

## پیش‌بینی مکانی غلظت فلئورید با استفاده از مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و زمین‌آمار

اصغر اصغری مقدم<sup>۱\*</sup>، عطاالله ندیری<sup>۲</sup> و الهام فیجانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۵ تاریخ پذیرش: ۸۸/۳/۱۰

۱ و ۲- به ترتیب استاد و دانشجویان دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبه [Moghaddam@tabrizu.ac.ir](mailto:Moghaddam@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

در چند دهه اخیر محققین به ناهنجاری‌های شیمیایی موجود در آب، خاک و هوا که سلامتی انسانها را تهدید می‌کنند، توجه خاصی داشته‌اند. از این میان غلظت بیش از حد استاندارد (1/5 میلی‌گرم بر لیتر) فلئورید در آب‌های شرب به دلیل تأثیر مستقیم روی فیزیولوژی بدن انسان، اهمیت بالایی دارد. در منابع آبی دشت‌های بازرگان و پلدشت غلظت فلئورید بیش از حد استاندارد جهانی (WHO) است. هدف این تحقیق تعیین تغییرات مکانی مقادیر فلئورید در این دشتها می‌باشد. بدین منظور از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان مدلی غیرخطی استفاده گردید. ساختارهای مختلفی از مدل مذکور ارزیابی و بهترین ساختار برای پیش‌بینی مکانی غلظت فلئورید در منطقه، ساختار FNN-BFG تشخیص داده شد. مدلسازی مکانی با این ساختار با استفاده از اندازه‌گیری غلظت یون فلئورید و یون‌های همبسته با آن و مختصات محل هر نمونه صورت گرفت، ضرایب تعیین برابر 0/9625 و 0/9019 به ترتیب برای مرحله آموزش و مرحله آزمایش به‌دست آمد. به منظور مقایسه نتایج حاصل از ساختار فوق‌الذکر با روش زمین‌آمار، دو شیوه کریجینگ و کوکریجینگ نیز بررسی شدند که به ترتیب ضریب تعیین معادل 0/7285 و 0/8556 برای مرحله آزمایش به‌دست آمد. از میان سه مدل بررسی شده دقیق‌ترین تخمین غلظت فلئورید از مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار انتخاب شده حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی مکانی، دشت‌های بازرگان و پلدشت، زمین‌آمار، شبکه‌های عصبی مصنوعی، فلئورید

## Spatial Prediction of Fluoride Concentration Using Artificial Neural Networks and Geostatic Models

A Asghari Moghaddam<sup>1\*</sup>, A A Nadiri<sup>2</sup> and E Fijani<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Professor and Ph.D Students, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

\*Corresponding author: E-mail: [Moghaddam@tabrizu.ac.ir](mailto:Moghaddam@tabrizu.ac.ir)

### Abstract

In the last decades, researchers had high consideration on the presence of chemical anomalies in water, soil and air which threat human health. Anomalies in fluoride concentration values exceeding standard limit ( $>1.5$  mg/l) in drinking water have high importance, because of direct influence on physiology of human body. Fluoride concentration values of water resources in Bazargan and poldasht plains exceed standard limit (WHO). The aim of this research is spatial prediction of fluoride concentration in these plains. For this purpose Artificial Neural Networks (ANNs) model was utilized as a nonlinear model. For spatial prediction of fluoride concentration in the study area, different structures of these models were tested and the best structure (FNN-BFG) was determined. Spatial modeling was carried out by this structure and using fluoride ion concentration, correlated ions values and position of each sample, for which the determination coefficients of training and test steps were equal to 0.9625 and 0.9019 respectively. Then, results of the model were compared to those of the geostatistical methods of kriging and cokriging and the determination coefficients for test steps were 0.7285 and 0.8556, respectively. The best results of the three developed models were related to ANNs models.

Keywords: Artificial neural networks, Bazargan and Poldasht plains, Fluoride, Geostatistics, Spatial prediction

### مقدمه

سلامتی انسان از اهمیت بالایی برخوردارند. از میان این آلودگی‌ها در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در سراسر جهان از جمله هند، چین، کره، مکزیک، استونی و ... بر روی مقادیر بالای فلوئورید انجام شده است که عموماً شامل تعیین منشأ و چگونگی کنترل این ناهنجاری طبیعی بودند (چوی و همکاران 2001، کاریلو-ریورا و همکاران 2002، کیم و جونگ 2005، جکس و همکاران 2005، همر 2006 و گوا و همکاران 2007). در ایران نیز اصغری مقدم و همکاران (1384) مقادیر بالای فلوئورید

در سال‌های اخیر، به علت مواجهه جهانی با کمبود منابع آبی، مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی به عنوان مهمترین منبع آب شیرین بسیاری از تحقیقات هیدرولوژیکی را به خود اختصاص داده است. آلودگی‌های این منابع علاوه بر منشأ فعالیت‌های انسانی می‌تواند منشأ طبیعی نیز داشته باشد. غلظت بیش از حد استاندارد عناصر کمیاب به عنوان آلودگی‌هایی با منشأ طبیعی و مصنوعی مانند نیترات، فلوئورید، آرسنیک و ... به علت تأثیر زیاد بر

روشهای کلاسیک برای پیش‌بینی مکانی پدیده‌های طبیعی است. در این مدل بررسی تغییرات مکانی پدیده‌ها به دو روش کلی کریجینگ<sup>2</sup> (پیش‌بینی تک پارامتری) و کوکریجینگ<sup>3</sup> (پیش‌بینی چند پارامتری) صورت می‌گیرد. این مدل از سال 1963 که برای اولین بار توسط ماترون ارائه شد و اساساً به مطالعاتی در زمینه مهندسی معدن محدود شده بود (گمبالاتی و والپی 1979)، اخیراً توسعه فراوانی جهت پیش‌بینی مسائل هیدرولوژیکی پیدا کرده است (ساتاگاپان و راجاگاپالان 1994؛ دسبارتس و همکاران 2002؛ شاجی و کیتارا 2006). با این وجود، نقایصی هم در به کارگیری این مدل از جمله خطی بودن و عدم امکان استفاده عملی از بیش از دو پارامتر به چشم می‌خورد. شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>4</sup> به عنوان مدلی تجربی و تخمینگر غیرخطی توانایی بالایی در پیش‌بینی زمانی پدیده‌های هیدرولوژیکی نشان داده است (اصغری مقدم و همکاران 1387b، لالا هم و همکاران 2005، دیاکوپولوس و همکاران 2005). این مدل اخیراً برای پیش‌بینی مکانی پدیده‌های هیدرولوژیکی (سطح آب‌های زیرزمینی) نیز به صورت ترکیبی با روش‌های آماری به کار گرفته شده است (ندیری 1386؛ نورانی و همکاران 2008 a, b). المصیری و کالوراجی (2005) توسط نوع خاصی از شبکه‌های عصبی با نام شبکه‌های عصبی مدولار<sup>5</sup> (MNN) و ترکیب آن با GIS توانستند توزیع زمانی غلظت نیترات را در آبخوانی آزاد واقع در شمال غرب واشنگتن پیش‌بینی نمایند. هدف این تحقیق پیش‌بینی مکانی غلظت یون فلئورید در دشتهای بازرگان و پلدشت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج حاصله با روش‌های کلاسیک کریجینگ و کوکریجینگ می‌باشد.

را در منطقه ماکو و پلدشت گزارش کردند. بر اساس مطالعات انجام گرفته عوامل زیادی از جمله سازندهای زمین‌شناسی، وضعیت تکتونیکی منطقه، قلیائیت و هدایت الکتریکی آب بر افزایش غلظت فلئورید تأثیر دارند. غلظت فلئورید عموماً همبستگی مستقیم با غلظت یون-های سدیم، پتاسیم، بی کربنات و همبستگی معکوس با غلظت یون کلسیم دارد (ساکسنا و احمد 2001). در منطقه مطالعاتی عموماً آب‌های زیرزمینی منابع آبی لازم برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی را تأمین می‌کند. مطالعات قبلی انجام یافته در منطقه بر روی مشخصات هیدروژئولوژیکی بازالت‌های منطقه ماکو جهت بهره‌برداری بهینه از آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و GIS (اصغری مقدم و همکاران 1384) و هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان‌های بازالتی دشت‌های بازرگان و پلدشت (فیجانی 1386) نشان از غلظت بیش از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای یون فلئورید (بالاتر از 1/5 میلی‌گرم برلیتر) در منابع آبی منطقه دارند. غلظت بالای یون فلئورید به دلیل ایجاد انواع بیماری‌های فلئورسیس (دندانی، ماهیچه‌ای و اسکلتی)، از جایگاه خاصی در مطالعات هیدروژئوشیمیایی برخوردار است. در منطقه مطالعاتی نیز تأثیر این یون بر سلامت اهالی منطقه مشهود است (اصغری مقدم و همکاران 1386). بنابراین بررسی توزیع مکانی و تخمین غلظت این یون در نقاط فاقد داده‌های هیدروژئوشیمیایی به منظور برداشت آب با کمترین غلظت فلئورید مهم به نظر می‌رسد. بر اساس مطالعات اخیر، دو نوع آبخوان اصلی بازالتی و غیر بازالتی در منطقه قابل تشخیص است (اصغری مقدم و همکاران، 1387a). به طور کلی غلظت فلئورید در منطقه منشاء بازالتی داشته و تحت تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی مختلف فلئورید در منابع آب منطقه آزاد می‌شود. توزیع آن از پیچیدگی خاصی برخوردار است (اصغری مقدم و فیجانی 2008). مدل زمین‌آمار<sup>1</sup> یکی از

<sup>2</sup>Kriging<sup>3</sup>Cokriging<sup>4</sup>Artificial Neural Networks<sup>5</sup>Modular Neural Networks<sup>1</sup>Geostatistics model

## مواد و روش‌ها

## منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب کشور و شمال استان آذربایجان غربی با مختصات (UTM)  $X=513055$  تا  $X=446625$  طول شرقی و  $Y=4344280$  تا  $Y=4402863$  عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه از غرب و شمال به کشور ترکیه، از شمال شرق به رود مرزی ارس و از جنوب شرق و جنوب تقریباً به مرز بازالته‌ها با سازندهای دیگر محدود می‌گردد. مساحت کل منطقه 2302 کیلومترمربع است که بیش از 650 کیلومترمربع آن توسط گدازه‌های بازالتی پوشیده شده است. کوه‌های بلند آبیگ (شمال شرق بازرگان و روستای دانالو) با ارتفاع بیش از 2000 متر در جهت شمال غربی - جنوب شرقی، هم امتداد با آراغات بزرگ و کوچک، منطقه را به نواحی شمالی شامل بورالان - شوطلو - پلدشت و

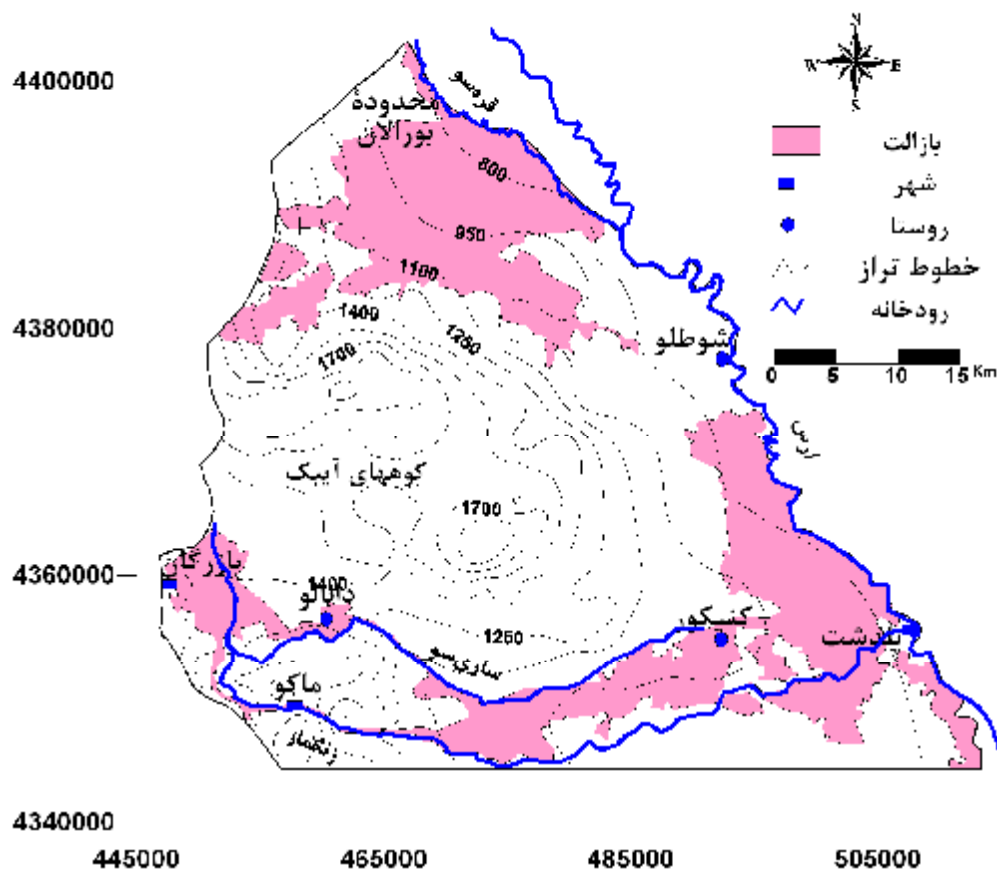
جنوبی شامل بازرگان - ماکو - پلدشت تقسیم کرده است. شهرهای ماکو، پلدشت و بازرگان از شهرهای مهم منطقه می‌باشند. سازندهای زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی شامل تشکیلات آهکی - شیلی متعلق به دونین - کربونifer و تریاس، آهک‌های متعلق به پرمین، تشکیلات قم و بازالت‌های کواترنری می‌باشد و به طور کلی می‌توان گفت دو تیپ از سازندهای زمین‌شناسی بازالتی و غیربازالتی در منطقه قابل شناسایی است که با هم در ارتباط هستند (اصغری مقدم و فیجانی 2009 و اصغری مقدم و فیجانی 1387). شایان ذکر است که سازندهای آبدار منطقه را بیشتر بازالت‌های کواترنری، آهک پرمین و سازند قم (رخساره آهکی آن) تشکیل می‌دهند. در جدول 1 طبقه‌بندی سازندهای آبدار منطقه بر حسب گسترش، آبدهی و تخلیه سالانه نشان داده شده است.

جدول 1 - خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازندهای موجود در منطقه مطالعاتی (بی‌نام ۱۳۷۲)

| نام سازند یا رخساره                   | گسترش<br>(km <sup>2</sup> ) | دبی<br>(L/S) | تخلیه سالانه<br>(Mm <sup>3</sup> /Year) | حجم تخلیه سالانه<br>بر سطح سازند<br>$(m^3/km^2) \times 10^3$ |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------|---|--|
| بازالتها                              | 734                         | 3543         | 111.7                                   | 152.2  |
| آهک قم                                | 802.5                       | 791.5        | 25                                      | 31.2   |
| آهک روته (پرمین)                      | 545                         | 237          | 7.5                                     | 13.8   |
| تشکیلات متعلق به ائوسن                | 342.5                       | 96           | 3                                       | 8.8  |
| آهک‌های متعلق به تریاس                | 106.5                       | 89           | 2.8                                     | 26   |
| آهک‌های متعلق به کرتاسه               | 47                          | 70           | 2.2                                     | 46   |
| تشکیلات متعلق به دونین -<br>کربونifer | 358                         | 56.5         | 1.8                                     | 5  |

جنوب شرق و رودخانه ساری سو در داخل منطقه مورد مطالعه از مهمترین رودخانه‌های این منطقه محسوب می‌شود.

شکل 1 موقعیت بازالته‌ها و نقشه توپوگرافی منطقه را نشان می‌دهد. رودخانه‌های قره‌سو و ارس در شمال و شمال شرق و رودخانه زنگمار در جنوب و



شکل ۱- نقشه توپوگرافی و موقعیت بازالت‌های منطقه

#### آنالیز داده‌ها

به منظور بررسی مقادیر فلئورید، نمونه‌برداری از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی منطقه در 7 مرحله در طی سالهای 1383 تا 1386 (شامل 133 نمونه) انجام یافت و نمونه‌ها در آزمایشگاه آبشناسی گروه زمین شناسی دانشگاه تبریز مورد تجزیه هیدروشیمیایی قرار گرفت. جدول 2 خصوصیات آماری داده‌های مورد

استفاده را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن متغیرهای همبسته با مقادیر فلئورید، ماتریس همبستگی بین داده‌ها در جدول 3 ارائه گردید. در این مطالعه از ماتریس همبستگی داده‌های هیدروشیمیایی به جای مرحله حساسیت سنجی که عموماً برای تعیین پارامترهای ورودی و مؤثر در مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت می‌گیرد، استفاده شده است.

جدول ۲- خصوصیات آماری داده‌های هیدروشیمیایی

| متغیر                         | حداقل  | حداکثر  | متوسط   | انحراف از معیار |
|-------------------------------|--------|---------|---------|-----------------|
| Ca <sup>++</sup>              | ۲۳/۶۱  | ۱۱۷/۰۹  | ۵۷/۰۹   | ۲۹/۲۶           |
| Mg <sup>++</sup>              | ۱۲/۵۰  | ۷۱/۹۳   | ۳۵/۱۹   | ۱۵/۰۷           |
| Cl <sup>-</sup>               | ۱۴/۱۸  | ۱۲۷۱/۲۸ | ۲۸۰/۱۹  | ۳۸۵/۲۷          |
| CO <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | ۰/۰۰   | ۲۴/۰۰   | ۴۳/۴۹   | ۵۷/۸۶           |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ۳۰۷/۴۴ | ۹۵۱/۶۰  | ۷۲۱/۷۷  | ۱۳۰/۶۶          |
| Na <sup>+</sup>               | ۱۲۹/۰۰ | ۳۳۳/۲۹  | ۲۱۲/۸۵  | ۵۹/۴۳           |
| K <sup>+</sup>                | ۶/۴۸   | ۱۸/۳۷   | ۱۲/۰۶   | ۲/۹۹            |
| SiO <sub>2</sub>              | ۲۰/۰۶  | ۱۲۴/۹۰  | ۶۱/۲۲   | ۲۰/۶۸           |
| SO <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | ۱۱/۵۲  | ۱۶۵/۱۲  | ۷۲/۵۶   | ۲۳/۵۰           |
| F <sup>-</sup>                | ۰/۲    | ۷/۹۱    | ۴/۶۶    | ۱/۲۰            |
| pH                            | ۶/۹۰   | ۸/۹۰    | ۷/۹۲    | ۰/۵۶            |
| EC (μS/cm)                    | ۷۵۰/۰۰ | ۱۵۸۵/۰۰ | ۱۲۱۹/۰۳ | ۳۰۵/۱۵          |

تمامی پدیا و ساینس بر حسب میلی گرم بر لیتر بیان شده‌اند.

جدول ۳- ماتریس ضرائب همبستگی (R) داده‌های هیدروشیمیایی

| پارامتر                       | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Cl <sup>-</sup> | F <sup>-</sup> | SiO <sub>2</sub> | pH   | EC   |
|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------|------|
| Ca <sup>++</sup>              | ۱/۰۰             |                  |                 |                |                               |                              |                              |                 |                |                  |      |      |
| Mg <sup>++</sup>              | ۰/۳۶             | ۱/۰۰             |                 |                |                               |                              |                              |                 |                |                  |      |      |
| Na <sup>+</sup>               | ۰/۷۲             | ۰/۳۶             | ۱/۰۰            |                |                               |                              |                              |                 |                |                  |      |      |
| K <sup>+</sup>                | ۰/۶۰             | ۰/۲۸             | ۰/۷۷            | ۱/۰۰           |                               |                              |                              |                 |                |                  |      |      |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | ۰/۸۵             | ۰/۲۴             | ۰/۸۵            | ۰/۵۶           | ۱/۰۰                          |                              |                              |                 |                |                  |      |      |
| CO <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | ۰/۷۷             | ۰/۲۶             | ۰/۷۶            | ۰/۶۹           | ۰/۷۵                          | ۱/۰۰                         |                              |                 |                |                  |      |      |
| SO <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | ۰/۳۶             | ۰/۲۹             | ۰/۵۷            | ۰/۲۹           | ۰/۳۹                          | ۰/۳۹                         | ۱/۰۰                         |                 |                |                  |      |      |
| Cl <sup>-</sup>               | ۰/۷۸             | ۰/۲۹             | ۰/۹۴            | ۰/۸۳           | ۰/۷۹                          | ۰/۷۳                         | ۰/۵۴                         | ۱/۰۰            |                |                  |      |      |
| F <sup>-</sup>                | ۰/۶۶             | ۰/۱۹             | ۰/۵۲            | ۰/۳۸           | ۰/۳۲                          | ۰/۱۲                         | ۰/۱۶                         | ۰/۰۷            | ۱/۰۰           |                  |      |      |
| SiO <sub>2</sub>              | ۰/۰۶             | ۰/۲۶             | ۰/۶۵            | ۰/۴۰           | ۰/۶۹                          | ۰/۱۰                         | ۰/۰۹                         | ۰/۱۰            | ۰/۲۰           | ۱/۰۰             |      |      |
| pH                            | ۰/۱۷             | ۰/۰۰             | ۰/۱۴            | ۰/۲۱           | ۰/۱۸                          | ۰/۱۶                         | ۰/۱۷                         | ۰/۰۰            | ۰/۰۲           | ۰/۰۰             | ۱/۰۰ |      |
| EC                            | ۰/۱۴             | ۰/۴۴             | ۰/۳۶            | ۰/۱۲           | ۰/۱۵                          | ۰/۲۰                         | ۰/۲۵                         | ۰/۱۵            | ۰/۰۵           | ۰/۱۲             | ۰/۰۵ | ۱/۰۰ |

### تخمین غلظت فلئورید

مرحله بسته به نوع تحقیق می‌تواند به روش‌های مختلفی صورت گیرد. در این تحقیق، از نتایج آنالیز داده‌ها (ماتریس همبستگی) به عنوان روشی جدید برای انجام این مرحله استفاده شد. به این معنی که متغیرهای همبسته با یون فلئورید و موقعیت مکانی هر نمونه به عنوان داده‌های ورودی مدل در نظر گرفته شد و خروجی مدل، غلظت فلئورید بود.

برای تعیین نوع شبکه و الگوریتم آموزشی و تابع انتقال از روش آزمون خطا استفاده شد. بدین منظور دو شبکه

در این تحقیق از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مکانی غلظت یون فلئورید در محدوده مطالعاتی استفاده شد. لازم به ذکر است که ابتدا هدف پیش‌بینی زمانی و مکانی غلظت فلئورید بود که به علت فقدان داده‌های با بازه زمانی مناسب برای پیش‌بینی زمانی تنها به پیش‌بینی مکانی اکتفا می‌گردد. اولین مرحله در مدلسازی تعیین داده‌های ورودی و خروجی مدل بود که مرحله آنالیز حساسیت نامیده می‌شود. این

واسطه کمبود داده در دسترس توسعه یافت. در این روش به کمک متغیرهای ثانویه (که در این تحقیق می‌تواند یونهای همبسته با فلئور باشد) و با استفاده از همبستگی متقابل بین متغیرهای اصلی و ثانویه، می‌توان تخمین دقیقی بدست آورد. کلیات و مفاهیم تئوریک مدل زمین‌آمار توسط منابع مختلفی ارائه شده است (ایساک و اسریواستاوا، 1989؛ بی‌نام، 1990). با توجه به وجود پارامترهای همبسته با مقادیر یون فلئورید از روش کوکریجینگ بلوکی نیز برای مقایسه با روشهای دیگر استفاده گردید.

### نتایج و بحث

#### مدلسازی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی

در این تحقیق برای پیش‌بینی مکانی غلظت فلئورید در دشت‌های بازرگان و پلدشت شش ساختار مختلف از شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت تا بهترین و کاراترین شبکه برای این مطالعه تعیین گردد. بر اساس جدول 3 همبسته‌ترین پارامترها با مقادیر یون فلئورید به ترتیب همبستگی عبارتند از یون‌های پتاسیم، سدیم، بی‌کربنات و برخی از پارامترها مانند یون کلسیم نیز همبستگی معکوس با مقدار یون فلئورید نشان می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت یون فلورید در آب‌های زیرزمینی منطقه با افزایش غلظت یونهای پتاسیم، سدیم، بی‌کربنات و کاهش غلظت یون کلسیم صورت می‌گیرد. روند مذکور توسط بیشتر مطالعات انجام شده بر روی غلظت بالای یون فلئورید در سراسر جهان تأیید می‌شود (ساکسنا و احمد، 2001). بنابراین هر شش ساختار دارای هفت گره ورودی شامل متغیرهای همبسته با غلظت فلئورید (یون‌های پتاسیم، سدیم، بی‌کربنات و کلسیم) و موقعیت مکانی از نمونه‌ها (بر حسب UTM) می‌باشد. غلظت فلئورید نیز تنها خروجی این شبکه‌ها را تشکیل داده و بر اساس روش آزمون و خطا هشت گره میانی برای هر شش ساختار تعیین شد. بدین ترتیب فرم کلی شش ساختار مورد

پیش‌رو<sup>1</sup> و برگشتی<sup>2</sup> با الگوریتم‌های BFG<sup>3</sup>، BR<sup>4</sup> و LM<sup>5</sup> که از کاراترین شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشند (ندیری، 1386)، مورد بررسی قرار گرفتند (شکل 2). با توجه به ماهیت داده‌های ورودی مدل، تابع سیگموئید تانژانتی هیپربولیک از بین توابع دیگر، بهترین تابع برای مدلسازی این سیستم غیرخطی تشخیص داده شد و به عنوان تابع انتقال نورونهای پردازشگر لایه مخفی به کار رفتند. به علت اینکه برای انتخاب تعداد نورونهای مخفی این شبکه‌ها، روش مستقیم و دقیقی وجود ندارد، بنابراین روش آزمون و خطا به صورت بسیار گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (بی‌نام، 2000). در این تحقیق نیز از روش مذکور استفاده گردید. توضیحات کلی و مفاهیم تئوریک مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی توسط انجمن مهندسين عمران آمریکا (بی‌نام، 2000) ارائه شده است.

مدل بعدی استفاده شده در این تحقیق مدل زمین‌آمار می‌باشد. در این مطالعه با توجه به اینکه داده‌های هیدروژئوشیمیایی عموماً نشانگر غلظت متغیر در یک محدوده هستند، بنابراین برای مدلسازی از روشهای کریجینگ و کوکریجینگ بلوکی استفاده شد. تخمینگر کریجینگ ساده‌ترین تخمینگر نا اریب است که از ترکیب خطی تبعیت می‌کند. لذا با در نظر گرفتن دو شرط عاری بودن از خطای سیستماتیک و حداقل بودن واریانس تخمین قابل بررسی است. روابط مربوطه با روش حل آنها توسط ایساک و اسریواستاوا (1989) ارائه شده است. همانطور که در آمار کلاسیک روشهای چند متغیره برای تخمین وجود دارد، در زمین‌آمار نیز می‌توان به روش کوکریجینگ بر اساس همبستگی بین متغیرهای مختلف تخمین زد. این خصوصیت می‌تواند باعث دقت بیشتر تخمین‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌ها (با نمونه‌برداری کمتر) شود. استفاده از کوکریجینگ به

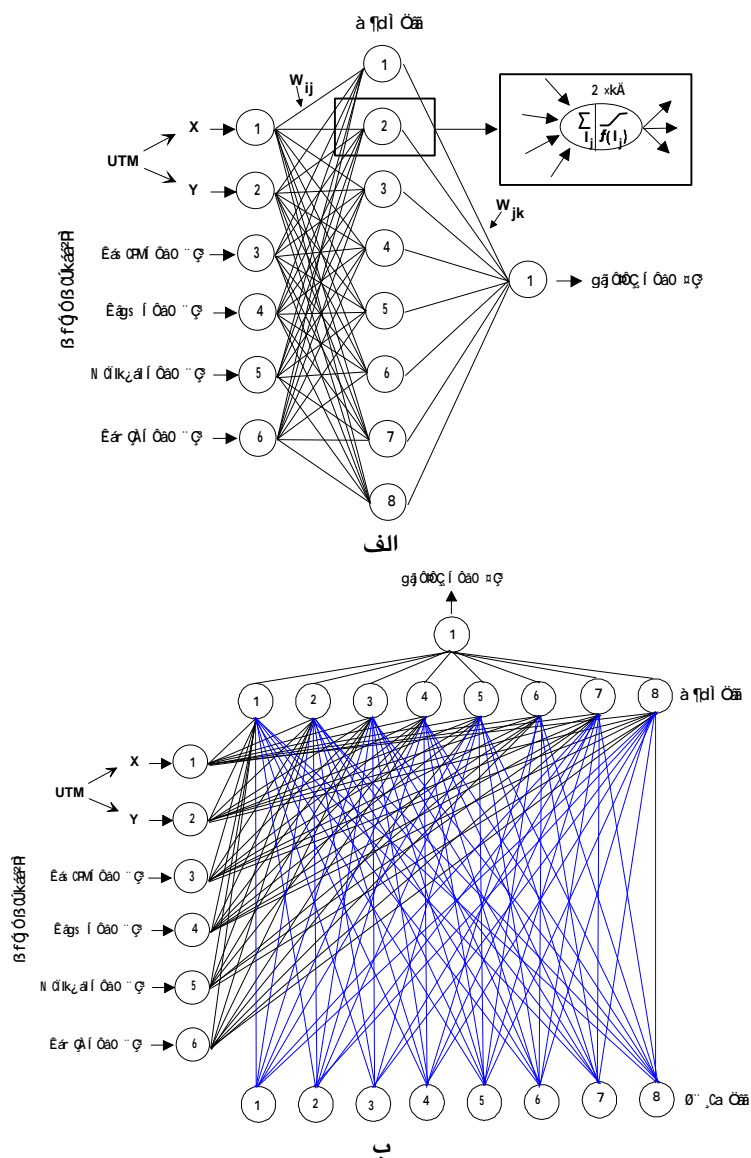
<sup>1</sup>Feedforward Neural Networks

<sup>2</sup>Back Forward Neural Networks

<sup>3</sup>BFGS Quasi-Newton

<sup>4</sup>Bayesian Regularization

<sup>5</sup>Levenberg-Marquardt



شکل ۲- شکل شماتیک دوشبکه استفاده شده در مدلسازی، الف) شبکه پیشرو، ب) شبکه برگشتی

سه مرحله آموزش، صحت‌سنجی و آزمایش تشکیل می‌شود تنها دو مرحله آموزش و آزمایش صورت گرفت زیرا در مدلسازی مکانی نیازی به مرحله صحت‌سنجی نمی‌باشد. نتایج بدست آمده از این مدلها در جدول 4 ارائه شده است. بر اساس این نتایج ساختار FNN-LM در مرحله آموزش و ساختار FNN-BFG در مرحله آزمایش بهترین نتایج را دادند. به علت اینکه هر دو ساختار شبکه پیشرو را دارند، بنابراین تفاوت در نتایج این دو ساختار مربوط به عملکرد الگوریتم‌های آنها

(بررسی FNN-LM, RNN-LM, FNN-BR, RNN-BR, FNN-BFG, RNN-BFG) به صورت (1-8-6) بود (شکل 2). برای اجرای مدل داده‌های خروجی و ورودی توسط رابطه 1 نرمالیزه شده و مورد استفاده قرار گرفتند.

$$Y_{Normalised} = \frac{Y - \bar{Y}}{d} \quad [1]$$

در رابطه فوق  $Y$  خروجی‌ها یا ورودی‌ها،  $\bar{Y}$  و  $\delta$  به ترتیب میانگین و انحراف از معیار آنها می‌باشند. در این مدلسازی مکانی بر خلاف پیش‌بینی زمانی که عموماً از

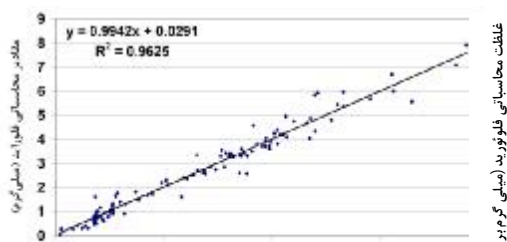


است که مدل فوق برای کل محدوده مطالعاتی که از دو تیپ سازندهای بازالتی و غیربازالتی تشکیل شده‌اند، ارائه شده است. نتایج مدل ارائه شده نشان از توانایی مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین ارتباط غیرخطی بین دو آبخوان موجود در منطقه دارد.

می‌باشد و چون عموماً در هر مدلسازی هدف اصلی پیش‌بینی می‌باشد و نیز نتایج مرحله آموزش این دو الگوریتم تقریباً نزدیک بهم است، لذا ساختار FNN-BFG بهترین ساختار برای اهداف این تحقیق خواهد بود. نتایج نموداری این مدل در شکل 3 ارائه شده است. شایان ذکر

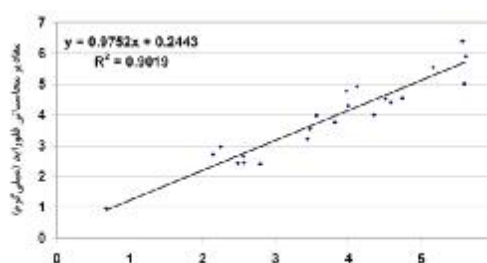
جدول ۴- مقایسه نتایج ساختارهای مختلف برای مراحل آموزش و آزمایش

| ساختار                     | RNN-LM | FNN-LM | RNN-BR | FNN-BR | FNN-BFG | RNN-BFG |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| معیار ارزیابی ( $R^2$ )    | آموزش  | ۰/۹۸۱۶ | ۰/۹۰۷۹ | ۰/۸۳۰۴ | ۰/۸۸۶۶  | ۰/۹۳۳۴  |
|                            | آزمایش | ۰/۸۲۸۳ | ۰/۷۸۳۳ | ۰/۶۸۵۴ | ۰/۶۸۵۳  | ۰/۸۱۲۶  |
| معیار ارزیابی (RMSE(mg/l)) | آموزش  | ۰/۱۳   | ۱/۰۲   | ۱/۱۴   | ۱/۳۱    | ۰/۶۵    |
|                            | آزمایش | ۱/۳۳   | ۲/۴۶   | ۲/۸۶   | ۲/۹۷    | ۱/۵۳    |



غلظت مشاهده‌ای فلئورید (میلی گرم بر لیتر)

ب



غلظت مشاهده‌ای فلئورید (میلی گرم بر لیتر)

الف

شکل ۳- مقایسه غلظت تخمینی فلئورید از مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار بکار رفته و غلظت اندازه‌گیری شده (الف) مرحله آموزش، (ب) مرحله آموزش

می‌شود) می‌باشد. بنابراین برای رسم آن ابتدا نیاز به تعیین نوع توزیع داده‌ها داریم. از آزمون کولموگروف و اسمیرنوف<sup>۱</sup> برای بررسی آماره‌های (مثل متوسط، واریانس، چولگی و ...) داده‌ها استفاده شد. این آزمون نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال و لاگ نرمال تبعیت نمی‌کنند. بنابراین از تبدیل ریشه مربع<sup>۲</sup> برای حذف روند از داده‌ها استفاده شد. در این قسمت نیز تعدادی از داده‌ها برای مرحله آموزش مدل کنار گذاشته شد. قبل از

مدلسازی تخمین غلظت توسط زمین آمار

غلظت فلئورید در آب‌های زیرزمینی عموماً متأثر از عواملی همچون ترکیب شیمیایی آب و کانی، وجود و قابل دسترس بودن کانی‌های فلئوریددار و مدت زمان تماس بین آب و کانی می‌باشد. در این تحقیق برای مقایسه نتایج حاصل از مدل ارائه شده با روش زمین آمار از دو شیوه کریجینگ و کوکریجینگ بلوکی استفاده گردید. بدین منظور ابتدا مدل کریجینگ بلوکی به کار گرفته شد. در هر مدل زمین‌آمار اولین مرحله رسم سیمپوار یوگرام (که عموماً واریوگرام نیز نامیده

<sup>1</sup>Kolmogorov-Smirnov

<sup>2</sup>Root square transformation

با وجود اینکه به خوبی مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی نیست ولی در حد قابل قبولی می‌باشد. شکل دوبعدی نتایج کلی مدل کریجینگ بلوکی در شکل 7 ارائه شده است.

با توجه به اینکه غلظت فلئورید همبستگی نسبتاً بالایی با غلظت برخی از یون‌ها نشان داده است (جدول 3). لذا از مدل کوکریجینگ نیز برای پیش‌بینی مکانی فلئورید استفاده شد. این مدل با وجود اینکه از نظر تئوریک توانایی تحلیل چندین متغیر را همزمان دارد ولی در عمل تنها برای دو متغیر می‌تواند جواب مناسبی بدست دهد (ایساک و اسریواستوا 1989). در این تحقیق نیز علاوه بر مقادیر یون فلئورید به عنوان متغیر اصلی، از یون پتاسیم (همبسته‌ترین یون با مقادیر یون فلئورید) به عنوان متغیر ثانوی استفاده شد.

برای انجام این مدل‌سازی با توجه به بررسی اولیه داده‌ها از نظر حذف روند و ناهمسانگردی، از نتایج بدست آمده از مرحله مدل‌سازی کریجینگ بلوکی استفاده شد و تنها به بررسی ناهمسانگردی واریوگرام مقادیر پتاسیم و واریوگرام متقابل اکتفا گردید. در مدل کوکریجینگ چون از دو متغیر استفاده می‌شود، بنابراین در صورتی که دو متغیر دارای واحد یکسانی نباشند باید هم‌واحد شوند. در این مطالعه به علت هم واحد بودن متغیرها نیازی به یکسان‌سازی واحدها نبود. همانطور که در شکل 8 نشان داده شده هر دو واریوگرام مذکور حالت ایزوتروپ دارند. شایان ذکر است که این بررسی بعد از حذف روند داده‌ها صورت می‌گیرد

در این مرحله نیز با توجه به دلایل ذکر شده در مراحل قبل از روش کوکریجینگ بلوکی استفاده شد. در این مدل نیز همانند مدل کریجینگ بلوکی مقادیر به صورت بلوک‌هایی به ابعاد 8×8 مترمربع در نظر گرفته شد. در این روش علاوه بر واریوگرام رسم شده برای هر متغیر بایستی واریوگرام متقابل نیز از روی واریوگرام‌های دو متغیر رسم شود. از روی این واریوگرام پیش‌بینی مکانی صورت گیرد.

رسم واریوگرام، همسانگرد<sup>1</sup> و ناهمسانگرد<sup>2</sup> بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل 4 داده‌های مورد استفاده همسانگرد بوده و ناهمسانگردی محسوس نشان نمی‌دهند. بنابراین واریوگرام داده‌ها برای حالت همسانگرد رسم شد (شکل 5) و سپس مدل‌های تجربی مختلف (کروی، نمائی، خطی و گوسین) بر آن برازش داده شدند تا بهترین مدل برای انجام مدل‌سازی نهایی بدست آید. نتایج حاصل از برازش در جدول 5 نشان داده شده است.

با دقت در منحنی واریوگرام مشاهده می‌شود که این منحنی روندی در جهت مجانب شدن به مقدار ثابتی که سقف<sup>3</sup> نامیده می‌شود، دارد. این امر به طور ریاضی نشانگر وجود یک روند ارتباطی بین متغیرهای مکانی می‌باشد (حسنی پاک 1377). در مرحله بعد واریوگرام اولیه حاصله با مدل‌های تجربی برازش داده شد تا بهترین مدل برای انجام مدل‌سازی نهایی به دست آید، که نتایج آنها در جدول 5 نشان داده شده است.

بر اساس جدول 5، با توجه به پارامترهای حاصل از هر برازش، بهترین برازش مربوط به مدل کروی<sup>4</sup> می‌باشد. معادله کلی واریوگرام مدل کروی بصورت رابطه 2 بیان می‌شود.

$$\begin{cases} g(h) = C\left(\frac{h}{a} - 0.5\frac{h^3}{a^3}\right) & h < a \\ g(h) = C(h) & h > a \end{cases} \quad [2]$$

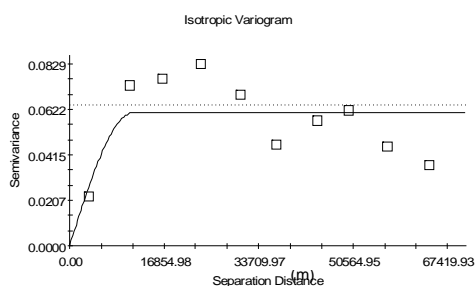
در این رابطه  $g(h)$  واریوگرام،  $h$  فاصله،  $a$  دامنه تأثیر و  $C$  سقف واریوگرام می‌باشد. مدل کریجینگ با بلوک‌های 8×8 متر مربع اجرا شد و مدل نهایی به دست آمد. بدین ترتیب می‌توان با مدل کریجینگ بلوکی مقادیر فلئورید را در کل منطقه تخمین زد. نتایج مدل برای غلظت فلئورید در مکان‌های استفاده شده و استفاده نشده در مدل در شکل 6 نشان داده شده است. غلظت‌های تخمینی

<sup>1</sup>Isotrope

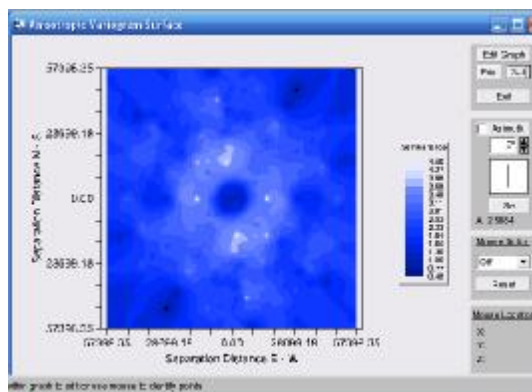
<sup>2</sup>Anisotrope

<sup>3</sup>Sill

<sup>4</sup>Spherical



شکل ۵- واریوگرام تجربی همسانگرد



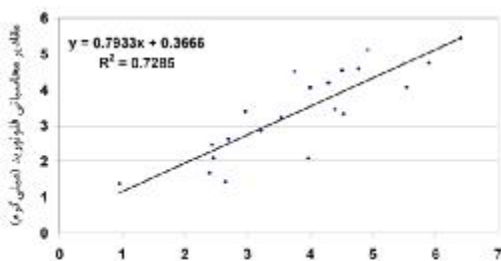
شکل ۴- بررسی شکل دو بعدی ناهمسانگردی

جدول ۵- نتایج برازش مدل‌های تجربی بر واریوگرام

| مدل   | اثر قطعه‌ای (C.) | سقف (C.+C) | C/(C.+C) | RSS*  |
|-------|------------------|------------|----------|-------|
| کروی  | ۰/۰۰۱            | ۰/۶۷۸      | ۰/۹۹۹    | ۰/۱۸۵ |
| نمایی | ۰/۵۶۶            | ۰/۱۱۳      | ۰/۵      | ۰/۶۲۸ |
| خطی   | ۰/۶۳۵۹۵          | ۰/۶۳۵۹۵    | ۰/۰۰     | ۰/۵۶۵ |
| گوسین | ۰/۶۱۶            | ۱/۲۳۳      | ۰/۰۹۱    | ۰/۵۹۴ |

\* Residual Sum of Squares

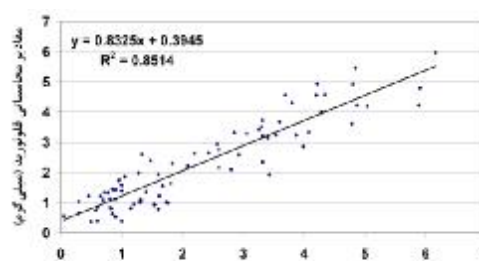
غلظت محاسباتی فلئورید (میلی گرم بر



غلظت مشاهداتی فلئورید (میلی گرم بر لیتر)

ب

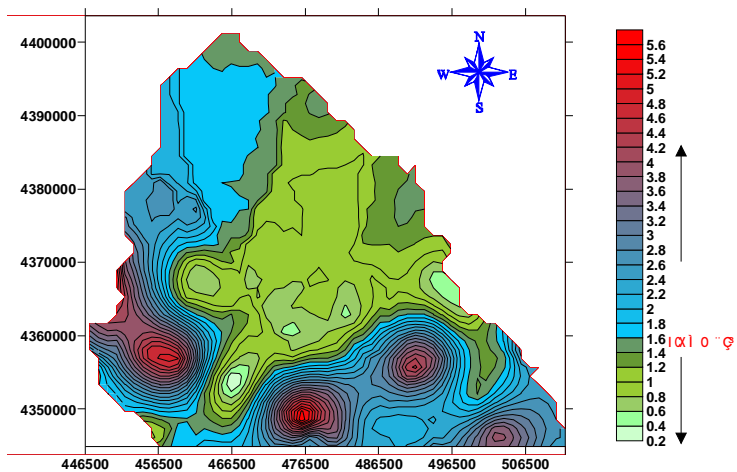
غلظت محاسباتی فلئورید (میلی گرم بر



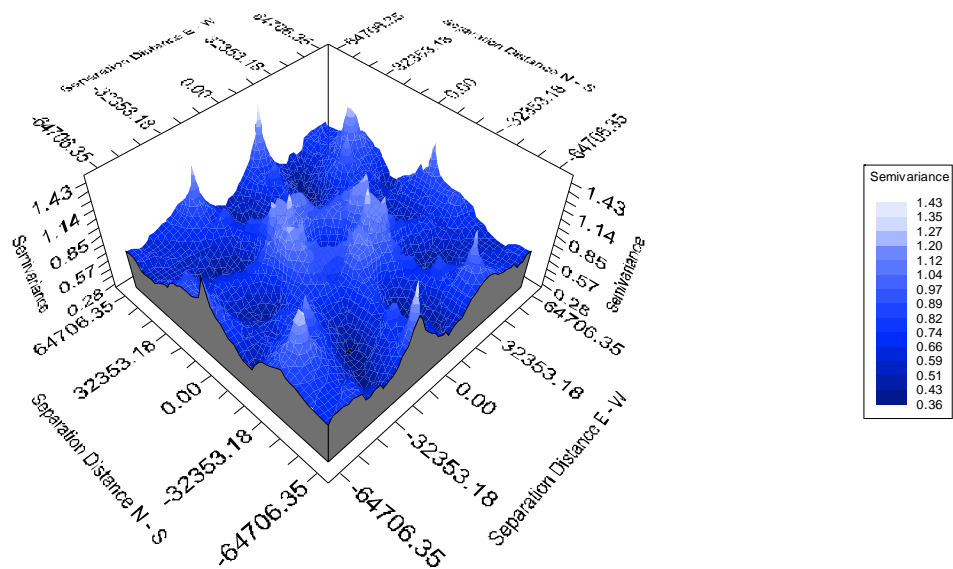
غلظت مشاهداتی فلئورید (میلی گرم بر لیتر)

الف

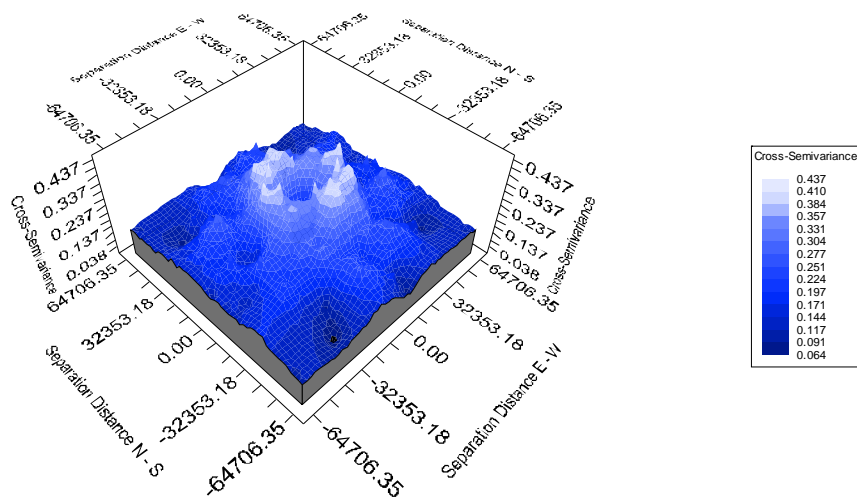
شکل ۶- نتایج مدل کریجینگ بلوکی، الف) مرحله آموزش، ب) مرحله آزمایش



شکل ۷- شکل دوبعدی نتایج کلی مدل کریجینگ بلوکی



الف



ب

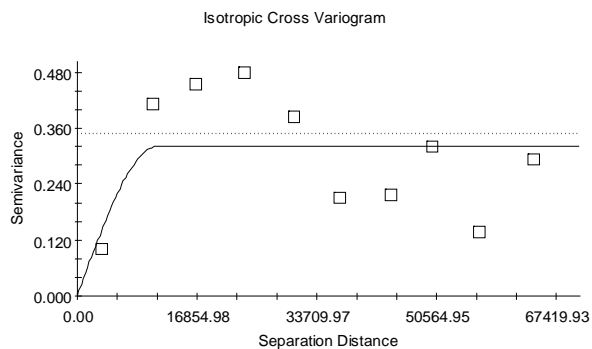
شکل ۸- شکل سه بعدی ناهمسانگردی واریوگرام‌های روش کوکریجینگ، الف) واریوگرام متقابل ب) واریوگرام یون پتاسیم

شبکه‌های عصبی مصنوعی مناسب‌تر از هر دو مدل مذکور بوده است. نتایج دو بعدی مدل کوکریجینگ نیز در شکل ۱۱ ارائه شده است. توسط این پیش‌بینی مکانی، چگونگی ورود مقادیر فلئورید از مرز ترکیه و توزیع کلی این ناهنجاری را نیز بررسی نمود. بین دو منطقه با ناهنجاری بالای فلئورید، مقادیر پائینی از این یون مشخص است که احتمالاً حاصل ورود آب از آبخوان غیر بازالتی به داخل آبخوان بازالتی و اختلاط این دو منبع آبی است. مقایسه کلی نتایج مدل‌های استفاده شده در این تحقیق در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به همانطور که از این شکل مشخص است حتی می‌توان ارتباط پیچیده آبخوان‌های بازالتی و غیربازالتی، به طوری که حتی در برخی مناطق آبهای برداشت شده از مناطق بازالتی تیپ آب‌های آهکی را نشان می‌دهند و بالعکس (فیجانی ۱۳۸۶)، و وجود تخلخل دوگانه (به علت وجود سازند سخت) در این منطقه و خصوصیات کلی حرکت آبهای زیرزمینی در محیط متخلخل می‌توان این سیستم را ذاتاً یک سیستم غیرخطی دانست. بنابراین مدل‌های غیرخطی می‌توانند نتایج بهتری برای این منطقه ارائه دهند.

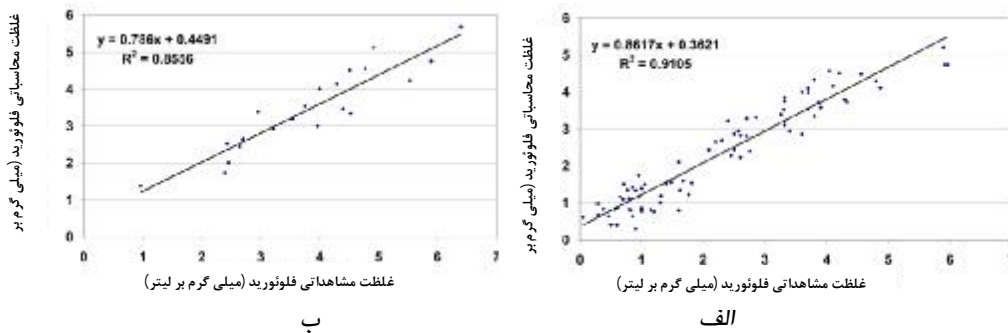
برای رسم واریوگرام متقابل در عمل از روش مایرز (۱۹۹۱) استفاده شد مطابق این روش ابتدا توسط هر زوج از متغیرها، متغیر جدیدی که حاصل جمع آن دو متغیر است، تشکیل شده و سپس واریوگرام این متغیر جدید رسم می‌شود و از روی واریوگرام‌های حاصله می‌توان واریوگرام متقابل را رسم نمود (حسنی پاک ۱۳۷۷). در برازش مدل‌های تجربی بر واریوگرام متقابل بایستی توجه شود که تابع کواریانس متقابل در نامساوی کوشی-شوارتز<sup>۱</sup> صدق کند (پن و همکاران ۱۹۹۳). بر اساس شکل ۹، نتایج برازش مدل‌های تجربی مختلف بر واریوگرام متقابل بهترین مدل را مدل کروی معرفی کرد.

پس از رسم واریوگرام متقابل با استفاده از روش کوکریجینگ بلوکی (با بلوک‌های  $8 \times 8$ ) می‌توان پیش‌بینی مکانی از مقادیر فلئورید را در منطقه ارائه داد. نتایج حاصل از این روش برای مکان‌های استفاده شده و استفاده نشده در مدل در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق شکل، مدل کوکریجینگ نتایج بهتری نسبت به مدل کریجینگ ارائه داد. با این وجود، نتایج حاصل از مدل

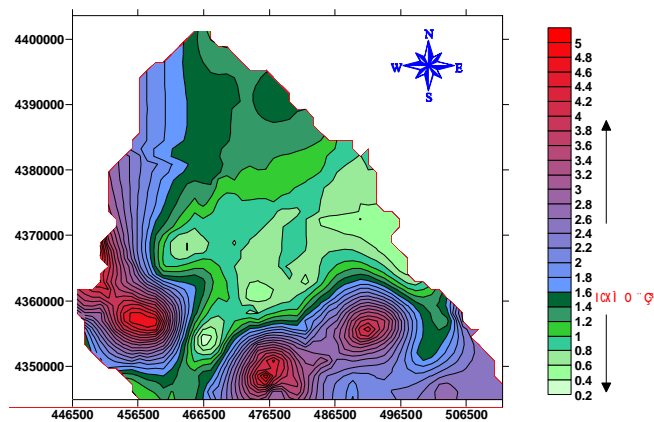
<sup>۱</sup>Cauchy-Schwartz



شکل ۹- واریوگرام متقابل برازش داده شده



شکل ۱۰- نتایج مدل کوکریجینگ بلوکی، الف) مرحله آموزش، ب) مرحله آزمایش



شکل ۱۱- شکل دوبعدی نتایج کلی مدل کوکریجینگ بلوکی

جدول ۶- مقایسه نتایج مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و زمین‌آمار بر اساس ضریب تعیین ( $R^2$ )

| نتایج       |              | ساختار          | مدل       |
|-------------|--------------|-----------------|-----------|
| مرحله آموزش | مرحله آزمایش |                 |           |
| -۰/۹۸۱۶     | -۰/۸۳۸۳      | FNN-LM          | زمین‌آمار |
| -۰/۹۰۷۹     | -۰/۷۸۳۳      | RNN-LM          |           |
| -۰/۸۳۰۴     | ۰/۶۸۵۴       | FNN-BR          |           |
| -۰/۸۸۶۶     | ۰/۶۸۵۳       | RNN-BR          |           |
| -۰/۹۴۲۵     | -۰/۹۰۱۹      | FNN-BFG         |           |
| -۰/۹۲۳۴     | ۰/۸۱۲۶       | RNN-BFG         |           |
| -۰/۸۵۱۴     | -۰/۷۲۸۵      | کریجینگ بلوکی   | زمین‌آمار |
| -۰/۹۱۰۵     | ۰/۸۵۵۶       | کوکریجینگ بلوکی |           |

مدل خطی زمین‌آمار می‌توان حالت غیرخطی از این مدل را که عموماً با تغییراتی همچون ترکیب با مدل‌های دیگر صورت می‌گیرد، استفاده کرد. در کل برای پیش‌بینی دقیق‌تر غلظت یون فلئورید در منطقه توصیه می‌شود که با افزایش تعداد داده‌ها از هر یک از آبخوانها، مدلسازی جداگانه‌ای برای آنها انجام گیرد.

#### سپاسگزاری

داده‌های این تحقیق از دو طرح پژوهشی دانشگاهی و یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز حاصل شده است. بدینوسیله مؤلفین مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه کمال تشکر را دارند.

#### نتیجه‌گیری

براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق مدل غیرخطی شبکه‌های عصبی مصنوعی با ساختار (FNN-BFG) برای پیش‌بینی مکانی غلظت یون فلئورید در منطقه مطالعاتی نتایج بهتری نسبت به مدل زمین‌آمار که ذاتاً یک مدل خطی است، نشان داد. دلیل این نتایج را می‌توان در خصوصیات ذاتی این مدل‌ها بررسی نمود. با توجه به غیرخطی بودن ارتباط آبخوان بازالتی و غیربازالتی، بنابراین مدل‌های غیرخطی می‌توانند نتایج بهتری برای این مدل ارائه دهند. بهترین مدل زمین‌آمار کوکریجینگ بلوکی است که احتمالاً به دلیل چند متغیره بودن نتایج بهتری ارائه داده است و حتی مدل مذکور از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (به غیر از FNN-BFG) دقت بالاتری دارد. برای بدست آوردن نتایج بهتری از

#### منابع مورد استفاده

اصغری مقدم الف، جمیری ر و محمدی ع، 1384. مطالعه مشخصات هیدروژئولوژیکی بازالت‌های منطقه ماکو جهت بهره‌برداری بهینه از آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و GIS، طرح تحقیقاتی. دانشگاه تبریز، گروه زمین‌شناسی.

اصغری مقدم الف، جمیری ر و محمدی ع، 1386. منشاء غلظت بالای فلوئورید در آب‌های زیرزمینی گدازه‌های بازالتی دشت‌های بازرگان-پلدشت و تأثیر نامطلوب آن بر سلامتی اهالی منطقه، مجله محیط شناسی، شماره 41، ص. 32-25.

اصغری مقدم الف، فیجانی الف، 1387. مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروشیمیایی آبخوان‌های بازالتی و کارستی منطقه ماکو در ارتباط با سازندهای زمین شناسی منطقه، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، سال هفدهم، شماره 67، ص. 2-13.

اصغری مقدم الف، فیجانی، الف و ندیری ع، 1387a. تأثیر بازالت‌های منطقه ماکو در غلظت فلوئورید منابع آب زیرزمینی طرح تحقیقاتی. دانشگاه تبریز، گروه زمین‌شناسی.

اصغری مقدم الف، نورانی و و ندیری ع، 1387b. مدل‌سازی بارش دشت تبریز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله دانش کشاورزی، جلد 18، شماره 1، ص. 1-15.

بی‌نام، امور مطالعات منابع آب سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی 1372. گزارش شناسایی منابع آب کارست و سازند سخت حوضه آبریز ارس، وزارت نیرو، 161 ص.

حسنی‌پاک ع الف، 1377. زمین‌آمار. انتشارات تهران. 314 ص.

فیجانی الف، 1386. بررسی هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان‌های بازالتی - آبرفتی دشت‌های بازرگان و پلدشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز. 141 ص.

ندیری ع، 1386. پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی توسط مدل ANNs در محدوده متروی شهر تبریز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز. 178 ص.

Almasri MN and Kaluarachchi JJ, 2005. Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data. *Environmental Modeling & Software* 20: 851-871.

ASCE American Society of Civil Engineering Task Committee on geostatistical techniques in geohydrology, 1990. Review of geostatistics in geohydrology. 1:Basic concepts; 2:applications. *ASCE J Hydraulic Engin* 116(5): 612-658.

ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000. Artificial neural network in hydrology, part I and II. *J Hydraulic Engin* 5(2): 115-137.

Asghari Moghaddam A and Fijani E, 2008. Distribution of fluoride in groundwater of Maku area, northwest of Iran. *Environmental Geology* 56(2): 281-287.

Asghari Moghaddam A and Fijani E, 2009. Hydrogeologic framework of the Maku area basalts, north western Iran. *Hydrogeology Journal* 17: 949-959.

Carrilla- Rivera JJ, Cardona A and Edmunds WM, 2002. Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi Basin, Mexico. *J Hydrology* 261: 24-47.



- Choi S, Yun Z, Hong S and Ahn K, 2001. The effect of co-existing ions and surface characteristics of nanomemberences. *Desalination* 133: 53-64.
- Daliakopoulos NI, Coulibaly P and Tsanis IK, 2005. Ground water level forecasting using artificial neural networks. *J Hydrol* 309: 229-240.
- Desbarats AJ, Logan CE, Hiton MJ and Sharpe DR, 2002. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. *J Hydrol* 255: 25-38.
- Gambolati G and Volpi G, 1979. A conceptual deterministic analysis of the kriging technique in hydrology. *Water Resour Res* 15(3): 625-629.
- Guo Q, Wang Y, Ma T and Ma R, 2007. Geochemical processes controlling the elevated fluoride concentration in groundwaters of the Taiyuan Basin, Northern China. *J of Geochemical Exploration* 93: 1-12.
- Hammer K, 2006. Hydrochemistry and sources of fluoride in Silurian-Ordovician aquifer system, Estonia. M.S. thesis, University of Tartu, Institute of Geology 50 pp.
- Isaaks EH and Srivastava RM, 1989. *Applied Geostatistics*, Oxford University Press.
- Jacks G, Bhattacharya P, Chaudhary V and Singh KP, 2005. Controls on the genesis of high-fluoride groundwaters in India. *Applied Geochemistry* 20: 221-228.
- Kim K and Jeong YG, 2005. Factors influencing natural occurrence of fluoride-rich ground waters: a case study in the southeastern part of the Korean Peninsula. *Chemosphere* 58: 1399-1408.
- Lallahem S, Mania J, Hani A and Najjar Y, 2005. On the use of neural networks to evaluate ground water levels in fractured media. *J Hydrol* 307: 92-111.
- Myers DE, 1991. Pseudocross-variograms, Positive definiteness and cokriging. *Mathematical Geology* 23: 805-816.
- Nourani V, Asghari Moghaddam A and Nadiri AA, 2008a. An ANN-based model for spatiotemporal groundwater level forecasting. *Hydrological Processes* 22 (26): 5054-5066.
- Nourani V, Asghari Moghaddam A and Nadiri AA, 2008b. Forecasting spatiotemporal water levels of Tabriz aquifer. *Trends in Applied Sciences Research* 3: 319-329.
- Pan GC, Gaard D, Moss K and Heiner T, 1993. A Comparison between cokriging and ordinary kriging, case study with a polymetallic deposit. *Mathematical Geology* 25: 337-398.
- Satagopan J and Rajagopalan B, 1994. Comparing spatial estimation techniques for precipitation analysis. *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*, 3: 317-330. Kluwer Academic Publishers.
- Saxena VK and Ahmed S, 2001. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. *Environmental Geology* 40: 1084-1087.
- Shaji T and Kitaura H, 2006. Statistical and geostatistical analysis of rainfall in central Japan. *Computers Geosciences* 32: 1007-1024.