

## بررسی ارتباط تغییرات زمانی غلظت گاز رادون با پس لرزه‌های زمین لرزه بم به کمک شبکه عصبی آدالاین

فروغ کشوری<sup>۱\*</sup>، نوربخش میرزائی<sup>۱</sup> و علی نگارستانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۳۰)

### چکیده

غلظت گاز رادون پس از زمین لرزه بم ( $M_s = 6/8$ ، ۱۳۸۲/۱۰/۵)، در ایستگاهی واقع در غرب بروات در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای ثبت شد. برای بررسی ارتباط زمانی بین تغییرات میزان غلظت گاز رادون و وقوع پس لرزه‌های زمین لرزه بم، تاثیر پارامترهای جوئی دما، فشار جوئی و رطوبت خاک روی میزان غلظت گاز رادون با استفاده از شبکه عصبی خطی آدالاین و الگوریتم ژنتیک کمینه شد. تجزیه و تحلیل داده‌های غلظت گاز رادون اندازه گیری شده در بم نشان می‌دهد که شبکه عصبی آدالاین قادر به شناسایی تغییرات خطی غلظت گاز رادون ناشی از پارامترهای جوئی از بی‌هنجاری‌های حاصل از پس لرزه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: زمین لرزه بم، پیش‌نشانگرهای زمین لرزه، شبکه عصبی، انتشار گاز رادون

## Analysis of temporal variations of radon concentration and aftershocks of Bam Earthquake using Adaline neural network

Forough Keshvari<sup>1\*</sup>, Noorbakhsh Mirzaei<sup>1</sup> and Ali Negarestani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran  
<sup>2</sup>Kerman Graduate University of Technology, Mahan, Kerman, Iran

(Received: 20 June 2011, accepted: 13 June 2012)

### Summary

Temporal variations of radon concentration in soil and groundwater might be one of the few promising precursors for earthquake prediction. In this study, the relation between radon concentration and aftershocks of Bam Earthquake (26/12/2003,  $M_s=6.8$ ) has been investigated. The radon monitoring station was located at 29°N and 58.4°E, precisely on Bam Fault where there have been high occurrences of seismic activities. The study was carried out using an active method involving an Alpha Guard PQR2000, Alpha Pump and relative accessories which is a device capable of accurately measuring radon concentrations every 10 minutes. Air was being pumped from ground to the measuring

\*Corresponding author:

keshvari@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

system with a flux of 1 L/min. Forced air suction was chosen in order to avoid stratification effects, very common for radon, due to its elevated weight. Radon-monitoring sites are usually chosen in the areas where higher concentrations of radon in the surface soil layer can be expected. For this propose, the radon monitoring site was placed exactly on Bam Fault, which was placed between Bam and Baravat Cities. Radon concentration monitoring data was collected in soil at 90 cm depth exposed for a period of 90 days, every 10 minutes. Radon concentration changes are not only controlled by an earthquake, but they are also controlled by meteorological parameters at the radon monitoring site such as rainfall, soil moisture, temperature and atmospheric pressure. Therefore, in order to use radon variations as a reliable earthquake precursor, we must be able to differentiate changes that are due to earthquake from those which are not.

In recent years, artificial neural networks have become very powerful, intelligent tools, used widely in signal processing, pattern recognition and other applications. The main advantages of the method are the learning capability for developing new solutions to problems that are not well defined, an ability to deal with computational complexities, a facility of carrying out quick interpolative reasoning, and finding functional relationships between sets of data.

We have used a modified Adaline structure to estimate the temporal variation of radon concentration related to environmental parameters. This enables us to differentiate the changes due to phenomena in the earth such as earthquakes from those of environmental parameters. Radon concentration data obtained from our site and meteorological parameters measured in meteorological station of Bam were processed by the adaptive linear neural network, Adaline. It was indicated that the linear neural network was able to differentiate linear variations of radon concentration caused by the meteorological parameters from those arose from anomaly phenomena due to the aftershocks.

**Key words:** Bam Earthquake, earthquake precursors, neural network, radon emission

## ۱ مقدمه

گسلی بم-بروات از سامانه گسلی بم، درست در جنوب شهر بم در منطقه‌ای خالی از ریختارهای سطحی رخ داده است. وارون‌سازی شکل موج زمین‌لرزه اصلی، دو زیررویداد با بازه زمانی تقریباً ۱۰-۸ ثانیه را نشان داده است: (۱) گسلش امتدادلغز راست گرد با آزادسازی ممان بزرگ‌تر و عمق مرکزی  $6\text{ km}$  و (۲) سازوکار رورانده با شیب صفحه گسل  $64^\circ W$  با اندکی جنبش راست گرد با عمق مرکزی  $7\text{ km}$  و آزادسازی ممان کوچک‌تر. مدل‌سازی شکل موج زمین‌لرزه اصلی پیشنهاد می‌کند که شکستگی در امتداد گسل به سمت شمال منتشر شده است (طالبیان و همکاران، ۲۰۰۴). طول کلی شکستگی را وانگ و همکاران (۲۰۰۴) حدود  $24\text{ km}$  و شامل سه قطعه برآورد کرده‌اند.

زمین‌لرزه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ (۱۳۸۲/۱۰/۵) که در ساعت ۱:۵۶ دقیقه به وقت گرینویچ (۵:۲۶ به وقت محلی) رخ داد، یکی از فاجعه‌آمیزترین زمین‌لرزه‌های ثبت شده در تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران بود. این زمین‌لرزه با بزرگی  $6/8$  در مقیاس امواج سطحی در  $29/10$  درجه عرض شمالی و  $53/33$  درجه طول شرقی (سازمان زمین‌شناسی ایالات متحد آمریکا USGS)، بین ۳۱۰۰۰ (آمار رسمی) تا ۴۳۰۰۰ (آمار غیر رسمی) کشته در شهر بم و مناطق اطراف به‌جا گذاشت. بررسی تصویرهای ماهواره Envisat (طالبیان و همکاران، ۲۰۰۴) و تفسیر تصویر تداخل‌سنجی تفاضلی (D-In-SAR، وانگ و همکاران، ۲۰۰۴) زمین‌لرزه بم روشن ساخت که گسیختگی سطحی اصلی زمین‌لرزه روی گسلی شمالی-جنوبی در ۴ کیلومتری غرب قطعه

غلظت گاز رادون می‌توان به تحرکات پوسته زمین به هنگام وقوع زمین لرزه پی برد (یاکولوا، ۲۰۰۳).

بی‌هنجاری‌های مشاهده‌شده در میزان غلظت گاز رادون، فقط در اثر فرایند رخداد زمین لرزه نیست، بلکه عوامل دیگری همانند پارامترهای جوئی نیز باعث این بی‌هنجاری‌ها می‌شوند. از این رو در بررسی‌های پیش‌نشانگری گاز رادون، همه تلاش‌ها بر این استوار است که به نحوی، بخشی از بی‌هنجاری‌هایی که ناشی از وقوع زمین لرزه هستند، شناسایی شود و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد (المغربی و همکاران، ۲۰۰۹). با ظهور روش‌های جدید، به ویژه سامانه‌های هوشمند، همانند شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک، درک بهتری از تاثیر سایر عوامل بر تغییرات غلظت گاز رادون پدیدار شد (نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۳؛ کولاسی و همکاران، ۲۰۰۹). شبکه‌های عصبی توانایی شناسایی ارتباط مجهول خطی یا غیرخطی بین پارامترهای جوئی و میزان غلظت گاز رادون را فراهم می‌کنند. نگارستانی و همکاران (۲۰۰۳)، با استفاده از داده‌های برداشت شده در یک منطقه در تایلند، روشن ساختند که با کمک شبکه عصبی آدالاین می‌توان تغییرات ناشی از پارامترهای جوئی را از تغییرات ناشی از زمین لرزه متمایز کرد. شبکه عصبی لایه‌ای نیز برای برآورد غلظت گاز رادون درون خاک ناشی از پارامترهای جوئی مورد استفاده قرار گرفت (نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۲). کولاسی و همکاران (۲۰۰۹) به کمک شبکه عصبی، تغییرات غیرخطی ناشی از هشت پارامتر متفاوت (طول، عرض جغرافیایی و عمق زمین لرزه، غلظت گاز رادون، فشار جوئی و دمای خاک در عمق‌های ۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) را از تغییرات غلظت گاز رادون ناشی از زمین لرزه‌ها جدا کردند.

در این تحقیق، تلاش می‌شود تا ارتباط خطی بین تغییرات غلظت گاز رادون و پس لرزه‌های زمین لرزه بم مورد بررسی قرار گیرد و به همین علت از شبکه عصبی

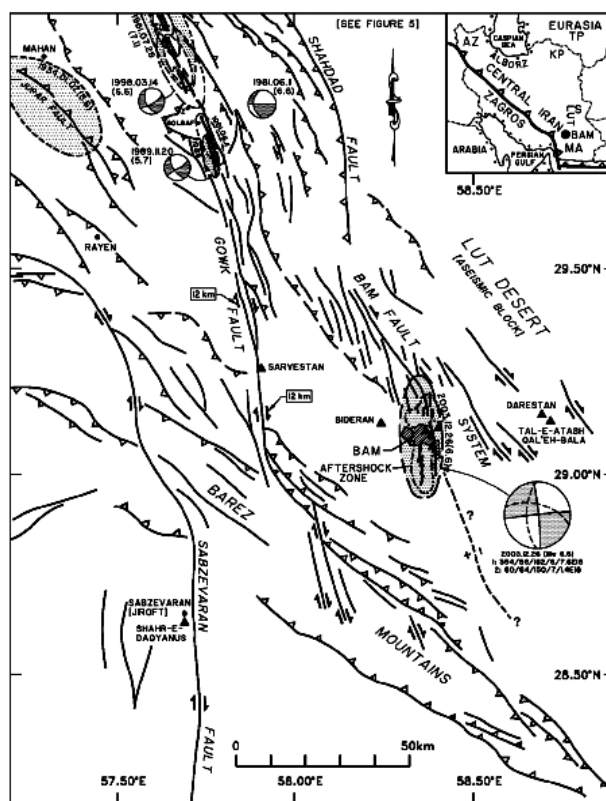
جست‌وجو برای یافتن روش‌های قابل اطمینان پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین لرزه از مباحث مهم زلزله‌شناسی و ژئوفیزیک است. از ۱۹۶۰، هم‌زمان با پیشرفت دستگاه‌های اندازه‌گیری، روش‌های ژئوشیمیایی در مقایسه با سایر روش‌های مورد استفاده در بررسی‌های پیش‌نشانگری، اطلاعات با ارزش و کیفیت بالایی را فراهم کرده است. براساس شواهد موجود بین شارش شارها و فرایندهای گسلش، مشاهده بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی ناشی از فعالیت‌های لرزه‌ای دوراز انتظار نیست (هیکمن و همکاران، ۱۹۹۵). از نخستین تجربیات در ارتباط با همخوانی بین بی‌هنجاری‌های گاز رادون و رخداد زمین لرزه می‌توان به تغییرات غلظت گاز رادون در آب‌های معدنی حوضه تاشکند قبل از زمین لرزه مخرب ۱۹۶۶ اشاره کرد (اولومف و ماواشف، ۱۹۶۷). چنین تغییراتی در غلظت گاز رادون پیش از زمین لرزه سونگان-پینگ‌وو ( $M = 7/2$ ) در ۱۹۷۶ در چین گزارش شد. افزایش تدریجی غلظت گاز رادون، دو تا سه سال پیش از زمین لرزه شروع شد و تا قبل از وقوع آن ادامه یافت (آسادا، ۱۹۸۲). ایگاراشی و همکاران (۱۹۹۵)، افزایش گاز رادون را در حدود دو ماه پیش از زمین لرزه کوبه ژاپن که با بزرگی  $7/2$  در تاریخ ۱۹۹۵/۱/۱۷ رخ داد، ثبت کردند. رادون اندازه‌گیری شده در درون خاک و آب‌های زیرزمینی، تغییرات پیش‌نشانگری زیادی را در چند کیلومتری رومرکز زمین لرزه نشان می‌دهد (کینگ و همکاران، ۱۹۹۳؛ ایگاراشی و همکاران، ۱۹۹۵؛ اینارسون و همکاران، ۲۰۰۸؛ میکلاوسیک و همکاران، ۲۰۰۸؛ راملا و همکاران، ۲۰۰۸). افزایش تنش در زون‌های شکستگی پیش از زمین لرزه، تغییرات بارزی را در گرادیان‌های فشار و دما ایجاد می‌کند که در نهایت موجب افزایش جریان شارها و انتقال گازها از اعماق زیاد به سطح زمین می‌شود (فلیشر، ۱۹۹۷؛ مانین، ۲۰۰۱). با استفاده از تغییرات زمانی

کیلومتری شرق جنوبی ترین بخش سامانه گسلی گوک در غرب گستره بی لرزه کویر لوت قرار دارد (بربریان، ۲۰۰۵) (شکل ۱). قطعه گسلی بم-بروات که دارای امتداد شمالی-جنوبی است، بین شهر بم و بروات قرار گرفته است که به وضوح در تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی قابل مشاهده است. این گسل با جابه‌جایی‌های راست گرد نه‌چندان واضح در نهشته‌های رودخانه‌ای و قنات‌ها و دیواره گسلی واضح به ارتفاع تقریبی ۲۵ متر که موجب پایین افتادگی دشت بروات در شرق شده است، مشخص می‌شود (بربریان، ۲۰۰۵). قطعه گسلی بم-بروات در شرق یک تاقدیس متقارن ناشی از گسلش در زمینی

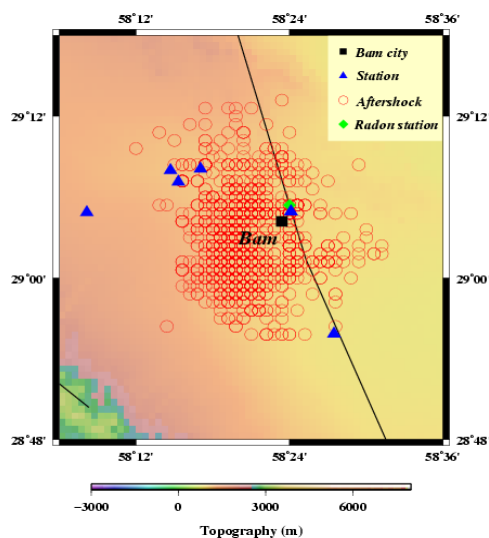
آدالاین استفاده شده است. با کمک این شبکه عصبی، تاثیر پارامترهای جوئی موثر بر میزان غلظت گاز رادون شناسایی می‌شود و سپس، با کمینه کردن اثر این عوامل، تاثیر سایر بی‌هنجاری‌های موجود، مانند اثر پس‌لرزه‌ها بر میزان غلظت گاز رادون به دست می‌آید. برای بهینه‌سازی نتایج حاصل از عملکرد شبکه عصبی آدالاین، از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک بهره گرفته شده است.

## ۲ سامانه گسلی بم

قطعه گسلی بم-بروات با طول بیش از ۱۲ km، بخشی از سامانه گسلی بم با پرتگاه گسلی رو به شرق (بربریان، ۲۰۰۵)، تقریباً در پنج کیلومتری شرق مرکز شهر بم و ۴۵



شکل ۱. نقشه سامانه گسلی گوک و بم در غرب کویر لوت. گسل‌های معکوس با مثلث‌هایی در جهت فرادیواره و گسل‌های امتدادلغز با پیکان نمایش داده شده‌اند. گسل‌های بدون دندان و پیکان برای جنبش‌های اخیر که حالت لغزش نامشخص دارند، به کار رفته است. مثلث‌های توپُر، مکان‌های تاریخی تخریب‌شده را نشان می‌دهند. حل صفحه گسل، دو سازوکار چشمه برای زمین‌لرزه ۲۶/۱۲/۲۰۰۳ بم ( $M_W = 6.6$ ) را نشان می‌دهد (بربریان، ۲۰۰۵). منحنی‌های خط‌چین روی کره کانونی، صفحات گره برای زیررویداد دوم است که جنبش رورانده با مولفه راست‌گرد را نشان می‌دهد. زون پس‌لرزه‌ها را تاتار و همکاران (۲۰۰۴) تعیین کرده‌اند (بربریان، ۲۰۰۵).



شکل ۲. موقعیت مکانی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری (مثلث‌ها)، پس‌لرزه‌های ثبت شده و محل ایستگاه اندازه‌گیری گاز رادون (لوزی).

فواصل ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری در اطراف گسل بم که از داخل شهر بم نیز عبور می‌کند، نصب شدند. از تاریخ ۲۸/۱۲/۲۰۰۳ (۱۳۸۲/۱۰/۷) تا ۲۶/۲/۲۰۰۴ (۱۳۸۲/۱۲/۷)، جمعاً ۱۰۷۳ پس‌لرزه در بازه بزرگی ۲/۴ تا ۳/۸ ثبت شد. شکل ۲، موقعیت مکانی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و پس‌لرزه‌های ثبت شده و محل ایستگاه اندازه‌گیری گاز رادون را نشان می‌دهد. داده‌های غلظت گاز رادون با همکاری معاونت سوخت سازمان انرژی اتمی ایران در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و به صورت شبانه‌روزی از ۱۱ دی تا ۲۶ اسفند ۱۳۸۲ در ایستگاهی واقع در غرب بروات با مختصات ۲۹/۱ درجه عرض شمالی و ۵۸/۴ درجه طول شرقی (شکل ۲) توسط دستگاه آلفاگارد مدل *PQR 2000PRO* ثبت شد. در اندازه‌گیری تغییرات غلظت گاز رادون، انتخاب محل مناسب برای نصب دستگاه و عمق سوند نمونه‌برداری، اهمیت خاصی دارد. محل دستگاه اندازه‌گیری بایستی نزدیک به منطقه گسیختگی و گسل مسبب زمین‌لرزه باشد، تا اینکه ثبت بی‌هنجاری‌های کوچک غلظت گاز رادون امکان‌پذیر شود. عمق سوند در این اندازه‌گیری‌ها با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، ۸۵ سانتی‌متر انتخاب شد.

مشکل از رُس، سیلت، ماسه و شن متعلق به پلیستوسن به رنگ زرد تا قهوه‌ای قرار دارد (GSI, ۱۹۹۳ a,b). این ویژگی ریخت‌زمین‌ساختی مشخص و جوان، نتیجه دگرشکلی تجمعی طولانی‌مدت در کوتاه‌تری پسین است. این دگرشکلی، یک گسل معکوس بزرگ‌زاویه با شیب رو به غرب با مولفه جنبش احتمالی امتدادلغز راست‌گرد است (بربریان، ۲۰۰۵). قطعه گسلی بم-بروات، عضوی از سامانه گسلی بم با طول کلی ۱۱۰ km > با روند NW - SE است که از تعداد زیادی گسل‌های امتدادلغز تقریباً موازی که از شهر بم و مجاور آن می‌گذرند، تشکیل شده است (شکل ۱). در کوه‌های شمال شهر بم و رودخانه پشت‌رود، سامانه گسلی بم با پلکان‌ها و فراگام‌هایی با فاصله چند کیلومتر از هم، کاملاً مشخص است.

### ۳ داده‌ها

دو روز پس از وقوع زمین‌لرزه بم، کارشناسان موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به منظور ثبت پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه، هفت دستگاه لرزه‌نگاری *PDAS* را در منطقه زلزله‌زده نصب کردند. لرزه‌نگارها در هفت ایستگاه با

که  $w(i)$  وزن‌های قابل تنظیم برای ارتباط بین ورودی و خروجی،  $r$  تعداد تاخیر زمانی هر ورودی،  $T$  ترانزاده ماتریس،  $W$  ماتریس وزن‌ها و  $X_k$  ماتریس ورودی است. تابع فعال‌ساز این شبکه، خطی است؛ بنابراین، آدالاین فقط می‌تواند ارتباط خطی بین سیگنال‌های ورودی و خروجی را بیابد. روش یادگیری کمترین میانگین مربعات ( $LMS$ ) که به قانون یادگیری ویدرو-هوف نیز معروف است، برای تصحیح وزن‌های شبکه به کار می‌رود. این روش براساس به‌روزرسانی آنی گرادبان خطای میانگین پایه‌گذاری شده است. قانون یادگیری کمترین میانگین مربعات به صورت زیر تعریف می‌شود (نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۳):

$$w_{k+1} = w_k + 2\mu e(k) X_k, \quad (2)$$

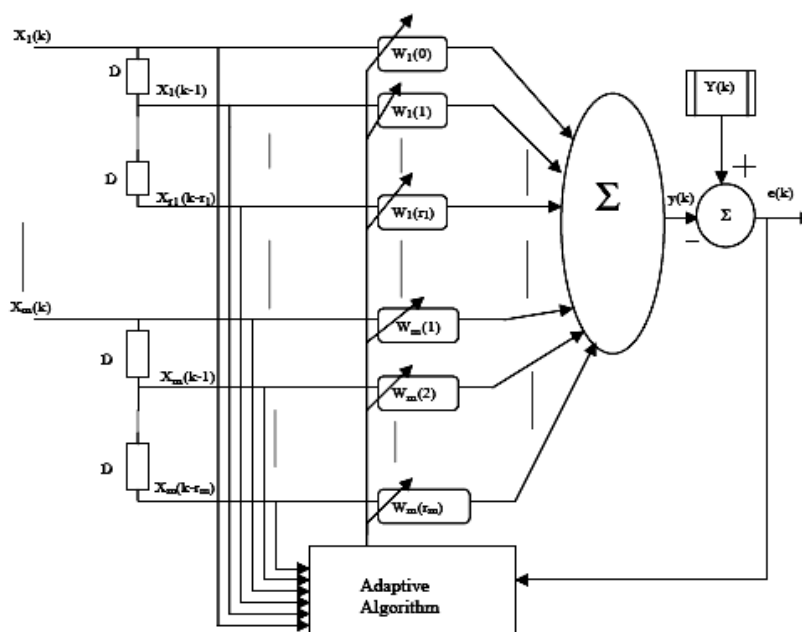
که خطای خروجی برابر است با  $e(k) = Y(k) - y(k)$  و ضریب تقویت یادگیری،  $\mu$  می‌تواند ثابت باشد یا گاهی اوقات با ضریب  $\frac{1}{n}$  کاهش یابد، به طوری که  $n$  تعداد مراحل به‌روزرسانی است (نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۳).

داده‌های هواشناسی شامل اندازه‌گیری‌های دما (برحسب  $^{\circ}C$ )، فشار جو (برحسب هکتوپاسکال) و رطوبت (برحسب درصد) به صورت ساعتی و بارش (برحسب میلی‌متر) به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی بم واقع در فاصله ۵ کیلومتری محل استقرار دستگاه آلفاگارد تهیه گردید. پس از پردازش و پالایش داده‌های اندازه‌گیری شده، داده‌های مناسب برای تحلیل انتخاب و به همراه پس‌لرزه‌ها و پارامترهای جوی مربوطه ذخیره شدند.

#### ۴ شبکه عصبی آدالاین

ساختار شبکه عصبی آدالاین در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل،  $k$  اندیس زمانی نمونه‌برداری،  $x(k)$  ورودی شبکه،  $y(k)$  خروجی شبکه و  $Y(k)$  خروجی مطلوب است. شبکه عصبی آدالاین، ارتباط بین سیگنال‌های ورودی و خروجی را به صورت زیر نشان می‌دهد (نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۳):

$$y(k) = \sum_{i=0}^r w(i)x(k-i) = X_k^T W, \quad (1)$$



شکل ۳. ساختار شبکه آدالاین اصلاح شده (نگارستانی، ۲۰۰۳).

## ۵ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روش بهینه‌سازی ابتکاری است که براساس نظریه تکامل ازسوی هلند (۱۹۷۵) عرضه شد. این الگوریتم براساس گُدسازی دودویی بنا شده است. به طوری که هر کروموزوم از یک رشته بیت تشکیل شده که تعداد این بیت‌ها به پارامترهای ورودی بستگی دارد. الگوریتم ژنتیک با تعدادی از این رشته‌ها (جمعیت) شروع و با استفاده از انتخاب توأم عملگرهای ژنتیکی مانند تولید مجدد، پیوند ضربدری و جهش، جمعیت جدید تولید می‌شود. از این جمعیت جدید با توجه به تابع برازندگی، رشته‌هایی (که بخت بیشتری برای تولید مجدد دارند) برای تشکیل جمعیت جدید انتخاب می‌شوند. این کار تا برآورده شدن شرط پایان کار ادامه می‌یابد.

## ۶ مدل خطی بررسی ارتباط بین غلظت گاز رادون و پارامترهای جوئی

پینالت و بابرون (۱۹۹۶) با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، مدلی را برای بررسی ارتباط خطی بین تغییرات غلظت گاز رادون و پارامترهای جوئی، نظیر فشار جو، دما، رطوبت خاک و بارندگی و شناسایی تاثیر احتمالی زمین لرزه‌ها بر این تغییرات پیشنهاد کردند. آنها سری زمانی غلظت گاز رادون،  $C(n)$  (که در آن  $n = 1, \dots, N$  است) را به صورت مجموع دو جمله در نظر گرفتند: جمله اول، ارتباط خطی غلظت گاز رادون با پارامترهای جوئی و جمله دوم تاثیر پدیده‌های درونی زمین بر غلظت گاز رادون را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن  $P_1, P_2, \dots, P_m$  درحکم سری‌های زمانی پارامترهای جوئی، رابطه کلی به صورت زیر نوشته می‌شود (پینالت و بابرون، ۱۹۹۶):

$$C = W_1 \times P_1 + W_2 \times P_2 + \dots + W_m \times P_m + R, \quad (3)$$

که  $W$  به صورت ماتریس سطری زیر نشان داده می‌شود (پینالت و بابرون، ۱۹۹۶):

(۴)

$W_1 = [W_1(0) \dots W_1(r)]$ , ...,  $W_m = [W_m(0) \dots W_m(r)]$ ,  
ماتریس  $W$  که در واقع همان ضرایب ارتباط خطی بین سری‌های زمانی پارامترهای جوئی و تغییرات غلظت گاز رادون است، به کمک روش‌های گوناگون آماری و ریاضی با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت گاز رادون و پارامترهای جوئی به دست می‌آید. در این تحقیق، از شبکه عصبی آدالاین برای برآورد ماتریس  $W$  استفاده شده است.

شبکه عصبی آدالاین با ساختاری تک‌لایه، قادر به شناسایی ارتباط خطی بین پارامترها است. به همین دلیل، برای بررسی ارتباط خطی بین داده‌های غلظت گاز رادون و پارامترهای جوئی از این شبکه استفاده می‌شود. ورودی‌های این شبکه را پارامترهای جوئی شامل دما، فشار جو و رطوبت و خروجی آن را مقدار غلظت گاز رادون تشکیل می‌دهد. نرون‌های شبکه عصبی آدالاین متناسب با تعداد خروجی‌های آن است که به همین دلیل، شبکه مورد استفاده در این تحقیق دارای یک نرون است. برای اجرای شبکه، ۵۰ درصد از کل داده‌های نرمال شده به طور تصادفی انتخاب می‌شود و آموزش شبکه از راه ۹۰ درصد این داده‌ها تا رسیدن به خطای قابل قبول ادامه می‌یابد و سپس، وزن‌ها تعیین می‌شوند. برای بررسی صحت نتایج، شبکه آموزش دیده، با ۱۰ درصد باقی‌مانده از داده‌های انتخاب شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

اثر پارامترهای جوئی بر غلظت گاز رادون را می‌توان به صورت دینامیک فرض کرد. به این معنا که مقدار این پارامترها در یک لحظه خاص می‌تواند بر میزان غلظت گاز رادون در زمان‌های آتی نیز موثر باشد که این پدیده تاخیر زمانی پارامترهای جوئی نامیده می‌شود. در این حالت، برای ورودی‌های شبکه برای مقدار گاز رادون در یک لحظه خاص، از پارامترهای جوئی همان لحظه به همراه پارامترهای جوئی چند مرحله قبل استفاده می‌شود. با

بیشترین احتمال حضور می‌گیرد. این فرایند، تولید مجدد نامیده می‌شود. کروموزوم‌های باقی‌مانده با فرایند پیوند ضربدری، چهار کروموزوم جدید تولید می‌کنند و بدین ترتیب، پنج کروموزوم جمعیت دوم ساخته می‌شود. مشابه با جمعیت اول، پس از آموزش شبکه آدالاین و محاسبه تابع برازندگی، احتمال حضور کروموزوم‌ها در جمعیت‌های بعدی به دست می‌آید. این روند تا رسیدن به جمعیت پنجم ادامه می‌یابد و در پایان، کروموزوم با بیشترین احتمال حضور در حکم کروموزوم برنده انتخاب می‌شود.

پس از کسب اطمینان از آموزش و آزمایش شبکه با ۲۰ درصد از کل داده‌ها و تعیین تاخیر زمانی مناسب با الگوریتم ژنتیک، در مرحله بعد، کل داده‌ها برای تعیین نحوه ارتباط زمانی تغییرات غلظت گاز رادون با پارامترهای جوئی به برنامه داده می‌شود. در نهایت، پس از شناسایی پارامترهای جوئی، میزان غلظت گاز رادون با شبکه عصبی برآورد می‌شود و تفاضل مقدار غلظت گاز رادون محاسبه شده و اندازه‌گیری شده، میزان تاثیر پس‌لرزه‌های رخ داده بر غلظت گاز رادون را نشان می‌دهد.

## ۷ بحث

شکل ۴، عملکرد شبکه عصبی آدالاین را برای داده‌های رادون اندازه‌گیری شده در شهر بم از تاریخ ۲۰۰۴/۲/۱۰ تا ۲۰۰۴/۱۱/۲۱ (۱۳۸۲/۱۱/۲۱) تا ۲۰۰۴/۲/۱۴ (۱۳۸۲/۱۱/۲۵) نشان می‌دهد. تاخیر زمانی داده‌های ورودی با الگوریتم ژنتیک ۱، ۲ و ۳ برای دما، فشار و رطوبت تعیین شده است. خط آبی‌رنگ، مقدار غلظت گاز رادون مشاهده شده در منطقه و خط سرخ‌رنگ، مقدار برآورد غلظت گاز رادون با شبکه عصبی آدالاین را که انتظار می‌رود بر اثر تغییرات پارامترهای جوئی به وجود آمده باشد نشان می‌دهد.

توجه به میزان تاثیرگذاری پارامترهای جوئی بر غلظت گاز رادون، تاخیر زمانی اعمال‌شده بر هر کدام از این پارامترها می‌تواند متفاوت باشد (نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۳). همان‌طور که گفته شد، تاخیرهای زمانی اعمال‌شده ممکن است حالت‌های متفاوتی داشته باشند. به عبارت دیگر، تاخیر زمانی‌های متفاوت را می‌توان در حکم ورودی شبکه عصبی در نظر گرفت. برای یافتن بهترین حالت ممکن از تاخیرهای زمانی اعمال‌شده، می‌توان از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک استفاده کرد. برای این کار، از میان تاخیرهای زمانی که می‌توان به شبکه اعمال کرد، الگوریتم ژنتیک ۵ ورودی (کروموزوم) را به‌طور تصادفی انتخاب می‌کند و آنها را به اعداد دودویی تبدیل می‌کند. این کروموزوم‌های پنج‌گانه، جمعیت اولیه را تشکیل می‌دهند. برای هر کروموزوم، شبکه عصبی آدالاین تا رسیدن به خطای قابل قبول آموزش می‌بیند. تابع برازش این داده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود (نگارستانی، ۱۳۸۱):

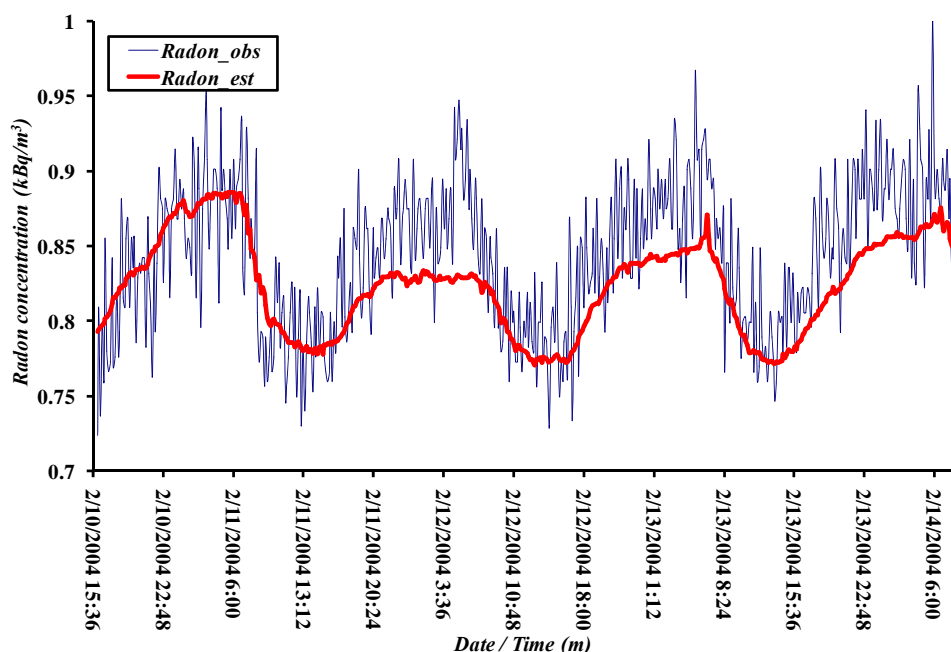
$$f = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2}, \quad (5)$$

که  $d$  مقدار غلظت گاز رادون اندازه‌گیری شده،  $y$  مقدار غلظت گاز رادون محاسبه‌شده با شبکه و  $N$  تعداد داده‌های مجموعه آزمایش است. احتمال حضور هر یک از کروموزوم‌ها در جمعیت بعدی را می‌توان از حاصل ضرب تابع  $F$  در تعداد کروموزوم‌ها و گرد کردن عدد حاصل به نزدیک‌ترین عدد صحیح به دست آورد. تابع  $F$  به صورت زیر به دست می‌آید (نگارستانی، ۱۳۸۱):

$$F = \frac{f_j}{\sum_{i=1}^N f_i}, \quad (6)$$

که  $f_j$  تابع برازندگی مربوط به کروموزوم  $j$ ام است. در مرحله بعد، کروموزوم‌های جمعیت دوم، بدین صورت تولید می‌شوند: کروموزومی که دارای کمترین احتمال حضور است حذف می‌شود و جای آن را کروموزوم با

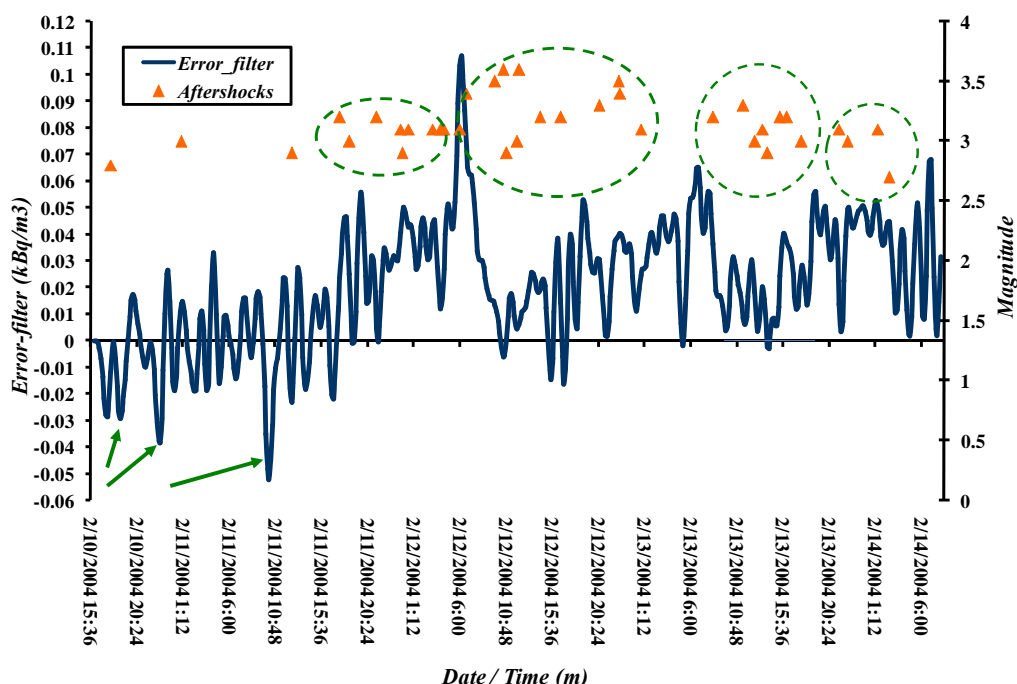




شکل ۴. تغییرات غلظت گاز رادون اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با شبکه عصبی آدالاین در بازه زمانی ۲۰۰۴/۲/۱۰ تا ۲۰۰۴/۲/۱۴ (۱۳۸۲/۱۱/۲۱) تا ۲۰۰۴/۲/۲۵ (۱۳۸۲/۱۱/۲۵) در شهر بم. خط نازک مقدار غلظت گاز رادون مشاهده شده در منطقه و خط ضخیم مقدار غلظت گاز رادون برآورد شده با شبکه که ناشی از تغییرات پارامترهای جوی هستند را نشان می‌دهد.

شکل ۵ ملاحظه می‌شود که خطای برآورد شبکه فیلتر شده از دو بخش تشکیل شده است: بخش اول که در محدوده زمانی بین ۲۰۰۴/۲/۱۰ تا ۲۰۰۴/۲/۲۱ (۱۳۸۲/۱۱/۲۱)، ساعت ۱۸:۳۰ قرار دارد. این بخش شامل خطای برآورد شبکه فیلتر شده با میانگینی حدود صفر است. افزایش یا کاهش بارز خطای برآورد شبکه که با پیکان‌هایی به رنگ سبز نشان داده شده است، با پس لرزه‌های منفردی همراه است. از ۲۰۰۴/۲/۱۱ تا ۲۰۰۴/۲/۲۵ (۱۳۸۲/۱۱/۲۵)، ساعت ۱۸:۳۰ (بخش دوم)، این خطا، افزایش محسوسی می‌یابد؛ به طوری که میانگین آن از صفر به  $۰/۰۳ \text{ kBq/m}^3$  می‌رسد. این افزایش با تعداد زیادی پس لرزه همراه است که به خوبی ارتباط بین تغییرات غلظت گاز رادون و فعالیت‌های زمین‌ساختی را نشان می‌دهد؛ ولی، با توجه به شکل ۵ در بخش دوم، تشخیص اینکه هر پس لرزه دقیقاً پس از کدام تغییر بارز خطای برآورد شبکه رخ داده، دشوار است. به همین دلیل

مشاهده می‌شود که شبکه توانسته است روند کلی تغییرات غلظت گاز رادون اندازه‌گیری شده را برآورد کند. در این حالت، می‌توان اختلاف بین مقادیر غلظت گاز رادون اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را ناشی از تاثیر رخداد پس لرزه‌های متوالی و شرایط مغشوش محیط لرزه‌ای پس از وقوع زمین لرزه اصلی دانست. شکل ۵، نمودار خطای برآورد شبکه عصبی آدالاین برای داده‌های غلظت گاز رادون را نشان می‌دهد که تغییرات با بسامد بیشتر آن به کمک فیلتر پایین‌گذر باترورت حذف شده است. این فیلتر برای نمایش بهتر روند تغییرات اختلاف بین مقادیر برآورد شبکه و مقادیر واقعی غلظت گاز رادون، روی داده‌ها اعمال شده است. پس لرزه‌های رخ داده در این بازه زمانی به صورت مثلث در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، انتظار می‌رود که خطای برآورد شبکه، میزان غلظت گاز رادون ناشی از تحولات زمین‌ساختی درون زمین را نشان دهد. با توجه به



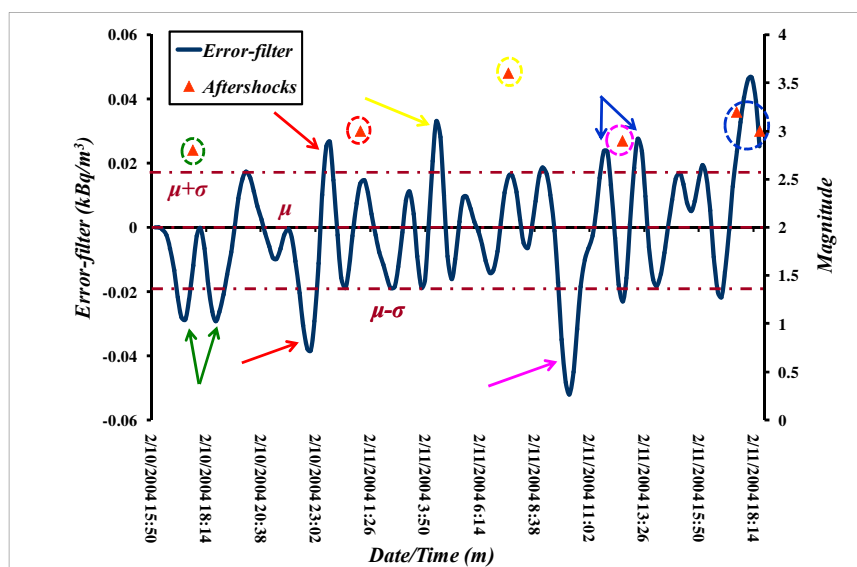
شکل ۵. نمودار فیلتر شده تغییرات غلظت گاز رادون ناشی از رویداد پس‌لرزه‌ها در بازه زمانی ۲۰۰۴/۲/۱۰ تا ۲۰۰۴/۲/۱۴ (۱۳۸۲/۱۱/۲۱) تا ۲۰۰۴/۲/۲۵ (۱۳۸۲/۱۱/۲۵) در شهر بسم. مثلث‌ها، پس‌لرزه‌های رخ داده در این مدت، پیکان‌های سبزرنگ، تغییرات ناگهانی در خطای برآورد شبکه و بیضی‌ها، تجمع پس‌لرزه‌ها پس از تغییرات ناگهانی را نشان می‌دهند.

شده‌اند) نسبت به  $\mu \pm \sigma$ ، پس‌لرزه‌ای رخ داده است. این پس‌لرزه‌ها با دایره‌هایی به رنگ پیکان‌های مربوط مشخص شده‌اند. پیکان‌های سبزرنگ، دو مقدار خطای برآورد شبکه فیلتر شده را نشان می‌دهند که پیش و پس از پس‌لرزه‌ای با بزرگی  $2/8$  رخ داده‌اند. پس‌لرزه‌هایی با بزرگی  $3$ ،  $3/6$  و  $2/9$  پس از خطاهای برآورد شبکه فیلتر شده‌ای که به ترتیب با پیکان‌های سرخ، زرد و بنفش مشخص شده‌اند، رخ داده است و وقوع دو پس‌لرزه با بزرگی‌های  $3/2$  و  $3$  هم‌زمان با افزایش خطای برآورد شبکه فیلتر شده نسبت به خط  $\mu + \sigma$  است.

با افزایش میانگین خطای برآورد شبکه فیلتر شده در بخش دوم (شکل ۵)، تعداد پس‌لرزه‌ها افزایش می‌یابد. به‌علاوه، این پس‌لرزه‌ها از نظر زمانی نسبت به بخش اول به هم نزدیک‌تر می‌شوند. به‌طوری‌که گاهی پس از

پس‌لرزه‌هایی که پس از هر افزایش بارز در خطای برآورد شبکه رخ داده‌اند، با بیضی‌های سبزرنگ نشان داده شده‌اند.

برای نمایش بهتر نتایج به‌دست‌آمده، قسمت‌هایی از خطای برآورد شبکه فیلتر شده در شکل ۵، در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. شکل ۶، خطای برآورد شبکه فیلتر شده و پس‌لرزه‌های مربوط را در بخش اول نشان می‌دهد. در این شکل میانگین داده‌ها ( $\mu = -0/001$ ) و مقادیر  $\mu \pm \sigma$  به صورت خط‌چین نشان داده شده است ( $\sigma = 0/018$ ) معادل انحراف معیار داده‌ها است). خطوط  $\sigma$  و  $\mu - \sigma$ ، پراکندگی خطای فیلتر شده را نسبت به میانگین نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود که هم‌زمان یا پس از افزایش یا کاهش خطای برآورد شبکه فیلتر شده (که با پیکان‌های سبزرنگ مشخص

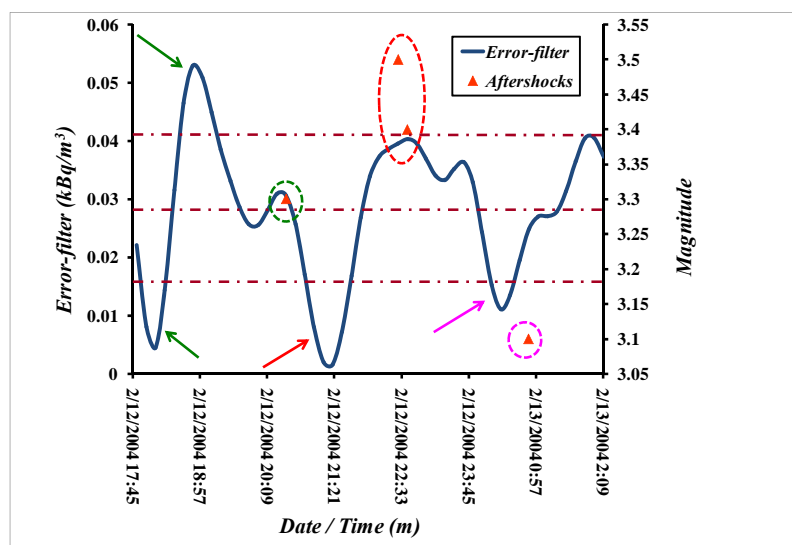


شکل ۶. نمودار فیلتر شده تغییرات غلظت گاز رادون ناشی از رویداد پس‌لرزه‌ها در بازه زمانی ۱۵:۵۰، ۲۰۰۴/۲/۱۰ تا ۱۸:۳۰، ۲۰۰۴/۲/۱۱. (بخش اول) در شهر بم. مثلث‌ها، پس‌لرزه‌های رخ داده در این مدت، پیکان‌های رنگی، تغییرات ناگهانی در خطای برآورد شبکه نسبت به خطهای  $\mu \pm \sigma$  را نشان می‌دهند.

پس‌لرزه‌ها با رنگ مشابه با پیکان‌های مربوط به تغییرات خطای برآورد شبکه نسبت به خط‌چین‌های  $\mu \pm \sigma$  نشان داده شده‌اند. در برخی از زیربخش‌های نمودار به علت نزدیکی پس‌لرزه‌ها از نظر زمانی، امکان جداسازی آنها پس از هر تغییر بارز غلظت گاز رادون وجود ندارد.

با توجه به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ و مقایسه آنها با نمودارهای حاصل از تغییرات غلظت گاز رادون قبل از رخداد زمین‌لرزه‌های اصلی (بررسی‌های پیشین)، به نظر می‌رسد که الگوی تغییرات غلظت گاز رادون در هنگام رخداد پس‌لرزه‌ها، با تغییرات آن قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی متفاوت است. علت این امر را می‌توان به تفاوت ویژگی‌های محیط لرزه‌ای قبل و بعد از زمین‌لرزه اصلی نسبت داد. قبل از وقوع زمین‌لرزه اصلی، تنش در حال تجمع در محیط لرزه‌ای است. با افزایش تنش در منطقه، ریزش‌کستگی‌ها در سنگ‌ها افزایش می‌یابند و گسیختگی‌های جدید در محیط لرزه‌ای پدیدار می‌شود. افزایش ریزش‌کستگی‌ها باعث افزایش خلل و فرج و خروج گازهای محبوس در داخل سنگ‌ها، از جمله گاز رادون

افزایش یا کاهش خطا، چندین پس‌لرزه وجود دارد. به عبارت دیگر، در برخی قسمت‌های این بخش نمی‌توان تغییرات بارز خطای برآورد متناظر با هر پس‌لرزه را جدا کرد. این مسئله ممکن است به این دلیل باشد که شبکه آدالاین فقط می‌تواند ارتباط خطی بین پارامترهای جوئی و تغییرات غلظت گاز رادون را تشخیص دهد؛ یعنی، وجود ارتباط غیرخطی بین پارامترهای نامبرده در بخش دوم، موجب شده است که نتوان پس‌لرزه‌های متناظر با هر تغییر ناگهانی خطای برآورد شبکه فیلتر شده را تشخیص داد. باین حال، بخش دوم را هم می‌توان به چندین زیربخش تقسیم کرد که در برخی از آنها امکان جداسازی پس‌لرزه‌های منفرد متناظر با تغییرات بارز خطای برآورد شبکه فیلتر شده وجود دارد. یکی از این زیربخش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است که بخشی از خطای برآورد شبکه شکل ۵ را در بازه زمانی ۲۰۰۴/۲/۱۲ تا ۲۰۰۴/۲/۱۳، ساعت ۵:۳۰ تا ۱۳:۳۰، (۱۳۸۲/۱۱/۲۳)، ساعت ۲:۱۰ تا ۱۰:۳۰، (۱۳۸۲/۱۱/۲۴) به همراه پس‌لرزه‌های مربوط نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود،



شکل ۷. نمودار فیلتر شده تغییرات غلظت گاز رادون ناشی از رویداد پس‌لرزه‌ها در بازه زمانی ۱۷:۵۰، ۲۰۰۴/۲/۱۲ تا ۲۰۰۴/۲/۱۳، ۲:۱۰ تا ۲۰۰۴/۲/۱۳ (بخش دوم) در شهر بم. مثلث‌ها، پس‌لرزه‌های رخ داده در این مدت، پیکان‌های رنگی، تغییرات ناگهانی در خطای برآورد شبکه نسبت به خط‌های  $\mu \pm \sigma$  و دایره‌های رنگی متناظر با پیکان‌ها پس‌لرزه‌های رخ داده پس از هر تغییر ناگهانی را نشان می‌دهند.

تغییرات غلظت گاز رادون باشد که بایستی با شبکه‌های عصبی غیرخطی مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۸ نتیجه‌گیری

تغییرات غلظت گاز رادون پس از زمین‌لرزه بم به‌منظور بررسی امکان وجود ارتباط خطی بین پارامترهای جوئی و غلظت گاز رادون ناشی از پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه بم مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، برای کمینه‌کردن تاثیر پارامترهای جوئی بر غلظت گاز رادون و در نتیجه مشخص کردن تغییرات ناشی از پس‌لرزه‌ها در غلظت این گاز از شبکه عصبی آدالاین استفاده شده است. با فرض وجود ارتباط خطی بین غلظت گاز رادون و پارامترهای جوئی، شبکه عصبی آدالاین توانسته است روند کلی تغییرات غلظت گاز رادون را با توجه به پارامترهای جوئی دنبال کند. با کمینه‌کردن تاثیر این پارامترها روی غلظت گاز رادون که با استفاده از شبکه عصبی صورت می‌گیرد، آنچه که باقی می‌ماند (یعنی، خطای برآورد شبکه فیلتر

می‌شود. تغییرات در میزان غلظت گاز رادون معمولاً از چند هفته تا چند روز قبل از وقوع زمین‌لرزه اصلی قابل مشاهده است. لیکن، پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی، محیط کاملاً گسیخته و دگرگون شده است. از این رو، به نظر می‌رسد که با آزاد شدن تنش باقی‌مانده در محیط و وقوع پس‌لرزه‌ها، الگوی حاکم بر تغییرات غلظت گاز رادون نیز تغییر می‌کند. در این حالت، بی‌هنجاری در میزان غلظت گاز رادون را می‌توان در اثر ترکیبی از تغییرات ناشی از زمین‌لرزه اصلی و وقوع پس‌لرزه‌های زیاد با فواصل زمانی کم در محیطی گسیخته دانست که امکان جداسازی بی‌هنجاری‌های بارز برای هر پس‌لرزه، را فراهم نمی‌کند. از طرفی نکته دیگری که بایستی به آن توجه شود، این است که در این تحقیق ارتباط خطی بین تغییرات غلظت گاز رادون با پس‌لرزه‌ها به کمک شبکه آدالاین مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، نبود امکان جداسازی بی‌هنجاری‌های بارز متناظر با هر پس‌لرزه ممکن است به علت وجود ارتباط غیرخطی بین پارامترهای جوئی و

## منابع

- شده)، ممکن است در اثر تغییرات زمین ساختی در منطقه به وجود آمده باشد که معمولاً به صورت افزایش یا کاهش خطا نسبت به خط چین‌های  $\mu \pm \sigma$  مشاهده می‌شوند. نتیجه به دست آمده در این تحقیق، شامل دو بخش است که در بخش اول، خطای برآورد شبکه فیلتر شده بیش از  $\mu \pm \sigma$  بیانگر وقوع رخداد پس لرزه‌های آتی است. این مسئله همچنین، می‌تواند نشان دهد که شبکه عصبی آدالاین توانسته است رابطه خطی بین پارامترهای جوئی و تغییرات غلظت گاز رادون را در این بخش شناسایی کند. در بخش دوم، خطای برآورد شبکه فیلتر شده با جمععی از پس لرزه‌ها همراه است که در حالت کلی نمی‌توان افزایش یا کاهش خطای برآورد شبکه فیلتر شده را نسبت به  $\mu \pm \sigma$  برای  $\mu \pm \sigma$  هر پس لرزه جدا کرد. ولی، با در نظر گرفتن بخش‌های کوچک تری در خطای برآورد شبکه فیلتر شده، می‌توان در برخی از این زیربخش‌ها پس لرزه‌های منفرد متناظر با تغییرات ناگهانی خطای شبکه را تشخیص داد. با این حال، در حالت کلی، امکان جداسازی هر تغییر بارز برای یک پس لرزه منفرد به این روش، به علت نزدیک بودن زمین لرزه‌ها و هم پوشانی آنها با هم، مشکل است که این مسئله ممکن است به این علت باشد که پس از وقوع زمین لرزه اصلی، عمده تنش موجود در منطقه آزاد می‌شود و آزاد شدن باقی مانده تنش با پس لرزه‌ها، احتمالاً گاز رادون کمتری را نسبت به مرحله پیش‌لرزه‌ای تا مرحله هم‌لرزه‌ای آزاد می‌کند؛ در نتیجه، تغییرات کمتری در غلظت گاز رادون در مرحله پس‌لرزه‌ای مورد انتظار خواهد بود. این مسئله می‌تواند پیش‌بینی وقوع پس لرزه‌ها را با مشکل مواجه کند. دلیل دیگری که می‌توان برای این مشکل ذکر کرد، وجود رابطه غیرخطی بین پارامترهای جوئی و تغییرات غلظت گاز رادون است که بایستی با شبکه‌های عصبی چندلایه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.
- نگارستانی، ع.، ۱۳۸۱، تجزیه و تحلیل هوشمندانه زمین لرزه از طریق تشخیص تغییرات انتشار گاز رادون و عوامل محیطی تاثیر گذار (دما، فشار، بارندگی، ...): پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- Asada, T., 1982, Earthquake Prediction Techniques: Their Application in Japan: University of Tokyo Press.
- Berberian, M., 2005, The 2003 Bam Urban earthquake: A predictable seismotectonic pattern along the Western Margin of the Rigid Lut Block, Southeast Iran: Earthquake Spectra, **21**, S35-S99.
- Einarsson, P., Theodorsson, P., Hjartardottir, A. R., and Guojonsson, G. I., 2008, Radon change associated with the earthquake sequence in June 2000 in the South Iceland seismic zone: Pure. Appl. Geophys., **165**, 63-74.
- Elmaghraby, E. K., and Lotfy, Y. A., 2009, Differentiation between earthquake radon anomalies and those arising from nuclear activities: Applied Radiation and Isotopes, **67**, 208-211.
- Fleischer, R. L., 1997, Radon and earthquake prediction: Radon Measurements by Etched Track Detectors, in Durrani, S. A., and Ilić, R., eds., Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment: World Scientific, Singapore, 285-299.
- GSI, 1993a, Geological Map of Iran, 1:100,000 Series, Sheet 7648-Bam, Geological Survey of Iran, Tehran.
- GSI, 1993b, Geological Quadrangle Map of Bam, 1:250,000. Geological Quadrangle of Iran No. J11. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Hickman, S., Sibson, R., and Bruhn, R., 1995, Introduction to special section: mechanical involvement of fluids in faulting: J. Geophys. Res., **100**, 12831-12840.
- Holland, J., 1975, Adaptation in Natural and Artificial System: University of Michigan Press.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., and Sano, Y., 1995, Groundwater radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan: Science, **269**, 60-61.
- King, C. Y., Zhang, W., and King, B. S., 1993, Radon anomalies on three kinds of faults in California: Pure. Appl. Geophys., **141**, 111-124.

- Ramola, R. C., Prasad, Y., Prasad, G., Kumar, S., Choubey, V. M., 2008, Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya: Applied Radiation and Isotopes, **66**, 1523-1530.
- Talebian, M., Fielding, E. J., Funning, G. J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parson, B., Priestley, K., Rosen, P. A., Walker, R., and Wright, T. J., 2004, The 2003 Bam Iran earthquake: rupture of a blind strike-slip fault: Geophys. Res. Lett., **31**, L11611.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Moradi, A. S., Paul, A., Farahbod, A. M., and Mokhtari, M., 2004, Aftershock study of the 26 December 2003 Bam earthquake: Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Special Issue on Bam Earthquake, 23-31.
- Ulomov, V. I., and Mavashev, B. Z., 1967, A precursor of a strong tectonic earthquake: Dokl. Akad. Nauk. USSR, Earth Sci. Sect., **176**, 9-11.
- Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzel, H. U., Kaufmann, H., and Zschau, J., 2004, The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: Precise source parameters from satellite radar interferometry: Geophys. J. Int., **159**, 917-922.
- Yakovleva, V. S., 2003, The radon flux density from the Earth's surface as an indicator of a seismic activity: Proceedings of ICGG7, Extended Abstracts, 28-30.
- Kulahci, F., Inceoz, M., Dogru, M., Aksoy, E., and Baykara, O., 2009, Artificial neural network model for earthquake prediction with radon monitoring: Applied Radiation and Isotopes, **67**, 212-219.
- Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., and Planinic, J., 2008, Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor: Applied Radiation and Isotopes, **66**, 1459-1466.
- Monnin, M. M., 2001, Radon over volcanic and seismic areas, in Frontasyeva, M. V., Perelygin, V. P., and Vater, P., eds., Radionuclides and heavy metals in Environment: Kluwer Academic Publishers, 319-330.
- Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M., and Akashe, B., 2002, Layered neural networks based analysis of radon concentration and environmental parameters in earthquake prediction: Journal of Environmental Radioactivity, **62**, 225-233.
- Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M., and Akashe, B., 2003, Estimation of the radon concentration in soil related to the environmental parameters by a modified Adaline neural network: Applied Radiation and Isotopes, **58**, 269-273.
- Pinault, J. L., and Baubron, J. C., 1996, Signal processing of soil-gas radon, atmospheric pressure, moisture and soil temperature data: a new approach for radon concentration modeling: J. Geophys. Res., **101**, 3157-3171.