

زمین لرزه و پیش درآمدهای^(۱) آن

علی نگارستانی*، سعید ستایش*، محمد قنادی مراغه**، بهرام عکاشه***
دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر#

معاونت تولید سوخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران*** - مرکز ژئوفیزیک وابسته به دانشگاه تهران***

چکیده

پیش‌بینی زمین لرزه در عمل از دو راه امکان پذیر است: یکی مطالعه فرآیند لرزه و پارامترهای مؤثر در آن، که اطلاعات مورد لزوم آن در منابع نظری وجود دارند و دیگری استفاده از پیش درآمدهاست. راه اول با توجه به دانش اندک بشر در باره فرآیند زمین لرزه چندان قابل استفاده نیست و توجه دانشمندان بیشتر معطوف به راه دوم، یعنی استفاده از پیش درآمدهاست. پیش‌بینی زمین لرزه علمی است که به مطالعه رفتار پیش درآمدها در طی فرآیند زمین لرزه می‌پردازد و در پی یافتن رابطه‌های بین این رفتارها و فرآیند زمین لرزه است که در نهایت باید منجر به پیش‌بینی آن شوند.

در این مقاله ضمن مطالعه نظری رویداد زمین لرزه، ارتباط زمانی پیش درآمدهای مختلف بامدل‌های مربوط به مرحله آماده‌سازی زمین لرزه بررسی شده است. بر این اساس، پیش درآمدها از نظر زمانی به سه نوع درازمدت، میان مدت و کوتاه مدت تقسیم شده‌اند. از جمله این پیش درآمدها، رفتار غیر عادی بعضی از حیوانات، تغییرات میدان الکتریکی زمین، تغییرات شکل پوسته زمین، تغییرات شدت میدان جاذبه زمین و تغییرات غلظت گاز رادون بررسی شده است، در مورد تغییرات غلظت گاز رادون، چگونگی پیدایش این گاز و تاثیر پذیری آن از عوامل محیطی، مانند دما، فشار جو، مقدار بارندگی و سرعت باد مورد بحث قرار گرفته و شواهدی نیز از ارتباط غلظت گاز رادون با وقوع زمین لرزه آورده شده است.

۱- مقدمه

است، راه دوم استفاده از پیش درآمدها است. راه اول به علت دانش اندک بشر در مورد فرآیند زمین لرزه چندان قابل استفاده نیست و تنها راه ممکن، استفاده از پیش درآمدها است [۲]. پیش درآمدها بنا به تعریف کمیسیون ویژه پیش‌بینی زمین لرزه در چین (IASPEI) عبارتند از «کمیت‌های متغیر محیطی قابل اندازه‌گیری که قبل از وقوع تکان اصلی زمین لرزه اتفاق افتاده و از فرایندهای مقدماتی تکان اصلی ناشی می‌شوند». چون علت وقوع زمین لرزه‌های گوناگون شرایط زمین ساختی متفاوت بوده و با هر زمین لرزه پدیده‌های مختلفی همراه است، پیش درآمدها نیز سرشت پیچیده‌ای خواهند داشت. بنابراین، پدیده‌های اتفاقی قبل از وقوع زمین لرزه‌های مختلف در یک مکان معین، بسته به نوع زمین لرزه ممکن است متفاوت باشند. همچنین پدیده‌هایی که در زمین لرزه‌های مشابه در مناطق مختلف، مشاهده می‌شوند بسته به شرایط طبیعی و محیطی

زمین لرزه یا زلزله یکی از هولناک‌ترین بلاهای طبیعی است که پیش‌بینی آن همواره از بزرگترین آرزوهای انسان بوده است. همگام با پیشرفت علوم و فناوری، تلاش‌های بسیاری برای نیل به این هدف در تعدادی از کشورهای زلزله خیز، از جمله ژاپن، امریکا، چین، روسیه، ایتالیا، هند، یونان، ارمنستان و ... به عمل می‌آید. والاس^(۲) و همکاران در ۱۹۸۴ در کمیت‌های که به منظور استاندارد کردن تعریف واژه‌های مربوط به پیش‌بینی زمین لرزه در امریکا تشکیل شده بود، فرآیند پیش‌بینی زمین لرزه را چنین تعریف کردند: «مشخص کردن دامنه بزرگی، ناحیه جغرافیایی و بازه زمانی که یک زمین لرزه رخ خواهد داد. در این ارزیابی درصد احتمال نیز باید گنجانیده شود» [۱].

در عمل دو راه برای پیش‌بینی زمین لرزه وجود دارد: راه اول مطالعه فرآیند زمین لرزه و محاسبه پارامترهایی که در آن دخالت دارند و اطلاعات مربوط به آنها به صورت منابع نظری موجود

1- Precursor

2- Wallace



ج - انتقال جرم که به هنگام وقوع زمین لرزه صورت می‌گیرد در اثر پس جهش کشسان ناگهانی دوطرف ترکها است در راستایی ایجاد می‌شود که تنجیدگی وجود ندارد و گسترش آن تا چند کیلومتری ترک اصلی است.

د - ارتعاشهای ناسازی از زمین لرزه از سطح ترکها شروع می‌شود. ترکها در آغاز سطح نسبتاً کوچک دارند، اما این سطح ممکن است به سرعت خیلی بزرگ شود، سرعت بزرگ شدن آن هیچگاه بیش از سرعت انتشار موجهای کشسان تراکمی نیست.

ه - انرژی که در اثر رویداد زمین لرزه آزاد می‌گردد، درست قبل از آغاز زمین لرزه به صورت انرژی تنجیدگی کشسان در سنگها ذخیره می‌شود.

این نظریه با آنکه جنبه‌های مثبتی در پاسخگویی به بسیاری از ابهامات لرزه‌شناسی دارد، دارای نواقصی از جمله ناتوانی در برآورد زمان آغاز گسستگی است.

برای بدست آوردن نظریه‌ای کاملتر با توجه به محدود بودن تعداد زمین لرزه‌های بزرگ در جهان و مهمتر از آن فقدان وسائل آزمایشگاهی مورد نیاز در مناطق خاص و غیر مشخص، به ناچار باید از مدلها و اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی استفاده کرد. این مدلها باید قادر باشند برای سه مرحله رویداد زمین لرزه، یعنی آماده‌سازی زمین لرزه^(۴)، وقوع زمین لرزه^(۵) و سایر پدیده‌های مربوط توجه مناسبی داشته باشند [۲].

مرحله آماده‌سازی فرایندی است که در آن تعداد و ابعاد ترکها افزایش یافته و پس از رسیدن به چگالی بحرانی چند ترک اصلی، در صفحه‌های که بعدها «صفحه گسل اصلی» را تشکیل خواهد داد، رخ می‌دهد. این مرحله در عمل ویژگیهای فیزیکی - مکانیکی محل را تغییر می‌دهد. تغییرات حاصل ممکن است در پیش‌بینی زمین لرزه مورد استفاده قرار گیرند. فرآیند تشکیل گسل اصلی و گسترش سریع آن راکه منجر به رویداد زمین لرزه می‌شود، مرحله وقوع زمین لرزه گویند. از جمله سایر پدیده‌های مربوط به زمین لرزه می‌توان به شاخه زدن و جوش خوردن گسل اصلی اشاره کرد. بطوری که گفته شد، در مرحله آماده‌سازی زمین لرزه ویژگیهای فیزیکی - مکانیکی محیط تغییر می‌کند. این تغییرات ممکن است در

منطقه، ممکن است یکسان نباشند [۲]. با وجود این، از میان پدیده‌های پیچیده پیش درآمدها، تعداد اندکی از ویژگیهای کلی بعضی از آنها مورد شناسایی جهانی قرار گرفته است که به توسط زلزله شناسان تعقیب می‌شوند.

بررسی آزمایشهای انجام گرفته در بازه‌های زمانی زمین لرزه‌ها نشان می‌دهد که ناهنجاری^(۳) در پیش درآمدهای متفاوت در زمانهای مختلف قبل از وقوع زمین لرزه ایجاد می‌شود، بنابراین، پیش‌بینی زمین لرزه به لحاظ زمان بندی به سه نوع درازمدت، میان مدت و کوتاه مدت تقسیم می‌شود. بازه زمانی برای پیش‌بینی درازمدت زمین لرزه از چند سال تا چند دهه، برای میان مدت از چند هفته تا چندسال و برای کوتاه مدت از چند ساعت تا چند هفته است [۳].

۲ - نظریه رویداد زمین لرزه

بر پایه نظریه‌های موجود، زمین لرزه عبارت است از آزاد شدن ناگهانی انرژی در ناحیه محدودی از زمین که ممکن است به صورت پتانسیل (گرانشی)، جنبشی، شیمیایی و یا انرژی تنجیدگی کشسان ظاهر شود. آزاد شدن این انرژی عامل اصلی زمین لرزه قلمداد می‌شود، اما همواره این مسأله مهم زمین - پویایی (ژئودینامیکی) درباره چگونگی انباشته شدن چنین مقدار عظیم انرژی ذهن محققان را به خود مشغول داشته است. البته با توجه به شواهد موجود می‌توان گفت که از این صورتهای مختلف انرژی، در واقع تنها انرژی کشسانی ممکن است به مقدار قابل توجهی برای ایجاد زمین لرزه، آزاد گردد [۱].

اولین نظریه درباره چگونگی رویداد زمین لرزه را Reid در ۱۹۱۱ بر اساس بررسیهای خود در زمین لرزه بزرگ سال ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو، تحت عنوان نظریه پس جهش کشسان در ۵ بند عرضه نمود [۴]:

الف - هنگامی که تنجیدگیهای کشسان ناشی از جابجایی قسمتهای مجاور پوسته زمین بیش از توان سنگها باشد، سنگها ترک خورده و باعث ایجاد زمین لرزه‌های زمین ساختی می‌شود.

ب - جابجاییهای قسمتهای مجاور پوسته زمین پدیده ناگهانی نبوده است که همزمان با ظهور ترکها ایجاد شده باشد، بلکه فرایندی تدریجی است که در مدت کم و بیش طولانی رخ می‌دهد.

3- Anomaly

4- Earthquake Preparation

5- Earthquake in action



پیش‌بینی زمین‌لرزه مورد استفاده قرار بگیرند. بنابراین، برای مطالعه هرچه بهتر پیش‌درآمدها لازم است مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه با دقت بیشتری مورد توجه قرارگیرد [۲]. هم‌اکنون پژوهشگران متعددی در سراسر جهان با تحقیقات عملی در مورد مکانیک سنگ و جمع‌آوری بی‌وقفه اطلاعات مربوط به پیش‌درآمدها، در بازه سازوکار زمانی آماده‌سازی زمین‌لرزه و پیش‌درآمدهای متأثر از آن فعالیت می‌نمایند. در این باره، مدل‌های نظری زیادی نیز در روند آماده‌سازی زمین‌لرزه و پدیدارشدن پیش‌درآمدها پیشنهاد شده است که از میان آنها سه مدل: اتساع سنگ - نفوذ آب (D-D)^(۶) ناپایداری شکست بهمینی^(۷) و اتساع سنگ - خزش گسل (D-C)^(۸) حائز اهمیت می‌باشد [۵].

با استفاده از این مدل‌های نظری، مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه و چگونگی ارتباط زمانی آن با پیش‌درآمدها به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است، بطوریکه سازوکار زمانی پیش‌درآمدهای مختلف به صورت نسبتاً مطلوب مشخص شده است.

۳- پیش‌درآمدهای مختلف زمین‌لرزه

۱-۳- سازوکار زمانی پیش‌درآمدها

بر اساس آزمایش‌هایی که روی شکستن سنگها صورت گرفته و به کمک نظریه‌های مختلف، روند آماده‌سازی و وقوع زلزله به چندین مرحله تقسیم شده است؛ چگونگی ارتباط زمانی این مراحل با پیش‌درآمدها برحسب مدل‌های انتخاب شده در جدول ۱ بیان شده است. بطوری که در این جدول نشان داده شده است، مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه به وسیله مدل‌های نظری به سه بخش تقسیم می‌شود:

- حالت تغییر شکل الاستیک

- حالت تغییر شکل غیرالاستیک

- حالت شکست که به ترتیب با تقسیم‌بندی مراحل بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت پیش‌بینی زمین‌لرزه مطابقت دارند.

پیش‌بینی بلندمدت با مرحله‌ای که نیروی الاستیک برسنگ وارد می‌شود و انرژی جمع شده در آن به صورت تغییر شکل ماندگار ظاهر می‌گردد، همخوانی دارد. این انرژی جمع شده در گسل، عامل بوجود آمدن مقدار غیرمتعارف بعضی از پیش‌درآمدها است. حالت پیش‌بینی میان‌مدت با رشد ترکهای ریز، برهم‌کنش

ترکها، نفوذ آب در سنگ و اشباع آن همخوانی دارد. این تغییرات باعث بوجود آمدن پاره‌ای از فعالیتهای نابهنجار مانند، بازه زمانی بین زمین‌لرزه‌های متوالی^(۹)، کمربند زمین‌لرزه‌ای^(۱۰)، افت سرعت امواج، شتاب گرفتن تغییر شکل بلورها، تغییرات سطح آبهای زیرزمینی و مشخصات هیدروشیمیایی آنها و همچنین افت مقاومت الکتریکی و گرایشهای مغناطیسی جهت دار و تغییرات جاذبه‌ای زمین می‌شود. این پدیده‌ها در شمار مقادیر غیرمتعارف پیش‌درآمدهای میان‌مدت محسوب می‌گردند.

در اواخر دوره میان مدت جابجایی توده سنگهای تغییر شکل یافته، شکستهای محلی و خزش سطح گسل و تغییر فشار حاصل از نفوذ سیالات ممکن است منجر به آشکار شدن نابهنجاری‌های جهت‌دار میان مدت بشوند که نقش مهمی در گذر از مرحله میان‌مدت به مرحله کوتاه‌مدت دارند. در مرحله کوتاه‌مدت و آنی، بخاطر کاهش مقاومت ویژه سنگها، شکستن سنگها شتاب بیشتری گرفته و خزش گسل نیز شتاب می‌گیرد و درنواحی ناپایدار، شکستهای ریز به شکستهای بزرگ تبدیل می‌شوند.

برخی از نابهنجاری‌های کوتاه‌مدت عبارتند از، نابهنجاری‌ها در سطح آبهای زیرزمینی و خواص هیدروشیمیایی آنها، تغییر شکل پوسته زمین، تغییر مقاومت الکتریکی زمین، تغییرات فشار و کرنش زمین و امواج الکترومغناطیسی که ممکن است قبل از وقوع زلزله پدیدار شوند. این سه مدل زمینه درک فیزیکی نسبتاً واضحی از سرشت تناوبی آماده‌سازی زمین‌لرزه را فراهم می‌سازند و امکان استفاده از بعضی از اصول فیزیکی را برای پیش‌بینی بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت در یک حوزه خاص مهیا می‌کنند [۶].

6- Rock dilatancy-fluid diffusion

7- snow avalanche-fracturing instability

8- Rock dilatancy-fault creep

9- seismic gap

10- seismic belt

جدول ۱: اساس سه مدل برای مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه و ارتباط زمانی آنها با پیش‌درآمدها [۶]
 Zhang Guomin and Zhang Zhaocheng, Journal of Earthquake Prediction 1 (1992).

| مرحله وقوع زمین‌لرزه | مرحله کوتاه‌مدت | مرحله میان‌مدت | | مرحله بلندمدت | زمان بندی پیش‌درآمدها |
|---|---|---|---|--------------------------|-----------------------|
| | | باز یافت | آغاز | | |
| آب داخل فضای انبساط یافته می‌شود و در نتیجه فشار منافذ افزایش می‌یابد. شباب گرفتن شکسته شدن سنگها | انبساط سستالات درون سنگها، پدیدار شدن خواص فیزیکی پر بسته خشک میانی | پیدایش و بسط درزهای انبساطی و بوجود آمدن سنگهای انبساط یافته | مرحله الاستیک (هیچ ریزدروزی بوجود نمی‌آید) | مدل انبساط سنگ - نفوذ آب | |
| توده‌های سنگی ناپایدار شده و بسرعت گسیختگی بسرعت می‌شوند. | تغییر شکلهایی که منجر به شکل‌گیری یک ناحیه تغییر شکل یافته ناپایدار می‌شود. بعضی از ریزدروزها به صورت کلی و یا جزئی بسته می‌شوند. | رخداد فعل و انفعال ریزدروزها، افزایش تعداد و اندازه ریزدروزها | پدیدار شدن ریزدروزهای یکسان | مدل ناپایداری شکست بهمنی | |
| انبساط پیدا می‌کند. گسل به سرعت خزش یافته و شکست سطح گسل ناگهان از شکست خرتشی به شکست بهمنی تبدیل می‌شود. | شکستهای محلی و خزش سطح گسل و همچنین معکوس شدن جهت فشار و بسته شدن ریزدروزهای قابل انبساط | آغاز افزایش درزهای قابل انبساط که همراه با انبساط حجم می‌یابند. | مرحله تغییر شکل الاستیک هیچ ریزدروزی بوجود نمی‌آید. | مدل انبساط سنگ - خزش گسل | |



۳- رفتار غیرعادی حیوانات

بررسی رفتار غیر عادی بعضی از حیوانات قبل از وقوع تکان اصلی زمین لرزه، به منظور پیش‌بینی زمین لرزه در بعضی از کشورها از جمله چین و ارمنستان در کنار روشهای دیگر، مانند علامت‌های الکتریکی زمین لرزه، انتشار گاز رادون و غیره مورد توجه قرار گرفته است. وقایعی که در مورد حرکات غیر عادی حیوانات گزارش شده، عبارتند از پارس سگها، دویدن آنها در اثر وحشت، پرواز پرندگان، امتناع اردکها از رفتن به داخل نهرها، تلاش خوکها برای بالا رفتن از دیوار حصارها، روی دوبا ایستادن اسبان، الاغها، گاوها و موارد دیگر [۷و۶]. همچنین قبل از وقوع زمین لرزه سال ۱۹۹۵ کوبه در ژاپن که باعث نابودی این شهر شد پستانداران، پرندگان، خزندگان، ماهیها، حشرات و کرمها از خود رفتار غیر عادی نشان دادند [۸]. بی‌بردن به رفتار غیر عادی حیوانات دارای پیشینه چند هزار ساله می‌باشد. بعضی از دانشمندان غربی به رفتار غیر عادی جانوران قبل از وقوع زمین لرزه به عنوان داستانهایی که بعد از زمین لرزه ساخته می‌شود نگریسته‌اند و به آن اعتقادی ندارند در صورتی که در آسیا اغلب به آن اعتقاد داشته و آن را ورای سطح دانش امروزی بشر می‌دانند. علی‌رغم نظر بعضی از دانشمندان، عموم مردم امیدوارند که بتوان زمین لرزه را توسط مشاهده رفتار حیوانات، بخصوص رفتاری شبیه رفتار گربه ماهی که برای چندین سال در ژاپن بعنوان یک رفتار غیر عادی حیوانی مطرح بوده، پیش‌بینی نمود. از آنجا که حیوانات به دلیل عمر نسبتاً کوتاه خود قادر نیستند چندین زمین لرزه بزرگ را تجربه کنند، نمی‌توانند زلزله را پیش‌بینی نمایند. آنها تنها با دریافت علاماتی که برای انسان غیر قابل درک است، وحشت زده می‌شوند. اما اینکه به راستی آنها چه چیز را دریافت و حس می‌کنند، خود هنوز در پرده ابهام است.

یک پاسخ این است که حیوانات می‌توانند امواج صوتی و الکتریکی زمین لرزه [۷] بو، یا عوامل محرک دیگر را، که انسان قادر به احساس آنها نیست، حس کنند [۹]. ای‌کی‌یا^(۱۱) و همکارانش با قراردادن حیواناتی از جمله ماهی و کرم ابریشم در معرض مدل پیشرفته الکترومغناطیسی گسل [۱۰] که به عنوان زلزله صاعقه‌ای معروف است، رفتار آنها را به طور کمی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱].

۳-۳- آبهای زیرزمینی

تصور می‌شود که آبهای زیرزمینی نقش مهمی در رویداد زمین لرزه دارند. تغییرات محسوس در خواص فیزیکی و ژئوشیمیایی آبهای زیرزمینی نه تنها به هنگام وقوع زلزله، بلکه پیش از وقوع آن نیز مشاهده شده‌است. بیشترین تغییرات در سطح آب چاهها و مقدار آب خروجی چشمه‌ها رخ می‌دهد. تغییرات دمای آبهای زیرزمینی قبل از وقوع زمین لرزه، نیز امری شناخته شده محسوب می‌شود و عاملی مهم برای پیش‌بینی زمین لرزه بشمار می‌آید [۱۳].

سادوفسکی^(۱۲) و همکاران در ۱۹۷۲ گزارش دادند که شاهد افزایش قابل توجه دمای آب حدود دو ماه قبل از وقوع زلزله سال ۱۹۷۰ در آسیای مرکزی بوده‌اند، بطوریکه در زمان وقوع زمین لرزه دمای آب افزایشی حدود ۱۰ درجه سانتیگراد را داشته است [۱۴].

افزایش ناگهانی ۱۰ درجه سانتیگراد در چشمه‌های آب گرم، دوازده روز قبل از وقوع زمین لرزه لانگ‌لینگ^(۱۳) در سال ۱۹۷۶ (M7.5) در چین نیز گزارش شده است [۱۵]. علاوه بر این، چون گاز رادون به خوبی در آب حل می‌شود، تغییرات غلظت گاز رادون در آبهای زیرزمینی که منعکس‌کننده فشارهای ناحیه‌ای است ممکن است نشانه‌ای از وقوع زمین لرزه باشد [۶].

گزارش نساوجی کوئی‌زومی^(۱۴) نیز حاکی از افزایش غیرمتعارف ۱۰ تا ۳۰ برابر مقدار گازهای H₂ و CO₂ در چاه کوشی‌می‌زو^(۱۵) است که در فاصله ۱ کیلومتری کانون زلزله قرار گرفته بود [۱۷].

۳-۴- میدان الکتریکی زمین

ثبت تغییرات میدان الکتریکی زمین به منظور بررسی حالت پیش‌درآمد آن در زمین لرزه‌های بزرگ، به توسط بعضی از محققان گزارش شده است. در شوروی سابق آزمایشهای دقیق متعددی درباره زمین ساخت مناطق فعال صورت گرفته است [۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱].

11- Ikeya

12- Sadovsky

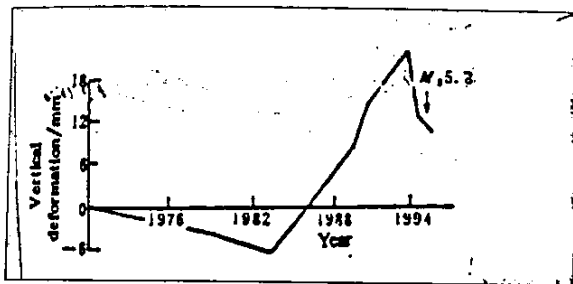
13- Long Ling

14- Naoji Koizumi

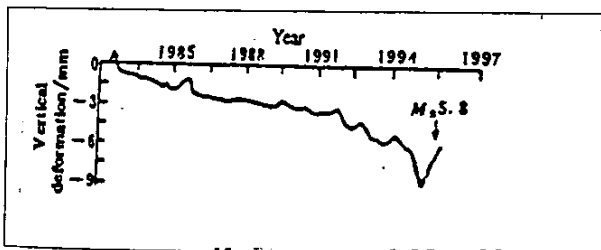
15- Koshimizu



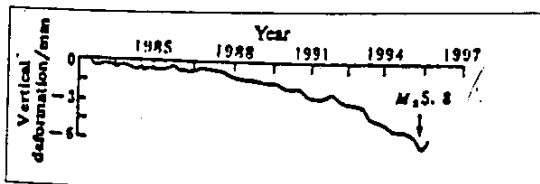
نوع پله‌ای بوده و یکی هم به هیچیک از این دو نوع تعلق نداشته است



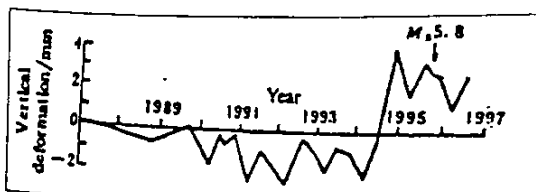
شکل (۱) - نمودار تغییرات قائم پوسته زمین
ایستگاه Waqiaoling



شکل (۲) - نمودار تغییرات قائم پوسته زمین
ایستگاه wozidan



شکل (۳) - نمودار تغییرات قائم پوسته زمین،
ایستگاه Dashuitou



شکل (۴) - نمودار تغییرات قائم پوسته زمین
ایستگاه Bianducou

کوته (۱۶) تغییرات افت میدان الکتریکی زمین را اندکی قبل از وقوع زلزله در چین گزارش داده است [۲۲]. همچنین می‌توان از پیش بینی موفقیت آمیز زمین لرزه‌هایی چنگ (۱۷) در سال ۱۹۷۵ که افت ناگهانی در میدان الکتریکی زمین در فاصله ۲۵ کیلومتری کانون زمین لرزه رخ داده بود نام برد [۲۳] چنین پدیده‌ای در ژاپن نیز گزارش شده است [۲۴].

در یونان مطالعه سازمان یافته تغییرات میدان الکتریکی زمین نسبت به وقوع زلزله از سال ۱۹۸۱ آغاز شده است [۲۵ و ۲۶]. که عملیات آن در شبکه‌ای متشکل از ۱۸ ایستگاه پراکنده که با ایستگاه مرکزی در آتن ارتباط دارند، انجام می‌شود [۲۷].

۳-۵- تغییر شکل پوسته زمین

تغییر شکل پوسته زمین در بسیاری از زمین لرزه‌ها مشاهده شده است. این عامل به عنوان یک پیش آشکار ساز کوتاه مدت تا میان مدت در وقوع زمین لرزه‌ها مطرح می‌باشد. شکل‌های (۱، ۲، ۳ و ۴) تغییرات قائم سطح زمین را در چند ایستگاه مختلف در زمین لرزه سال ۱۹۹۵ Yong Dong (۱۸) چین در (M=5.8) نشان می‌دهد [۲۹]. در شکل‌های ۴ و ۳، ۲ و ۱ فاصله ایستگاهها از کانون زلزله کمتر از ۱۶۰ کیلومتر و در شکل (۱) فاصله ایستگاه مورد نظر از کانون زلزله در حدود ۲۵۰ کیلومتر است. در شکل‌های ۴ و ۳، ۲ تغییر نابهنجاریها نسبتاً آرامند، در حالیکه در شکل ۱ تغییر شکل ناگهانی و شدید دیده می‌شود که آنرا علامت (سیگنال) پله‌ای نابهنجاری ناگهانی می‌نامند.

بطوری که در شکل دیده می‌شود از سال ۱۹۸۸ فرآیند، دارای تغییراتی کمتر از ۰/۵ میلی متر بوده است اما ناگهان در نوامبر ۱۹۹۴ یک جهش پله‌ای ۵ میلی متری رخ داده است. با توجه به آنچه که گفته شد، تغییرات فرآیند ممکن است تدریجی باشد که عموماً آرام است و یا پله‌ای شکل باشد. که در فاصله‌های بیش از ۲۵۰ کیلومتر شرایط عموماً بدینگونه است؛ در بعضی از موارد هم علامت (سیگنال) ممکن است به هیچیک از این دو نوع شبیه نباشد. به عنوان مثال از ۱۷۰ ایستگاهی که در فواصل مختلف از کانون زلزله سال ۱۹۹۵ Yong Dong قرار داشته‌اند، تنها در ۱۴ ایستگاه توانسته‌اند نابهنجاریهای تغییر شکل سطح زمین را مشاهده نمایند. از این ۱۴ مورد، سه مورد آنها از نوع تدریجی، ۱۰ مورد از

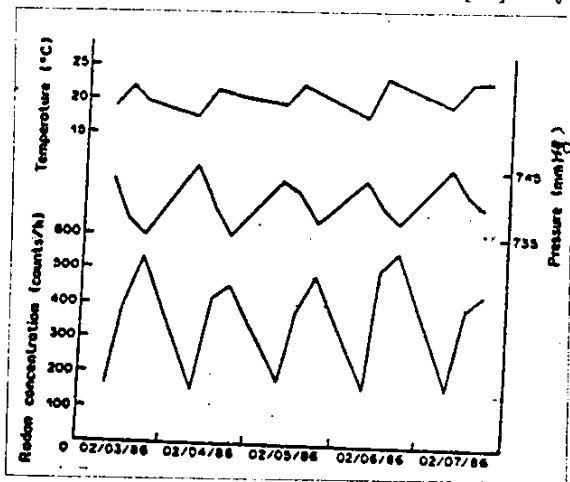
16- Coe

17- Haycheng

18- Yong Dong



مواد تشکیل دهنده خاک و یا توسط ساز و کار جریان سیال در میان خلل و فرج زمین و ترکهای درون صخره‌ها و درون مناطق سست مانند برش‌ها و گسل‌ها به حرکت درآید [۳۲]. آهنگ خروج گاز رادون از سطح زمین تابعی از قابلیت نفوذ آن در لایه‌های زیرین خاک، شرایط آب و هوایی و مقدار رادیوم موجود در خاک می‌باشد. در سنگ‌هایی که مشخصات فیزیکی مشابه دارند مقدار خروج گاز رادون متناسب با غلظت اورانیوم موجود در آنهاست [۳۳].



شکل (۶) - نوسانات روزانه گاز رادون، در اثر فشار هوا و دما [۱۵]

عوامل محیطی مانند دما، فشار هوا، سرعت باد، رطوبت و میزان بارندگی در انتشار گاز رادون بسیار مؤثرند، بطوری که یکی از مشکلات اساسی استفاده از گاز رادون به عنوان پیش‌نشانگر زلزله تأثیرپذیر بودن شدید آن از این عوامل است. برای در نظر گرفتن اثر این عوامل بر میزان غلظت گاز رادون، باید این عوامل به طور مرتب اندازه‌گیری شوند تا با استفاده از روشهای محاسباتی بتوان غلظت واقعی گاز رادون را بدست آورد.

در یک روز آفتابی معمولاً تغییرات غلظت روزانه گاز رادون در هوا حدود ۳۰٪ مقدار متوسط آن است و عموماً حداکثر غلظت آن در اواخر عصر است که فشار هوا به حداقل مقدار روزانه خود می‌رسد (شکل ۶) [۳۶]. مشابه این تغییرات به توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۳۸ و ۳۷ و ۱۶].

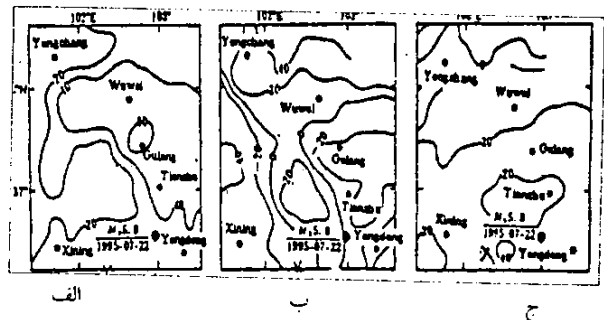
الف - اثر دما: درجه حرارت محیط اثر مستقیم بر انتشار گاز رادون

۳-۶- تغییرات شدت میدان گرانش زمین

تغییرات شدت میدان گرانش زمین در بسیاری از زمین‌لرزه‌ها مشاهده شده و به عنوان پیش‌درآمد کوتاه مدت تا میان مدت مطرح است. شکل (۵) منحنی‌های هم‌تراز میدان گرانش زمین در مراحل مختلف زمانی زمین‌لرزه سال ۱۹۹۵ Yong Dong با بزرگی ۵/۸ ریشتر را نشان می‌دهد [۲۹]. این شکل تغییرات دینامیکی میدان گرانش زمین در بازه‌های زمانی ۱۹۹۲-۱۹۹۴، ۱۹۹۴-۱۹۹۵ و ۱۹۹۵-۱۹۹۶ و به طور آشکار تغییرات رو به افزایش میدان گرانش را از حالت ناهمگن در مراحل مختلف شکل‌گیری زمین‌لرزه به حالت شبه همگن بعد از تکان اصلی نشان می‌دهد. همه این موارد بر طبق قانون تحولات سازمان یافته، به صورت:

شبه همگن \Rightarrow تکان اصلی \Rightarrow ناهمگن \Rightarrow شبه همگن

است که با تحقیقات Zhou در ۱۹۹۶ در زمینه تغییرات پوسته زمین، مطابقت دارد [۲۹].



شکل (۵) - نقشه تغییرات هم‌تراز گرانش زمین در ناحیه Hexi [۲۸]

الف - (۱۹۹۲-۱۹۹۴) ب - (۱۹۹۴-۱۹۹۵) د - (۱۹۹۵-۱۹۹۶)

۳-۷- تغییرات غلظت گاز رادون

رادون اماناسیون بلافاصله واپاشی رادیوم ۲۲۶ و تنها عضو زنجیره اورانیوم است که در دمای معمولی به صورت گاز می‌باشد. این گاز در ۶۲- درجه سانتیگراد به مایع و در دمای ۷۱- درجه سانتیگراد به جامد تبدیل می‌شود و سنگین‌ترین عضو خانواده گازهای نادر شامل هلیوم، نئون، آرگون و... است. حرکت گاز رادون در یک محیط مشخص، بستگی زیاد به نیمه عمر و قابلیت نفوذش در محیط مورد انتشار دارد. چون گاز رادون از نظر شیمیایی خنثی است، می‌تواند به وسیله ساز و کار نفوذ مولکولی به درون



گاز رادون اثر می‌گذارند، اما در مورد داده‌هایی که سالانه بررسی می‌شوند این اثرهای زودگذر نقش قابل توجهی ندارند [۳۶].

جدول ۲- ارتباط گاز رادون با پارامترهای هواشناسی
Ramolla et al., 1990

| پارامترها | ضرائب همبستگی | | |
|--------------|---------------|-------|---------|
| | روزانه | هفتگی | ۱۵ روزه |
| ماکزیموم دما | ۰/۳۵ | ۰/۴۴ | ۰/۴۷ |
| می‌نیم دما | ۰/۴۲ | ۰/۵۸ | ۰/۵۸ |
| رطوبت نسبی | -۰/۰۵ | -۰/۱۳ | -۰/۱۹ |
| سرعت باد | ۰/۳۹ | ۰/۵۰ | ۰/۴۹ |
| فشار هوا | -۰/۳۵ | -۰/۴۷ | -۰/۴۳ |
| بارندگی | -۰/۴۲ | -۰/۲ | -۰/۲ |

۳-۸- گاز رادون و زمین لرزه

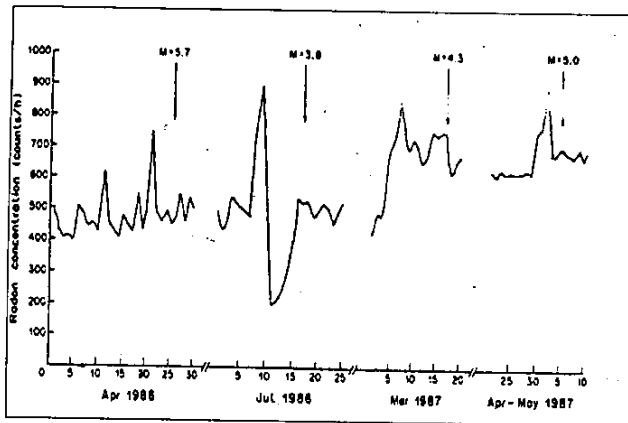
بررسی تغییرات انتشار گاز رادون در اثر زمین لرزه به مطالعات Okabe بر می‌گردد که او رابطه آشکاری بین تغییرات روزانه گاز رادون در جو مجاور سطح زمین و زمین لرزه‌های Tottori ژاپن کشف کرد. با علم به اینکه گاز رادون در آب به خوبی حل می‌شود، سنجش غلظت گاز رادون در چاههای آب تا شکند در مدت طولانی به عنوان پیش در آمد زمین لرزه صورت گرفت. Ulomo و Mavachev نخستین کسانی بودند که تغییرات غلظت گاز رادون در آب چاهها را در زمین لرزه ۱۹۶۶ تا شکند مشاهده کردند [۳۶، ۴۱، ۴۳]. بعد از آن نیز تغییرات شدید غلظت گاز رادون در آبهای زیرزمینی در مورد چندین زمین لرزه که در فواصل چند صد کیلومتری رخ داده بود، گزارش شده است. شکل‌های (۷، ۸، ۹) نمونه‌هایی از این تغییرات را نشان می‌دهند. منشأ و سازوکار پیدایش تغییرات شدید گاز رادون و چگونگی ارتباط آن با زمین لرزه با وجود ارائه چندین مدل آزمایشگاهی، مدل‌های ریاضی و آزمایشهای هیدرولیکی هنوز به خوبی شناخته نشده است. جمع بندی مدل‌های مطرح شده در این زمینه به توسط رامولا [۳۶] و خان [۴۲] به شرح زیر جمع بندی شده‌اند: «در ابتدا، مدل پخش اتساعی»^(۱۹) و چندین مدل مشابه دیگر پیشنهاد شد که مقادیر

دارد. بیشتر محققان بر این عقیده‌اند که در اثر افزایش دما، فشرده‌گی خاک (که در دمای پایین صورت گرفته است) کاهش یافته و سبب می‌شود گاز رادون بیشتری از خاک متصاعد شود. افزایش دمای سطح زمین نه تنها باعث انبساط هوای درون خاک و خروج آن از سطح زمین می‌شود بلکه باعث رها شدن گازها و بخارهای دیگری که جذب ذرات خاک شده‌اند نیز می‌گردد [۱۶، ۳۸، ۳۹، ۴۰].

ب- اثر فشار هوا. غلظت گاز رادون با فشار هوا رابطه معکوس دارد. فشار هوا را می‌توان در حکم پمپی فرض کرد که بر سطح خاک قرار گرفته است، هنگامی که فشار کم شود گاز رادون از اعماق خاک بیرون کشیده می‌شود، برعکس زمانی که فشار هوا افزایش یابد، گاز رادون به درون خاک رانده می‌شود [۴۱، ۳۷، ۱۶].

ج- اثر بارندگی. غلظت گاز رادون معمولاً به هنگام بارندگی ملایم افزایش می‌یابد. در بارندگی‌های نسبتاً شدید، غلظت گاز رادون درون خاک ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش قابل توجهی در دوره چند روزه پیدا می‌کند. این افزایش ممکن است به علت پوشش یک لایه خاک نرم در سطح زمین باشد که از رها شدن رادون به اتمسفر جلوگیری می‌کند [۳۸]. در یک دوره چند روزه پس از بارندگی، به علت حل شدن گاز رادون در آب باران و نفوذ آب باران در لایه‌های زیرین خاک، مقدار گاز رادون در سطح زمین کاهش می‌یابد [۳۶].

د- اثر سرعت وزش باد. باد می‌تواند مستقیماً هوای مجاور سطح زمین را به سمت بالا براند و گاز رادون را از نواحی گودتر، طبق اصل برنولی، بیرون بکشد. در نتیجه غلظت گاز رادون در هوا با افزایش سرعت وزش باد افزایش می‌یابد. ارتباط غلظت گاز رادون با پارامترهای هواشناسی ماتریس همبستگی براساس داده‌های گردآوری شده در جدول ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود، انتشار گاز رادون رابطه مستقیم و شدیدی با دمای هوا و سرعت باد، رابطه معکوسی با فشار هوا و بارندگی و همچنین رابطه ضعیفی با رطوبت هوا دارد. تغییرات در ضریب همبستگی انتشار گاز رادون و میزان بارندگی، به علت اختلاف در چگونگی بررسی اطلاعات اندازه گیری شده است. در ثبت روزانه دیده می‌شود که حوادث ضمنی و موقتی بارندگی بر روی داده‌های



شکل (۷) - نمودار تغییرات روزانه گاز رادون در خاک در زمان وقوع

زمینلرزه [۳۵]

زمینهای با ضریب نفوذ $1.5^{-1} \text{ cm } 0.3\%$ به مقدار بیشینه خود می‌رسند. هنگامی که بر اثر فشردگی و یا اتساع زمین، به ترتیب جریانی رو به بالا و یا رو به پایین وجود داشته باشد آرایش آن، بسته به سرعت جریان، تغییر می‌کند. در شکل ۱۰، آرایش قائم‌گاز رادون برای سرعت صفر و دو نوع سرعت دیگر نشان داده شده است. به طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، عمق ۵ تا ۱ متری نسبت به تغییرات سرعت گاز رادون بیشترین حساسیت را دارد، بنابراین، مناسب‌ترین عمق برای ثبت تغییرات غلظت گاز رادون بمنظور پیش‌بینی زمین‌لرزه می‌باشد. در عمق‌های بیشتر حساسیت تغییرات غلظت گاز رادون نسبت به زمین‌لرزه بسیار کم می‌شود [۳۴]. از طرف دیگر با نزدیک شدن به سطح زمین، تأثیر عوامل جوی بر اندازه‌گیری غلظت گاز رادون افزایش می‌یابد. در نتیجه برای قضاوت درست در باره ارتباط میان وقوع زمین‌لرزه و تغییرات غلظت گاز رادون، عوامل جوی تأثیرگذار، از جمله دما، رطوبت، فشار، سرعت باد و میزان بارندگی نیز باید بدقت اندازه‌گیری شوند. اطلاع از این پارامترها به ما امکان می‌دهد که تأثیر آنها را بر تغییر غلظت گاز رادون به کمک روشهای محاسبه متداول و یا به وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی مد نظر قرار دهیم.

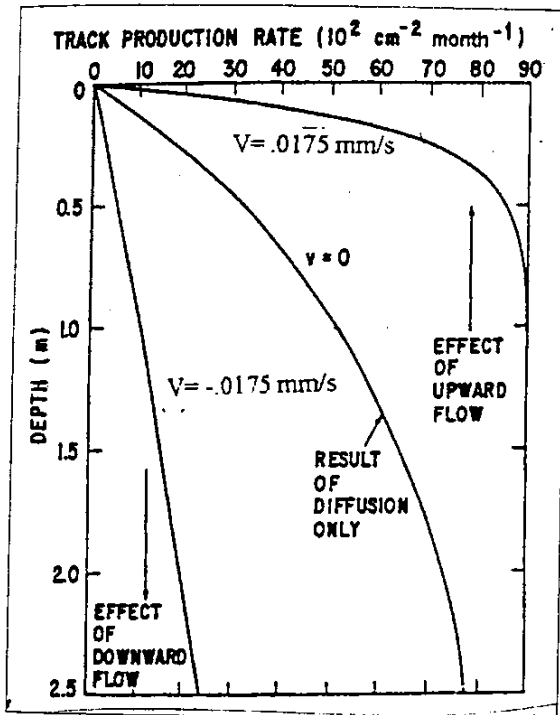
غلظت‌های نابهنجار گاز رادون را به افزایش ترکها در اثر ایجاد تنش‌های مکانیکی در حجم اتساع یافته و یا به تغییرات سرعت جریان آبهای زیرزمینی مربوط می‌سازد. اشکال این مدل در این است که اغلب احتیاج به تغییرات بزرگ غیر محسوسی در تنش و کرنش در فاصله‌های دور از کانون زمین‌لرزه بعدی دارد. مدل دیگر بر اساس نظریه فرسایش تنشی^(۲۰) است. در این مدل، غلظت‌های نابهنجار گاز رادون را مربوط به افزایش تدریجی ترکها می‌دانند که به وسیله رابطه تنش در ماتریس سنگ اشباع شده با آبهای زیرزمینی کنترل می‌شود. زیرا افزایش ترکها به وسیله فرسایش رفتن تنشی، مقدم بر هر نوع ترک خوردگی مکانیکی در یک محیط مرطوب می‌باشد. بعدها به طور تجربی نیز ثابت شد که در رطوبت‌های زیاد، مواد زمین - ساخت می‌توانند در جریان کرنش‌های خیلی کم سبب افزوده شدن ترکها شوند. در سازوکار فرسایش تنشی به این مطلب اشاره شده است که پیدایش غلظت‌های نابهنجار گاز رادون نیز ممکن است وابسته به آهنگ کرنش^(۲۱) و شرایط محلی مانند نوع سنگ، مدول الاستیک، وقوع زمین‌لرزه‌های کوچک، درجه اشباع، دما، پارامترهای شدت تنش و خواص هیدرولیکی باشد. سازوکار دیگری که برای بروز مقادیر غیرمتعارف گاز رادون قبل از وقوع زمین‌لرزه مفروض است، سازوکار فشردگی^(۲۲) می‌باشد. بر اساس این سازوکار نابهنجاریهای غلظت گاز رادون ممکن است در اثر افزایش فشردگی قسمتی از پوسته قبل از وقوع زمین‌لرزه باشد که گاز رادون را از درون خاک به اتمسفر می‌راند. گاز بیرون رانده شده، آرایش قائم غلظت گاز رادون را در زیر سطح زمین آشفته می‌سازد به طوری که گازهای موجود در خاکهای عمقی، که محتوی مقدار زیادتری رادون می‌باشند، به مرحله آشکار سازی می‌رسند.

پیش‌بینی زمین‌لرزه با توجه به چگونگی و آهنگ تغییر آرایش قائم غلظت گاز رادون صورت می‌گیرد. در مجاور سطح زمین حتی زمانی که سرعت نفوذ گازهای موجود در خاک صفر باشد، به علت سازوکار نفوذ مولکولی و محدود بودن عمر گاز رادون، شاهد گرا دیان غلظت گاز رادون هستیم. غلظت گاز رادون در سطح زمین نزدیک به صفر است. با فاصله گرفتن از سطح زمین غلظت به صورت نمایی افزایش می‌یابد و در عمق حدود ۱/۲ متری (در

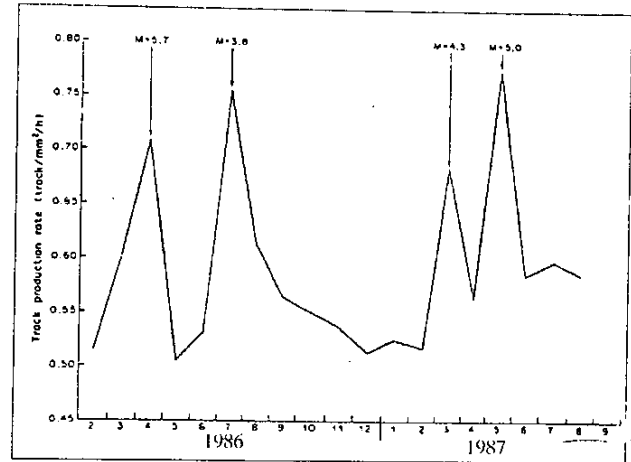
20- stress corrosion

21- strain rate

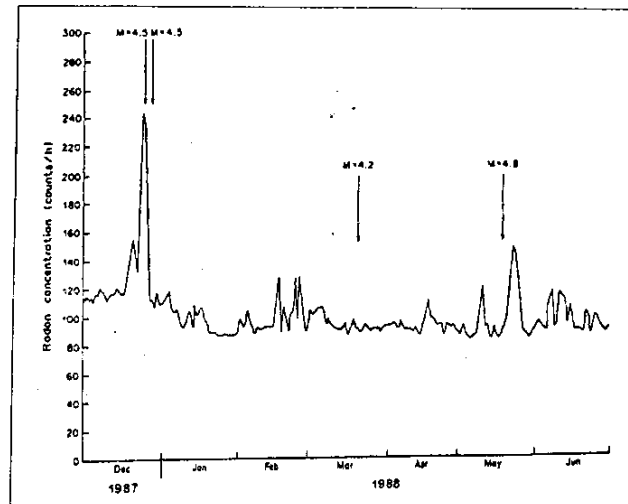
22- compression mechanism



شکل (۱۰) - تغییرات غلظت گاز رادون در خاک بر حسب فاصله از سطح زمین برای سرعت‌های نفوذ مختلف [۳۴].



شکل (۸) - نمودار تغییرات ماهانه گاز رادون در خاک با استفاده از آشکارساز حالت جامد ردیابهای هسته‌ای [۳۶].



شکل (۹) - تغییرات روزانه گاز رادون در آبهای زیرزمینی [۳۶].

References

1. R.E. Wallace, J.F. Davis, K.C. McNally. "Terms for expressing earthquake potential, prediction, and probability," Bull.Seis.Soc.Am., Vol. 24, No. 5, pp. 1819-1825, Oct.,(1984).
2. M. Bahavar, "Earthquake prediction" Publication No. 71-93-32, (IIEES), (1993).
3. Cheng Yong, Wang Wei, Zhu Yueqing. Ji Yong "Multidisciplinary approach used in expert systems for earthquake prediction in China " Journal of Earthquake Prediction., Vol. 1, No. 1, pp. 107-113 (1992).



4. H.F. Reid, "The elastic rebound of earthquake", Bull. Dep. Geology Univ. California, No. 6, P. 413 (1911).
5. F.D. Stacy, "Physics of the Earth." John Willey and Sons Inc., (1969).
6. Zhang Guomin, Zhang Zhaocheng "The study of multidisciplinary earthquake prediction in China." Journal of Earthquake Prediction., Vol. 1, pp. 71-85 (1992).
7. T. Rikitake, "Biosystem. behavior as an earthquake precursor," Tectonophysics, Vol. 51, pp. 1-20. (1978).
8. H. Tributsch, "Do aerosol anomalies precede earthquake," Natur, Vol. 276, pp. 606-608 (1978).
9. K. Wadatasmi, "Statement of earthquake precursor," Tokyo :Tokyo Press 265 (1995).
10. R. Bushirk, C. Frohlich, V. Latha, "Unusual animal behaviors before earthquake: A review of possible sensory mechanisms," Rev Geophys and Space Phys., Vol. 19, pp. 247-270, (1981).
11. M. Ikeya, S. Takaki, D. Takashimizu, "Electric shocks for seismic animal anomalous behaviors(SAAB)" J. Phys. Soc Japan. Vol. 65, pp. 710 -712, (1996).
12. M. Ikeya, H. Matsumoto, Q. Hang, " Aligned silkworms as seismic animal anomalous behavior (SAAB) and electromagnetic model of a fault :A theory and laboratory experiment," Acta Seismologica Sinica, Vol. 11, No. 3, pp. 365-374 (1998).
13. K. Notsu, T. Aiko, H. Wakita, "Cosmic temperature change of well water related to volcanic activities of USA Volcano," J. Phys. Earth, Vol. 28, pp. 617-624, 1980.
14. M.A. Sadovsky, S.K. Nersesov, L.I. Nigmatullev, A.A. Latynina, A.N. Lukk, I.G. Semonov, V.I. Simbireae. "The processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asia," Tectonophysics, Vol. 14, pp. 295-307 (1972).
15. S. Nagai, K. Ikeya, H. Goto, K. Abe, S. Nagata, N. Oba. "Change of the ground water temperature and quality before or after the Izu-Oshima-Kinkai Earthquake 1978," Special Report of the Geological Survey of Japan, Vol. 7, pp. 87-118 (1979).



16. G. Igarashi, H. Wakita, "Groundwater radon anomalies associated with earthquakes," *Tectonophysics*, Vol. 180, pp. 237-254(1990).
17. Naoji Koizumi, Yuichi Kiltagawa, Kouhei Kazahaya, Masaaki Tokahashi, "Volcanic gas concentration and aquifer permeability," *Geophysics Research Letters*, Vol. 25, No. 12, PP. 2237-2240, June 15, (1998).
18. V. Mjachkin, G. Sobolev, N. Dolbikina, V. Morozow, V. Preobrozensky, " The study of variation in geophysical field near focal zones of Kamachatka." *Tectonophys*, Vol. 14, pp. 287-293 (1971).
19. G. Sobolev, "Application of electric method to the tentative short term forecast of Kamchaka Earthquakes." *Pur. Appl. Geophys*, Vol. 113, pp. 229-235 (1975).
20. V. Mjachkin, W. Brace, G. Sobolve, J. Diterich, "Two models for earthquake for Erunner," *Pure Appl. Geo Phys*, Vol. 113, pp. 169-180 (1975).
21. S.A. Fedotor, G.A. Sobolve, S.A. Boldyrev, A.A. Guseu, A.M. Kondratenka, O.V.Potapova, L.B. Slavina. " Long and short term earthquake prediction in Kamchatka," *Tectonophysics*. Vol. 37, pp. 305-321 (1977).
22. R.S. Coe, "Earthquake prediction programe in the people's Republic of China," *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 52, No. 12, pp. 940-943 (1971).
23. B. Raliegth, G. Bennet, H. Craig, T. Hanks, " Prediction of the Haicheng Earthquake," *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 58, pp. 236-272 (1977).
24. K. Koyama, Y. Honkura, "Observation of electric self potential at Nakaizu," *Bull. Earthquakes Res. Inst.*, Vol. 53, pp. 939-942 (1978).
25. P. Varotsos, K. Alexopoulos, " Physical properties of the variation of the electric field of the earth preceding Earthquake." *Tectonophysics*. Vol. 110, pp. 73-98 (1984).
26. K. Meyer, P. Varotsos, K. Alexopoulos, "Efficiency test of earthquake prediction around Thessaloniki, from Electrotelluric Precursors," *Tectonophysics*. Vol. 120, pp. 153-161(1985).
27. C. Thanassoulas, G. Tselentis, "Periodic variation in the earth's electric field as earthquake precursors: Results From Recents in Greec," *Tectonophysics*, Vol. 224, pp. 103-111, 1993.



28. P. Varotsos, K. Alexopoulos, M. Lazaridou, " Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals,II," *Tectonophysics*, Vol. 224, PP. 1-37, 1993.
29. Z.S. Jiang, Y.Q. Zhu, Q.L. Wang, S.X. Wang, B. Chen, " Dynamic pattern characteristics of fault deformation and gravity field in the development process of Yongdeng M=5.8 earthquake," *Acta seismologica sinca*. Vol. 11, pp. 313-320(1998).
30. K.S. Krain, *Introductory Nuclear Physics*. Wiley & Sons Inc. (1988).
31. D.E. Robely, "Engineer's guide to the elementary behavior of radon dugther," *Health Phys.*, Vol. 38, PP. 1173-1179 (1980).
32. A. Mogro-Campero, R.L. Fleicher, "Subterrestrial fluid convection: Ahypothesis for long-distance migration of radon within the earth," *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 34, pp. 321-325 (1997).
33. V.M. Chouby, R.C. Ramolla, K. Sharma, " Soil gas and indoor radon studies in Doon valley, India," *Nucl. Geophys.*, Vol. 8, pp. 49-54 (1994).
34. R.L. Fleischer, "Radon measurements by etched track detectors," *World Scientific Inc*, Edit by Durrani, S. A., Ilic, R., pp. 1-20 (1997).
35. M.J. Cutlot, "Radon progeny control in building," Ph.D. Disseretation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado(1973).
36. R.C. Ramolla, M. Singh, A.S. Sandahu, S. Singh, H.S. Virk, "The use of radon as an earthquake precursor," *Nucl. Geophy*. Vol. 4, pp. 275-287(1990).
37. W.E. Clements, W.H. Wilkeming, "Atmospheric pressure effect on radon-222 transport Across the Earth-Air Interface," *J. Geophys. Res.*, Vol. 79 pp. 1025(1974).
38. J.L. Pinault, J. Bauborn, "Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature data: A new Approach for radon concentration modeling," *J.Geophy.Res.*, Vol. 17. pp. 3157-3171 (1996).



39. M. Monnin, J.L. Seidel. "Radon and geophysics-recent advances." Nucl. Tracks Radiat. Meas., Vol. 9, pp. 375-382 (1991).
40. M. Al-Hilal, M. Mouty, "Radon Monitoring for Earthquake Prediction on Al-Ghab Fault of Syria." Nucl. Geophys., Vol. 8, pp. 291-299 (1994).
41. M. Singh, R.C. Ramolla, S. Singh, H.S. Virk. "The influence of meteorological on soil gas radon," J. Assoc. Explor. Geophys., Vol. 9, pp. 85-94 (1988).
42. H.A. Khan, "Radon:A friend or a foe?" Nucl. Tracks. Radiat. Meas, Vol. 19, No. 1-4, pp 353-362 (1991).
43. B. Singh, H.S. Virk. "Investigation of radon-222 in soil gas as an earthquake precursor," Nuclear Geophysics, Vol. 8, pp. 185-193(1994).