شرکت پیشگام تجهیز بنیان

نبض زمین در دست ماست...

پیش‌بینی زمین‌لرزه و پیش‌نشانگرها

WWW.PTBI.IR

`

پیش‌بینی زمین‌لرزه و پیش‌نشانگرها

اردیبهشت ۱۴۰۲

فهرست مطالب

مقدمه..... ۳

تاریخچه..... ۵

پیش نشانگرهای کوتاه مدت غیرمکانیکی..... ۹

مشکلات ذاتی پیش نشانگرهای کوتاه مدت..... ۹

آنومالی های کلان..... ۹

پیش نشانگرهای ژئوشیمیایی/هیدرولوژیکی..... ۹

تصاویر مادون قرمز ماهواره ای به عنوان دمای احتمالی سطح..... ۱۱

پیش نشانگرهای الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی..... ۱۱

پیش نشانگر های جریان تلوریک..... ۱۲

پیش نشانگرهای فرکانس فوق العاده پایین ۱۳

تشعشعات الکترومغناطیسی فرکانس بالا..... ۱۴

جفت شدگی یونسفر-اتمسفر-لیتوسفر..... ۱۴

مکانیزم احتمالی تشعشعات الکترومغناطیسی پیش لرزه ای..... ۱۷

جمع بندی و چشم انداز آینده..... ۲۰

فهرست اشکال

شکل ۱- پیش نشانگر تغییر شکل پوسته، مشاهده شده قبل از زمین لرزه ۱۹۴۴ تونانکای (۷,۹M)..... ۷
شکل ۲- غلظت گاز رادون، مشاهده شده از ژانویه ۱۹۸۴ تا فوریه ۱۹۹۶..... ۱۰
شکل ۳- داده های مربوط به غلظت گاز رادون، از مارچ ۱۹۷۷ تا فوریه ۲۰۱۲..... ۱۱
شکل ۴- تغییرات غیرعادی پتانسیل ژئوالکتریک در باند ULF..... ۱۳
شکل ۵- اهمیت آماری آنومالی یونسفری پیش لرزه ای..... ۱۵
شکل ۶- وابستگی فرکانس-زمان مربوط به شدت احتمالی برگرفته از داده میدان الکتریکی شبانه..... ۱۶
شکل ۷- پلات مربوط به TEC قائم برای هشت زمین لرزه..... ۱۷

مقدمه

پیش بینی زمین لرزه به فرآیند تعیین محل چشمه، بزرگا (M) و زمان رخداد با دقت مشخص قبل از وقوع لرزه اصلی گفته می‌شود. در این زمینه لغات پیش‌بینی و پیشگویی اغلب با تفاوت های ظریفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که لغت دوم ماهیت تصادفی بیشتری دارد. ما در این مقاله اغلب از واژه اول (پیش‌بینی) استفاده خواهیم کرد. پیش‌بینی زلزله بسته به مدت زمان مورد مطالعه به دسته های: طولانی مدت (۱۰ الی ۳۰ سال) ، میان مدت (۳ الی ۱۰ سال) و کوتاه مدت (کمتر از ۳ سال) طبقه بندی می‌شود. پیش نشانگرهای زلزله پدیده هایی هستند که قبل از وقوع زلزله رخ داده و پیش‌بینی زلزله بر اساس اطلاعات آنها صورت می پذیرد. این مقاله بر روی پیش نشانگرها به منظور پیش‌بینی کوتاه مدت زلزله متمرکز خواهد بود. در این مرحله باید وجود پیش نشانگرها را به عنوان یک حقیقت علمی پذیرفت و جزئیات بیشتر آنها را بطور کامل مورد مطالعه قرار داد.

در طول تاریخ حیات بشر پیش نشانگرهای مختلفی مورد توجه قرار گرفته اند. این موارد اغلب پیش نشانگرهایی روی حیوانات، گیاهان، ابرها و اصوات بوده اند. پیش نشانگرهایی که بدون نیاز به ابزارهای علمی قابل مشاهده هستند، پیش نشانگرهای ماکروسکوپی (کلان) نامیده می‌شوند.

پیش نشانگرهایی که به کمک ابزارهای علمی مورد مشاهده قرار می‌گیرند به دسته های طولانی مدت، میان مدت و کوتاه مدت تقسیم می شوند. پیش نشانگرهای بلند/میان مدت گسل های فعال هستند که به عنوان پیش نشانگرهای زمین شناسی عمل می‌کنند. حفاری گسل های فعال اطلاعاتی در مورد تاریخ و میزان لغرش های حاصل از زمین‌لرزه های بزرگ گذشته فراهم می‌کند. دیگر پیش نشانگرهای بلند/میان مدت شامل موارد زیر هستند:

۱- پیش نشانگرهای ژئودتیک: تغییر شکل زمین، تغییر سطح آب دریا، تغییرات شیب و کرنش.

۲- پیش نشانگرهای لرزه شناختی: فواصل رویدادهای لرزه ای، دوره های خاموشی، موج برشی تجزیه شده، تغییرات در میکرولرزه ها، سرعت امواج لرزه ای، مقادیر b، زلزله های سرشتی.

۳- تغییرات در مقاومت الکتریکی.

۴- پیش نشانگرهای هیدرولوژیکی و ژئوشیمیایی: تغییرات در سطح رادون، کربن دی اکسید و دیگر گازها، تغییر در سطح و دمای آبهای زیرزمینی.

برخی از این موارد (خصوصا موارد ۳ و ۴) به عنوان پیش نشانگرهای کوتاه مدت نیز عمل می کنند.

پیش نشانگرهای کوتاه مدت که مورد توجه اصلی این مقاله هستند اغلب ژئوشیمیایی/هیدرولوژیکی، الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی (EM) می باشند. این موارد شامل:

۱- تغییرات در میدان الکتریکی (جریان تلوریک)، میدان مغناطیسی و الکترومغناطیسی در فرکانس های متفاوت (DC تا VLF).

۲- تغییرات در خواص امواج الکترومغناطیسی با منشا انسانی در محدوده های VLF به VHF.

۳- یونسفر (تغییرات در پارامترهای foF2 و TEC).

۴- تغییرات دمای زمین.

این تغییرات توسط ابزارهای زمینی یا ماهواره ای مورد مطالعه قرار می گیرند.

دقت داریم که گاها تمایز بین پیش نشانگرها و عوامل محرک زلزله بسیار مشکل است. در صورتی که وضعیت پوسته بسیار بحرانی باشد، آشفتگی های کوچکی همانند عبور جریانات کم فشار مثل تایفون ها، سایکلون ها و طوفان می‌توانند منجر به وقوع زلزله گردند (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از عوامل محرک قابل توجه ساخت سدهای بزرگ است. در این رابطه سد کوینا در هند بیش از باقی موارد مورد مطالعه قرار گرفته است (گوپتا و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین تزریق آب به چاه های عمیق نیز از عوامل محرک زلزله می‌باشد. امروزه استخراج گاز شیل نیز منجر به زمین لرزه های القایی بسیاری می شود (لی و همکاران، ۲۰۱۷).

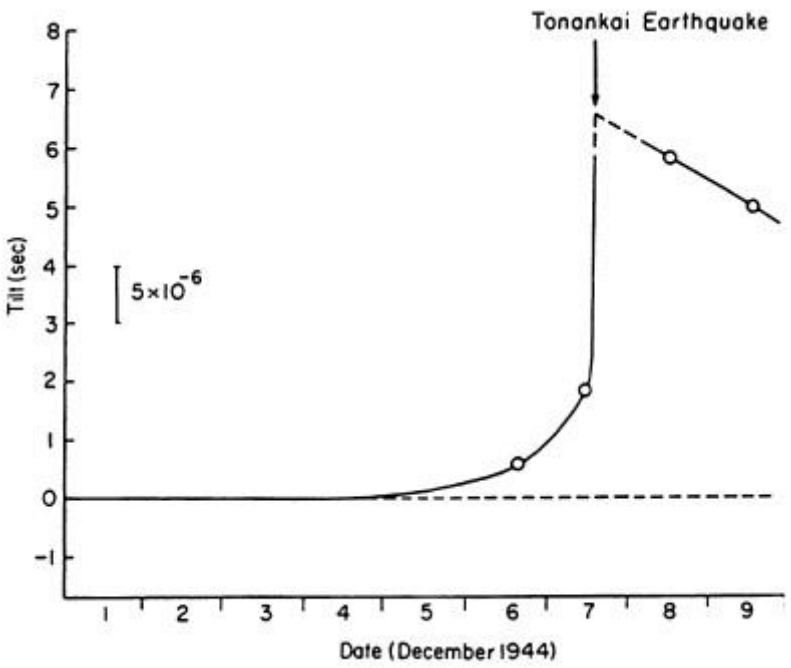
تاریخچه

گفته می شود که اولین پیشگویی بلند مدت زلزله به سال ۵۲۰ قبل از میلاد بازمی‌گردد. این پیشگویی بر اساس یک گسل سطحی مربوط به زلزله ای در ۷۵۹ قبل از میلاد انجام شده است. پیش نشانگرها از تاریخ ۳۷۳ قبل از میلاد در یونان ثبت شده اند. پس از آن، این اطلاعات در مناطق دیگری از دنیا نیز بصورت مستنداتی نگاه داشته شد. در سال های بعد حتی تعداد بیشتری از ناهنجاری کلان جمع آوری شد. امروزه این موارد شامل نویزهای رادیویی و تلویزیونی نیز هستند، نمونه این ناهنجاری ها در زلزله های ۱۹۹۵ کوبه با بزرگای ۷٫۳M، ۱۹۹۹ ازمیت با بزرگای ۷٫۴M و ۱۹۹۹ چی‌چی با بزرگای ۷٫۷M ثبت شده است (ایکیا، ۲۰۰۴). اگرچه آنومالی های کلان نقش مهمی در پیشبینی موفقیت آمیز زلزله ۱۹۷۵ های‌چنگ (M۷٫۵) داشتند، اما این آنومالی ها هنوز مورد مطالعه سیستماتیک و جدی قرار نگرفته اند.

پس از زلزله ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو (۸,۳M) تئوری بازگشت کشسان از طریق مطالعه داده های ژئودتیک مربوط به گسل ها توسعه یافت و بدین ترتیب زیربنای تئوری پیش بینی زلزله گذاشته شد. کشورهای شوروی سابق، ژاپن، چین و ایالات متحده آمریکا از دهه ۶۰ تا ۷۰ میلادی آغاز به پروژه های پیشبینی زلزله در مقیاس ملی کردند. این پروژه ها اغلب رویکردهای آماری برای پیش بینی های بلند/میان مدت داشتند، اما در این بین رویکرد های غیرآماری نیز برای پیش بینی های کوتاه مدت وجود داشت. در اوایل دهه ۷۰ میلادی مدل پخش اتساعی ارائه داده شد. این مدل از داده های میدانی و آزمایشگاهی بدست آمده از کشورهای مختلف بهره برد، بطور مثال مشاهده تغییر ۱۰ الی ۲۰ درصدی در نسبت Vp/Vs در شوروی و ایالات متحده، بالا آمدن پوسته در ژاپن، نشت رادون و تغییرات مقاومت الکتریکی و به همین ترتیب. تمامی پیش نشانگر های کوتاه و بلندمدت ذکر شده در جهت تایید مدل پخش اتساعی ظاهر شدند. پیشبینی معروف زلزله ۱۹۷۵ (۷,۳M) های چنگ نیز بر پایه تمامی این پیش نشانگر ها بود (ریلی، ۱۹۷۷). پیش نشانگرهای میان مدت در ماه ژوئن و پیش نشانگر های کوتاه مدت در ماه دسامبر ۱۹۷۴ مشاهده شدند، هشدار اضطراری در ظهر روز ۴ ام ماه فوریه (چند ساعت قبل از لرزه اصلی) برای تخلیه به عموم داده شد. این مورد و سایر پیش بینی های موفق در دهه های ۶۰ و ۷۰ میلادی موجب ایجاد خوش بینی بین کارشناسان شد.

هرچند که این خوش بینی دوام چندانی نداشت. اول، بدلیل آنکه مطالعات بعدی به کمک چشمه های کنترل شده (مک اویلی و جانسون، ۱۹۷۴) تغییرات قابل توجه در نسبت Vp/Vs را که مهمترین پیش‌زمینه مدل پخش اتساعی بود تایید نکرد. دوم، در زمین لرزه ۱۹۷۵ تانگشن (۷,۸M) بدلیل عدم وجود پیش لرزه هشدار اضطراری صادر نشد. این مساله موجب جان باختن بیش از ۱۰۰ هزار نفر گردید (چن و همکاران، ۱۹۸۸).

در واقع روش های لرزه شناسی و ژئودتیک سنتی توانایی پیش بینی کوتاه مدت هیچ زمین لرزه بزرگی (غیر از زلزله های‌شنگ) را نداشتند. برای هیچکدام از این زلزله ها هیچگونه پیش-لغزش، که مهمترین پیش نشانگر کوتاه مدت از نظر لرزه ای بود، وجود نداشت. اما استراتژی اصلی آژانس هواشناسی ژاپن برای پیش بینی کوتاه مدت زمین لرزه توکای همچنان ثبت پیش-لغزش ها بود، همانطور که در گزارش زمین لرزه تونانکای (۷,۹M) نیز آمده است (شکل ۱). پیش بینی زلزله توکای از اوایل دهه ۷۰ انجام شده بود (ایشیباشی، ۱۹۸۱). یک نمونه پیش بینی عمومی و ناموفق دیگر مورد پارکفیلد است. در این رابطه در سال ۱۹۸۵ هشدار داده شده بود که زمین لرزه ای به بزرگای ۶ ظرف پنج سال آینده بوقوع خواهد پیوست، یک هشدار ۷۲ ساعته نیز در سال ۱۹۹۲ صادر شد، اما این زمین لرزه ۱۲ سال بعد در سال ۲۰۰۴ بوقوع پیوست (باکون و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۱_ پیش نشانگر تغییر شکل پوسته، مشاهده شده قبل از زمین لرزه ۱۹۴۴ تونانکای (۷,۹M)، (موگی، ۱۹۸۵).

در حقیقت روش ها و پیش نشانگر های لرزه ای همچون، فواصل لرزه ای، الگوریتم M8، ZMAP، نقاط داغ و غیره پیش بینی های کوتاه مدت را مورد هدف قرار نمی‌دهند. اکتشافات جدید در لرزه شناسی مثل مدل های تنشگاه، زمین لرزه های آرام/خاموش و ترمور های غیرآتشفشانی فرکانس پایین کمک های شایانی به درک هرچه بهتر مکانیزم وقوع زلزله کرده اند، اما ارتباط آنها به پیش بینی های کوتاه مدت هنوز چندان روشن نیست. زمین لرزه های سرشتی شاید تنها مواردی باشند که می توان به کمک مانیتورینگ لرزه ای آنها را در زمان شبه-کوتاه مدت پیش بینی کرد، اما این زمین لرزه ها نادر هستند. در اواخر دهه ۷۰ میلادی نگاه کلی به مقوله پیش بینی زمین لرزه به طور کلی بدبینانه شد. این نگرش منفی تا به امروز ادامه داشته و واژه پیش بینی را تقریبا "ممنوع" کرده است.

اما باید به این موضوع اشاره کرد که تعداد زیادی از پیش نشانگر های غیرلرزه ای/ژئودتیک (غیرمکانیکی) نیز مشاهده شده است. در صدر این آنومالی های کلان، نشت گازهای رادون، کربن دی اکسید و دیگر گازها، همچنین تغییرات سطح آب و آنومالی های الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیس حضور دارند.

پیش بینی های کوتاه مدت احتمالا تنها پس از تغییر تمرکز مطالعات اصلی به سمت رویکردهای غیرمکانیکی ممکن خواهند شد، البته به استثنای برخی موارد محدود مثل تغییرشکل های پیش-لرزه ای که توسط GPS در کامچاتکا تشخیص داده شد (گردیف و همکاران، ۲۰۰۱). البته اخیرا به لطف گسترش هرچه بیشتر شبکه نظارت و توسعه ی تئوری پدیده بحرانی، پیش نشانگرهای فیزیکی نیز درحال گزارش هستند، بطور مثال: لیپیلو و همکاران، ۲۰۱۲ (پیش لرزه) سارلیس و همکاران، ۲۰۱۵ (تحلیل زمانی طبیعی)، نانجو و همکاران، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶ (تغییرات لرزه ای شامل مقدار b).

پیش نشانگرهای کوتاه مدت غیرمکانیکی

مشکلات ذاتی پیش نشانگرهای کوتاه مدت

بنظر می ر سد که پیش بینی زلزله به کمک پیش ن شانگرهای کوتاه مدت از طریق رویکرد مکانیکی شانس چندانی برای موفقیت نداشته باشد، البته به استثنای مواردی که پیش لرزه های واضحی وجود داشته باشند. چرا که لحظه وقوع تنش بحرانی را به سختی می توان با رصدهای لرزه ای و ژئودتیک مشاهده کرد. پیش ن شانگرهای غیرمکانیکی نیز از همان ساز و کاری ا ستفاده می کنند که در زمان تجمع تنش رخ می دهد، با این تفاوت که سطح تنش بحرانی در پیش نشانگرهای غیرمکانیکی اندکی کمتر از خود زمین لرزه است و زمانی که وضعیت به شرایط بحرانی می رسد، زلزله اندکی پس از تشخیص آنها بوقوع خواهد پیوست.

برای ارزیابی پیش ن شانگرها دو معیار وجود دارد. معیار اول میزان موفقیت پیش ن شانگر، که عبارت ا ست از نسبت پیش بینی های موفق به کل پیش بینی های صادر شده و معیار دوم، میزان هشدار، که عبارت ا ست از نسبت تعداد زلزله هایی که با موفقیت پیش بینی شده اند به تعداد کل زلزله های هدف. در استفاده از این نسبت ها برای ارزیابی باید شاخصه های موفقیت و شکست (یعنی مقدار خطای مجاز در تاریخ، مکان و بزرگای زلزله) به وضوح ذکر شده باشد.

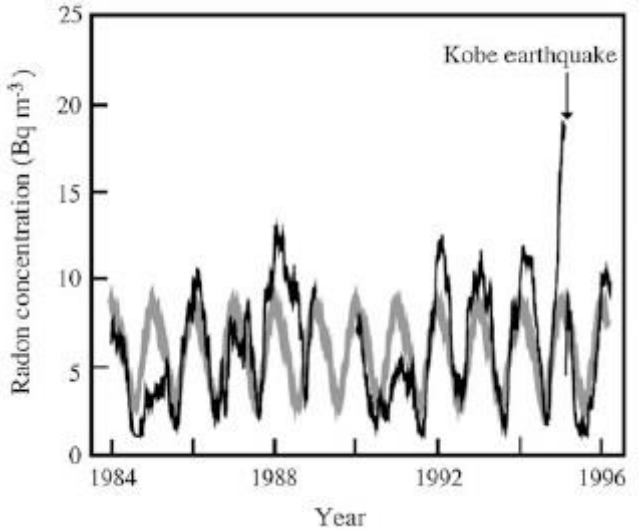
آنومالی های کلان

ماکرو آنومالی ها فراوان ه ستند. بهترین نمونه های آن پس از زلزله های شنگ، زمین لرزه های ۱۹۹۵ کوبه (۷,۵M)، ۱۹۹۹ ازمیت (۷,۴M)، ۱۹۹۹ چی‌چی (M۷,۷) و ۲۰۰۸ شوچوان (۸M) می باشد (شکل ۲). علت پیش نشانگرهای کلان مدرن ، مثل نویزهای رادیو تلویزیون و اختلال کارکرد وسائل الکتریکی، به احتمال زیاد به دلیل تشعشعات الکترومغناطیسی پیش لرزه ای می باشد. اخیرا، مارتیللی (۲۰۱۸) نشان داده است که پیش نشانگر های زلزله حتی در دوران قبل از میلاد مسیح نیز وجود داشته اند.

پیش نشانگرهای ژئوشیمیایی/هیدرولوژیکی

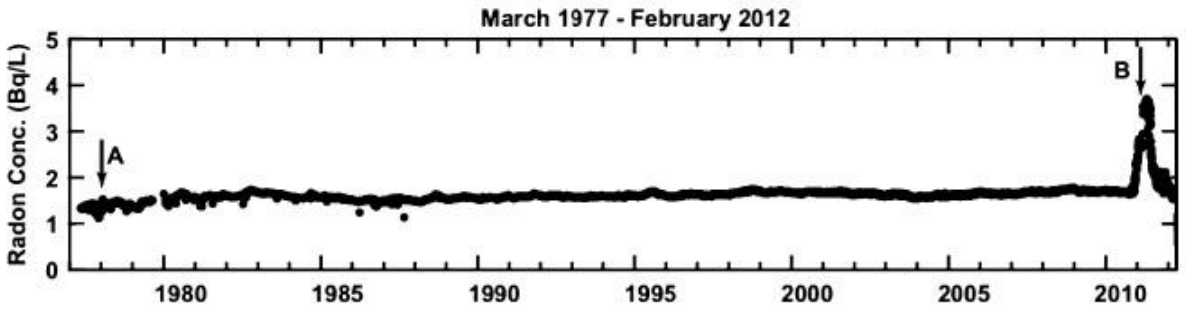
پیش ن شانگرهای ژئو شیمیایی/هیدرولوژیکی نیز متنوع ه ستند. نمونه های آن انت شار گاز رادون، کربن دی اکسید، هلیوم، H_2، و CH_4 هستند (توتر و بائربرون، ۱۹۹۹). از میان آنها انتشار گاز رادون بیش از باقی

موارد پایش شـده اسـت، بطور مثال زلزله های ۱۹۷۶ ازبکسـتان (۷,۱M)، ۱۹۸۵ مکزیک (۸,۱M) و زلزله ۱۹۹۵ کوبه (۷,۲M) در شکل ۲ نمایش داده شده است (یاسوکا و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۲_ غلظت گاز رادون، م شاهده شده از ژانویه ۱۹۸۴ تا فوریه ۱۹۹۶. تغییرات مینیمم روزانه با خط م شکی و تغییرات نرمال با خط خاک‌ستری نمایش داده شده ا ست (یا سوکا و همکاران، ۲۰۰۹). افزایش غلظت رادون قبل از زلزله کوبه بو ضوح قابل مشاهده است.

تغییرات سـطح آب های زیرزمینی نیز از پیش نشـانگرهای بالقوه اسـت. پیش نشـانگرهای ژئوشـیمیایی و هیدرولوژیکی اغلب در فواصـل زیاد (۱۰۰ کیلومتر و بیشـتر) از مرکز زلزله مشـاهده می شـوند. ظهور آنها احتمالا تو سط عوارض زمین شناختی مانند گ سل ها و تخلخل کنترل می شود. در مورد سطح آب و دما، تغییرات هم‌لرزی بسـیار بارزتر و رایج تر از تغییرات پیش لرزه ای هسـتند، که این مسـاله برخلاف پیش نشانگرهای الکترومغناطیسی است. در ماه مارچ سال ۲۰۱۱ زمین لرزه ساحل توهوکو (۹M) بوقوع پیوست. این زمین لرزه موجب تلفات سـنگین ناشـی از سـونامی و آسـیب به نیروگاه هسـته ای شـد. این زلزله پیش نشـانگرهای زیادی داشـت (ناگو و همکاران، ۲۰۱۴). اوریهارا و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند که پیش ن شانگر تغییر سطح آب، که برای یک چاه ۲۰۰۰ متری به میزان ۱۰ متر ر سیده بود، حدود سه ماه قبل از لرزش ا صلی رخ داده ا ست. علاوه بر این سونوموری و تاناکا (۲۰۱۴) خبر از غلظت های بالای گاز رادون در شبه جزیره ایزو دادند. این میزان تغییر برای اولین پس از ۳۵ سال ثبت داده مشاهده شده بود (شکل ۳).



شکل ۳_ داده های مربوط به غلظت گاز رادون، از مارچ ۱۹۷۷ تا فوریه ۲۰۱۲. A: زمان آغاز زلزله ۱۹۷۸ ایزو-اوشیما، B: زمان آغاز زلزله ۲۰۱۱ توهوکو.

تصاویر مادون قرمز ماهواره ای به عنوان دمای احتمالی سطح

تصاویر فروسرخ غیرعادی از مناطق لرزه ای به عنوان دمای احتمالی سطح زمین گزارش شده است. هرچند که معنای این آنومالی های ماهواره ای هنوز به طور کامل روشن نیست. بحث های زیادی پیرامون چیستی و چگونگی تشکیل این آنومالی ها در جریان است. تفسیر جایگزین دیگری که برای تصاویر ماهواره ای فروسرخ وجود دارد این است که این موارد آنومالی های دمایی نیستند. هنگامی که نقاط p به سطح زمین می رسند، آنها مجددا ترکیب شده و موجب انتشار پرتوهای فروسرخی می شوند که به لحاظ طیف سنجی قابل تشخیص هستند (فروند، ۲۰۰۹). اوزورنوف و همکاران تشعشعات خروجی با طول موج بالایی را بررسی کرده اند که قبل از زمین لرزه ۲۰۱۱ توکیو در تروپوسفر اندازه گیری شده بودند. آنها ادعا می کنند که در روز های ۲۱ تا ۲۴ فوریه و ۷ تا ۱۰ مارچ میدان های آنومالی OLR را در نواحی نزدیک به مرکز زمین لرزه و بر فراز گسل های اصلی با درجه اطمینان بالاتر از ۲ سیگما مشاهده کرده اند.

پیش نشانگرهای الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی

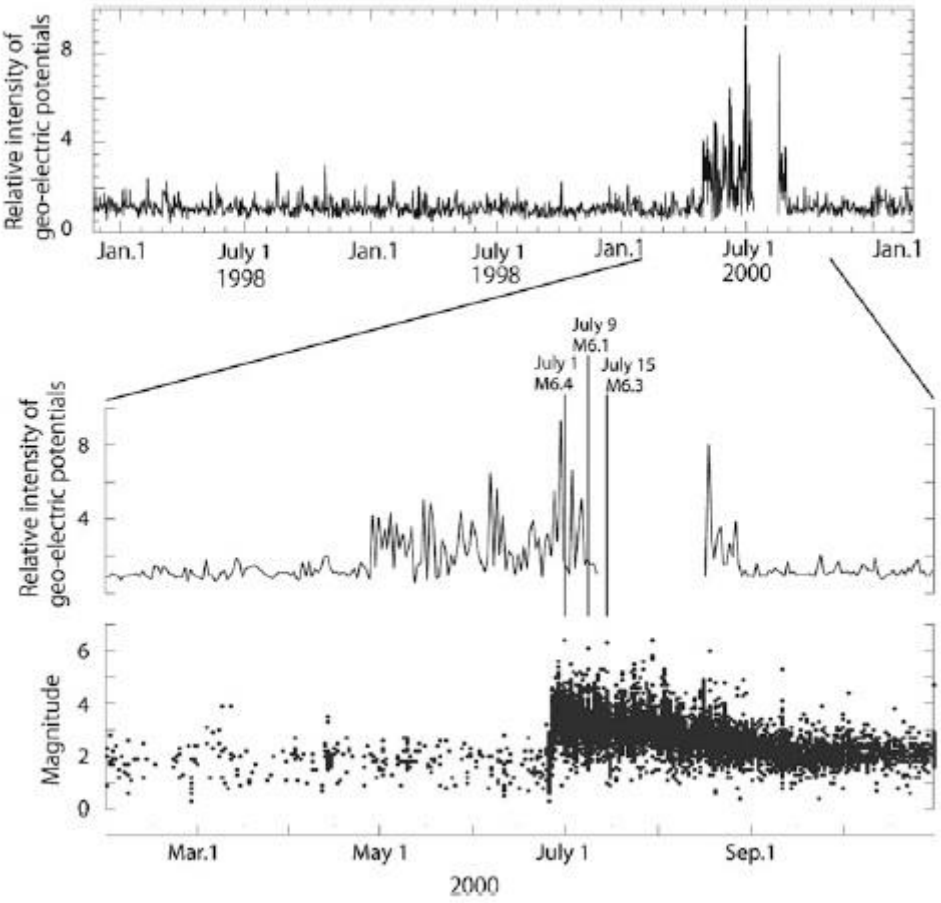
در دهه ۸۰ میلادی تحقیقات سیستماتیکی پیرامون پدیده های الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی مرتبط با زمین لرزه در نقاط مختلفی از جهان آغاز شد. این شاخه ی نسبتا جدید از علم امروزه Seismo-Electromagnetics نامیده میشود.

پیش نشانگر های جریان تلوریک

روش VAN از اوایل دهه ۸۰ میلادی در یونان توسعه داده شد. این روش به نام دانشمندانی که آن را بنا گذاشتند نام گذاری شده است (واروتسوس و همکاران، ۱۹۸۴). این روش تنها سیستمی بوده که در طول سه دهه برای پیش بینی های کوتاه مدت واقعی از آن استفاده شده است. معیار پیش بینی موفق برای زمین لرزه های با بزرگای بیشتر از ۵ یونان، که توسط این گروه ارائه شده بدین شرح است: کمتر از چند هفته در زمان، کمتر از ۰,۷ واحد در بزرگا و کمتر از ۱۰۰ کیلومتر در موقعیت مرکز زمین لرزه. سیگنال های الکتریکی لرزه ای (SES) تغییرات ژئوپتانسیل گذرایی هستند که قبل از وقوع زمین لرزه ها توسط دوقطبی های الکترود های دفن شده در سایت های مجزا و بطور پیوسته ثبت می شوند.

گروه VAN دو اکتشاف مهم داشت. مورد اول "انتخاب پذیری" است. انتخاب پذیری به این معناست که تنها برخی از سایت ها به SES حساس هستند، و یک سایت حساس نیز تنها به SES از یک محدوده کانونی مشخص حساس است. این اطلاعات به تخمین مرکز زلزله کمک می کند. به نظر می رسد که انتخاب پذیری از ناهمگونی ساختارهای الکتریکی زیرزمینی است، یعنی SES تنها از طریق کانال های زیرزمینی رسانا به سایت های حساس می رسد. مورد دوم، رابطه ون است. رابطه ون می‌گوید که فاصله کانونی (r)، بزرگای زمین لرزه (m) و اختلاف پتانسیل (v) برای دوقطبی (به طول L) از طریق رابطه $\log\left(\frac{\Delta V}{L} \times r\right) = aM + b$ برقرار است. در این فرمول a یک ثابت بین ۰,۳۴-۰,۳۷ و b ثابتی مربوط به سایت مورد مطالعه است. به محض آنکه موقعیت مرکز زلزله از داده های انتخاب پذیری تخمین زده شد،M قابل ارزیابی خواهد بود چرا که $\frac{\Delta V}{L}$ و r معلوم هستند. روش ون مناقشه برانگیز بوده اما تاکنون از تمامی نقد ها جان سالم بدر برده است.

در ژاپن از اواخر دهه ۸۰ میلادی پایش های VAN صورت گرفته است. علیرغم نویز بالای داده های DC، وجود SES هایی از نوع VAN تایید شده است. در سال ۲۰۰۰ یک دسته فعالیت لرزه ای با ۷۰۰۰ لرزه با بزرگای بالای ۳ و پنج لرزه با بزرگای بالای ۶ در محدوده جزیره ایزو اتفاق افتاد. برای این خوشه لرزه ها آشفتگی های الکتریکی و پیش لرزه ای قابل توجهی مشاهده شد (شکل ۴، اویدا و همکاران).



شکل ۴_ تغییرات غیرعادی پتانسیل ژئوالکتریک در باند ULF (۰,۰۱ هرتز) پیش از آغاز فعالیت خوشه زمین لرزه سال ۲۰۰۰، منطقه جزیره ایزو، ژاپن.

پیش نشانگرهای فرکانس فوق العاده پایین (ULF)

برای این مورد بهترین نمونه زمین لرزه ۱۹۸۹ لوما پریتا (۷,۱M) اســـت. در فاصـــله ۲ هفته مانده به زمین لرزه، مولفه افقی اندازه گیری شـــده در ســـایتی واقع در ۷ کیلومتری مرکز زمین لرزه آغاز به ثبت داده های غیرعادی کرد، همینطور یک افزایش ناگهانی در فاصله چند ساعت پیش از زمین لرزه ثبت شد. این آشفتگی به مدت ۳ ماه پس از زمین لرزه نیز ادامه پیدا کرد. نمونه این پدیده در دوره ر صد ۱۵ ساله م شاهده نـ شده بود. همچنین گزارشـــات مشـــاهده آنومالی های ژئومغناطیســـی ULF پیش لرزه ای برای زلزله های ۱۹۸۸ اسپیتاک (۶,۹M) و ۱۹۹۳ گوام (۸M) نیز موجود است. بحث هایی بر سر این مساله که ممکن است منشا این آنومالی ها مصـــنوعی یا مربوط به جریانات مغناطیســـی-تلوریک باشـــد وجود دارد (توماس و همکاران،

۲۰۰۹). در دهه گذشته برخی مطالعات آماری نیز در مورد آنومالی های ULF انجام شده است (هاتوری و همکاران، ۲۰۱۳؛ هان و همکاران، ۲۰۱۴). هان به وجود یک همبستگی بین پدیده لرزه-مغناطیسی ULF و لرزه خیزی های محلی در منطقه کاکیوکا ژاپن اشاره کرده است. نتایج آنها نشان داد که پیش بینی بر اساس داده های مغناطیسی ULF عملکرد بهتری نسبت به پیش بینی تصادفی داشته است.

تشعشعات الکترومغناطیسی فرکانس بالا

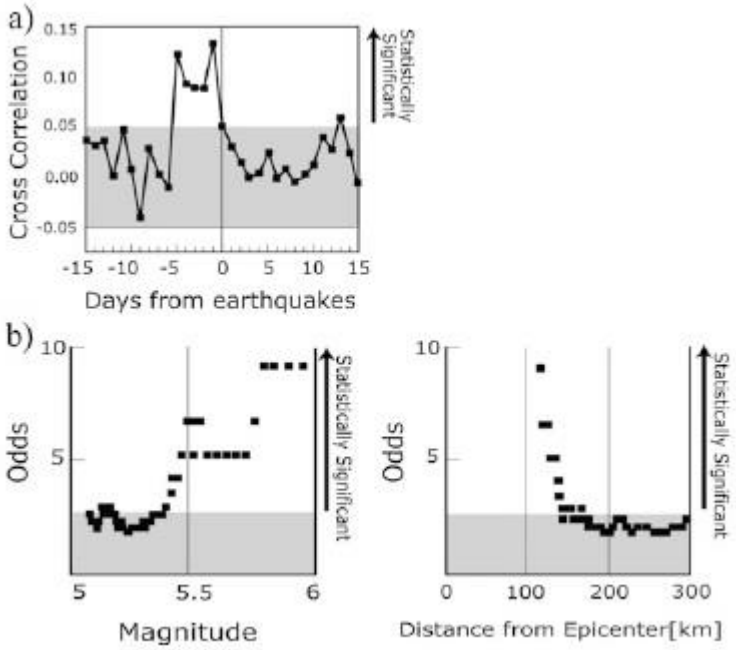
در سال ۱۹۸۲ یک آزمایش پیشگام جهت رصد تشعشعات الکترومغناطیس پیش لرزه ای در محدوده LF توسط گوخبرگ و همکاران انجام شد. در ژاپن آسادا و گروهش شکل موج مربوط به دو مولفه افقی امواج الکترومغناطیسی VLF، که در خلال آن جهت ظاهری پالس های VLF ارزیابی می‌شد را پایش کردند (آسادا و همکاران، ۲۰۰۱). آنها متوجه شدند که چند روز پیش از زمین‌لرزه کلاس ۵M و در شعاع ۱۰۰ کیلومتری ایستگاه آنها، پالس هایی با جهت ثابت دریافت شده بود که در واقع زلزله نیز در همان جهت رخ داده است.

وارویک و همکاران (۱۹۸۲) گزارشی از مشاهدات امواج رادیویی فرکانس بالا دادند که احتمالا به فعالیت های پیش نشانگری زلزله بزرگ شیلی در سال ۱۹۶۰ (۹,۵M) مرتبط بوده است. این احتمالا اولین گزارش از این نوع می‌باشد. یک تیم از دانشمندان در هوکایدو ژاپن دو دسته از پالس های جریانات ژئوالکتریکی (باند فرکانس بالا) را در ایستگاه اریمو ثبت کردند (انوموتو و همکاران، ۲۰۰۶). مورد اول بین سال های ۲۰۰۱-۲۰۰۰ قبل و در هنگام فعالیت کوه آتشفشانی اوسو (۲۰۰ کیلومتر دورتر) و مورد دوم در سال ۲۰۰۳، یک ماه پیش از زلزله توکاچی-اوکی (۸M) در فاصله ۸۰ کیلومتری آغاز شد. این دو مورد تنها آنومالی های ثبت شده در یک دوره ۱۰ ساله بودند.

جفت شدگی یونسفر-اتمسفر-لیتوسفر

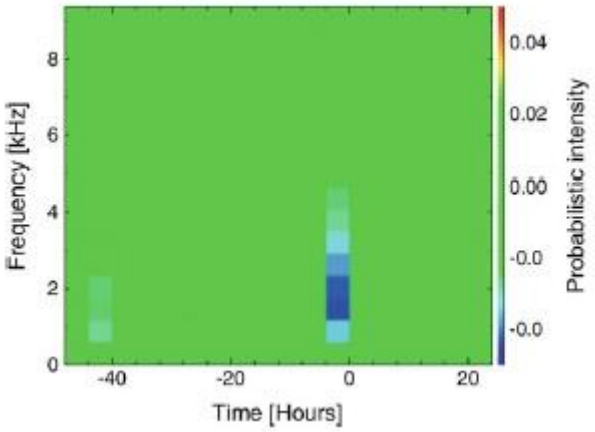
آنومالی های زیر یونسفری پیش از زلزله های بزرگ با استفاده از پایش امواج VLF در محدوده ۱۰-۲۰ کیلوهرتز گزارش شده اند (مولچانو و هایاکاوا، ۱۹۸۸). هرچند که کلیلورد و همکارانش به نتیجه مشابهی دست نیافتند. یک کاهش در چگالی الکترونی یونسفر به فاصله ۵ روز از زمین لرزه با بزرگای بالای ۵ در تایوان ثبت شد. این داده برداری از طریق اندازه گیری فرکانس بحرانی پلاسما (foF2) با استفاده از یونوسوند انجام شده است (شکل ۵). فوجیوارا و همکارانش آنومالی های اتمسفری را به فاصله ۵ روز از زمین

لرزه های با بزرگی بالای ۴,۸M یافتند که موجب آشفتگی هایی در موج FM رادیو شده بود. در سال ۲۰۱۰ موریا و همکارانش این مطالعه را بهبود داده و روابط آماری بین مدت زمان کل آشـــفتگی دریافتی و بزرگای زلزله را بدست آوردند. مفهوم جفت شدگی یونسفر-اتمسفر-لیتوسفر که از این مطالعات نشات میگیرد امروزه به یکی از مهمترین بحث ها در زمینه مطالعات پیش نشـــانگرها تبدیل شـــده اســـت، چرا که باید عامل و مکانیزمی در لیتوسفر وجود داشته باشد که انرژی را به ارتفاعات بالای اتمسفری برساند.



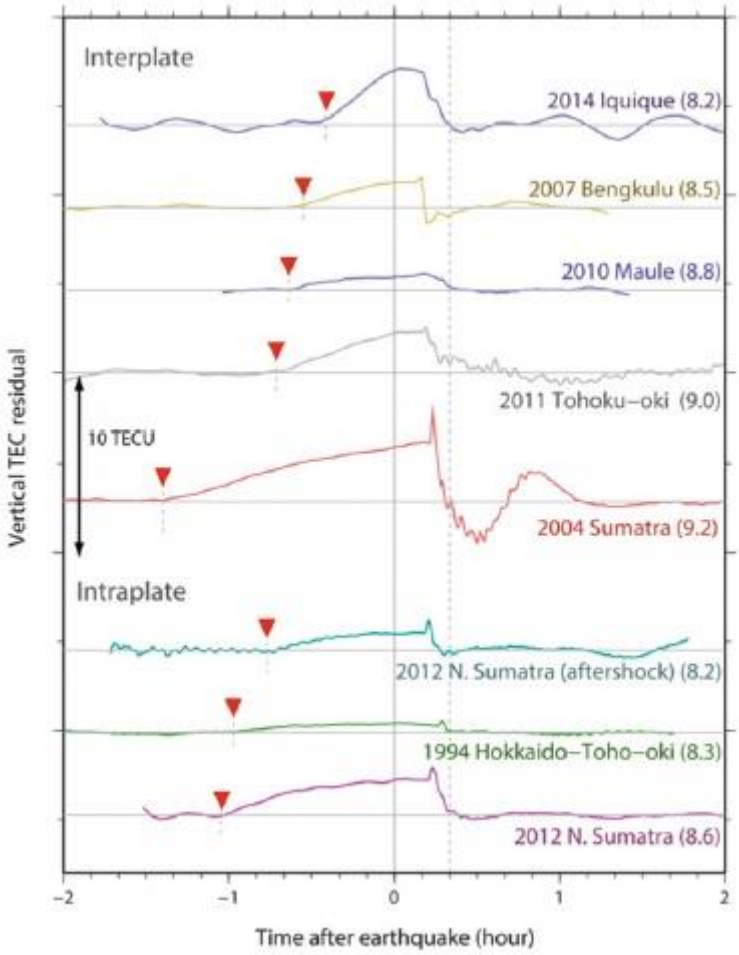
شکل ۵_ اهمیت آماری آنومالی یونسفری پیش لرزه ای (لیو و همکاران، ۲۰۰۶). a) ضریب همبستگی متقابل بین زمینلرزه ها و آنومالی های با تاخیر زمانی. b) احتمال وقوع زمین لرزه های ســطحی با آنومالی یونســفری پیش لرزه ای در برابر بزرگا (تصویر چپ) و فاصله از مرکز زلزله (تصویر راست).

در زمینه پیش بینی زلزله از فضا، برنامه فضایی کشور فرانسه آغاز یک دوران مهم بود. دولت فرانسه در سال ۲۰۰۴ ماهواره DEMETER را با هدف رصد تشعشعات الکترومغناطیسی مربوط به نواحی زمین لرزه در مدار قرار داد. بسیاری از ماهواره ها پارامترهای مختلف پلا سما مثل چگالی الکترون، دما، امواج الکترومغناطیسی باند UHF-HF و غیره را اندازه گیری کردند. در نتیجه این آنالیزها، پیشنهاد شد که به لحاظ آماری مهمترین پیش نشانگر یک کاهش شبانه در شدت میدان الکتریکی VLF است که به نظر می رسد مربوط به نوسانات ناحیه Dدقیقا قبل از زمین لرزه بوده است (شکل ۶).



شکل ۶_ وابستگی فرکانس-زمان مربوط به شدت احتمالی برگرفته از داده میدان الکتریکی شبانه در فاصله ۴۴۰ کیلومتری مرکز زمین لرزه هایی با بزرگای بیشتر از ۵M.

همانطور که ا شاره شد گزارش های زیادی مبنی بر تغییرات یونسفر پیش از زمین لرزه وجود دارد. در زلزله ۲۰۱۱ توهوکو (۹M) یافته های مهمی گزارش شده است. مقدار چگالی الکترون یونسفر (TEC) از حدود ۴۰ دقیقه پیش از لرزه اصلی افزایش نسبی داشته است (هکی، ۲۰۱۱). اگرچه مقدار TEC بطور واضحی افزایش پیدا کرده بود، اما این پدیده از نظر کاموگاوا و کاکینامی یک تغییر م صنوعی بود (۲۰۱۳). در ابتدا هکی ادعا کرده بود که مقدار TEC افزایش پیدا می کند اما سپس از عبارت "منحنی TEC قبل از زلزله کلاس 8M خم می گردد" استفاده کرده است. اکنون کاموگاوا نیز با این عبارت موافق است. هکی و همکارانش اکنون تایید می کنند که این اتفاق بلافاصله قبل از تمامی هشت زمین لرزه با بزرگای بیشتر از ۸,۲ اتفاق افتاده است. البته باید دقت داشت که تغییرات یونسفری مشابه زیادی هستند که پس از آنها زمین لرزه ای رخ نمی دهد. مطالعات بعدی آنها بوسیله روش توموگرافی ۳ بعدی یونسفری نیز وجود این پدیده را پیش از زلزله های بزرگ تایید می کند (هکی و همکاران، ۲۰۱۶). درحال حاضر مطالعات تئوری در این زمینه نیز بسیار فعال است (بطور مثال کلی و همکاران، ۲۰۱۷)(شکل ۷).



شکل ۷_ پلات مربوط به TEC قائم برای هشت زمین لرزه مقایسه شده است. بزرگای گشتاوری در پرانتز نمایش داده شده است. مثلث های قرمز زمان های شکست مثبت را نمایش می دهند (هکی و انوموتو، ۲۰۱۵).

مکانیزم احتمالی تشعشعات الکترومغناطیسی پیش لرزه ای

این پرسش اغلب مطرح می شود که چرا سیگنال های الکترومغناطیسی، مثل SES، تنها بصورت پیش‌لرزه ای و نه هم‌لرزه ای ظاهر می شوند. بطور کلی این نکته جامعه علمی را در خصوص پیش نشانگرهای الکترومغناطیسی مورد تردید قرار داده است. درواقع سیگنال های هم‌لرزه ای همواره بطور روتین مشاهده می‌شوند اما به عنوان پیش نشانگر چندان مفید نیستند. علاوه بر این، تمامی سیگنال های الکترومغناطیسی هم‌لرزه که تا به امروز ثبت شده اند در واقع به هنگام زمان رسید موج های لرزه ای اتفاق افتاده اند، بنابراین این سیگنال ها هم‌لرزه ی واقعی نیستند. این حقیقت که تابحال سیگنال های هم لرزه ی واقعی مشاهده

نشده اند ممکن است سرنخ مهمی در اکتشاف مکانیزم فیزیکی سیگنال های الکترومناطیسی و همینطور خود زمین لرزه باشد. در واقع فرآیند آهسته ی تجمع تنش های پیش لرزه ای و آزاد شدن ناگهانی تنش به هنگام وقوع زلزله به لحاظ فیزیکی دو پدیده بسیار متفاوت هستند و دلیل متقاعدکننده ای وجود ندارد که چرا این دو پدیده سیگنال های الکترومغناطیسی مشابهی ایجاد می کنند.

این مکانیزم شکل گیری برای فرکانس های مختلف متفاوت است. دلیل آن ممکن است تاثیرات Electro kinetics و/یا تاثیر جریان ناشی از فشار (PSC) ، تاثیرات پیزوالکتریک و تشعشعات Exo-Electron برای سیگنال های با فرکانس بالاتر باشد. مکانیزم P-hole نیز گزارش شده است.

مکانیزم PSC توسط واروتسوس و آلکسوپودوس پیشنهاد شده است. ناخالصی ها و فضاهای خالی دوقطبی های محلی ای را تشکیل می دهند که جهت گیری تصادفی دارند. این دوقطبی ها جریانات الکتریکی را ایجاد می کنند. مدل PSC از نظر توضیح فرآیند ایجاد جریان به هنگام تجمع تدریجی تنش بدون نیاز به تغییر ناگهانی عملکرد یکتایی دارد. فروند و همکارانش درحال ارائه مکانیزم متفاوتی برای سیگنال های الکتریکی ULF هستند (فروند و همکاران، ۲۰۰۶). آنها در آزمایشگاه متوجه شده اند هنگامی که بلوکی از سنگ های آذرین بصورت محلی تحت تنش قرار بگیرد، سنگ بدون میدان الکتریکی خارجی به باتری تبدیل می‌شود. در این حالت انتقال دهنده های بار الکتریکی p-hole های نیمه رسانا هستند. آنها تصاویر ماهواره ای مربوط به آنومالی های فروسرخ پیش لرزه ای را به ترکیب مجدد دو انتقال دهنده بار P-hole در نزدیکی سطح زمین نسبت می دهند.

پدیده های بحرانی

زمین لرزه ممکن است در فیزیک آماری بصورت یک پدیده بحرانی (Critical Phenomenon) تعریف شود (باک و تنگ، ۱۹۸۹). این بدین معناست که پیش بینی کوتاه مدت زلزله به معنای تعریف رویکرد برای "وضع بحرانی" است. هرچند که این امر مشکل است، اما اخیرا نشان داده شده است که با تحلیل زمانی داده های لرزه خیزی در یک حوزه زمانی جدید به نام "زمان طبیعی" رویکرد وضعیت بحرانی بوضوح قابل تعریف است (سارلیس و همکاران، ۲۰۰۸). بدین ترتیب بنظر می رسد که آنها موفق شدند تا زمان پیش بینی در روش VAN را به چند روز کاهش دهند (اویدا و کاموگاوا، ۲۰۰۸). ما فکر می کنیم که داده های لرزه ای به عنوان پیش نشانگر کوتاه مدت در ترکیب با داده های SES می توانند نقش مهمی را ایفا کنند.

هرچند که با توجه به پیشـــرفت های اخیر تئوری بحرانی داده های لرزه ای برای پیش بینی کوتاه مدت به تنهایی نیز می توانند مفید باشند (سارلیس و همکاران، ۲۰۱۳).

جمع بندی و چشم انداز آینده

اغلب پیش نشانگرهایی که در این مقاله به آنها اشاره شد از نوع احتمالاتی هستند و تاکنون تنها پس از لرزه اصلی ثبت یا شناسایی شده اند. این پیش نشانگرها (بغیر از SES مربوط به روش VAN) قیدهای محدودی در مورد کانون زمین لرزه و بزرگای آن ارائه داده اند. تحقیقات بسیار بیشتری نیاز است تا این پیش نشانگرها به لحاظ عملی سودمند باشند.

۱- برخی از پیش نشانگرهای کوتاه مدت آنومالی کلان واقعی هستند. درحال حاضر تحقیقات علمی پیرامون آنها اندک است.
۲- پیش نشانگرهای لرزه ای و ژئودتیک می توانند برای پیش بینی های بلند و میان مدت مفید باشند.
۳- فعالیت های پیش لرزه ای می توانند برای پیش بینی کوتاه مدت مفید باشند.
۴- پیش نشانگرهای غیرمکانیکی مثل برخی پیش نشانگرهای ژئوشیمیایی، هیدرولوژیکی و الکترومغناطیسی برای پیش بینی کوتاه مدت مناسب هستند. برای پیش بینی کوتاه مدت عملی تحقیقات بیشتری باید صورت بگیرد.

منابع

Asada T, Baba H, Kawazoe K, SugiuraM(2001) An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes. Earth Planets Space 53:55–62

Bakun WH, Aagaard B, Dost B, Ellsworth WL, Hardebeck JL, Harris RA, Ji C, Johnston MJS, Langbein J, Lienkaemper JJ, Michael AJ, Murray JR, Nadeau RM, Reasenberg PA, Reichle MS, Roeloffs EA, Shakal A, Simpson RW, Waldhauser F (2005) Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. Nature 437:969–974

Bak P, Tang C (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. J Geophys Res 94:15635–15637

Chen Y, Tsoi K, Chen F, Gao Z, Zou Q, Chen Z (1988) The great Tangshan earthquake of 1976., 153pp. Pergamon, Tarrytown

Freund F (2009) Stress-activated positive hole charge carriers in rocks and the generation of preearthquake signals, In: Hayakaw M (ed) Electromagnetic phenomena associated with earthquakes. pp 41–96. ISBN: 978-81-7895-297-0

Gupta H, Encyclopedia of solid earth Geophysics (2021), Springer

Gupta H, Shashidhar D, Mallika K, Purnachandra Rao N, Srinagesh D, Satyanarayana HVS, Saha S, Naik RTB (2011) Short term earthquake forecasts at Koyna, India. J Geol Soc India 77:5–11. https://doi.org/10.1007/s12594-011-0001-z

Gordeev E, Gusev A, Levin V, Bakhtiarov V, Pavlov M, Chevrov V, Kasahara M (2001) Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data.Geophys J Int 147:189–198

Gotoh K, Akinaga Y, Tanaka H (2002) Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan. Proc Natl Acad Sci USA 99:7352–7355

Gokhberg MB, Morgounov VA, Yoshino T, Tomizawa I (1982) Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan. J Geophys Res 87(B9):7824–7828

Hattori K, Han P, Yoshino C, Febriani F, Yamaguchi H, Chen CH (2013) Investigation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kanto, Japan during 2000–2010: case studies and statistical studies. Surv Geophys. https://doi.org/10.1007/s10712-012-9215-x

Han P, Hattori K, Zhuang J, Chen CH, Liu JY, Yoshida S (2017) Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram. Geophys J Int 208(1):482–490. https://doi.org/10.1093/gji/ggw404

Heki K (2011) Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Geophys Res Lett 38:L17312. https://doi.org/10.1029/2011GL047908

Ishibashi K (1981) Specification of a soon-to-occur seismic faulting in the Tokai district, central Japan, based upon seismotectonics. In: Simpson DW, Richards PG (eds) Earthquake prediction: an international review, Maurice Ewing series, vol 4. AGU, Washington, DC, pp 297–332

Ikeya M (2004) Earthquakes and animals: from folk legends to science. World Scientific Publications Company Inc. ISBN-13: 978-9812385918

Liu CC, Linde AT, Sacks IS (2009) Slow earthquakes triggered by typhoons. Nature 459:833–836

Lei X, Huang D, Su J, Jiang G, Wang X, Wang H, Guo X, Fu H (2017) Sci Rep 7:7971. https://doi.org/10.1038/s41598-017-08557-y

Lippiello E, Marzocchi W, Arcangelis L, Godano C (2012) Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes. Sci Rep 2(846). https://doi.org/10.1038/srep00846

McEvilly TV, Johnson LR (1974) Stability of P and S velocities from central California quarry blasts. Bull Seismol Soc Am 64:342–353

Mogi K (1985) Temporal variation of crustal deformation during the days preceding a thrust-type great earthquake – the 1944 Tonankai earthquake of magnitude 8.1, Japan. Pageoph 122:765–780

Martilelli G (2018) Contribution to a history of earthquake prediction research. Geophys Monogr 234:67–76. Wiley

Molchanov OA, Hayakawa M (1998) Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes. J Geophys Res 100:1691–1712

Nanjo KZ, Hirata N, Obara K, Kasahara K (2012) Decade- scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes. Geophys Res Lett 39:L20304. https://doi.org/10.1029/2012GL052997

Nagao T, Orihara Y, Kamogawa M (2014) Precursory phenomena possibly related to the 2011M9.0 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. J Disaster R 9(3):303–310

Orihara Y, Kamogawa M, Nagao T (2014) Preseismic changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku Earthquake. Sci Rep 4(6907):1–6. https://doi.org/10.1038/ srep06907

Ouzounov D, Pulinets S, Romanov A, Romanov A, Tsybulya K, Davidenko D, Kafatos M, Taylor P (2011) Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrumentspace-borne and ground observations: preliminary results. Earthq Sci24:557. https://doi.org/10.1007/s11589-011-0817-z

Raleigh B, Benett D, Craig H, Hanks T, Molnar P, Nur A, Savage J, Scholz C, Turner R,Wu F (1977) Prediction of haisheng earthquake.Eos 58(5):2

Sholtz C, Sykes LR, Aggarwel YP (1973) Earthquake prediction: a physical basis. Science 181:803–810

Sarlis NV, Skordas S, Varotsos PA, Nagao T, Kamogawa M, Uyeda S (2015) Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations. Proc Natl Acad Sci 112(4):986–989. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1422893112

Toutain JP, Baurbron JC (1999) Gas geochemistry and seismotectonics: a review. Tectonophysics 304:1–27

Tsunomori F, Tanaka H (2014) Anomalous change of groundwater radon concentration monitored at Nakaizu well in 2011. Radiat Meas60:35–41. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.11.006

Thomas JN, Love JJ, Johnston MJS, Yumoto K (2009) On the reported magnetic precursor of the 1993 Guam earthquake. Geophys Res Lett 36:L16301. https://doi.org/10.1029/2009GL039020

Uyeda S, Hayakawa M, Nagao T, Molchanov O, Hattori K, Orihara Y

Varotsos P, Alexopoulos K (1984a) Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, Tectonophysics 110:73–98

Warwick JW, Stoker C, Meyer TR (1982) Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960. J Geophys Res 87:2851–2859

Yasuoka Y, Kawada Y, Nagahama H, Omori Y, Ishikawa T, Tokonami S, Shinogi M (2009) Preseismic changes in atmospheric radon concentration and crustal strain. Phys Chem Earth 34:431–434

,

آدرس: خیابان کارگر شمالی، بعد از گمنام، بین خیابان ۵ و ۶، پلاک ۱۸۶۷، واحد۵ کدپستی: ۱۴۳۹۶۳۳۱۶۸
تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۳۴۹۵۴
نمابر: ۰۲۱-۸۸۶۳۸۴۳۵
تارنما: www.ptbi.ir
رایانامه: info@ptbi.ir