

معرفی شبکه اندازه‌گیری پیش‌نشانگرهای الکتریکی زمین‌لرزه‌ها به روش VAN در شمال غرب ایران

بهزاد زمانی قره‌چمنی^{۱*}، حامد حمیدی هریس^۲ و جمال بروستانی^۳

۱. استادیار، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه تبریز، ایران

(دریافت: ۹۴/۳/۹، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱)

چکیده

ایران کشوری است که در قسمت میانی سیستم کوهزایی آلپ-همالیا قرار دارد و دارای وضعیت زلزله‌خیزی شدیدی است. به دلیل خطری که زمین‌لرزه‌ها دارند، تحقیقات در زمینه پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه تداوم دارد. یکی از موفق‌ترین پیش‌نشانگرها، پیش‌نشانگرهای سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای است. سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای (SES) سیگنال‌های الکتریکی فرکانس پایین هستند که برای اولین بار در یونان (توسط گروه VAN) و در ژاپن توسط اویدا در سال ۲۰۰۰ برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها ثبت شده است. این سیگنال‌ها اکنون در شمال غرب ایران نیز برای اولین بار در حال ثبت هستند (از اوایل سال ۱۳۹۳). بین سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای (SES) VAN و پارامترهای زمین‌لرزه وابستگی‌هایی جهت ثبت بزرگی، زمان و مکان وجود دارد. در این پروژه ما پنج ایستگاه VAN در شمال غرب ایران نصب و داده‌هایی از مارس ۲۰۱۴ ثبت کرده‌ایم که چهار سیگنال را تاکنون نشان داده‌اند. این سیگنال‌ها و پارامترهای زمین‌لرزه‌ها به سازمان مدیریت بحران استان آذربایجان شرقی قبل از رویداد آن‌ها گزارش شده است و این زمین‌لرزه‌ها به وسیله روش VAN با موفقیت پیش‌بینی شده‌اند که جزئیات آن‌ها در این تحقیق شرح داده شده است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه‌های حساس، پیش‌بینی زلزله، سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای (SES)، شمال غرب ایران، روش VAN.

۱. مقدمه

۱۸ ایستگاه حساس به SES را در سرتاسر یونان راه‌اندازی و ۹ زمین‌لرزه از ۱۲ زمین‌لرزه روی داده با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر (به‌عنوان مثال زمین‌لرزه ۱۹۸۷/۰۲/۲۶ با بزرگی $M=6/6$) را با موفقیت پیش‌بینی کردند (واروتسوس و همکاران، ۱۹۹۳). با اینکه بعضی از محققان در اوایل، پیش‌بینی‌های گروه VAN را به شانس نسبت دادند (مولارجیا و گاسپرینی، ۱۹۹۲) ولی وجود سیگنال‌های الکتریکی (SES) پیش از زلزله، امکان دریافت این سیگنال‌ها و خواص فیزیکی این سیگنال‌ها را دانشمندان سراسر دنیا تأیید کرده‌اند (شیرمن و همکاران، ۱۹۹۳؛ ناگاو و همکاران، ۱۹۹۶؛ اویدا و همکاران، ۲۰۰۹؛ چیمبل و همکاران، ۲۰۱۰؛

یکی از موفق‌ترین پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه که مورد استقبال جهانی نیز واقع شده است، استفاده از پیش‌نشانگرهای الکتریکی لرزه‌ای (SES) معروف به روش VAN است. این روش از سال ۱۹۸۱ بعد از زمین‌لرزه مخرب آتن در یونان برای پیش‌بینی زلزله‌های محلی توسط سه دانشمند با نام‌های Nomicos، Varotsos، Alexopoulos ابداع و استفاده شده است که به افتخار این دانشمندان، این روش VAN نام‌گذاری شده است. دقت پیش‌بینی این روش ۱۰۰ کیلومتر در تعیین رومرکز زلزله، ۰/۷ واحد در بزرگی زمین‌لرزه و ۱ روز در زمان رویداد زمین‌لرزه است. گروه VAN در مدت هشت سال شبکه‌ای متشکل از

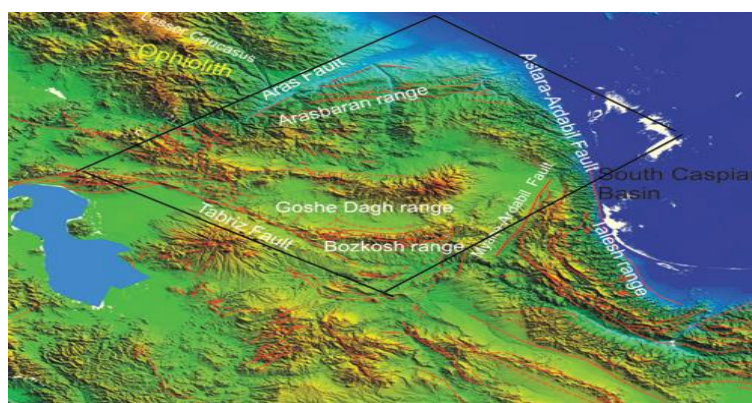
پیش‌نشانگرهای الکتریکی در این منطقه می‌تواند بسیار مفید باشد. در راستای این هدف مطالعاتی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه در شمال‌غرب ایران به خصوص با تأکید بر زمین‌لرزه‌های گسل تبریز به روش پیش‌نشانگرهای الکتریکی لرزه‌ای (روش VAN) در حال اجراست که در ادامه موفقیت‌های به‌دست آمده در این خصوص تشریح شده است.

۲. تکتونیک منطقه مورد مطالعه

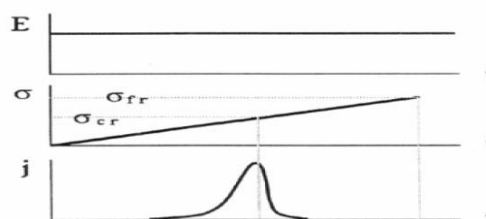
شمال‌غرب ایران مانند سایر نقاط ایران تحت تأثیر همگرایی صفحه عربی و اوراسیاست. مطالعات لرزه‌خیزی ژئودزی در این منطقه براساس اندازه‌گیری‌های GPS و محاسبه گشتاور لرزه‌ای، کوتاه‌شدگی را نشان می‌دهند. مهم‌ترین گسل‌های تأثیرگذار در تکتونیک آذربایجان چهار گسل امتدادلغز اصلی است. این چهار مرز شامل گسل ارس در شمال، گسل تبریز در باختر و سامانه گسلی تالش و آستارا در مرز خاوری و همچنین گسل میانه - اردبیل در مرز جنوب خاوری هستند. این چهار خطواره، محدوده‌ای لوزی شکل به وجود آورده‌اند که فلات آذربایجان در آن قرار گرفته است (زمانی، ۱۳۹۲).

هانگ، (۲۰۱۱) و در بعضی کشورها این سیگنال‌ها با موفقیت دریافت شده است (گازمن وارگاس و همکاران، ۲۰۰۹؛ تلسکا و همکاران، ۲۰۰۵؛ کولانژیلو و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج تحقیقات گروه VAN نشان داده است که نرخ موفقیت این روش برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر، بیش از ۷۰ درصد است (مشین چی اصل و صفری، ۱۳۸۶؛ واروستوز، ۲۰۱۳). گروه ون به افتخار ابداع این روش موفق توانسته است جوایز جهانی ارزشمندی از جمله جایزه بین‌المللی Onassis را در سال ۱۹۹۵ دریافت کند.

یکی از خطرناک‌ترین مناطق از لحاظ زمین‌لرزه‌خیزی در کشور ایران، منطقه شمال‌غرب ایران است که به لحاظ قرارگیری گسل‌های فعال و خطرناک متعدد، تاریخچه لرزه‌خیزی گسترده با زلزله‌های مخرب بسیار دارد و از گذشته تا به حال خسارت‌های جبران‌ناپذیری را در این زمینه به خود دیده است. بیشتر گسل‌های این منطقه دارای دوره بازگشت چندین‌ساله هستند و بعضی از این گسل‌ها دوره بازگشت خود را سپری کرده‌اند و از لحاظ لرزه‌ای در شرایط بحرانی قرار دارند (میسون و همکاران، ۲۰۰۶). به همین دلیل بررسی امکان هشدار زمین‌لرزه پیش از وقوع به وسیله



شکل ۱. فلات آذربایجان که توسط گسل‌های تبریز، ارس، آستارا-اردبیل و گسل میانه-اردبیل احاطه شده است.



شکل ۲. نمودارهای میدان الکتریکی خارجی، استرس و جریان گذرای جسم جامد تحت استرس بر حسب زمان (اوتادا، ۱۹۹۳)

۳. پیش‌نشانگرهای الکتریکی

مطالعات نقطه ترمودینامیک جامدات به این نتیجه می‌انجامد که به محض ایجاد یک تغییر تدریجی فشار (استرس) در یک جسم جامد شامل دوقطبی‌های الکتریکی، جریان‌های الکتریکی گذرا در آن منتشر می‌شود. این سیگنال‌ها را سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای (Seismic Electric Signals) یا SES نام داده‌اند (واروتسوز و الکسوپوز، ۱۹۸۴a). آزمایش‌های فیزیکی حالت جامد نشان داده‌اند که اجسام جامد دارای دوقطبی‌های کوچک الکتریکی مانند کوارتز هستند که وقتی تحت استرس قرار می‌گیرند، قبل از شکستن، جریان‌های الکتریکی ضعیف و ناپایداری از خود منتشر می‌کنند که مقدم بر شکستگی است (شکل ۳). این سیگنال‌ها که به صورت اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از جسم بروز می‌کند، قابل اندازه‌گیری هستند (واروتسوز و الکسوپوز، ۱۹۸۴a,b) و با آشکارسازی و بررسی دقیق آن‌ها می‌توان سه پارامتر مهم (زمان، مکان و بزرگای) زلزله‌های قریب‌الوقوع را پیش‌بینی کرد.

۴. انواع سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای (SES) و

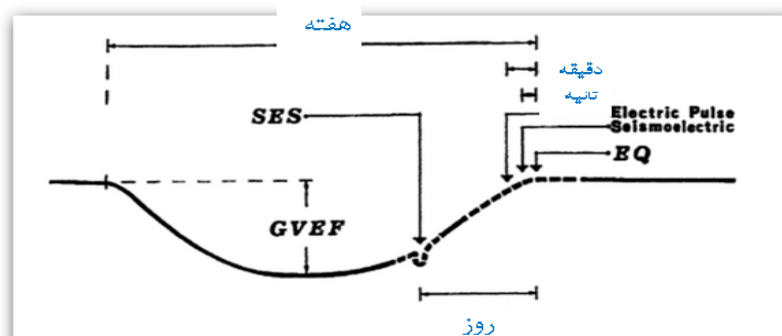
مدت زمان پیش‌بینی آن‌ها

دانشمندان به این مهم پی برده‌اند که پتانسیل‌های الکتریکی ایجادشده با دامنه‌ای در حدود 0.1 mv/m مقدم بر زمین‌لرزه است که آن‌ها را SES نام نهاده‌اند. به طور کلی سه نوع سیگنال الکتریکی وجود دارد که عبارتند از:

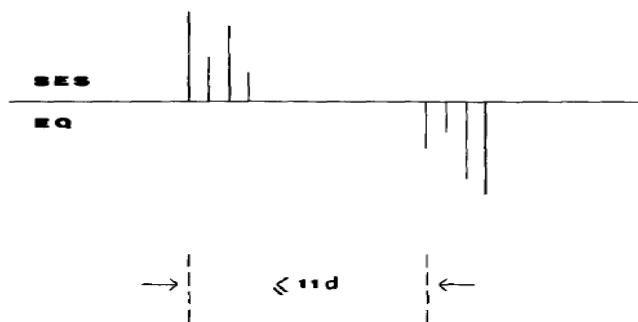
۱. سیگنال منفرد SES: استمرار زمانی نیم دقیقه‌ای تا چند ساعتی دارد و قبل از یک زمین‌لرزه منفرد مشاهده می‌شود. به طور معمول ۱۱ روز پس از زمان دریافت چنین سیگنال‌هایی زمین‌لرزه روی می‌دهد (واروتسوز و الکسوپوز، ۱۹۸۴a,b).

۲. فعالیت SES (SES activity): این سیگنال‌ها در زمانی کوتاه بین چند ساعت تا چندین روز ظاهر می‌شود و به دنبال آن همیشه بیش از یک رویداد لرزه‌ای اتفاق می‌افتد.

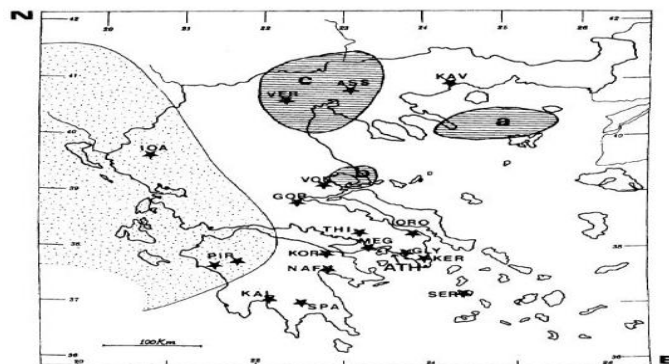
۳. نوسان تدریجی میدان الکتریکی (Gradual Variation of Electric Field) GVEF: استمرار زمانی در حدود چندین ساعت تا چند روز دارد که هفته‌ها قبل از یک زمین‌لرزه بزرگ مشاهده می‌شود.



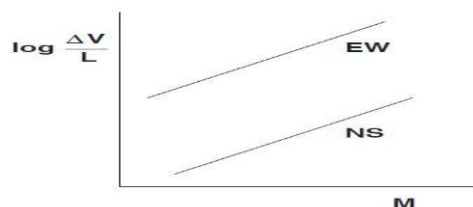
شکل ۳. نمودار شماتیک از سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای پیش‌نشانگر زمین‌لرزه با ترتیب زمانی (واروتسوز و همکاران، ۱۹۹۳)



شکل ۴. این شکل توالی‌ای از چهار SES را به همراه چهار زمین‌لرزه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تأخیر زمانی بین اولین SES و اولین زمین‌لرزه ۱۱ روز است ولی فاصله زمانی بین بزرگ‌ترین SES و قوی‌ترین زمین‌لرزه بیش از ۱۱ روز است (واروتسوز و لازاریو، ۱۹۹۱).



شکل ۵. تمام ایستگاه‌های VAN نصب‌شده حساس به SES تا پایان سال ۱۹۸۸. نقشه انتخابی برای ایستگاه Ioannina عبارت است از مناطق لرزه‌ای در غرب کشور یونان که به صورت منطقه سایه نشان داده شده است و همچنین نقشه انتخابی برای ایستگاه Assiros سه منطقه a, b, c است و به SESهای منتشرشده از این مناطق حساسیت نشان می‌دهند. برگرفته از واروستوز و همکاران (۲۰۰۶).

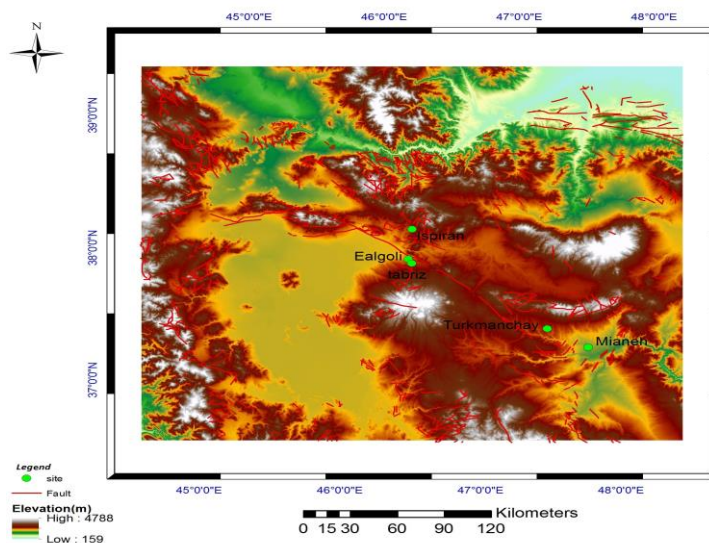


شکل ۶. نمودار دامنه SESهای ثبت‌شده ($\Delta V/L$) در دو مؤلفه دوقطبی نصب‌شده در هر ایستگاه در مقابل بزرگی زلزله‌های اتفاق افتاده در جهت NS و EW را نشان می‌دهد (واروستوز و لازاریدو، ۱۹۹۱).

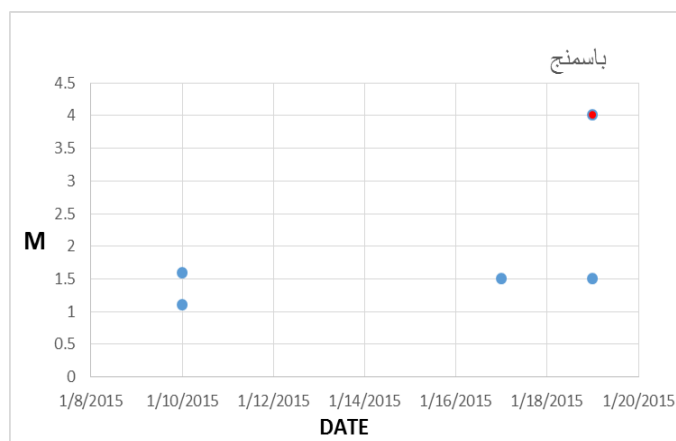
۵. انتخابی بودن SESها

SESهای آن‌ها را ثبت می‌کنند. برای مثال شکل ۷، ایستگاه‌های VAN نصب‌شده تا پایان سال ۱۹۸۸ را در یونان توسط گروه ون نشان می‌دهد. در این شکل نقشه انتخابی برای ایستگاه Ioannina (IOA) و ایستگاه Assiros (ASS) نشان داده شده است.

انتخابی بودن از غیر معمول‌ترین ویژگی‌های روش VAN در مقایسه با روش‌های دیگر پیش‌بینی زمین‌لرزه است. انتخابی بودن SESها یعنی اینکه SESهای ساطع شده از نواحی لرزه‌ای به بعضی از ایستگاه‌ها حساس‌اند و این ایستگاه‌ها نیز خود به گسل‌های خاصی حساس هستند و



شکل ۷. موقعیت ایستگاه‌های نصب‌شده در شبکه VAN شمال غرب کشور



شکل ۸. نمودار پیش‌لرزه، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های مربوط به اولین SES ایستگاه تبریز

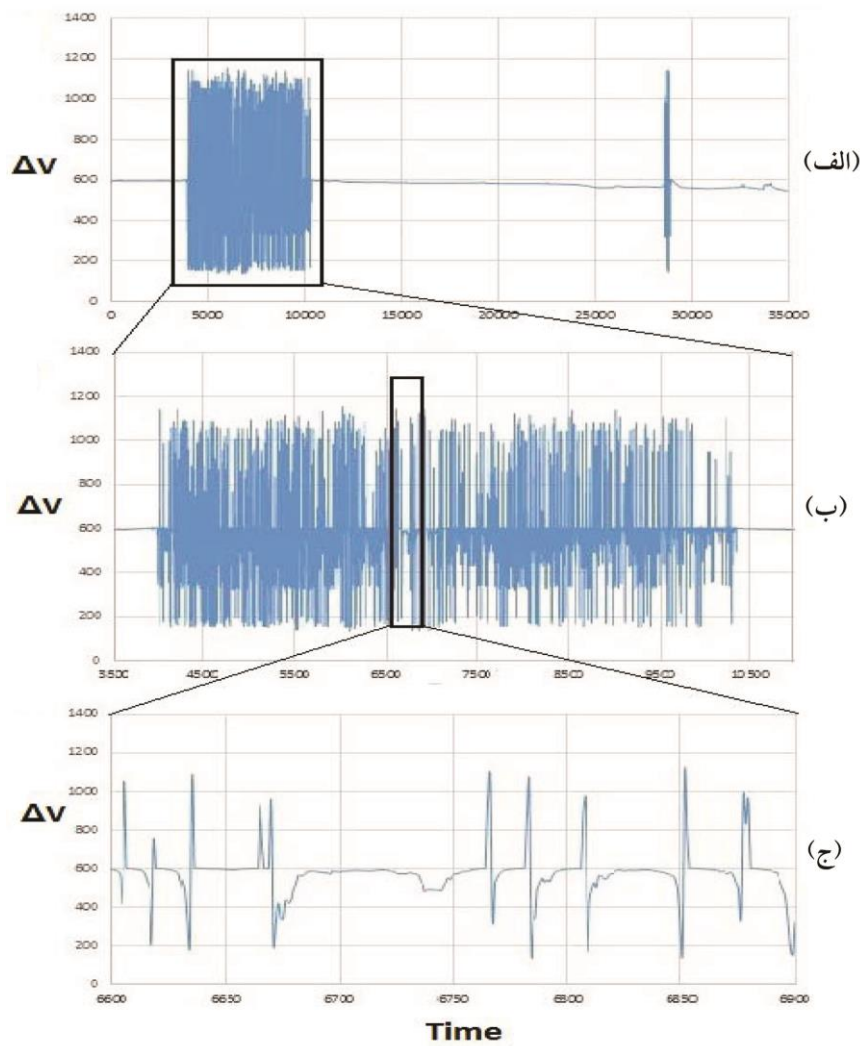
بزرگای زلزله‌های مربوط به این سیگنال‌ها ارتباط معناداری وجود دارد که به صورت نسبت $\Delta V/L$ مشخص می‌شود. اگر لگاریتم مقدار $\Delta V/L$ در مقابل بزرگی زلزله‌های رویداده برای هر ایستگاه رسم شود، نموداری خطی با شیبی یکسان به دست می‌آید که برای هر ایستگاه این شیب یکسان (بین ۰/۳۷ - ۰/۳۴) خواهد بود، ولی عرض از مبدأ متفاوت است. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش بزرگی زلزله‌های اتفاق افتاده، دامنه SESها ($\Delta V/L$) نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین، به این ترتیب می‌توان بزرگای زلزله بعدی را پیش‌بینی کرد.

۸. شبکه VAN نصب شده در شمال غرب ایران مطابق با نظر واروتسوز و همکاران (۱۹۸۶) برای نصب و راه‌اندازی ایستگاه‌های پایش SES، مطالعات اولیه در منطقه برای مکان‌یابی ایستگاه‌ها انجام گرفت. مناطقی که از نظر نویزهای صنعتی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، راه‌های دسترسی و حفظ و نگهداری ایستگاه‌ها بهترین شرایط را داشتند، مشخص شد. دوقطبی‌ها در هر ایستگاه با فاصله مشخص و کنترل‌شده‌ای از هم با استفاده از الکترودهای مخصوص تا عمق حدود ۱ تا ۱/۵ متر در داخل زمین قرار گرفتند. جدول ۱ ایستگاه‌های نصب شده در منطقه را نشان می‌دهد. شکل ۹ نقشه ایستگاه‌های نصب شده در منطقه را به همراه گسل‌های موجود نشان می‌دهد.

۶. روش اندازه‌گیری سیگنال‌های الکتریکی (SES) روش تجربی برای اندازه‌گیری سیگنال‌های VAN پیش از زمین‌لرزه یا SES، به وسیله دو الکتروود که در داخل زمین در عمق حدود ۱ - ۲ متر و با فاصله از هم جاگذاری می‌شوند، اجرا می‌شود. هر الکتروود از انتهای خود به وسیله کابل به انتهای الکتروود دیگری وصل می‌شود، سپس اختلاف پتانسیل بین دو انتهای الکتروود با یک ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین اساس کار اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین دو نقطه A و B در سطح زمین است که این‌ها را دوقطبی‌های الکتریکی می‌نامند (electric dipole). زمانی که SES آشکار می‌شود تغییرات اختلاف پتانسیل (ΔV) بین این دو نقطه تقسیم بر فاصله بین دو الکتروود L، نسبت $\Delta V/L$ را می‌دهد که تغییرات میدان الکتریکی زمین در جهت AB است. برای به‌دست‌آوردن کل تغییرات میدان الکتریکی زمین، باید اندازه‌گیری مشابهی در جهت عمود بر جهت قبلی AB انجام گیرد. دوقطبی‌های با طول چند صد متر را دوقطبی‌های کوتاه و دوقطبی‌های با طول بیشتر از ۱ کیلومتر را دوقطبی‌های بلند می‌نامند.

۷. روش پیش‌بینی بزرگا و رومرکز زمین‌لرزه‌های آینده به روش VAN

واروتسوز و الکسوپوز (۱۹۸۴b) به صورت تجربی ثابت کردند که بین دامنه سیگنال ثبت شده در ایستگاه و



شکل ۹. اولین SES دریافت شده در ایستگاه تبریز؛ (الف) کل SES ثبت شده در مدت یک روز را نشان می دهد. (ب) بزرگ‌نمایی قسمت (الف) برای مشخص کردن اینکه این سیگنال از کدام نوع SES است. چون بین نوسانات سیگنال موجود وقفه ایجاد شده، پس سیگنال مورد نظر از نوع فعالیت SES تشخیص داده شده است. (ج) وقفه زمانی بین نوسانات SES را نشان می دهد.

جدول ۱. ایستگاه‌هایی که در منطقه شمال غرب نصب و راه‌اندازی شده‌اند. ایستگاه دانشگاه تبریز ایستگاه کنترل مرکزی است.

شماره	نام ایستگاه	تاریخ نصب	فاصله دوقطبی‌ها	جهت‌های دوقطبی‌ها	وضعیت	حساسیت یا عدم حساسیت به SES
۱	ایستگاه ترکمن‌چای	فروردین ۹۳	۲۰ متر	N-S	غیرفعال	حساس به SES است ولی به علت دوری کاملاً تجهیز نشده
۲	ایستگاه ائل گلی تبریز	اردیبهشت ۹۳	۲۰ متر	در جهت‌های E-W و N-S	فعال	حساس به SES
۳	ایستگاه اسپیران (۱)	خرداد ۹۳	۹۰ متر	E-W	غیرفعال	عدم حساسیت به SES
۴	ایستگاه دانشگاه تبریز (۱)	مرداد ۹۳	۲۰ متر	در جهت E-W	فعال	حساس به SES
۵	ایستگاه دانشگاه تبریز (۲)	مهر ۹۳	۸۰ متر	در جهت‌های E-W و N-S	فعال	حساس به SES
۶	ایستگاه اسپیران (۲)	دی ۹۳	۵۰ متر	E-W	فعال	حساس به SES

جدول ۲. SESهای دریافت‌شده و زلزله‌های اتفاق افتاده مربوط به هر یک از SES

ردیف	ایستگاه دریافت‌کننده SES	سمت جغرافیایی دوقطبی	تاریخ شروع دریافت SES	تاریخ خاتمه دریافت SES	زمین‌لرزه روی داده مربوطه				
					تاریخ وقوع زمین‌لرزه	بزرگی M(ریشتر)	محدوده رویداد	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	اتل گلی	N-S	۲۰۱۴/۰۶/۱۸	۲۰۱۴/۰۶/۲۰	۲۰۱۴/۰۸/۵	۳/۷	ورزقان	۴۶/۷۳	۳۸/۴۸۷
۲	اتل گلی	N-S	۲۰۱۴/۰۶/۲۱	۲۰۱۴/۰۶/۳۰	۲۰۱۴/۰۷/۰۹	۳	خوی	۴۴/۹۹۵	۳۸/۴۸۸
۳	اتل گلی	N-S	۲۰۱۴/۱۲/۲۹	۲۰۱۵/۰۱/۰۴	۲۰۱۴/۱۲/۳۰	۳/۳	هشترود	۴۶/۶۱۴	۳۷/۲۲۵
۴	دانشگاه تبریز	E-W	۲۰۱۵/۰۱/۰۶	۲۰۱۵/۰۱/۸	۲۰۱۵/۰۱/۱۹	۳/۸	باسمنج	۴۶/۷۹۶	۳۸/۳۸۴
۵	دانشگاه تبریز	E-W	۲۰۱۵/۰۱/۱۰	۲۰۱۵/۰۱/۱۱	۲۰۱۵/۰۱/۲۴	۴/۴	زرنق	۴۷/۰۳۶	۳۸/۰۵۹
۶	دانشگاه تبریز	E-W	۲۰۱۵/۰۲/۰۱	۲۰۱۵/۰۲/۰۹	۲۰۱۵/۰۲/۲۶	۳/۳	سیه چشمه	۴۴/۹۴۶	۳۷/۴۸۲
۷	اسپیران ۲	E-W	۲۰۱۵/۰۸/۰۷	۲۱۹۷۷	۲۰۱۵/۰۹/۰۴	۵/۷	شمال آذربایجان	۴۷/۴۲	۴۰/۹۸

۹. SESهای دریافت‌شده در شمال غرب ایران

بعد از نصب و راه‌اندازی ایستگاه‌ها، پتانسیل الکتریکی زمین به‌طور پیوسته ثبت شد. در هر ایستگاه امواج الکتریکی با یک ولتاژ پایه ثبت می‌شوند و به تدریج با افزایش داده‌های ثبت‌شده امکان شناسایی سیگنال سطح پایه (به‌عنوان مثال سیگنال پایه ایستگاه اتل گلی و ایستگاه تبریز به ترتیب برابر با ۶۰-۵۰ و ۶۰۰-۵۰۰ میلی‌ولت است) از تغییرات و نویزها نیز به وجود می‌آید. با ایجاد تغییرات و افزایش اختلاف ولتاژ و دامنه در سیگنال‌ها و با بررسی و تحلیل این سیگنال‌ها و ارتباط آن‌ها با زلزله‌هایی که بعداً اتفاق افتاد، ایستگاه‌هایی که این سیگنال‌ها را ثبت می‌کنند، به‌عنوان ایستگاه‌های حساس، انتخاب و به ایستگاه‌های دائمی تبدیل شدند. در جدول ۲، SESهایی که در ایستگاه‌ها ثبت شده‌اند و زلزله‌های متعاقب این SESها نشان داده شده است که برای مدت هشت ماه گردآوری شده‌اند.

۱۰. شکل SESهای ثبت‌شده در ایستگاه‌ها و تحلیل آن‌ها

در اینجا به تجزیه و تحلیل برخی از SESهای ثبت‌شده در ایستگاه دانشگاه تبریز و ایستگاه اتل گلی و مقایسه آن‌ها با دیدگاه‌های ارائه‌شده توسط گروه VAN پرداخته می‌شود.

۱۰.۱. ایستگاه تبریز

۱۰.۱.۱. اولین SES

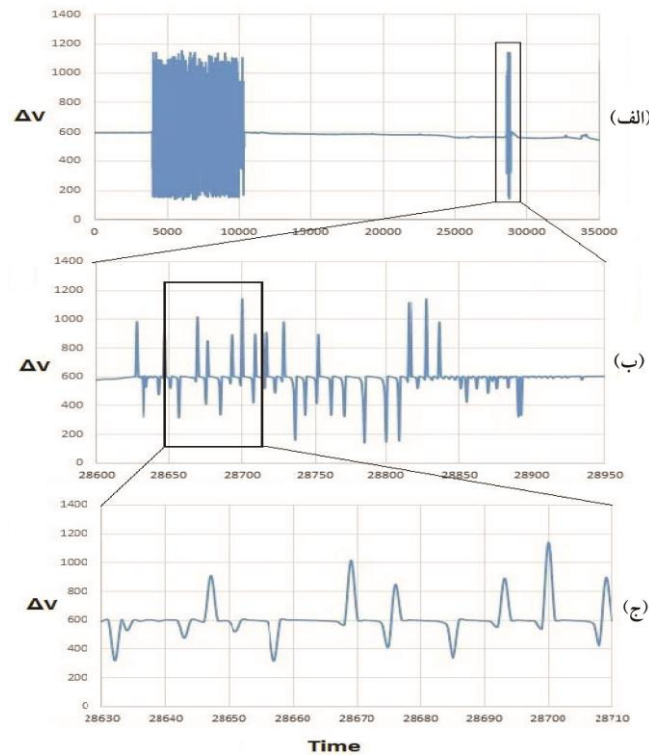
طبق نظر واروتسوز و همکاران SESها می‌توانند چند دقیقه تا چند روز دوام داشته باشند؛ بنابراین اختلاف پتانسیل دریافتی در ایستگاه‌ها شبانه‌روزی و با فاصله ۵ ثانیه ثبت می‌شود. اولین SES در این ایستگاه در تاریخ ۲۰۱۵/۱/۶ ثبت شد که یک روز ادامه پیدا کرد. این سیگنال الکتریکی، ناگهانی شروع شد و ناگهانی نیز خاتمه یافت. سیگنال پایه ایستگاه در شرایط عادی دامنه‌ای در حد ۵۰۰-۶۰۰ میلی‌ولت دارد که این دامنه با شروع ثبت SES، بین ۱/۱۴۹ ولت تا ۱۵۳ میلی‌ولت در نوسان بود. با بررسی اولین SES، چنانچه در شکل ۹ نشان داده شده است مشاهده شد این سیگنال الکتریکی لرزه‌ای به صورت فعالیت SES است؛ به این معنا که می‌تواند با چندین زمین‌لرزه آینده در ارتباط باشد و می‌توان از روی این سیگنال احتمال وقوع چندین زمین‌لرزه را پیش‌بینی کرد، ولی بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در فاصله زمانی دو هفته بعد از اتمام نوسان‌ها SES اتفاق خواهد افتاد. به این ترتیب در تاریخ ۲۰۱۵/۱/۱۹ زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۴ ریشتر در منطقه‌ای در باسمنج آذربایجان شرقی اتفاق افتاد که چند دقیقه بعد از پیش‌لرزه‌ای با بزرگی ۳/۳ ریشتر روی داد. اختلاف پتانسیل

برخلاف آن به صورت تدریجی به اتمام رسید. دومین SES یک ساعت به طول انجامید. اختلاف پتانسیل این SES ۹۹۶/۵ میلی‌ولت و نسبت $\Delta V/L$ برابر با ۱۲/۴۵ میلی‌ولت بر متر به دست آمد. این سیگنال نیز به صورت فعالیت SES است؛ بنابراین زمین‌لرزه اصلی، با پس‌لرزه و پیش‌لرزه‌هایی همراه خواهد بود. در نتیجه چنانکه پیش‌بینی شده بود، بعد از ۱۳ روز پس از به پایان رسیدن این SES زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۳/۷ ریشتر در منطقه کلوانق استان آذربایجان شرقی به همراه زمین‌لرزه اصلی ۴/۴ ریشتری در کلوانق اتفاق افتاد. شکل ۱۱ نمودار رسم‌شده برای زلزله‌های اتفاق افتاده برای دومین SES ثبت‌شده ایستگاه تبریز را نشان می‌دهد.

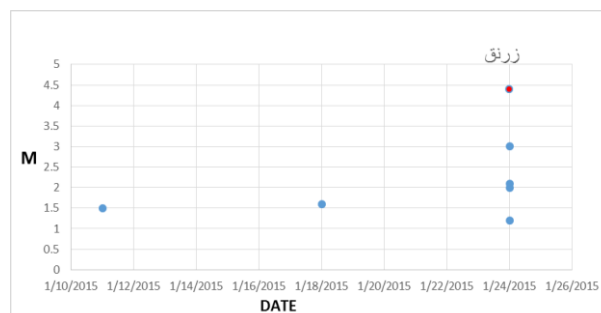
اندازه‌گیری شده برای این SES برابر با ۹۹۶ میلی‌ولت است و چون فاصله این دوقطبی نصب‌شده در جهت E-W در ایستگاه مذکور $L=80$ متر است؛ نسبت $\Delta V/L$ برابر با ۱۲/۴۵۰ میلی‌ولت بر متر به دست آمد. شکل ۱۰ نمودار پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های مربوط به این زمین‌لرزه اصلی را نشان می‌دهد.

۱۰.۱.۲. دومین SES

دومین SES دو روز بعد از اتمام اولین SES در همین ایستگاه و در همان دایبل شرقی غربی دریافت شد. این سیگنال نیز مانند سیگنال اول ناگهانی شروع شد ولی



شکل ۱۰. (الف) دومین SES که بعد از گذشت دو روز SES اول شروع شده است. (ب) پنجره‌ای از نوسانات سیگنال را نشان می‌دهد. (ج) بزرگ‌نمایی قسمت (ب) است که نوسانات و سیگنال پایه را نشان می‌دهد.

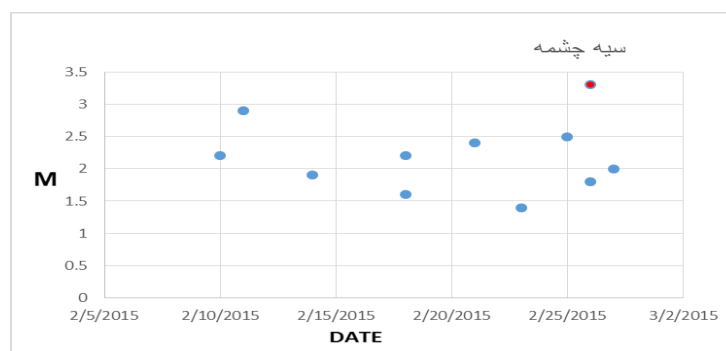


شکل ۱۱. نشان‌دهنده نمودار پیش‌لرزه‌ها، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های مربوط به دومین SES ایستگاه تبریز

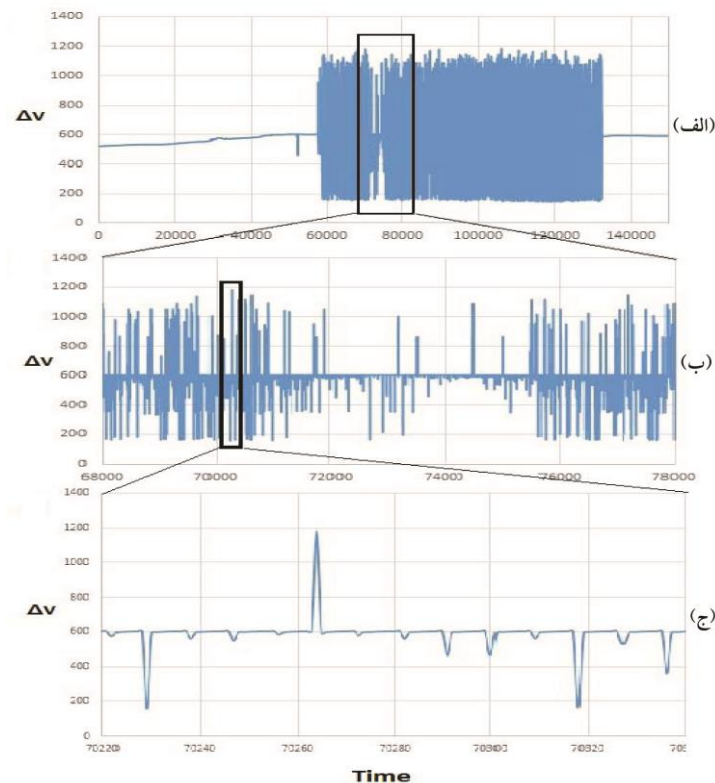
۳.۱.۱۰. سومین SES

پس از به اتمام رسیدن SES و ثبت سیگنال پایه در ایستگاه، بعد از ۱۷ روز زمین‌لرزه با بزرگی ۳/۳ ریشتر را در تاریخ ۲۰۱۵/۰۲/۲۶ در منطقه خوی به دنبال داشته است. اختلاف دامنه و مقدار نسبت $\Delta V/L$ برای این سیگنال به ترتیب ۱۰۳۸/۲ میلی‌ولت و ۱۲/۹۷ میلی‌ولت بر متر محاسبه شد. شکل ۱۳ تغییرات این SES را نشان می‌دهد.

سومین SES در تاریخ ۲۰۱۵/۲/۱ شروع و به مدت هشت روز ثبت شد. این سیگنال نیز مانند دو سیگنال قبلی، فعالیت SES محسوب می‌شود و انتظار رویداد چندین زمین‌لرزه را باید داشت. همانطور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود در بین هشت روز سیگنال دریافتی وقفه‌ای دیده می‌شود که در آن نوسانات به سیگنال پایه رسیده و بعد از مدتی دوباره نوسانات شروع شده است.



شکل ۱۲. نشان‌دهنده نمودار پیش‌لرزه‌ها، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های مربوط به سومین SES ایستگاه تبریز



شکل ۱۳. (الف) سومین SES که بعد از گذشت دو روز SES اول شروع شده است. (ب) پنجره‌ای از نوسانات سیگنال را نشان می‌دهد. (ج) بزرگ‌نمایی قسمت (ب) است که نوسانات و سیگنال پایه را نشان می‌دهد.

۲.۱۰. ایستگاه ائل گلی

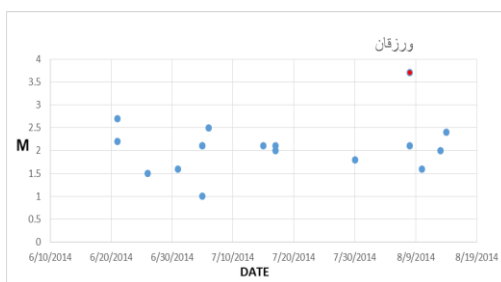
در این ایستگاه چند SES دریافت شده که در اینجا اولین SES بررسی و تحلیل شده است. این SES در تاریخ ۲۰۱۴/۰۶/۱۸ شروع شد و در تاریخ ۲۰۱۴/۰۶/۲۰ در دوقطبی کوتاه در جهت N-S با طول دوقطبی $L=20$ به پایان رسید. سیگنال پایه ایستگاه بین ۵۰ تا ۶۰ میلی‌ولت است، در حالی که SES ثبت شده بین ۱۰۴/۴- تا ۸۰ میلی‌ولت نوسان دارد. این سیگنال هم به صورت فعالیت SES بوده و به چند زمین‌لرزه مربوط است. اختلاف دامنه و نسبت $\Delta V/L$ به ترتیب برابر با ۱۸۴/۴ میلی‌ولت و ۹/۲۲ میلی‌ولت بر متر محاسبه گردید. بعد از به پایان رسیدن SES در تاریخ ۲۰۱۴/۰۸/۰۵، زمین‌لرزه ۳/۳ ریشتری در بخشایش و در تاریخ ۲۰۱۴/۰۸/۰۸ زمین‌لرزه ۳/۷ ریشتری و ورزقان اتفاق افتاد که زمین‌لرزه ورزقان، زمین‌لرزه اصلی و زمین‌لرزه بخشایش پیش‌لرزه زمین‌لرزه اصلی در نظر گرفته شده است (شکل ۱۴). نشان‌دهنده این SES در ایستگاه ائل گلی است (شکل ۱۵).

۳.۱۰. سیگنال دریافت شده در ایستگاه اسپیران (۲)

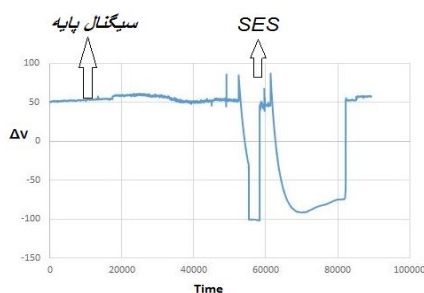
مهم‌ترین و بزرگ‌ترین SES دریافت شده در شبکه VAN طراحی شده در شمال غرب ایران، در ۱۶ مرداد ۹۴ در ایستگاه اسپیران (شمال تبریز) با دامنه بالا (۲۱۹۷۷

میلی‌ولت) و به مدت ۱۰ دقیقه در ساعت ۸:۳۰ دریافت شد (شکل ۱۶).

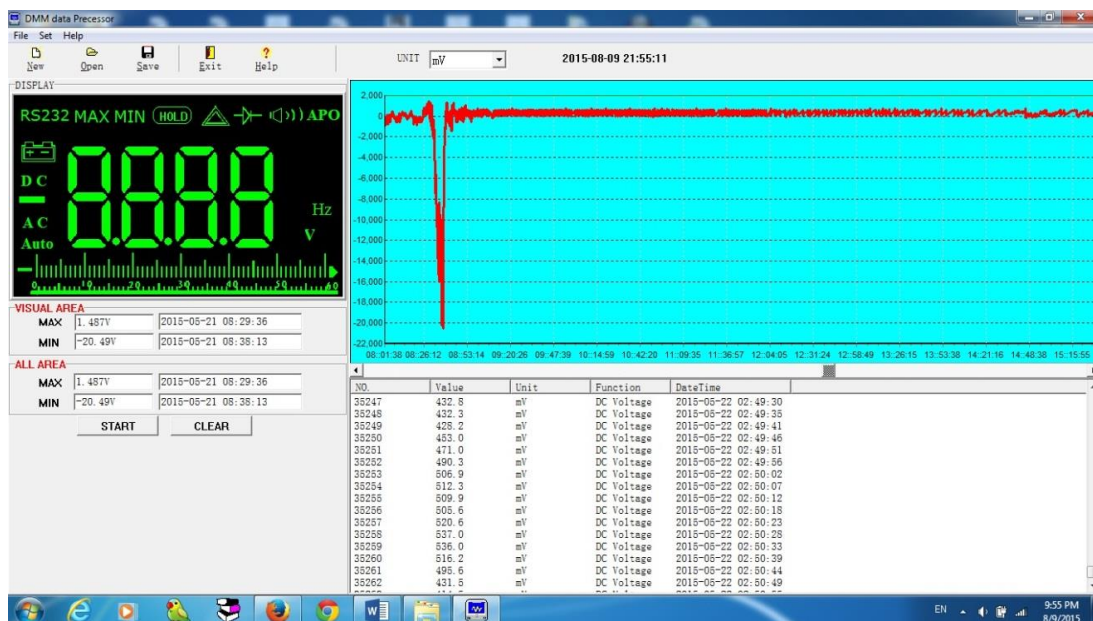
در نامه‌ای به ستاد بحران اعلام شد که زلزله در حد ۵/۵ ریشتر مورد انتظار است و به دلیل نبود ایستگاه به تعداد کافی، مکان و زمان دقیق رویداد قابل تشخیص نبوده و حتی ممکن است در استان‌ها و مناطق مجاور روی دهد و زمان مورد انتظار در چنین شرایطی (با توجه به منبع واروتسوز، ۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۱۱) نیز ۳۰ تا ۴۰ روز از تاریخ دریافت ذکر شد. ۲۸ روز پس از دریافت سیگنال (۱۳ شهریور) زلزله ۵/۷ ریشتری در شمال آذربایجان اتفاق افتاد؛ جالب اینکه در دایره‌ای به شعاع ۳۵۰ کیلومتر با مرکزیت تبریز در طول ۱/۵ سال گذشته (که شبکه VAN راه‌اندازی شده) زلزله‌ای بزرگ‌تر از ۵ ریشتر وجود ندارد. این صحت و دقت عملکرد را تأیید می‌کند که در ۱/۵ سال گذشته این اولین سیگنال دریافتی با این قدرت بوده است و به درستی دریافت شده و زلزله مربوط نیز روی داده است. درباره مکان زلزله در منبع (واروتسوز، ۲۰۱۳) به دقت اشاره شده است که سیگنال SES بیش از ۶ زلزله با فاصله‌های بیش از ۳۵۰ کیلومتر در ایستگاه‌های VAN در یونان دریافت گردیده است و از این رو دریافت این سیگنال در این مسافت نیز کاملاً عادی و منطقی است.



شکل ۱۴. نشان‌دهنده نمودار پیش‌لرزه‌ها، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های مربوط به SES ایستگاه ائل گلی



شکل ۱۵. SES دریافت شده در ایستگاه ائل گلی. سیگنال پایه و SES در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۶. سیگنال SES با اختلاف پتانسیل زیاد ۲۱ ولت که به مدت ۱۰ دقیقه در ساعت ۸/۳۰ صبح روز جمعه دریافت گردید.

۱۱. نتیجه‌گیری

همکاران در سال ۱۹۸۱ موفق به کشف آن‌ها شدند و به وسیله این SESها چندین زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۵ ریشتر را پیش‌بینی کردند. در منطقه مورد مطالعه نیز سیگنال‌های دریافتی با زلزله‌هایی که به دنبال این سیگنال‌ها روی می‌دهد، ارتباط معناداری نشان داده است. از آنجایی که هیچ دلیل خاصی وجود ندارد که این روش (VAN) در قسمت‌های دیگر کره زمین عمل نکند، می‌توان با توسعه این ایستگاه‌ها و تجهیز آن‌ها و ترسیم نقشه گزینش منطقه از روی ایستگاه‌های موجود، زمین‌لرزه‌های بزرگ را پیش‌بینی کرد و جان انسان‌ها را در نواحی مختلف کشور نجات داد.

در منطقه مورد مطالعه با توجه به نتایج تجربی به‌دست آمده، بعد از دریافت دو SES آخر یعنی سیگنال‌های دریافتی مورخ ۲۰۱۵/۱/۶ و ۲۰۱۵/۱/۸، احتمال وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بین ۳/۵ تا ۴/۵ ریشتر به ستاد بحران استان به‌طور رسمی و با مستندات مربوط اطلاع داده شده است. پس از ۱۳ روز از دریافت سیگنال‌های یادشده و هشدار اطلاع‌رسانی شده، زمین‌لرزه ۳/۸ ریشتری در باسمنج و زمین‌لرزه ۴/۴ ریشتری زرنق در شمال تبریز روی دادند که موفقیت ارزشمندی برای شبکه نصب‌شده محسوب می‌شود. امید

برای نخستین بار در ایران به منظور امکان‌سنجی، جستجو و ثبت پیش‌نشانگرهای الکتریکی لرزه‌ای (SES) از اوایل سال ۱۳۹۳ در شمال‌غرب ایران با مشخص کردن مناطقی که شانس بیشتری برای دریافت SES دارند، ۶ ایستگاه در این ارتباط به‌صورت موقت نصب و راه‌اندازی شد. به تدریج با روی‌دادن چندین زلزله، ایستگاه‌هایی که SES در آن‌ها دریافت می‌شود، مشخص و به ایستگاه‌های دائمی تبدیل شدند. در این بین از ۳ ایستگاه با نام‌های ترکمن‌چای، ائل‌گلی و دانشگاه تبریز ایستگاه‌های حساس تشخیص داده شدند که فعلاً به‌دلیل محدودیت‌های مالی فقط دو ایستگاه ائل‌گلی (با دوقطبی ۲۰ متر) و دانشگاه تبریز (با دوسری دوقطبی‌های ۲۰ و ۸۰ متر) تجهیز و بهره‌برداری شده‌اند، اما یکی از ایستگاه‌ها که در منطقه اسپیران نصب شده بود هیچ SES‌ای ثبت نکرد. دو ایستگاه دیگر نیز در دست تجهیز هستند.

با بررسی و مقایسه SESهای دریافت‌شده در ایستگاه‌های حساس در شمال‌غرب ایران با نتایج کار گروه VAN در یونان، این نتیجه حاصل شد که این سیگنال‌ها همان SESهایی است که واروتسوز و

زمانی، ب.، ۱۳۹۲، مدل زمین ساخت فلات آذربایجان (شمال گسل تبریز و جنوب ارس)، علوم زمین، ۲۲(۸۷)، ۴۱-۵۰.

مشین چی اصل، م. س. و صفری، ع.، ۱۳۸۶، پیش بینی زلزله با استفاده از پیش نشانگرهای الکتریکی، اولین همایش پیش نشانگرهای زلزله.

- Chmel, A., Smirnov, V. and Golovanov, O., 2010, Variability of scaling parameters in nonconservative systems, Geophysical aspect, *Physica A*, 389, 2617-2627.
- Colangelo, G., Lapenna V. and Telesca, L., 2008, Study of self-potential anomalous fluctuations in a seismic active zone of Lucano Apennine (southern Italy): recent results, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 8, 1099-1104.
- Guzman-Vargas, L., Ramirez-Rojas, A., Hernandez-Perez, R. and Angulo-Brown, F., 2009, Correlations and variability in electrical signals related to earthquake activity, *Physica A*, 388, 4218-4228.
- Huang, Q. H., 2011, Retrospective investigation of geophysical data possibly associated with the M(s) 8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan, China, *J. Asian Earth Sci.*, 41, 421-427.
- Huang, Q. H., 2011, Rethinking earthquake-related DC-ULF electromagnetic phenomena: towards a physics-based approach, *Nat. Hazard Earth Sys.*, 11, 2941-2949.
- Mulargia, F. and Gasperini, P., 1992, Evaluating the statistical validity beyond chance of VAN earthquake precursors, *Geophys. J. Int.*, 111, 32-44.
- Nagao, T., Uyeda, S., Asai, Y. and Kono, Y., 1996, Anomalous changes in geoelectric potential preceding four earthquakes in Japan in a critical review of VAN: earthquake prediction from seismic electric signals, edited by Sir J. Lighthill, World Scientific, Singapore, 292-300.
- Nagao, T., Uyeshima, M. and Uyeda, S., 1996, An independent check of VAN's criteria for signal recognition, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1441-1444.
- Shnirman, M., Schreider, S. and Dmitrieva, O., 1993, Statistical evaluation of the VAN predictions issued during the period 1987-

است با توسعه این شبکه در شمال غرب ایران بتوان با دریافت SES مربوط به یک زمین لرزه مشخص در دست کم ۳ ایستگاه حساس، رومرکز (R) و بزرگای زمین لرزه آینده را به صورت دقیق پیش بینی و اعلام هشدار کرد.

مراجع

- 1989, *Tectonophysics*, 224, 211-221.
- Telesca, L., Balasco, M., Colangelo, G. and Lapenna, V., 2005, Analysis of extreme events in Geoelectrical time series measured in a seismic area of Southern Apennine Chain (Italy), *Natural Hazards*, 34, 177-198.
- Uyeda, S., Nagao, T., Orihara, Y., Yamaguchi, T. and Takahashi, I., 2000, Geoelectric potential changes, possible precursors to earthquakes in Japan. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 97, 4561-4566.
- Uyeda, S., Nagao, T. and Kamogawa, M., 2009, Short-term earthquake prediction, current status of seismo-electromagnetics, *Tectonophysics*, 470, 205-213.
- Varotsos, P. and Alexopoulos, K., 1984a, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, 110, 73-98.
- Varotsos, P., and Alexopoulos, K., 1984b, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, II, Determination of epicenter and magnitude, *Tectonophysics*, 110, 99-125.
- Varotsos, P., Alexopoulos, K., Nomicos, K. and Lazaridou, M., 1986, Earthquake prediction and electric signals, *Nature*, 322, 120, doi: 10.1038/322120a0
- Varotsos, P., Alexopoulos, K. and Lazaridou, M., 1993, Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II, *Tectonophysics*, 224, 1-37.
- Varotsos, P. and Lazaridou, M., 1991, Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, *Tectonophysics*, 188, 321-347.
- Varotsos, M., 2013, *Earthquake prediction by seismic electric signals*, Springer. P.259.
- Utada, H., 1993, On the physical background of the VAN earthquake prediction method, *Tectonophysics*, 224, 153-160.