فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحهٔ ۲۵- ۳۶

معرفی شبکهٔ اندازه‌گیری پیش‌نشانگرهای الکتریکی زمین‌لرزه‌ها به روش VAN در شمال‌غرب ایران

بهزاد زمانی قره‌چمنی[1*]، حامد حمیدی هریس[2] و جمال بروستانی[3]

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: ۹۴/۱۱/۱۱)

چکیده

ایران کشوری است که در قسمت میانی سیستم کوهزایی آلپ-هیمالیا قرار دارد و دارای وضعیت زلزله‌خیزی شدیدی است. به‌دلیل خطری که زمین‌لرزه‌ها دارند، تحقیقات در زمینهٔ 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 شمال‌غرب ایران نیز برای اولین بار در حال ثبت هستند (از اوایل سال ۱۳۹۳). بین سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای VAN (SES) و پارامترهای زمین‌لرزه وابستگی‌هایی جهت ثبت بزرگی، زمان و مکان وجود دارد. در این پروژه ما پنج ایستگاه VAN در شمال‌غرب 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 وسیلهٔ 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)، شمال‌غرب ایران، روش VAN.

۱. مقدمه

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 زمین‌لرزهٔ مخرب آتن در یونان برای پیش‌بینی زلزله‌های محلی توسط سه دانشمند با نام‌های Nomicos، Alexopoulos، Varotsos ابداع و استفاده شده است که به افتخار این دانشمندان، این روش VAN نام‌گذاری شده است. دقت پیش‌بینی این روش ۱۰۰کیلومتر در تعیین رومرکز زلزله، ۰/۷ واحد در بزرگی زمین‌لرزه و ۱ روز در زمان رویداد زمین‌لرزه است.

گروه VAN درمدت هشت سال شبکه‌ای متشکل از ۱۸ ایستگاه حساس به SES را در سرتاسر یونان راه‌اندازی و ۹ زمین‌لرزه از ۱۲ زمین‌لرزهٔ روی داده با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر (به‌عنوان مثال زمین‌لرزهٔ ۱۹۸۷/۰۲/۲۶ با بزرگی M=۶/۶) را با موفقیت پیش‌بینی کردند (واروتسوز 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 (شینرمن و همکاران، ۱۹۹۳؛ ناگااو و همکاران، ۱۹۹۶؛ اویدا و همکاران، ۲۰۰۹؛ چیمل و همکاران، ۲۰۱۰؛

*نگارنده رابط: E-mail: b.zamani@tabrizu.ac.ir

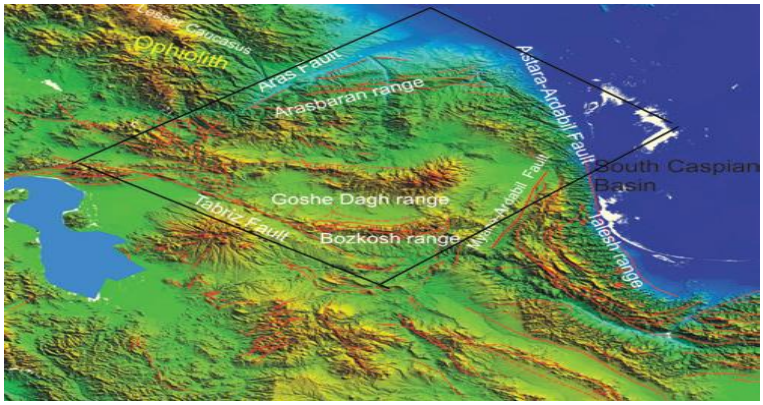
هانگ، ۲۰۱۱) و در بعضی کشورها این سیگنال‌ها با موفقیت دریافت شده است (گازمن وارگاس و همکاران، ۲۰۰۹؛ تلسکا و همکاران، ۲۰۰۵؛ کولانژیلو و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج تحقیقات گروه VAN نشان داده است که نرخ موفقیت این روش برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر، بیش از ۷۰ درصد است (مشین‌چی اصل و صفری، ۱۳۸۶؛ واروستوز،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

یکی از خطرناک‌ترین مناطق از لحاظ زمین‌لرزه‌خیزی در کشور ایران، منطقهٔ شمال‌غرب ایران است که به لحاظ قرارگیری گسل‌های فعال و خطرناک متعدد، تاریخچهٔ 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 دورهٔ بازگشت چندین‌ساله هستند و بعضی از این گسل‌ها دورهٔ 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 وسیلهٔ 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 به‌دست‌آمده در این خصوص تشریح شده است.

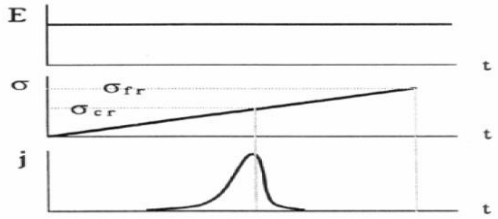
۲. تکتونیک منطقهٔ مورد مطالعه

شمال‌غرب ایران مانند سایر نقاط ایران تحت تأثیر همگرایی صفحهٔ عربی و اوراسیاست. مطالعات لرزه‌خیزی ژئودزی در این منطقه براساس اندازه‌گیری‌های GPS و محاسبهٔ 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 سامانهٔ گسلی تالش و آستارا در مرز خاوری و همچنین گسل میانه -اردبیل در مرز جنوب خاوری هستند. این چهار خطواره، محدوده‌ای لوزی‌شکل به وجود آورده‌اند که فلات آذربایجان در آن قرار گرفته است (زمانی، ۱۳۹۲).



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 نقطهٔ 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 فیزیک 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.

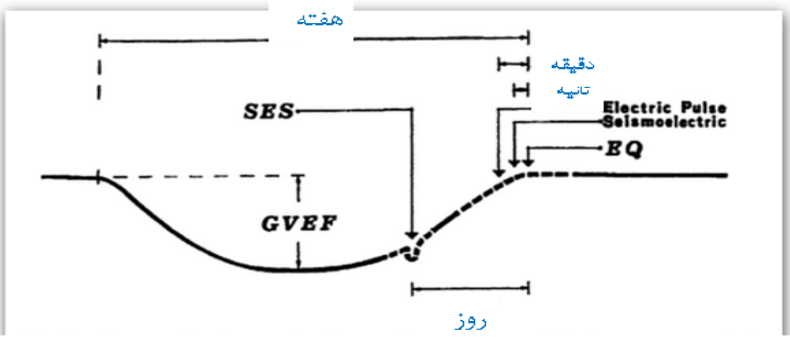
۴. انواع سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای (SES) و مدت زمان پیش‌بینی آن‌ها

دانشمندان به این مهم پی برده‌اند که پتانسیل‌های الکتریکی ایجادشده با دامنه‌ای در حدود ۰/۰۱ mv/m مقدم بر زمین‌لرزه است که آن‌ها را SES نام نهاده‌اند. به طور کلی سه نوع سیگنال الکتریکی وجود دارد که عبارتند از:

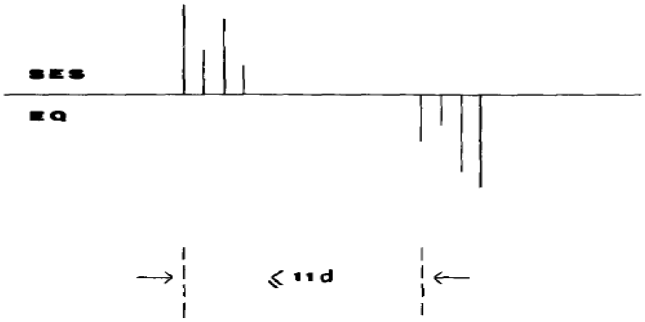
۱. سیگنال منفرد SES: استمرار زمانی نیم دقیقه‌ای تا چند ساعتی دارد و قبل از یک زمین‌لرزه منفرد مشاهده می‌شود. به‌طور معمول ۱۱ روز پس از زمان دریافت چنین سیگنال‌هایی زمین‌لرزه روی می‌دهد (واروتسوز و الکسوپوز، ۱۹۸۴a,b).

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.

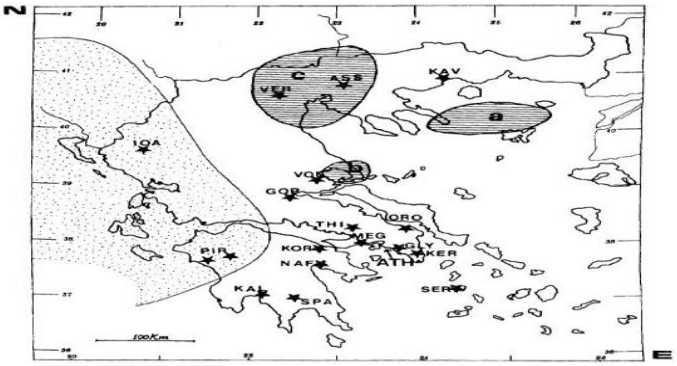
۳. نوسان تدریجی میدان الکتریکی GVEF (Gradual Variation of Electric Field): استمرار زمانی در حدود چندین ساعت تا چند روز دارد که هفته‌ها قبل از یک زمین‌لرزهٔ بزرگ مشاهده می‌شود.



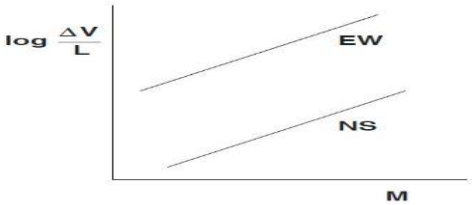
شکل ۳. نمودار شماتیک از سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای پیش‌نشانگر زمین‌لرزه با ترتیب زمانی (واروتسوز و همکاران، ۱۹۹۳)



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 ۱۱روز است ولی فاصلهٔ زمانی بین بزرگ‌ترین SES و قوی‌ترین زمین‌لرزه بیش از ۱۱ روز است (واروتسوز و لازاریدو، ۱۹۹۱).



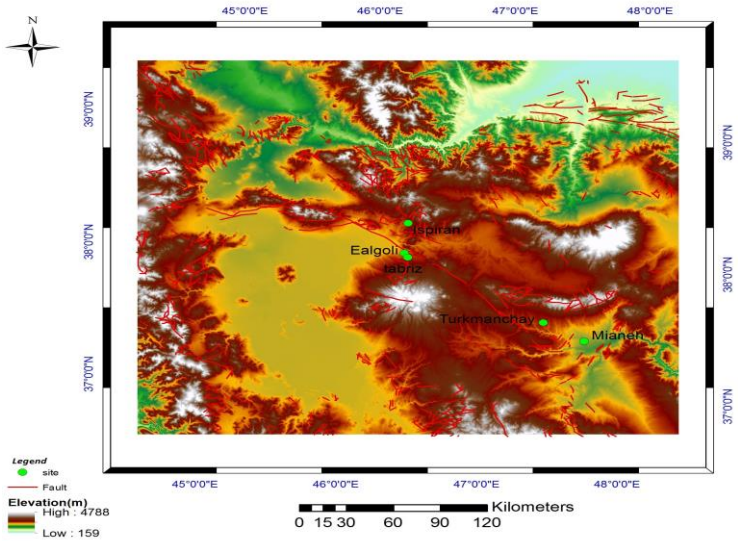
شکل ۵. تمام ایستگاه‌های VAN نصب‌شدهٔ حساس به SES تا پایان سال ۱۹۸۸. نقشهٔ انتخابی برای ایستگاه Ioannina عبارت است از مناطق لرزه‌ای در غرب کشور یونان که به صورت منطقهٔ سایه نشان داده شده است و همچنین نقشهٔ انتخابی برای ایستگاه Assiros سه منطقهٔ a,b و c است و به SESهای منتشرشده از این مناطق حساسیت نشان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



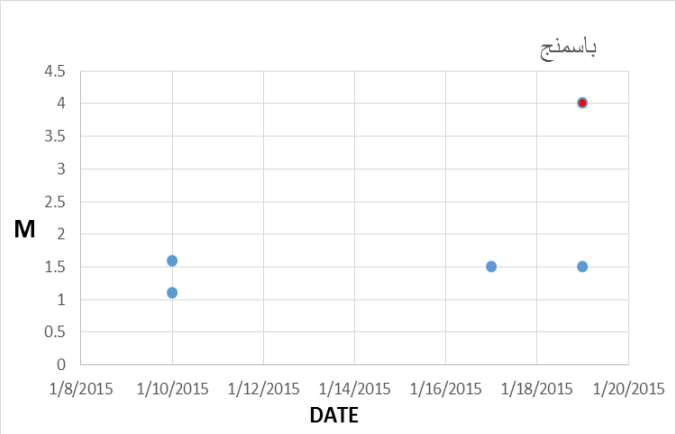
شکل ۶. نمودار دامنهٔ SESهای ثبت‌شده ($\Delta V/L$) در دو مؤلفهٔ دوقطبی نصب‌شده در هر ایستگاه در مقابل بزرگی زلزله‌های اتفاق‌افتاده در جهت NS و EW را نشان می‌دهد (واروستوز و لازاریدو، ۱۹۹۱).

۵. انتخابی‌بودن SESها

انتخابی‌بودن ازغیرمعمول‌ترین ویژگی‌های روش VAN در مقایسه با روش‌های دیگر پیش‌بینی زمین‌لرزه است. انتخابی‌بودن SESها یعنی اینکه SESهای ساطع‌شده از نواحی لرزه‌ای به بعضی از ایستگاه‌ها حساس‌اند و این ایستگاه‌ها نیز خود به گسل‌های خاصی حساس هستند و 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 نقشهٔ انتخابی برای ایستگاه Ioannina (IOA) و ایستگاه Assiros (ASS) نشان داده شده است.



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



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

۶. روش اندازه‌گیری سیگنال‌های الکتریکی(SES)

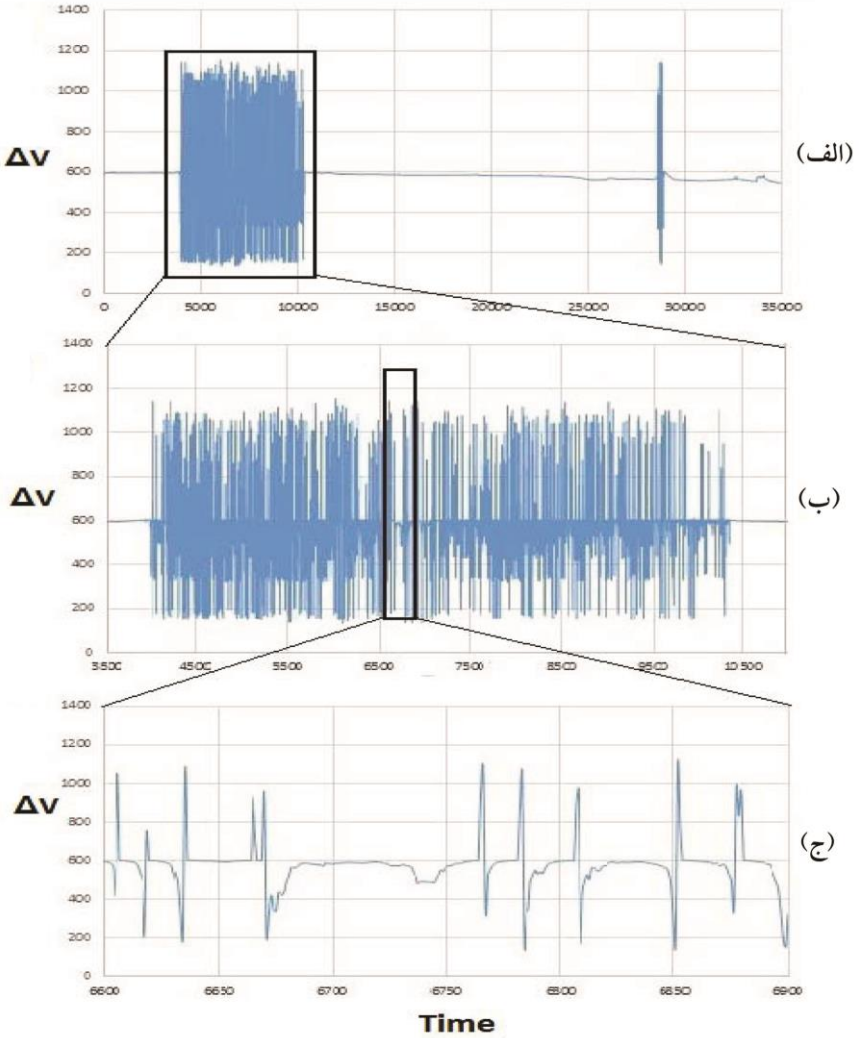
روش تجربی برای اندازه‌گیری سیگنال‌های VAN پیش از زمین‌لرزه یا SES، به وسیلهٔ دو الکترود که در داخل زمین در عمق حدود ۱ — ۲ متر و با فاصله از هم جاگذاری می‌شوند، اجرا می‌شود. هر الکترود از انتهای خود به وسیلهٔ کابل به انتهای الکترود دیگری وصل می‌شود، سپس اختلاف پتانسیل بین دو انتهای الکترود با یک ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین اساس کار اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ 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 فاصلهٔ بین دو الکترود L، نسبت ΔV/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 دامنهٔ سیگنال ثبت‌شده در ایستگاه و بزرگای زلزله‌های مربوط به این سیگنال‌ها ارتباط معناداری وجود دارد که به صورت نسبت ΔV/L مشخص می‌شود. اگر لگاریتم مقدار ΔV/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 اتفاق‌افتاده، دامنهٔ SESها (ΔV/L) نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین، به این ترتیب می‌توان بزرگای زلزلهٔ بعدی را پیش‌بینی کرد.

۸. شبکهٔ VAN نصب‌شده 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 فاصلهٔ 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 نصب‌شده در منطقه را نشان می‌دهد. شکل ۹ نقشهٔ ایستگاه‌های نصب‌شده در منطقه را به همراه گسل‌های موجود نشان می‌دهد.



شکل ۹. اولین SES دریافت‌شده در ایستگاه تبریز؛ (الف) کل SES ثبت‌شده در مدت یک روز را نشان می‌دهد. (ب) بزرگ‌نمایی قسمت (الف) برای مشخص‌کردن 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) وقفهٔ زمانی بین نوسانات SES را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ایستگاه‌هایی که در منطقهٔ شمال‌غرب نصب و راه‌اندازی شده‌اند. ایستگاه دانشگاه تبریز ایستگاه کنترل مرکزی است.

شماره	نام ایستگاه	تاریخ نصب	فاصلهٔ دوقطبی‌ها	جهت‌های دوقطبی‌ها	وضعیت	حساسیت یا عدم حساسیت به SES
۱	ایستگاه ترکمن‌چای	فروردین ۹۳	۲۰متر	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 N-S و E-W	فعال	حساس به SES
۳	ایستگاه اسپیران(۱)	خرداد ۹۳	۹۰متر	E-W	غیرفعال	عدم حساسیت به SES
۴	ایستگاه دانشگاه تبریز(۱)	مرداد ۹۳	۲۰متر	در جهت E-W	فعال	حساس به SES
۵	ایستگاه دانشگاه تبریز(۲)	مهر ۹۳	۸۰ متر	در جهت‌های N-S و E-W	فعال	حساس به SES
۶	ایستگاه اسپیران(۲)	دی ۹۳	۵۰ متر	E-W	فعال	حساس به SES

جدول ۲. SESهای دریافت‌شده و زلزله‌های اتفاق‌افتاده مربوط به هریک از SES

ردیف	ایستگاه دریافت‌کننده SES	سمت جغرافیایی دوقطبی	تاریخ شروع دریافت SES	تاریخ خاتمه دریافت SES	زمین‌لرزه روی‌دادهٔ مربوطه				
					تاریخ وقوع زمین‌لرزه	بزرگا M(ریشتر)	محدودهٔ رویداد	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	ائل‌گلی	N-S	۲۰۱۴/۰۶/۱۸	۲۰۱۴/۰۶/۲۰	۲۰۱۴/۰۸/۵	۳/۷	ورزقان	۴۶/۷۳	۳۸/۴۸۷
۲	ائل‌گلی	N-S	۲۰۱۴/۰۶/۲۱	۲۰۱۴/۰۶/۳۰	۲۰۱۴/۰۷/۰۹	۳	خوی	۴۴/۹۹۵	۳۸/۴۸۸
۳	ائل‌گلی	N-S	۲۰۱۴/۱۲/۲۹	۲۰۱۵/۰۱/۰۴	۲۰۱۴/۱۲/۳۰	۳/۳	هشترود	۴۶/۶۱۴	۳۷/۲۲۵
۴	دانشگاه تبریز	E-W	۲۰۱۵/۰۱/۶	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	۲۰۱۵/۰۲/۱	۲۰۱۵/۰۲/۹	۲۰۱۵/۰۲/۲۶	۳/۳	سیه چشمه	۴۴/۹۴۶	۳۷/۴۸۲
۷	اسپیران۲	E-W	۲۰۱۵/۰۸/۰۷	۲۱۹۷۷	۲۰۱۵/۰۹/۰۴	۵/۷	شمال آذربایجان	۴۷/۴۲	۴۰/۹۸

۹. SESهای دریافت‌شده در شمال‌غرب 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 به‌تدریج با افزایش داده‌های ثبت‌شده امکان شناسایی سیگنال سطح پایه (به‌عنوان مثال سیگنال پایهٔ ایستگاه ائل 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 ائل گلی و مقایسهٔ آن‌ها با دیدگاه‌های ارائه‌شده توسط گروه VAN پرداخته می‌شود.

۱۰. ۱. ایستگاه تبریز

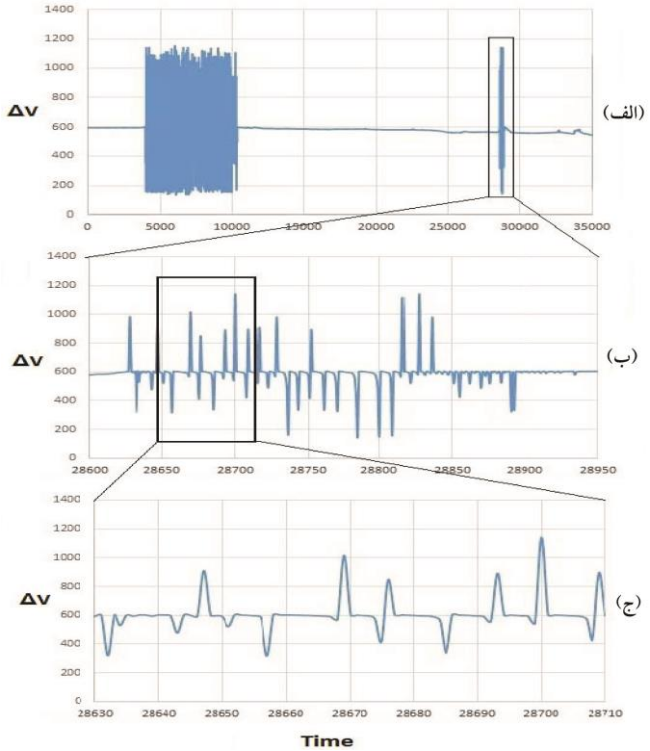
۱۰. ۱. ۱. اولین SES

طبق نظر واروتسوز وهمکاران SESها می‌توانند چند دقیقه تا چند روز دوام داشته باشند؛ بنابراین اختلاف پتانسیل دریافتی در ایستگاه‌ها شبانه‌روزی و با فاصلهٔ 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 پایهٔ 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 زمین‌لرزهٔ آینده در ارتباط باشد و می‌توان از روی این سیگنال احتمال وقوع چندین زمین‌لرزه را پیش‌بینی کرد، ولی بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در فاصلهٔ 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 پیش لرزه‌ای با بزرگی ۳/۳ ریشتر روی داد. اختلاف پتانسیل

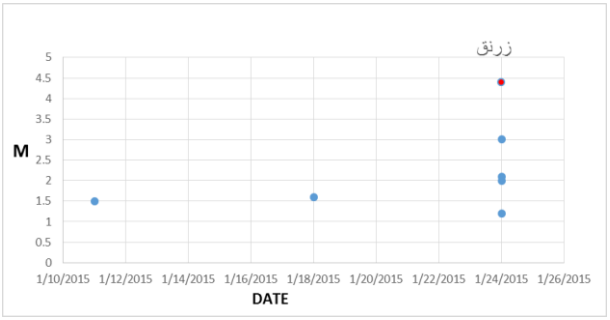
اندازه‌گیری‌شده برای این SES برابر با ۹۹۶ میلی‌ولت است و چون فاصلهٔ این دوقطبی نصب‌شده در جهت E-W در ایستگاه مذکور L=۸۰ متر است؛ نسبت ΔV/L برابر با ۱۲/۴۵۰ میلی‌ولت بر متر به دست آمد. شکل ۱۰ نمودار پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های مربوط به این زمین‌لرزهٔ اصلی را نشان می‌دهد.

۱۰. ۱. ۲. دومین SES

دومین SES دو روز بعد از اتمام اولین SES در همین ایستگاه و در همان دایپل شرقی –غربی دریافت شد. این سیگنال نیز مانند سیگنال اول ناگهانی شروع شد ولی برخلاف آن به‌صورت تدریجی به اتمام رسید. دومین SES یک ساعت به طول انجامید. اختلاف پتانسیل این SES ۹۹۶/۵ میلی‌ولت و نسبت ΔV/L برابر با ۱۲/۴۵ میلی‌ولت بر متر به دست آمد. این سیگنال نیز به‌صورت فعالیت SES است؛ بنابراین زمین‌لرزهٔ اصلی، با پس‌لرزه و پیش‌لرزه‌هایی همراه خواهد بود. در نتیجه چنانکه پیش‌بینی شده بود، بعد از ۱۳ روز پس از به‌پایان‌رسیدن این SES زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۳/۷ ریشتر در منطقهٔ کلوانق استان آذربایجان شرقی به همراه زمین‌لرزهٔ اصلی ۴/۴ ریشتری در کلوانق اتفاق افتاد. شکل ۱۱ نمودار رسم‌شده برای زلزله‌های اتفاق‌افتاده برای دومین SES ثبت‌شدهٔ ایستگاه تبریز را نشان می‌دهد.



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.

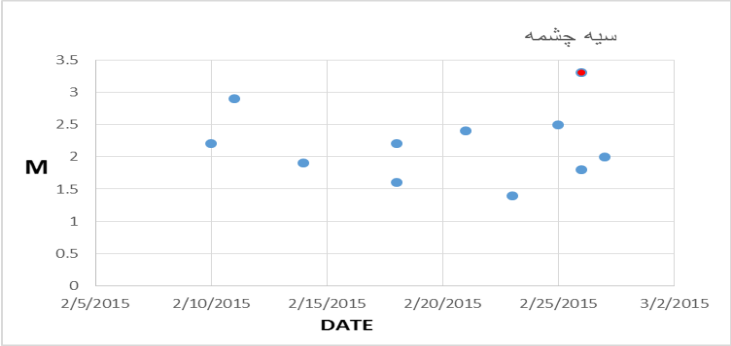


شکل ۱۱. نشان‌دهندهٔ نمودار پیش‌لرزه‌ها، زمین‌لرزهٔ اصلی و پس‌لرزه‌های مربوط به دومین SES ایستگاه تبریز

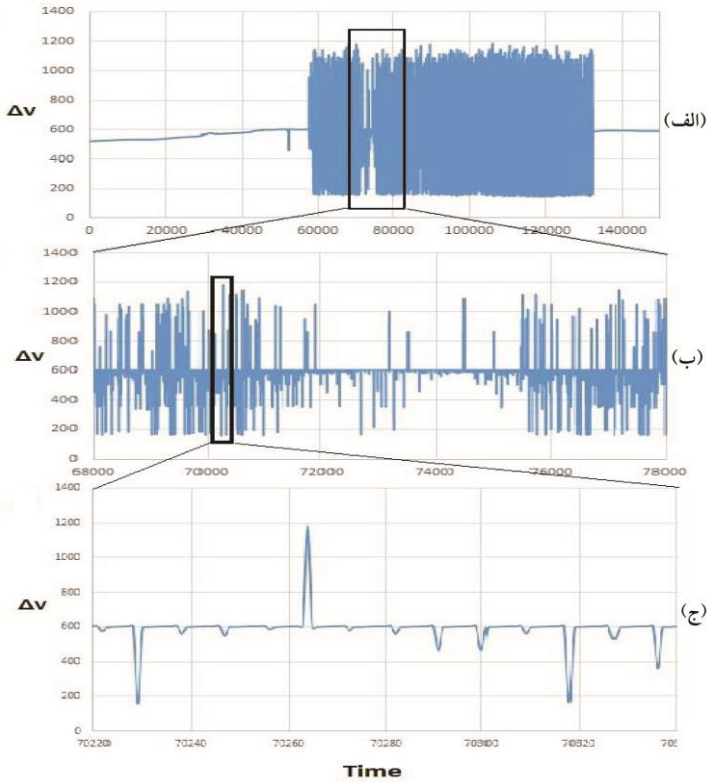
۱۰. ۱. ۳. سومین SES

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.

پس از به اتمام رسیدن SES و ثبت سیگنال پایه در ایستگاه، بعد از ۱۷ روز زمین‌لرزهٔ با بزرگی ۳/۳ ریشتر را در تاریخ ۲۰۱۵/۰۲/۲۶ در منطقهٔ خوی به دنبال داشته است. اختلاف دامنه و مقدار نسبت ΔV/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.



شکل ۱۲. نشان‌دهندهٔ نمودار پیش‌لرزه‌ها، زمین‌لرزهٔ 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.

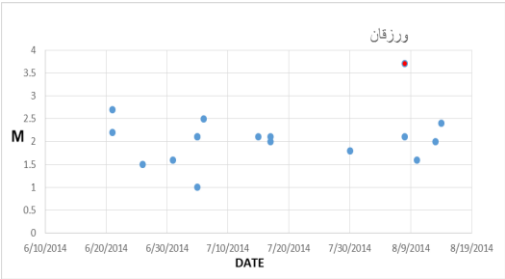
۱۰. ۲. ایستگاه ائل‌گلی

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=۲۰ به پایان رسید. سیگنال پایهٔ ایستگاه بین ۵۰ تا ۶۰ میلی‌ولت است، در حالی که SES ثبت‌شده بین ۱۰۴/۴- تا ۸۰ میلی‌ولت نوسان دارد. این سیگنال هم به‌صورت فعالیت SES بوده و به چند زمین‌لرزه مربوط است. اختلاف دامنه و نسبت ΔV/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، زمین‌لرزهٔ ۳/۳ ریشتری در بخشایش و در تاریخ ۲۰۱۴/۰۸/۰۸ زمین‌لرزهٔ ۳/۷ ریشتری ورزقان اتفاق افتاد که زمین‌لرزهٔ ورزقان، زمین‌لرزهٔ اصلی و زمین‌لرزه بخشایش پیش‌لرزهٔ زمین‌لرزهٔ اصلی در نظر گرفته شده است (شکل ۱۴). نشان‌دهندهٔ این SES در ایستگاه ائل‌گلی است (شکل ۱۵).

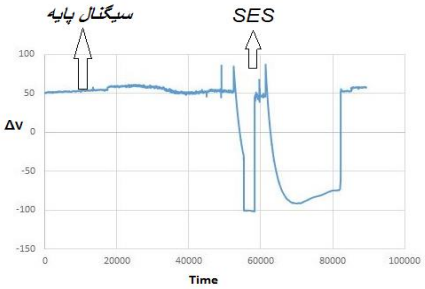
۱۰. ۳. سیگنال دریافت‌شده در ایستگاه اسپیران (۲)

مهم‌ترین و بزرگ‌ترین SES دریافت‌شده در شبکهٔ VAN طراحی‌شده در شمال‌غرب ایران، در ۱۶ مرداد ۹۴ در ایستگاه اسپیران (شمال تبریز) با دامنهٔ بالا (۲۱۹۷۷ میلی‌ولت) و به‌مدت ۱۰ دقیقه در ساعت ۸:۳۰ دریافت شد (شکل ۱۶).

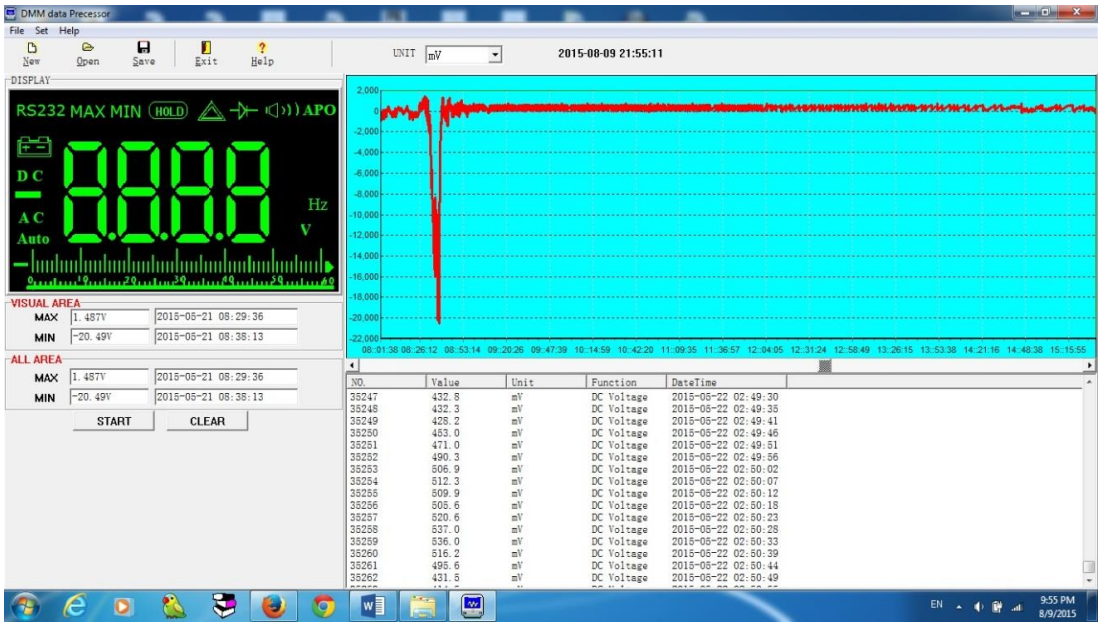
در نامه‌ای به ستاد بحران اعلام شد که زلزله در حد ۵/۵ ریشتر مورد انتظار است و به‌دلیل نبود ایستگاه به تعداد کافی، مکان و زمان دقیق رویداد قابل تشخیص نبوده و حتی ممکن است در استان‌ها و مناطق مجاور روی دهد و زمان مورد انتظاردر چنین شرایطی (با توجه به منبع واروتسوز، ۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۱۱) نیز ۳۰ تا ۴۰ روز از تاریخ دریافت ذکر شد. ۲۸ روز پس از دریافت سیگنال (۱۳ شهریور) زلزلهٔ ۵/۷ ریشنری 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 به‌درستی دریافت شده و زلزلهٔ مربوط نیز روی داده است. دربارهٔ مکان زلزله در منبع (واروتسوز، ۲۰۱۳) به‌دقت 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. نشان‌دهندهٔ نمودار پیش‌لرزه‌ها، زمین‌لرزهٔ اصلی و پس‌لرزه‌های مربوط به SES ایستگاه ائل‌گلی



شکل ۱۵. SES دریافت‌شده در ایستگاه ائل‌گلی. 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

برای نخستین بار در ایران به منظور امکان‌سنجی، جستجو و ثبت پیش‌نشانگرهای الکتریکی لرزه‌ای(SES) از اوایل سال ۱۳۹۳ در شمال‌غرب ایران با مشخص‌کردن مناطقی که شانس بیشتری برای دریافت SES دارند، ۶ ایستگاه در این ارتباط به‌صورت موقت نصب و راه‌اندازی شد. به‌تدریج 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 منطقهٔ اسپیران نصب شده بود هیچ SESای ثبت نکرد. دو ایستگاه دیگر نیز در دست تجهیز هستند.

با بررسی و مقایسهٔ SESهای دریافت‌شده در ایستگاه‌های حساس در شمال غرب ایران با نتایج کار گروه VAN در یونان، این نتیجه حاصل شد که این سیگنال‌ها همان SESهایی است که واروتسوز و همکاران در سال ۱۹۸۱ موفق به کشف آن‌ها شدند و به وسیلهٔ این SESها چندین زمین‌لرزهٔ بزرگ‌تر از ۵ ریشتر را پیش‌بینی کردند. در منطقهٔ مورد مطالعه نیزسیگنال‌های 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 کرهٔ زمین عمل نکند، می‌توان با توسعهٔ این ایستگاه‌ها و تجهیز آن‌ها و ترسیم نقشهٔ گزینش منطقه از روی ایستگاه‌های موجود، زمین‌لرزه‌های بزرگ را پیش‌بینی کرد و جان انسان‌ها را در نواحی مختلف کشور نجات داد.

در منطقهٔ مورد مطالعه با توجه به نتایج تجربی به‌دست‌آمده، 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 ازدریافت سیگنال‌های یادشده و هشدار اطلاع‌رسانی‌شده، زمین‌لرزهٔ ۳/۸ ریشتری در باسمنج و زمین‌لرزهٔ ۴/۴ ریشتری زرنق در شمال تبریز روی دادند که موفقیت ارزشمندی برای شبکهٔ نصب‌شده محسوب می‌شود. امید

است با توسعهٔ این شبکه در شمال‌غرب ایران بتوان با دریافت SES مربوط به یک زمین‌لرزهٔ مشخص در دست‌کم ۳ ایستگاه حساس، رومرکز (R) و بزرگای زمین‌لرزهٔ آینده را به‌صورت دقیق پیش‌بینی و اعلام هشدارکرد.

مراجع

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

مشین‌چی اصل.، م. س. و صفری، ع.، ۱۳۸۶، پیش بینی زلزله با استفاده از پیش نشانگرهای الکتریکی، اولین همایش پیش‌نشانگرهای 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 1987-1989, 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 Appenine 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.