

بررسی خواص آماری سیگنال‌های زلزله برای تشخیص زمین‌لرزه از انفجارهای مصنوعی

مصطفی علامه‌زاده، عضو هیأت علمی پژوهشکده زلزله‌شناسی پژوهشگاه

۱- چکیده

خودسازمانده به مدلسازی ARMA و شبکه‌های عصبی معطوف شده بود. در روش خوشه‌یابی خودسازمانده، نتایج تحقیقات قبلی مبین آن است که تعداد و شکل خوشه‌ها نقش بسیار مهمی در دقت طبقه‌بندی ایفا می‌کند [۱]. با توجه به این مطلب، الگوریتم جدید خوشه‌یابی با بسط روش LVQ بنا نهاده شد [۲] و با در نظر گرفتن خوشه‌های فازی، بهینه‌سازی‌هایی بر روی تعداد و شکل تداخل خوشه‌ها انجام یافته است.

در تحقیق انجام گرفته توسط علامه‌زاده و ناصری در سال ۱۹۹۹ [۱] در بخش شبکه‌های عصبی، با توجه به ماهیت جزیره‌وار داده‌های طیفی در لرزه نگاشتها شبکه عصبی مربعی مورد استفاده قرار گرفت و با انجام بهینه‌سازی‌هایی بر روی ساختار شبکه مزبور نتایج عملی مؤثری نسبت به شبکه‌های عصبی معمولی به دست آمد. سرعت و دقت بالا برای شناسایی چشمه در رویدادهای لرزه‌ای و توانایی درون‌یابی خوب، از نتایج مهم استفاده از این شبکه بوده‌اند. سری زمانی سیگنال‌های زلزله نسبت به انفجارات مصنوعی بسیار نامنظم است و نامانایی (Nan Stationary) شدیدتری دارد. طیف فرکانس، تبدیل فوریه تابع همبستگی می‌باشد که با استفاده از سری زمانی موج P ، عمل

در چند سال اخیر تحلیل آماری سیگنال‌های زلزله برای تفکیک زمین‌لرزه از انفجار اهمیت خاصی یافته است. در این پژوهش نشان داده شده است که چگونه از تحلیل زمان-فرکانس سیگنال‌ها در تشخیص زمین‌لرزه‌ها از انفجارهای مصنوعی می‌توان استفاده نمود. علاوه بر آن، تابع تصمیم با در نظر گرفتن یک سطح مشخص که جداکننده دو ویژگی است با فرض دانستن توزیع جداکننده برای هر دو رویداد محاسبه شده است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل آماری سیگنال، طیف زمان-فرکانس - انرژی، تابع تصمیم‌گیری، شبکه عصبی مصنوعی

۲- مقدمه

هدف از انجام این پژوهش ارائه روش‌های جدید برای طبقه‌بندی سیگنال‌های زلزله از انفجارهای مصنوعی می‌باشد. به منظور نیل به این هدف، ابتداء روش‌های کنونی طبقه‌بندی نگاشتها لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه آماری سیگنال‌های لرزه‌ای نشان می‌دهند که قبل از شروع بسیاری از رویدادهای لرزه‌ای این سیگنال‌ها حاوی اطلاعاتی در مورد ماهیت چشمه هستند. در دهه ۹۰ روش طبقه‌بندی براساس روش خوشه‌یابی

آشکار سازی (Discrimination) انجام می شود. بررسی طیف فرکانس در گذشته نشان می داد که چه فرکانس هایی دارای چه دامنه هایی بوده اند.

برای کسب اطلاعات بیشتر از سیگنال، تبدیلات ریاضی بر سیگنال های زلزله اعمال می شوند. این اطلاعات به آسانی از سیگنال اصلی قابل دسترس نیستند. در عمل، بیشتر سیگنال ها در حوزه زمان هستند. به عبارت دیگر، در منحنی سیگنال یکی از محورها زمان و محور دیگر دامنه است. در واقع، نمایش دامنه-زمان سیگنال به دست می آید. این نمایش همیشه بهترین نمایش برای سیگنال نیست؛ زیرا ممکن است بسیاری از اطلاعات را نشان ندهد. در بیشتر موارد، اطلاعات مهم در محتوای فرکانس سیگنال پنهان است. طیف فرکانس مبین آن است که چه مقدار از هر فرکانس در یک سیگنال موجود است. تبدیل فوریه، فرکانس های موجود در سیگنال را نشان می دهد؛ اما، در مورد اینکه این فرکانس ها در چه زمانی ظاهر می شوند، هیچ اطلاعاتی نمی دهد؛ بنابراین تبدیل فوریه برای بررسی سیگنال های زلزله که ناماناست روش مناسبی نیست؛ مگر اینکه هدف، کسب اطلاعاتی در مورد فرکانس های موجود در سیگنال زلزله باشد و زمان رخداد مهم نباشد. تبدیل فوریه کوتاه دوره یکی از روشهای گریز از این معضل است.

۳- روش تحلیل

در تبدیل فوریه کوتاه دوره (Short Term Fourier Transform)، سیگنال به بخشهای به اندازه کافی کوچک تقسیم می شود؛ به گونه ای که بتوان این بخشهای سیگنال را مانا فرض کرد. برای این منظور، در ابتدا یک پنجره (W)، انتخاب و در نقطه شروع سیگنال قرار می گیرد (t'=0). اگر پهنای پنجره T

ثانیه باشد، در لحظه (t'=0) تابع پنجره، اولین ثانیه از ثانیه سیگنال را می پوشاند. سپس تابع پنجره در $\frac{T}{2}$ ثانیه از سیگنال ضرب می شود. با این عمل، فقط $\frac{T}{2}$ ثانیه اول از سیگنال انتخاب می شود. سپس این حاصل ضرب به عنوان سیگنال های معمولی گرفته می شود. در نتیجه، تبدیل فوریه $\frac{T}{2}$ ثانیه اول سیگنال به دست می آید و محتوای فرکانسی آن مشخص می شود. در مرحله بعد پنجره به مکان دیگری (t'_1) منتقل، در سیگنال ضرب و از حاصل ضرب، تبدیل فوریه گرفته می شود [۲]. این فرآیند تا انتهای سیگنال تکرار می شود:

$$\text{STFT}^{(w)}(t', f) = \int_t x(t) w^*(t-t') e^{-2\pi f t} dt \quad (1)$$

در رابطه (۱)، x(t) سیگنال، w(t) تابع پنجره و * مزدوج مختلط است؛ اما چون تابع نمونه x_k(t) متناوب نیست، نمی توان آن را به صورت سری فوریه گسسته نمایش داد. علاوه بر آن، در فرآیند مانا، شرط انتگرال پذیری و پیوسته قطعه ای بودن برای x_k(t) برقرار نیست؛ بنابراین تبدیل فوریه را نمی توان به راحتی اعمال کرد. برای حل این مسأله به جای استفاده از خود تابع نمونه، تابع خود همبستگی آن به کار برده می شود. تابع خود همبستگی معمولاً شرط انتگرال فوریه را برآورده می کند:

$$R_x(\tau \rightarrow \infty) = 0 \quad (2)$$

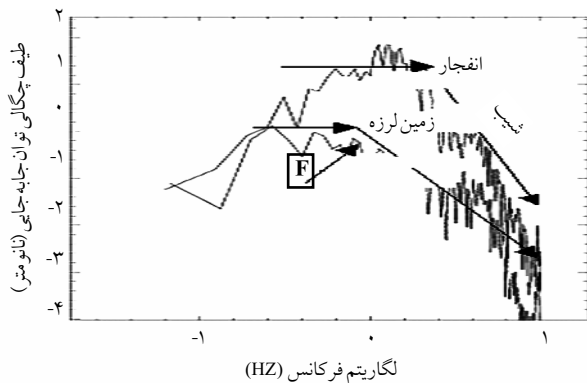
در نتیجه، شرط انتگرال پذیری برقرار است و می توان از R_x(\tau) تبدیل فوریه گرفت:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R_x(\tau)| d\tau < \infty \quad (3)$$

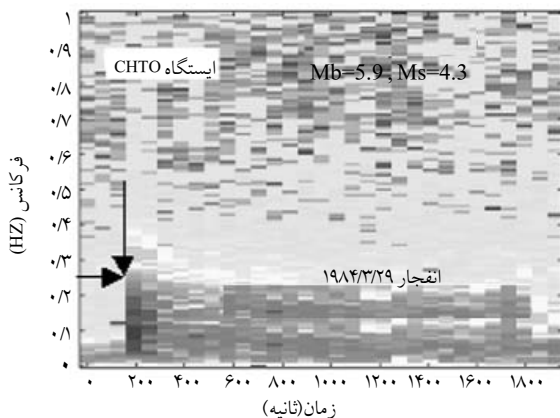
$$S_x(\omega) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

در رابطه (۴)، S_x(\omega) تابع چگالی طیف فرکانسی یا تابع

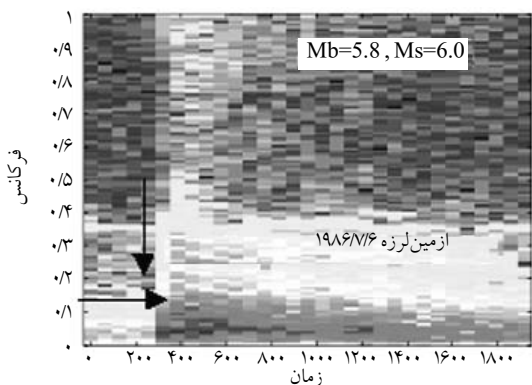
چگالی خود طیفی نامیده می شود و تعیین می کند که چه فرکانس هایی در تابع نمونه وجود دارد. منحنی تابع چگالی طیفی بر حسب فرکانس، طیف فرکانسی نامیده می شود.



الف: دو طیف انفجار و زمین لرزه. فرکانس کناری در انفجارهای مصنوعی کمتر از زمین لرزه هاست



ب: طیف زمان - فرکانس - انرژی مربوط به انفجارهای هسته ای، انرژی در فاصله کوتاهی از زمان رها شده است.



پ: طیف زمان - فرکانس - انرژی مربوط به زمین لرزه ها، انرژی در فاصله زمانی بیشتری رها شده است.

شکل (۱): طیف زمان - فرکانس - انرژی برای دو رویداد انفجار مصنوعی و زمین لرزه طبیعی

در این مقاله، طیف زمان-فرکانس جدا از مؤلفه قائم موج P از انفجارها و زمین لرزه ها بررسی شده است

با داشتن یک نمایش زمان-فرکانس برای سیگنال، نوع مؤلفه فرکانسی در سیگنال و زمان رویداد این فرکانس ها مشخص می شود؛ اما نمی توان فهمید که چه فرکانسی دقیقاً در چه لحظه ای اتفاق می افتد. آنچه مشخص است فواصل زمانی است که در آن فواصل نیز یک نوار از فرکانس ها وجود دارد. این مشکل تفکیک پذیری (Resolution) است. در تبدیل فوریه مشکل تفکیک پذیری در حوزه فرکانس وجود ندارد؛ به طور مشابه در حوزه زمان نیز مشکل تفکیک پذیری وجود ندارد؛ زیرا مقدار سیگنال در هر لحظه از زمان مشخص است. در STFT چون طول پنجره محدود است (در FT پنجره ای که استفاده می شود، تابع $e^{-2\pi i f t}$ بی نهایت دارد) فقط یک قسمت از سیگنال را می پوشاند و این باعث ضعیف شدن تفکیک پذیری فرکانس می شود [۳].

منظور از ضعیف ترین این است که نوار پهن تری از فرکانس وجود دارد. در STFT، هر چه پنجره باریک تر باشد، تفکیک پذیری زمانی بهتر و ولی تفکیک پذیری فرکانس ضعیف تر می شود و اگر پنجره پهن انتخاب شود تفکیک پذیری فرکانس خوب و تفکیک پذیری زمان ضعیف می شود.

شکل (۱) مبین آن است که انرژی ناشی از انفجار در فاصله کوتاهی از زمان رها شده است؛ در صورتی که در مورد سیگنال زلزله چنین نیست. علاوه بر آن، فرکانس گوشه

جدول (۱). زمین لرزه‌ها

ایستگاه	بزرگا		طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	تاریخ	ردیف
	Ms	Mb				
CHTO	۵/۴	۵/۶	۸۶/۱۹	۴۳/۷۴	۱۹۸۰/۱۷/۰۶	۱
KONO	۵/۱	۵/۸	۷۷/۴۵	۴۲/۸۶	۱۹۸۲/۱۲/۳۱	۲
ANTO	۵/۶	۵/۵	۷۵/۲۶	۴۰/۰۳	۱۹۸۳/۰۴/۰۵	۳
KONO	-	۶/۱	۷۷/۰۸	۳۶/۵۰	۱۹۸۳/۰۹/۱۲	۴
GRFO	-	۵/۵	۸۸/۷۷	۴۷/۵۷	۱۹۸۳/۱۰/۰۶	۵
GRFO	-	۵/۶	۷۷/۴۴	۳۶/۴۳	۱۹۸۳/۱۰/۳۰	۶
KONO	۵/۶	۵/۷	۷۲/۹۱	۳۹/۳۳	۱۹۸۳/۱۲/۱۶	۷
KEV	-	۶/۰	۷۰/۸۴	۳۶/۳۲	۱۹۸۳/۱۲/۳۰	۸
KEV	-	۵/۷	۷۷/۰۶	۳۶/۴۱	۱۹۸۴/۰۷/۲۷	۹
CHTO	-	۶/۰	۷۰/۸۴	۳۶/۴۲	۱۹۸۴/۰۲/۱۶	۱۰
CHTO	-	۵/۶	۷۰/۸۵	۳۶/۴۲	۱۹۸۴/۱۴/۱۹	۱۱
KEV	-	۵/۷	۷۰/۸۷	۳۶/۴۴	۱۹۸۷/۰۷/۰۱	۱۲
CHTO	۶/۱	۶/۰	۷۷/۳۴	۳۹/۱۷	۱۹۸۴/۱۰/۲۶	۱۳
CHTO	-	۶/۷	۷۰/۸۹	۳۶/۱۸	۱۹۸۵/۰۷/۲۹	۱۴
CHTO	-	۶/۱	۷۰/۸۱	۳۹/۴۲	۱۹۸۵/۰۸/۰۲	۱۵
ANTO	۷/۶	۶/۴	۷۵/۲۷	۳۹/۴۲	۱۹۸۵/۰۸/۲۳	۱۶
CHTO	۶/۱	۶/۰	۸۶/۸۶	۳۷/۲۲	۱۹۸۶/۰۶/۲۰	۱۷
CHTO	۶/۱	۵/۸	۸۰/۰۷	۳۴/۴۱	۱۹۸۶/۰۷/۰۶	۱۸
ANTO	-	۵/۶	۷۳/۱۶	۳۸/۸۴	۱۹۸۶/۰۸/۲۱	۱۹
CHTO	۵/۸	۵/۹	۸۷/۳۱	۴۷/۹۵	۱۹۸۷/۰۷/۰۵	۲۰
ANTO	-	۵/۲	۷۹/۲۷	۴۷/۳۹	۱۹۸۷/۰۷/۲۴ (E2)	۲۱
ANTO	-	۵/۵	۷۹/۳۰	۴۷/۵۲	۱۹۸۷/۰۷/۲۴ (E1)	۲۲
CHTO	-	۵/۱	۹۶/۱۵	۴۵/۳۸	۱۹۸۷/۰۷/۲۸	۲۳
CHTO	۵/۰	۵/۱	۷۹/۲۸	۴۷/۳۴	۱۹۸۷/۰۳/۰۳	۲۴
CHTO	۴/۵	۵/۱	۶۹/۸۷	۴۷/۷۳	۱۹۸۷/۰۳/۲۶	۲۵
EIL	-	۵/۲	۵۷/۷۴	۲۸/۲۳	۲۰۰۲/۰۲/۱۷	۲۶
FINES	-	۵/۵	۴۸/۷۸	۳۵/۶۵	۲۰۰۲/۰۶/۲۲	۲۷
EIL	۵/۴	-	۵۶/۸۰	۲۸/۱۴	۲۰۰۳/۰۲/۱۴	۲۸
MLR	-	۵/۲	۴۰/۳۸	۳۹/۰۱	۲۰۰۳/۰۵/۰۱	۲۹
FINES	-	۵/۰	۶۰/۸۶	۳۵/۴۷	۲۰۰۳/۰۷/۰۳	۳۰
ZAL	-	۵/۱	۵۴/۲۰	۲۸/۴۶	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۳۱
GERES	-	۵/۲	۵۴/۰۵	۲۸/۳۷	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۳۲
CMAR	-	۵/۱	۵۹/۷۸	۲۹/۰۵	۲۰۰۳/۰۸/۰۴	۳۳
CMAR	-	۵/۲	۵۹/۸۵	۲۹/۱۲	۲۰۰۳/۰۸/۲۱	۳۴

(جدول ۱). از ۳۴ مورد زمین لرزه مندرج در جدول (۱) و ۳۶ انفجار جدول (۲)، از ایستگاهها (جدول ۳) بجز یک مورد مشکوک انفجار که زلزله بوده در بقیه موارد تشخیص درست بوده است.

پارامترهایی که از طیف زمان-فرکانس برای تشخیص زمین لرزه از انفجار استخراج می شود، از مدل استوکاستیکی به دست می آید [۴]. این مدل به صورت رابطه (۵) و ماتریس Q به صورت رابطه (۶) می باشد:

$$P(k) = \frac{4\pi v H^2}{\sqrt{Q}} [U^2(k)+1]^{(v+1)} \quad (5)$$

$$Q = \left[k_s^2 \sin^2(\theta) + k_n^2 \cos^2(\theta) (k_n^2 - k_s^2) \sin^2\theta \cos^2(\theta) \right] \left[(k_s^2 - k_n^2) \sin^2\theta \cos^2(\theta) k_n^2 - \sin^2(\theta) - k_s^2 \cos^2(\theta) \right] \quad (6)$$

در رابطه های مذکور، RMS انرژی دامنه، k عدد موج، v فرم مربوط به نهایی بودن رابطه (۵) به ضرایب B (مجاناب بر طیف زمان-فرکانس انرژی است)، U فرم بدون بعد، θ آزیموت موج P و پارامترهای k_n و k_s مربوط به میدان چرخش فضایی (Spatial Orientation) است [۵]. ارتباط v با D (ابعاد فرکتالی این مدل استوکاستیکی) و B به صورت روابط (۷ و ۸) می باشد:

$$B = -2(v+1) \quad (7)$$

$$D = -3-v \quad (8)$$

۴- مجموعه داده ها

داده های به کاررفته در این پژوهش در جدول های (۱ و ۲) آورده شده است. این تحقیق بر روی نگاشتهای شش ایستگاه لرزه نگاری CHTO, KONO, ANTO, KEV, WMQ و GRF صورت گرفته است. انفجارات هسته ای در شرق قزاقستان و در ایستگاه Semi Palatin SK صورت پذیرفته اند.

جدول (۲): انفجارهای مصنوعی

ایستگاه	بزرگا		طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	تاریخ	ردیف
	Ms	Mb				
KEV	۴/۳	۶/۰	۷۸/۸۹	۴۹/۷۶	۱۹۸۱/۰۱/۱۸	۱
ANTO	۵/۶	۴/۰	۷۸/۸۶	۴۹/۹۱	۱۹۸۱/۱۷/۲۹	۲
KONO	۵/۶	۴/۰	۷۸/۸۶	۴۹/۸۶	۱۹۷۱/۲۲/۲۷	۳
KEV	۶/۱	۴/۶	۷۸/۹۸	۴۹/۹۰	۱۹۸۳/۰۶/۱۲	۴
KONO	۶/۰	-	۷۸/۸۴	۴۹/۹۳	۱۹۸۳/۱۰/۰۶	۵
CHTO	۵/۹	۴/۳	۷۹/۰۱	۴۹/۹۳	۱۹۸۴/۰۳/۲۹	۶
CHTO	۵/۷	-	۷۸/۱۹	۴۹/۷۷	۱۹۸۴/۰۴/۱۵	۷
CHTO	۶/۰	۵/۰	۷۸/۹۲	۴۹/۹۳	۱۹۸۴/۰۴/۲۵	۸
KEV	۶/۱	۵/۷	۷۹/۰۶	۴۹/۹۰	۱۹۸۴/۰۵/۲۶	۹
KEV	۶/۱	۴/۶	۷۸/۹۸	۴۹/۹۰	۱۹۸۴/۰۷/۱۴	۱۰
ANTO	۵/۸	۳/۸	۷۹/۰۹	۴۹/۹۸	۱۹۸۴/۱۲/۰۲	۱۱
KEV	۶/۱	۴/۶	۷۸/۸۹	۴۹/۹۷	۱۹۸۴/۱۲/۱۶	۱۲
KEV	۶	۵/۶	۷۸/۷۱	۴۹/۸۳	۱۹۸۴/۱۲/۲۸	۱۳
CHTO	۵/۹	۴/۴	۷۸/۸۳	۴۹/۸۶	۱۹۸۵/۰۲/۱۰	۱۴
ANTO	۵/۹	۴/۱	۷۸/۹۵	۴۹/۸۷	۱۹۸۵/۰۴/۲۵	۱۵
ANTO	۶/۰	۴/۳	۷۸/۸۸	۴۹/۸۸	۱۹۸۵/۰۶/۱۵	۱۶
KEV	۶	۴	۷۸/۶۸	۴۹/۸۳	۱۹۸۵/۰۶/۳۰	۱۷
KEV	۵/۹	۴/۲	۷۸/۸۰	۴۹/۹۱	۱۹۸۵/۰۷/۳۰	۱۸
CHTO	۵/۹	-	۷۸/۱۰	۴۹/۸۰	۱۹۸۷/۰۲/۲۶	۱۹
ANTO	۵/۴	۳/۹	۷۸/۸۳	۴۹/۸۹	۱۹۸۷/۰۳/۱۲	۲۰
KEV	۶/۲	۴/۷	۷۸/۸	۴۹/۹۰	۱۹۸۷/۰۴/۰۳	۲۱
ANTO	۴/۳	۶	۷۸/۶۷	۴۹/۸۲	۱۹۸۷/۰۴/۱۷	۲۲
WMQ	-	۵/۵	۷۸/۱۱	۴۹/۸۰	۱۹۸۷/۰۵/۰۶	۲۳
ANTO	-	۵/۳	۷۸/۰۹	۴۹/۸۰	۱۹۸۷/۰۶/۰۶	۲۴
KEV	۴/۲	۶/۱	۷۸/۷۰	۴۹/۹۰	۱۹۸۷/۰۶/۲۰	۲۵
China	-	۵/۵	۸۸/۷۰	۴۷/۵۶	۱۹۹۰/۰۵/۲۶	۲۶
COL	-	۶/۵	۸۸/۷۷	۴۷/۵۱	۱۹۹۲/۰۵/۲۱	۲۷
China	-	۵/۰	۸۸/۶۹	۴۷/۷۱	۱۹۹۲/۰۹/۲۵	۲۸
China	-	۵/۹	۸۸/۶۹	۴۷/۶۶	۱۹۹۳/۱۰/۰۵	۲۹
China	-	۶/۱	۸۸/۸۲	۴۷/۶	۱۹۹۵/۰۵/۱۴	۳۰
China	-	۶/۰	۸۸/۸	۴۷/۵۶	۱۹۹۵/۰۸/۱۷	۳۱
CMAR	-	۵/۹	۸۸/۶۹	۴۷/۶۶	۱۹۹۶/۰۷/۲۹	۳۲
CMAR	-	۴/۹	۸۸/۴۲	۴۷/۸۲	۱۹۹۶/۰۷/۲۹	۳۳
ARU	-	۵/۲	۷۷/۸	۲۷/۱	۱۹۹۷/۰۵/۱۱	۳۴
ZAL	-	۴/۸	۶۴/۷۹	۲۸/۹	۱۹۹۷/۰۵/۲۸	۳۵
MLR	-	۴/۶	۶۳/۷۳	۲۸/۴۹	۱۹۹۷/۰۵/۳۰	۳۶

جدول (۳): علل و مشخصات مکانی ایستگاهها

ایستگاه	محل	عرض شمالی (درجه)	طول شرقی (درجه)
ANTO	آنکارا، ترکیه	۳۹/۸۸۸	۳۲/۷۹
CHTO	چاینگ مین، تایلند	۱۸/۷۹۰	۹۸/۹۷
GRFO	گرافنبرگ، آلمان	۴۹/۶۹	۱۷/۲۲
KEV	KEVO، فنلاند	۶۹/۷۵۵	۲۷/۰۰۱
KONO	کونگسبرگ، نروژ	۵۹/۶۴۹	۹/۵۹۸
WMQ	یورومکی اکسینجینگ	۴۳/۸۲۱	۸۷/۶۹
FINES	فنلاند	۶۷/۴۴	۲۶/۰۷۷
GRES	آلمان	۴۸/۸۴۵۱	۱۳/۷۰۱۶
CMAR	تایلند	۱۸/۴۵۷۵	۹۸/۹۴۲۹
ZAL	زالسو، روسیه	۵۳/۹۳۶۷	۸۴/۷۹۸۱
ARCES	نروژ	۶۹/۵۳۴۹	۲۵/۵۰۵۸
NOA	نروژ	۶۷/۰۳۹۷	۱۷/۲۱۴۸

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش طیف زمان-فرکانس-انرژی برای مؤلفه قائم موج P از انفجارها و زمین لرزه‌ها بررسی شده است. از ۳۴ زمین لرزه جدول (۱) و ۳۶ انفجار جدول (۲) بجز یک مورد مشکوک انفجار که زلزله بوده است بقیه موارد درست تشخیص داده شده است.

با توجه به اینکه نرم افزار این روش در برنامه Geo Tool وجود دارد قبل از هر گونه طبقه بندی سیگنالی با روشهای پیشرفته تر و مسأله مهم تصمیم گیری از داده ها به راحتی می توان تشخیص اولیه را انجام داد.

یکی از مسائل مهم این روش ایجاد امکان رشد یادگیری آن است و این انعطاف باید موجود باشد که با وارد کردن ویژگیهای بهتر (طیف زمان-فرکانس) بتوان امکان شبکه ها و واحدهای تصمیم گیرنده (نظیر شبکه های عصبی) را بهبود بخشید.

1. Allamehzadeh. M, Nassery, P. (1999). Application of quadratic neural networks to seismic signal classification. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 113.
2. Cohen, L. (1995). *Time - Frequency Signal Analysis*. Prentice Hall, New York.
3. Shumway, R. H., Stoffer, D. S. (2000). *Time serial Analysis and its Applications*. New York : Springer verlag.
4. Goff, J. A., Jordan, T. H. (1989). Stochastic modeling of seafloor morphology: inversion of steam beam data for second - order statistics. *J. of Geophys. Res.*, 93, 13589-13608.
5. Pulli, J. J. (1995). Extracting and processing signal parameters for regional seismic event identification. *Proceeding of the NATO advanced study institute on monitoring a comprehensive test ban treaty*. ◀