

# تشخیص زمین لرزه و انفجار با به کارگیری روش تجزیه مد تجربی (EMD) لرزه نگاشتها

نوشته: احمد امینی\* و شایسته مهربان\*

\* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

## Identification between Earthquake and Explosion by using the Empirical Mode Decomposition (EMD) of Seismograms

By: A. Amini\* & Sh. Mehrabian\*

\*Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۴/۰۸

### چکیده

امواج زمین لرزه و انفجار گذرا و غیرایستا هستند. در لرزه شناسی همانند مهندسی زلزله، هنوز اغلب داده‌ها با تحلیل فوریه پردازش می‌شوند. به دلیل تفاوت در ویژگی‌های غیرخطی و غیرایستای این داده‌ها، روش تحلیل فوریه نمی‌تواند جزئیات اطلاعات را در پراش امواج، دگرشکلی شکل موج و توزیع انرژی- بسامد آشکارسازی کند. در این مقاله، یک روش جدید بر پایه تجزیه مد تجربی (Empirical Mode Decomposition) حوزه زمانی ارائه شده است که تحلیل ساختارهای بلند و کوتاه دوره این امواج را آسان می‌سازد و بینشی در مورد بسامدهای ذاتی را فراهم می‌آورد. پس از اعمال آن روی داده‌های لرزه‌ای، مدهای نوسانی امواج زمین لرزه و انفجار با هم مقایسه می‌شوند، رابطه‌ای برای هر گروه از داده‌های هم‌نوع و همچنین تفاوت‌هایی بین امواج غیر هم‌نوع بر اساس توابع مد ذاتی (Intrinsic Mode Functions) تولید شده، به دست می‌آید. از بررسی‌های به عمل آمده نتیجه می‌شود که ترسیم ماکزیمم بسامدهای IMF مختلف هر لرزه نگاشت بر حسب محل قرارگیری آنها، یک عامل تشخیصی بسیار مؤثر است و به این ترتیب انفجارها و زمین لرزه‌ها به راحتی از یکدیگر قابل تفکیک هستند. همچنین نشان داده می‌شود که روش مورد نظر نسبت به روش‌های پیشرفته‌ای مانند روش احتمالاتی غیرمارکوفی گسسته، کارایی بیشتری دارد.

**کلیدواژه:** تجزیه مد تجربی (EMD)، توابع مد ذاتی (IMF)، امواج زمین لرزه و انفجار، بسامدهای اساسی.

### Abstract

All the earthquakes are transient and nonstationary. For lack of alternatives, in seismology as well as earthquake engineering, most data are still processed by using the Fourier analysis. The most difficulties in the Fourier spectral analysis are associated with nonlinearity and non-stationary nature of the data. Such methods cannot reveal the detailed information in the dispersion properties, the wave form deformation, and the energy-frequency distribution. In this study, a new technique based on the time-domain empirical mode decomposition has been explained, which enables us to analyze both short-term information and long-term structures in seismic waves. It provides insight into long term memory and local time behavior of seismic signals. Oscillation modes of Earthquakes and Explosions are compared to each others, relationships between each group of the same data and differences between different data are obtained based on the produced IMFs. With respect to the advanced methods such as discrete stochastic non-Markov process it has been shown that this technique gives better identification. Plotting the maximum frequency of different IMFs via position of them, gives an effective identification tool. In this study first the technique

is explained and then the obtained results are illustrated and discussed.

**Key words:** Empirical Mode Decomposition, Intrinsic Mode Functions, Earthquakes and Explosions waves, Original frequency.

## ۱- مقدمه

امروزه مسئله تشخیص امواج زمین لرزه و انفجار، جدا از اثرات علمی آن در ارتباط با تشخیص سیگنال‌های مشابه دارای منشأ فیزیکی متفاوت، در بعضی مسائل سیاسی مرتبط با آزمایش انفجارهای هسته‌ای نیز نقش مهمی دارد. تبدیل‌ها در بررسی و تحلیل بسیاری از سیگنال‌ها نقشی اساسی دارند و به کمک آنها می‌توان سیگنال داده‌شده را به صورت مجموعه‌ای از توابع جدید نمایش داد. یکی از تبدیل‌های رایج، تبدیل فوریه است که این تبدیل در اینگونه مسائل در عمل نمی‌تواند بخش‌های یک سیگنال گذرا را که زمان دوام بسیار کوتاه دارد، به طور مؤثر نمایش دهد؛ علت آن را می‌توان به وجود توابع نمایی مختلط در تبدیل نسبت داد که هیچ تمرکزی در زمان ندارند. در واقع روش‌های حوزه فوریه دارای ماهیت ذاتاً کلی‌نگر هستند و نمی‌توانند بر اساس ویژگی‌های محلی سیگنال تغییر یابند. در لرزه‌شناسی همانند مهندسی زلزله، هنوز اغلب داده‌ها با تحلیل فوریه پردازش می‌شوند (Scherbaum, 1994; Geller & Ohminato, 1994). روش‌های تشخیص طیفی بر اساس نوع موج مورد استفاده (حجمی، سطحی)، به گروه‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شوند (Bath, 1962): مقایسه طیف امواج هم‌نوع انفجارها و زمین لرزه‌ها، مقایسه نسبت‌های طیفی امواج غیر هم‌نوع انفجارها و زمین لرزه‌ها و مقایسه ممان‌های طیفی (در مورد امواج حجمی) و مقایسه نسبت‌های دامنه طیفی امواج ریلی در باندهای بسامدی مختلف (در مورد امواج سطحی).

در روش مقایسه طیف امواج هم‌نوع، برای مثال امواج P، بسامدهای بزرگتری برای انفجارهای زیرزمینی در مقایسه با زمین لرزه‌های بزرگی موج حجمی مشابه نتیجه می‌شود که روش مؤثری برای تشخیص است (Aki & Tsai, 1972; Muller & Murphy, 1971). طیف جابه‌جایی (دوره تناوب ۰/۵-۳۳S) (Muller & Murphy (1971) امواج P انفجارهای زیرزمینی و زمین لرزه‌ها را با هم مقایسه کردند، که علاوه بر مقایسه بسامدهای بزرگ، شیب‌های طیفی را نیز بررسی نموده و به نتایج زیر رسیدند: ۱) برای دوره‌های تناوبی کوتاه‌تر (کمتر از ۱/۵S)، هر نوع طیف تقریباً با  $\omega^{-2}$  کاهش می‌یابد و ۲) برای دوره‌های تناوبی بزرگ‌تر (بیشتر از ۳S)، طیف انفجار کاهش می‌یابد ولی طیف زمین لرزه، یک افزایش کلی را دارد که این مورد نیز به عنوان یک عامل تشخیص مؤثر می‌تواند به کار برده شود.

روش دیگر که بر پایه مقایسه طیف موج P بنا گذاشته شده، از تفاوت‌هایی در سازوکار چشمه استفاده می‌کند. (Davis & Smith (1968) بر پایه روش

حرکت- محدود چشمه، طیف موج P یک انفجار زیرزمینی و زمین لرزه‌های با بزرگی یکسان و از نظر عملی دارای مسیرهای یکسان را با هم مقایسه کردند و دریافتند که زمان دوام انفجار، ۰/۵-۰/۱ برابر زمان دوام زمین لرزه معادل است. Willis (1963) نیز با استفاده از مؤلفه قائم طیف سرعت ذره‌ای، نشان داد که نسبت‌های به طور واضح بالاتر  $S_{max}/P_{max}$  برای زمین لرزه‌ها در مقایسه با انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی (اساساً آزمایش‌های NTS)، وجود دارد که روش تشخیص معتبری را برای فواصل بیشتر از ۱۰۰۰km پیشنهاد می‌کند. Weichert (1971) روش تشخیص مناسبی را به کمک ممان طیفی میانگین‌گیری شده،  $\sum_i A_i \omega_i^n / \sum_i A_i$ ، معرفی نمود که در این رابطه،  $A_i$  دامنه بسامد  $\omega_i$  است. او با بررسی‌های انجام شده نتیجه گرفت که  $n=3$ ، نسبت به  $n=1$ ، تفکیک بهتری را می‌دهد و  $n$ ‌های بزرگتر از ۳، تفاوتی را ایجاد نمی‌کنند. ممان‌های انفجار به طور مقایسه‌ای بزرگتر از ممان‌های زمین لرزه می‌باشند. امواج سطحی نیز وسیله تشخیص مؤثری بین انفجارهای زیرزمینی و زمین لرزه‌ها (با بزرگی یکسان)، بویژه برای نسبت‌های دامنه طیفی امواج ریلی در باندهای بسامدی مختلف هستند (Aki & Tsai, 1972; Derr, 1970; Marshal, 1970). در این روش‌ها علاوه بر نسبت‌های بین موج مشابه در باندهای بسامدی مختلف، نسبت دامنه‌های طیفی نرمالایز شده لاو به ریلی ( $L/R$ ) در باندهای بسامدی مشابه نیز به عنوان یک عامل تشخیص مناسب به کار برده شده است. Weichert (1971)، پی برد که برای انفجارها  $L/R \approx 1$  و مستقل از دوره تناوب (پریود) است اما این نسبت برای زمین لرزه‌ها، تقریباً ۲-۳ یا بیشتر بوده و رابطه افزایشی با دوره تناوب دارد.

نظر به این که عناصر تشخیص و باندهای بسامدی خاص، از یک منطقه به منطقه دیگر به دلیل اثرات مربوط به فاصله چشمه و مسیر انتشار تغییر می‌کنند، بنابراین لازم است برای هر نقطه عوامل تشخیص مناسب به کار برده شوند. در تمام روش‌هایی که از تبدیل فوریه سیگنال زمانی استفاده می‌شود، بایستی به دو محدودیت عمده ایستایی و خطی بودن این تبدیل توجه شود. در حالت کلی، امواج زمین لرزه و انفجار غیرایستا هستند و امروزه از روش‌های طیفی وابسته به زمان برای تشخیص آنها استفاده می‌شود. تبدیل موجک هم که یک تبدیل چندمقیاسی است، می‌تواند برای تحلیل سیگنال‌های غیر ایستا به کار رود اما در این تبدیل فرض خطی بودن همچنان وجود دارد.

(Yulmetyev et al. (2000) به کمک سه ویژگی اساسی سیگنال‌های

لرزه‌ای (گسستگی، حافظه بلندمحدوده و رفتار زمان محلی) به صورت سیستمی از معادله‌ها و روابط آماری غیرمارکوفی گسسته، به بررسی آنها پرداخته اند. به کمک تجزیه مد تجربی (EMD)، چنین ساختارهای حافظه کوتاه یا بلند دوره سیگنال‌های لرزه‌ای مشاهده خواهند شد یعنی EMD هم برای اندازه‌گیری‌های ساختارهای کوتاه دوره و هم ساختارهای بلنددوره می‌تواند به کار برده شود. به این صورت که در اینجا سیگنال به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های بسامدی میانگین صفر که توابع ذاتی مد (IMF) نامیده می‌شوند، تجزیه می‌شود (Huang, et al., 1998) و ساختارهای کوتاه‌دوره در IMF های پایین تر و ساختارهای بلنددوره در IMF های بالاتر دیده می‌شوند. هر یک از IMF ها به نحوی ویژگی‌های پیچیده امواج زمین لرزه و انفجار را در خود دارند. نقطه شروع تجزیه مد تجربی (EMD)، در نظر گرفتن نوسان‌ها در سیگنال‌ها در یک سطح بسیار محلی است.

در این مطالعه ابتدا روش EMD معرفی شده سپس روش مورد نظر روی داده‌های مصنوعی و همچنین داده‌های زمین لرزه‌ها و انفجارها اعمال می‌شود. در آخر، نتایج حاصل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

## ۲- روش تجزیه مد تجربی (EMD)

روش تجزیه مد تجربی، یک ابزار تطبیقی برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا است که قسمت‌های سازنده سیگنال را برپایه رفتار محلی سیگنال جداسازی می‌کند. از آنجا که این روش قادر به تحلیل سیگنال‌های میانگین غیرصفر بوده و همچنین برای تحلیل امواج سواره (riding waves) نیز مناسب است (امواج سواره، قسمتی از سیگنال هستند که هیچ برخورد صفری بین اکستریم‌های متوالی در آنها وجود ندارد)، از اینرو هیچ پیش‌پردازشی مورد نیاز نیست. این روش همچنین می‌تواند به عنوان یک بانک فیلتری (Rilling et al., 2003) و برای تحلیل ارتعاش سیگنال (Peng et al., 2005) استفاده شود. در اینجا تجزیه بر پایه این فرض ساده که هر داده شامل مدهای نوسان‌های ذاتی مختلفی است، بنا گذاشته شده است. هر مد ذاتی خطی یا غیرخطی، یک نوسان ساده را نشان می‌دهد که همان تعداد نقاط اکستریم و ریشه‌های صفر را خواهد داشت و نوسان نسبت به "میانگین محلی" متقارن می‌باشد. ممکن است داده‌ها شامل مدهای نوسانی بسیار متفاوتی باشند که با یکدیگر تداخل کرده و داده‌های پیچیده‌ای را تولید کنند. هر کدام از این مدهای نوسانی توسط یک تابع مد ذاتی، IMF، نمایش داده می‌شوند. EMD شامل محاسبه IMF ها برای سیگنال است به طوری که IMF ها در دو شرط زیر صدق کنند:

۱. تعداد اکستریم‌ها و تعداد برخوردهای صفر باید مساوی و یا فقط به اندازه یک نقطه با هم متفاوت باشند؛ یعنی فقط یک اکستریم بین دو برخورد صفر

موجود باشد.

۲. در هر نقطه، مقدار میانگین هر IMF (مقدار میانگین پوش تعریف شده توسط ماکزیمم‌های محلی و پوش تعریف شده توسط مینیمم‌های محلی) صفر باشد.

توابع مد ذاتی با انجام مراحل غربال زیر محاسبه می‌شوند (Huang et al., 1998):

۱. با تحلیل محلی سیگنال، تمام مینیمم‌ها و ماکزیمم‌ها تعیین محل می‌شوند. یک تابع درونیایی (معمولاً اسپلاین مکعبی)، تمام ماکزیمم‌ها را به هم وصل می‌کند. همین عمل در مورد مینیمم‌ها نیز انجام می‌گیرد.

۲. میانگین محلی (میانگین پوش‌های بالایی و پایینی) محاسبه می‌شود:  $m_1(t)$ .  
۳. میانگین محلی از سیگنال اصلی کم می‌شود تا "جزئیات محلی" به دست آید:

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (1)$$

در این حالت،  $h_1(t)$  سیگنال جدیدی می‌شود و فرایند غربال کردن (گام‌های ۱ تا ۳)، به صورت مجدد تا زمانی تکرار می‌شود که میانگین "جزئیات محلی" ناشی از یک معیار توقف، قابل چشم‌پوشی شود. یک آستانه برای این واریانس بین دو نتیجه متوالی به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$Var = \sum_{t=0}^T \left[ \frac{h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right]^2 \quad (2)$$

که  $h_{1k}(t)$ ، نتیجه  $k$ مین تکرار در رابطه (۱) است. مقدار این آستانه می‌تواند بین ۰/۰۵ تا ۰/۳ قرار گیرد (Huang et al., 1998; Rilling et al., 2003). ماکزیمم تعداد تکرارهای مجاز، یک معیار توقف دیگر است که مقدار آن معمولاً بین ۴ تا ۱۰ انتخاب می‌شود تا به مدهای با معنی منتهی شود (Rilling et al., 2003) یک مقدار بالا برای ماکزیمم تعداد تکرارها، منجر به محاسبه‌های بسیار زیاد می‌شود و ممکن است باعث فرا- تجزیه شدن سیگنال شود. وقتی الگوریتم تکرار به یک معیار توقف می‌رسد، اولین باقیمانده،  $t_1$ ، به دست می‌آید. این باقیمانده، اولین IMF است.

۴. باقیمانده گام ۴ از سیگنال کسر شده و سپس گام‌های ۱ تا ۵ برای محاسبه IMF بعدی انجام می‌شوند. این الگوریتم تا گام ۵ وقتی که تابع یکنوا شود، تکرار می‌شود به طوری که نتواند هیچ IMF جدیدی را تولید کند.

(Rilling et al., 2003) نشان داده‌اند که برآورد پوش‌های سیگنال به کمک درون‌یابی اسپلاین مکعبی منجر به نتایج بهتری نسبت به درون‌یابی‌های خطی یا چند جمله‌ای می‌شود. منحنی حاصل بدون پدیده فراتجزیه، برای تخمین محلی کافی است.

سیگنال اصلی به کمک مجموع زیر بازسازی می‌شود:

$$X(t) = \sum_{i=1}^T IMF(i) + r_n \quad (3)$$

که در آن  $IMF_{(i)}$ ،  $i$ -امین تابع مد ذاتی،  $n$  تعداد مدها و  $r_n$  آخرین باقیمانده

(باقیمانده  $n$  امین مد) است.

باید توجه داشت که در روش EMD نیاز به داشتن سری زمانی میانگین صفر نیست و این روش فقط به موقعیت‌های اکستریم‌های محلی نیاز دارد. مرجع صفر برای هر مؤلفه توسط فرایند غربال کردن حاصل خواهد شد. مؤلفه‌های EMD به‌طور معمول از نظر فیزیکی با معنی هستند به طوری که برای مقیاس‌های مشخصه‌ای توسط داده‌های فیزیکی تعریف شده‌اند.

در روش EMD، مدها و باقیمانده‌ها به‌طور ابتکاری بر پایه آرگومان‌های "طیفی" معرفی شده‌اند. انتخاب مدها، به‌طور وقتی (وابسته به سیگنال) انجام می‌گیرد. به عنوان مثالی از توان‌مندی‌های کاربرد EMD در تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های سازنده‌اش، در شکل (۱) سیگنالی ترکیبی از سه مؤلفه داده شده که به‌طور مشخص در زمان و بسامد هم‌پوشانی دارد و توسط این روش تجزیه شده است. مثالی دیگر که روی ماهیت "غیرهارمونیک" EMD تأکید دارد، در شکل (۲) ارائه شده است. در این حالت هر دو نوسان‌های خطی و غیرخطی (به ترتیب شامل یک شکل موج سینوسی و دو شکل موج مثلثی) به‌طور مؤثر شناسایی و تفکیک شده‌اند. سیگنال تحلیل شده (اولین ردیف دیاگرام)، مجموع سه مؤلفه است: یک سیگنال سینوسی دوره تناوب متوسط که با دو شکل موج مثلثی دوره‌های تناوب کوچک‌تر و بزرگ‌تر از آن تداخل کرده است. لازم به تذکر است که برای چنین مسائلی، هر تحلیل "هارمونیک" شامل روش‌های فوریه، موجک و ... در این زمینه، به تجزیه از نظر فیزیکی کم‌معنی، منتهی می‌شود.

### ۳- معرفی پارامترهای احتمالاتی غیرمارکوفی گسسته

(discrete non-Markov)

برای یک سری زمانی (به‌طور مثال امواج زمین‌لرزه یا انفجار) با مجموعه داده‌های  $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$  که  $1 < k < N$ ، Yulmetyev et al. (2000) نشان دادند که افت و خیزهای متغیر تصادفی (رندوم)  $j=0, 1, \dots, N-1$   $\delta x_j = \delta x(T + jT)$  یک سیستم مختلط می‌تواند به صورت بردار حالت  $-k$  مؤلفه‌ای زیر:

$$W_0 = (\delta x_0, \delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_{k-1}) \quad (4)$$

نمایش داده شود که در آن  $\delta x_j$  به صورت:

$$\delta x_j = x_j - \langle x \rangle \quad (5)$$

تعریف می‌شود که  $x_j$ ،  $j$  امین داده،  $\langle x \rangle$  میانگین مجموعه داده‌ها و  $T$  زمان گسسته سازی محدود است.

به کمک فرایندهای متعامد سازی گرام-اشمیت (Gram-Schmidt orthogonalization)، متغیرهای متعامد دینامیکی (dynamic orthogonalization)

variables)  $W_n = (t)$  می‌تواند به طور مستقیم بر حسب متغیر اولیه  $W_0$  به

شکل کلی زیر:

$$W_n = \begin{pmatrix} (i\hat{L} - \lambda_0) & \Lambda_1^{1/2} & 0 & \dots & 0 \\ \Lambda_1^{1/2} & (i\hat{L} - \lambda_1) & \Lambda_2^{1/2} & \dots & 0 \\ 0 & \Lambda_2^{1/2} & (i\hat{L} - \lambda_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & (i\hat{L} - \lambda_{n-1}) & 0 \end{pmatrix} W_0 \quad (6)$$

بیان شوند.

در رابطه (۶)،  $\lambda_n$ ، ویژه‌طیف (eigenspectrum) شبه عمل‌گر لیوویلی (Liouville's quasioperator)  $\hat{L}$ ، پارامتر آرامش (relaxation parameter) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\lambda_n = i \frac{\langle W_n^* \hat{L} W_n \rangle}{\langle |W_n|^2 \rangle}, \quad \Lambda_n = - \frac{\langle W_{n-1} (i\hat{L} - \lambda_{n+1}) W_n \rangle}{\langle |W_{n-1}|^2 \rangle} \quad (7)$$

در رابطه (۷) شبه عمل‌گر لیوویلی  $\hat{L}$  عبارتست از:

$$\hat{L}(t, \tau) = (i\tau)^{-1} \{U(\tau) - 1\} \quad (8)$$

و در رابطه (۸) عملگر ارزیابی  $U(\tau)$  (evaluation operator) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta x_{j+1} = U(\tau) \delta x_j \quad (9)$$

### ۴- داده‌های واقعی

در این مطالعه برای مقایسه روش EMD با روش احتمالاتی غیرمارکوفی گسسته، از داده‌های مورد استفاده در مقاله Yulmetyev et al. (2005) استفاده شده است. شکل ۳ مجموعه داده‌های زمین‌لرزه و انفجار را با طول ثابت ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ نقطه نشان می‌دهد. داده‌های EQ1-EQ3 مربوط به سه زمین‌لرزه محلی ضعیف در اردن (۱۹۹۸) می‌باشند. تمام داده‌ها متناظر با جابه‌جایی‌های لرزه‌ای عرضی هستند. گام زمانی دیجیتال کردن  $\tau$  بین نقاط ثبت شده برابر ۰/۰۱s است. از روی شکل تفاوت‌ها و شباهت‌های محسوس بین امواج مختلف و امواج مشابه دیده نمی‌شود. بنابراین برای دستیابی به یک عامل تشخیص مؤثر روش‌های بحث شده در بخش‌های (۲) و (۳) بر روی داده‌ها بررسی می‌شوند.

### ۴-۱ روش احتمالاتی غیرمارکوفی گسسته

در این بخش بر اساس رابطه (۷) به دست آمده برای  $\lambda_j(t)$  و  $\Lambda_j(t)$  که  $i=1-3$  و  $j=1, 2$ ، به توصیف این پارامترها برای امواج زمین‌لرزه و انفجار پرداخته می‌شود. برای تحلیل، رویدادهای EQ1 و EXP3 مورد استفاده قرار گرفته

برازش نشان می‌دهد که رفتار زمانی این پارامترها می‌تواند به خوبی توسط وابستگی زمانی ساده زیر تقریب زده شود (شکل ۶):

$$\lambda_I(t) = \lambda_0 + \Delta\lambda \exp\left[-\frac{t-T_0}{T_\lambda}\right] H(t-T_0) \quad (10)$$

$$\Lambda_I(t) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda \exp\left[-\frac{t-T_0}{T_\Lambda}\right] H(t-T_0) \quad (11)$$

که  $H(t)$  تابع هویساید،  $T_\lambda$  و  $T_\Lambda$  به ترتیب زمان‌های آرامش  $\lambda_I$  و  $\Lambda_I$  هستند. زمان  $T_0$  در روابط (۱۰) و (۱۱) برای پارامترهای  $\lambda_I(t)$  و  $\Lambda_I(t)$  یکسان است. مقادیر عددی متغیرهای به کار رفته در این روابط برای زمین‌لرزه‌ها و انفجارها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که کمیت‌های  $\Delta\lambda/\lambda_0$  و  $\Delta\Lambda/\Lambda_0$  افزایش مقدار پارامتر متناظر در انفجار یا در زمین‌لرزه را نشان می‌دهند، نسبت بین زمان‌های آرامش  $T_\lambda$  و  $T_\Lambda$  یک وسیله تشخیص مؤثر بین آنها را فراهم می‌آورد (ستون آخر جدول ۱).

## ۲- روش EMD

برای بیان شباهت‌های بین امواج هم‌نوع و تفاوت‌های بین امواج غیرهم‌نوع از دو سیگنال زمین‌لرزه و دو سیگنال انفجار به طور اختیاری استفاده شده است (شکل ۳). ویژگی‌های بیان شده در زیر برای سایر داده‌ها نیز صحیح است. به کمک الگوریتم بخش ۲، IMF‌های داده‌های موجود در شکل ۳ به دست آورده شد. شکل ۷ به ترتیب IMF‌های زمین‌لرزه‌ها (EQ1 و EQ2) و انفجارها (EXP1 و EXP2) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مرتبه IMF‌ها، هارمونیک‌های با دوره‌تناوب بالاتر ظاهر می‌شوند. برخلاف سیگنال‌های زمین‌لرزه و انفجار که ممکن است میانگین صفر نباشند، تمام IMF‌ها میانگین صفرند. توزیع زمانی IMF1 برای EQ1 و EQ2 به همان صورت توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های اصلی بوده ولی توزیع زمانی IMF1 برای EXP1 و EXP2 بدون هارمونیک‌های بسامد بالاست و بنابراین با شکل توزیع زمانی انفجارهای اصلی متفاوت هستند. برای IMF2 نیز گسستگی و تغییر شدید در توزیع زمانی برای انفجارها وجود دارد؛ برعکس، IMF2 برای زمین‌لرزه‌ها توزیع پیوسته‌ای را نشان می‌دهد. برای زمین‌لرزه‌ها از IMF2 تا IMF5 توزیع پیوسته‌ای از هارمونیک‌ها را در تمام بازه زمانی داریم ولی انفجارها، بسته‌های موج با دامنه بزرگ در یک بازه زمانی محدود را دارا هستند. از IMF8 تا IMF11، انفجارها دارای پیک‌های بلندی در وسط سری‌های زمانی هستند ولی پیک‌های زمین‌لرزه‌ها برای این IMF‌ها، در ابتدا و انتهای سری‌های زمانی وجود دارند. انفجارها تقریباً دارای خط تقارن در محدوده زمانی ۳۵۰۰-۴۵۰۰ هستند و به صورت یک موجک فاز صفر عمل می‌کنند ولی زمین‌لرزه‌ها فاقد خط تقارن در IMF‌های مذکور هستند و

است (شکل ۳). شکل‌های ۴ و ۵، پارامترهای آرامش امواج زمین‌لرزه EQ1 و انفجار EXP3 را نشان می‌دهند.

تمام پارامترهای  $\lambda_I(t)$  فقط مقادیر منفی ( $\lambda_I(t) < 0$ ) و  $\Lambda_I(t)$  مقادیر منفی و مثبت هر دو را می‌گیرند.

قدرمطلق  $\lambda_I(t)$  در دامنه‌اش با ضریبی معادل ۴-۱۳/۳ (متفاوت برای زمین‌لرزه‌های مختلف)، در حین زمین‌لرزه به سرعت افزایش یافته و همچنین به سرعت به حالت اولیه‌اش باز می‌شود. زمان بازگشت  $T_\lambda$  و دوره تناوب رویداد  $T_I$  برای زمین‌لرزه‌ها تقریباً یکسان هستند. قدرمطلق  $\lambda_I(t)$  در دامنه‌اش افزایش ناگهانی تقریباً ۳/۵-۲/۲ برابر بزرگتر را برای انفجارها نشان می‌دهد اما به سرعت به سطح نرمالش بازمی‌شود. زمان بازگشت  $\lambda_I(t)$  برای انفجار تقریباً با ضریبی بین ۲/۵ تا ۳ از دوره تناوب خود رویداد کوچک‌تر است. پارامتر  $\lambda_I(t)$  به شروع رویداد با یک افزایش ناگهانی در اندازه‌اش عکس‌العمل نشان می‌دهد و مشخصه نوفه‌ای (نویزی) این پارامتر در حین رویداد تغییر می‌کند. به طوری که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، پارامتر  $\lambda_I(t)$  همواره حول (-۱) افت و خیز می‌کند و یک افزایش ناگهانی به شکل اسپایک‌های پراکنده را در شروع رویداد نشان می‌دهد. این پارامتر به تغییرات نوفه (نویز) بسیار حساس است. پارامتر  $\Lambda_I(t)$  افت و خیزهایی نزدیک به صفر قبل و بعد از رویداد دارد به طوری که به سرعت در حین رویداد افزایش یافته و مثبت باقی می‌ماند و سپس به طور هموار کاهش می‌یابد و به تغییرات نوفه نیز بسیار حساس است. زمان بازگشت  $T_\Lambda$  و دوره‌تناوب رویداد  $T_I$  هم برای زمین‌لرزه و هم انفجار تقریباً یکسان هستند. تغییرات نوفه‌ای پارامتر  $\Lambda_I(t)$  در حین رویداد هم برای زمین‌لرزه و هم انفجار دیده می‌شوند به طوری که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود برای  $\Lambda_I(t)$  یک کاهش منفی مشخص در حین رویداد زمین‌لرزه و انفجار وجود دارد. برای داشتن معیاری کمی در تشخیص امواج زمین‌لرزه و انفجار می‌توان یک مدل نمایی ساده برای رفتار محلی زمانی پارامترهای آرامش  $\lambda_I$  و  $\Lambda_I$  را با برازش خوبی تهیه کرد.

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، تمام پارامترهای آرامش به شروع زمین‌لرزه و یا انفجار حساس می‌باشند. تحلیل نشان می‌دهد که این پارامترها نزدیک مقادیر میانگین  $\lambda_0$  و  $\Lambda_0$  به ترتیب قبل و بعد از نوسان‌های مشاهده‌پذیر روی لرزه‌نگاشت‌ها، نوسان می‌کنند که نتایج رفتارشان برای EXP3 و EQ1 در شکل‌های ۴(الف-د) و ۵(الف-د) نشان داده شده‌اند. اما یک افزایش ناگهانی با فاکتورهای  $\Delta\lambda$  و  $\Delta\Lambda$  همواره در رفتار این پارامترها در شروع زمین‌لرزه یا انفجار در داده‌های لرزه‌نگاشت دیده می‌شوند. به‌علاوه در آنها میرایی به صورت پیوسته رخ می‌دهد. در طول این زمان این پارامترها یک روند خوش تعریف دارند. چنین رفتار  $\lambda_I$  و  $\Lambda_I$ ، مدل‌سازی وابستگی زمانی این پارامترها توسط چند تابع ریاضی ساده را امکان‌پذیر می‌سازد. عمل



و تجزیه مد تجربی، بر خلاف روش‌های گذشته بر روی فاز خاصی از امواج زمین لرزه و انفجار تمرکز ندارند و کل سیگنال را تحلیل می‌کنند. بنابراین جداسازی فازها که خود نیاز به آگاهی از مبانی تئوری و تجربه زیاد دارد و همواره با خطاهایی همراه است، در اینجا مورد نیاز نیست.

رفتار زمانی پارامترهای آرامش محلی می‌تواند توسط مدل ساده‌ای توصیف شود. آرامش لحظه‌ای پارامترهای  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  در زمین لرزه‌ها و انفجارها بعد از شروع رویداد بر طبق قانون توانی رخ می‌دهد. اما بازگشت و دوره تناوب رویدادها در زمین لرزه‌ها در عمل یکسان هستند. زمان بازگشت پارامترهای  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  در انفجارها به طور مشخص از دوره تناوب رویداد مربوطه متفاوت است. در نتیجه این دیدگاه می‌تواند در تشخیص این دو پدیده لرزه‌ای با چشمه‌های متفاوت مفید باشد. نسبت زمان آرامش پارامترهای  $T_{\lambda_1}$  و  $T_{\lambda_2}$  یک وسیله تشخیص مؤثر را فراهم می‌آورد. به این صورت که این نسبت برای زمین لرزه‌ها برابر با یک و برای انفجارها بزرگ‌تر از یک (۲/۵-۳/۲) است. در روش EMD، مقایسه ماکزیمم بسامد هر IMF انفجارها با IMF های متناظر زمین لرزه‌ها یک فاکتور قوی در تشخیص امواج فراهم می‌آورد، به این صورت که IMF های انفجارها، بالا و IMF های زمین لرزه‌ها، زیر یک مرز خاص قرار می‌گیرند. این مرز را می‌توان به صورت یک خط راست در نظر گرفت که در یک دامنه بسامد خاص قرار می‌گیرد و فقط تابع مشخصه‌های مسیر انتشار و دستگاه ثبت کننده امواج است. این دامنه بسامد می‌تواند برای شناخت ضریب کیفیت ساختگاه‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد که این موضوع نیاز به بررسی بیشتری دارد.

لازم به ذکر است چون سازوکار تولید، تداخل و دگرشکلی امواج زمین لرزه بسیار پیچیده است، در بررسی‌هایی که به کمک تبدیل موجک انجام شده است معمولاً اطلاعات زیادی از موجک چشمه تولید امواج زمین لرزه‌ای در دسترس نیست و به تقریب گاهی اوقات در تحلیل‌های زمین لرزه‌ای که ماهیت غیرخطی امواج مورد نظر نیست و از هم پوشانی زمانی و بسامدی امواج صرف نظر می‌شود، از موجک‌هایی مانند موجک دابچیز (Daubechies) استفاده می‌شود. در این حالت‌ها، جداسازی مؤثر مؤلفه‌ها توسط این فیلترهای غیروقتی، با مشکلات بسیاری روبرو می‌شود و قابلیت انجام مؤثر مسائل پیچیده‌ای مانند تشخیص امواج زمین لرزه و انفجار توسط تبدیل موجک و فوریه وجود ندارد.

نیاز به محاسبه‌ها و حافظه کامپیوتری کمتر و در نتیجه سریع‌تر بودن را می‌توان از مزیت‌های دیگر روش EMD در مقایسه با روش غیرمارکوفی عنوان نمود.

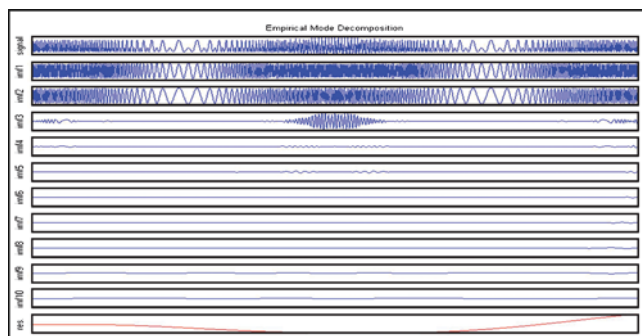
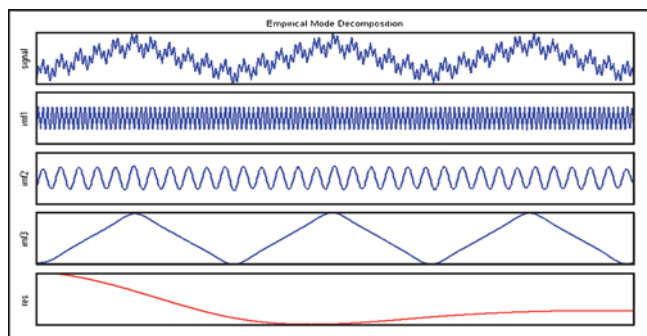
رفتار موجک‌های مینیمم فاز (IMF11)، ماکزیمم فاز (IMF10) و یا مختلط فاز (بقیه IMF ها) را نشان می‌دهند. IMF10 در زمین لرزه‌ها همگی دارای ۴ پیک و لی در انفجارها دارای ۳ پیک می‌باشند.

در این قسمت برای آن که تحلیلی در مورد بسامد ماکزیمم هر IMF انجام گیرد، تبدیل فوریه IMF های مختلف به دست آورده شد. در شکل ۸، توزیع بسامدی هر کدام از IMF ها برای زمین لرزه‌های EQ1 و EQ2 و انفجارهای EXP1 و EXP2 نشان داده شده‌اند. توزیع بسامدی IMF1 زمین لرزه‌ها دارای شکل‌های تقریباً یکسان و هر کدام شامل دو تجمع بسامدی مشخص در سمت راست هستند ولی این توزیع بسامدی دارای شکل‌های گسسته در زمین لرزه‌ها است. در مورد توزیع بسامدی IMF9، از روی شکل "نبود" یا "چاله" های بسامدی در مورد زمین لرزه‌ها دیده می‌شود (برای EQ1 در بازه Hz [۱۰<sup>-۳</sup> و ۶×۱۰<sup>-۴</sup>] و EQ2 در بازه Hz [۲×۱۰<sup>-۳</sup> و ۱۰<sup>-۳</sup>]) ولی این ویژگی در انفجارها دیده نمی‌شود.

آنچه در تمام توزیع‌های بسامدی IMF ها مشخص است، انتقال پیک‌های توزیع بسامدی از بسامدهای بالاتر به بسامدهای پایین‌تر، با افزایش مرتبه IMF هاست. اگر دامنه بسامد ماکزیمم هر IMF بر حسب مقدار آن بسامد بررسی شود، می‌تواند به عنوان عامل دیگری در تشخیص زمین لرزه‌ها و انفجارها به کار برده شود (شکل ۹). همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، می‌توان یک مرز جدایی (خط چین) را در نظر گرفت به طوری که زمین لرزه‌ها پایین و انفجارها بالای این خط قرار می‌گیرند. در این مورد خط تیره مقدار  $1/5 \times 10^{-1}$  را نشان می‌دهد. به طور متناظر با روش غیرمارکوفی، مقایسه هر کدام از IMF های مرتبه دلخواه نیز خود به تنهایی یک روش تشخیص مؤثر می‌باشد.

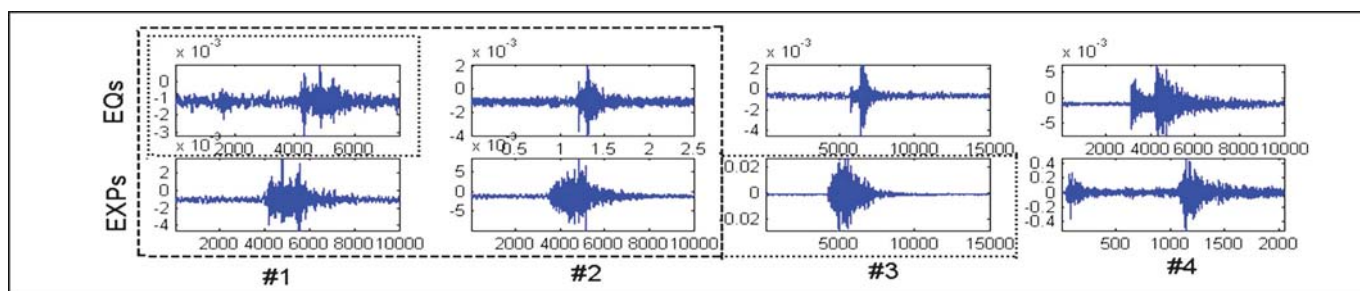
### نتیجه‌گیری

در این مطالعه روش‌هایی برای بررسی فرایندهای تصادفی غیرمارکوفی و غیرایستا در سیستم‌های گسسته و همچنین تجزیه سیگنال به هارمونیک‌های تشکیل دهنده آن به منظور تعیین ویژگی‌های غیرخطی و غیرایستای سیگنال، که روش‌های فوریه‌ای در آن با مشکل مواجه می‌شوند، پیشنهاد شده است. با به کارگیری این روش‌ها می‌توان سیگنال‌های مشابه با منشأ متفاوت را تحلیل و آنها را از یکدیگر تفکیک نمود. یکی از این روش‌ها که به عنوان روش تجزیه مد تجربی (EMD)، معروف است سیگنال را به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های بسامدی میانگین صفر که توابع مد ذاتی (IMF) نامیده می‌شوند، تجزیه می‌کند. این روش هیچ نمایش تحلیلی نداشته و برپایه رفتار زمان-محلی سیگنال قرار دارد. اما در روش غیرمارکوفی هدف بررسی رفتار سیگنال می‌باشد بدین معنی که تا چه اندازه از خود اثرات غیرمارکوفی (رفتار زمان محلی و حافظه بلندمدت) نشان می‌دهد. روش‌های احتمالاتی غیرمارکوفی گسسته



شکل ۲- در این شکل EMD یک سیگنال سه مؤلفه‌ای شامل نوسان‌های غیرخطی نشان داده شده است. سیگنال اصلی در سطر اول و سه IMF به‌دست آمده توسط عمل تجزیه EMD در سه سطر بعدی در زیر سیگنال اصلی آورده شده است و آخرین ردیف متناظر با باقیمانده نهایی است.

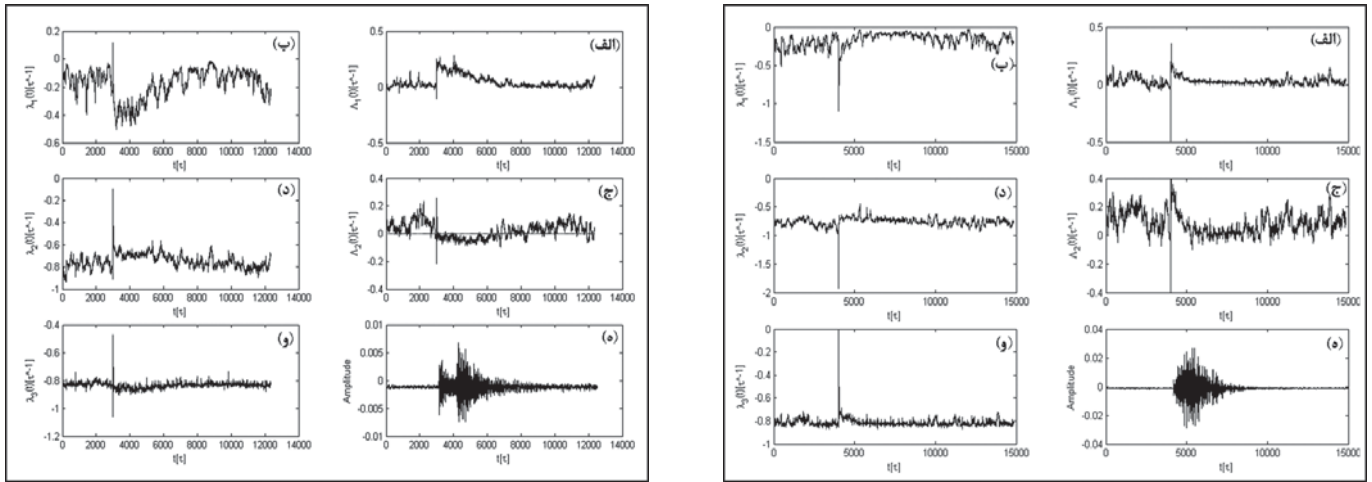
شکل ۱- در این شکل EMD یک سیگنال سه مؤلفه‌ای نشان داده شده است. سیگنال تحلیل شده (اولین سطر)، مجموع دو مؤلفه بسامدی سینوسی و یک بسته موج گوسی است که هم در زمان و هم در بسامد با هم همپوشانی دارند. بنابراین، جداسازی مؤثر مؤلفه‌ها توسط هر تکنیک فیلتری غیر وفقی ممتنع است. آخرین ردیف، متناظر با باقیمانده نهایی است.



شکل ۳- مجموعه داده‌های لرزه‌نگاشت‌های زمین لرزه و انفجار به کار رفته در تحلیل به کمک روش EMD و روش احتمالاتی غیرمارکوفی گسسته (داده‌های مورد استفاده توسط (Yulmetyev et al. (2000)). دو داده زمین لرزه و دو داده انفجار به کار رفته در تحلیل روش EMD (EXP1,2 و EQ1,2) با خط چین و داده زمین لرزه و انفجار به کار رفته در روش غیرمارکوفی (EQ1 و EXP3) با نقطه چین مشخص شده‌اند.

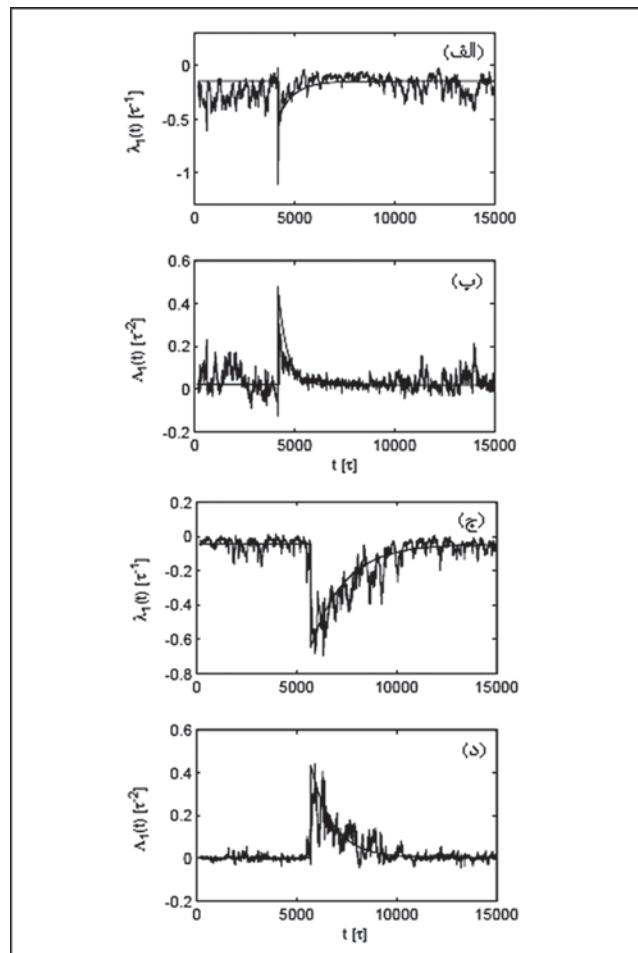
جدول ۱- مشخصه‌های پارامتری محلی  $\lambda_l(t)$  و  $\Lambda_l(t)$  زمان آرامش  $T_\lambda$ ،  $\lambda_l(t)$  زمان آرامش  $T_\lambda$ ،  $\Lambda_l(t)$  زمان آرامش برای میرایی نمایی  $\lambda_l(t)$  و  $\tau_\lambda$  زمان آرامش برای میرایی نمایی  $\Lambda_l(t)$  هستند.

	$\lambda_0[\tau^{-1}]$	$\Delta\lambda[\tau^{-1}]$	$T_\lambda$	$\tau_\lambda$	$\Lambda_0[\tau^{-2}]$	$\Delta\Lambda[\tau^{-2}]$	$T_\Lambda$	$\tau_\Lambda$	$\Delta\lambda/\lambda_0$	$\Delta\Lambda/\Lambda_0$	$T_\Lambda/T_\lambda$
EXP1	-۰/۱۳	-۰/۴۲۵	۱۸۰۰	۹۰	۰/۰۲	۰/۲۸	۴۵۰۰	۴۵	۳/۲۷	۱۴	۲/۵
EXP2	-۰/۱۵	-۰/۳۴	۱۴۴۰	۱۰۰	۰/۰۲	۰/۲۸	۴۰۳۲	۵۵	۲/۲۶	۱۴	۳/۱۲۵
EXP3	-۰/۱۵	-۰/۳۳	۱۸۷۰	۸۰	۰/۰۰۲	۰/۴۲	۴۸۵۰	۴۵	۲/۲	۲۱۰	۲/۵۹
EQ1	-۰/۱۲	-۰/۴۷	۵۷۰۰	۲۱۰	۰/۰۱	۰/۳۵	۵۷۰۰	۱۸۰	۳/۹۱	۳۵	۱
EQ2	-۰/۱	-۰/۵	۵۷۷۰	۱۷۰	۰/۰۰۱	۰/۳۵	۵۷۷۰	۱۳۰	۵	۳۵۰	۱
EQ3	-۰/۰۴۵	-۰/۶	۴۵۰۰	۱۷۰	۰/۰۰۵	۰/۴۳	۴۵۰۰	۱۱۰	۱۳/۳	۸۶	۱



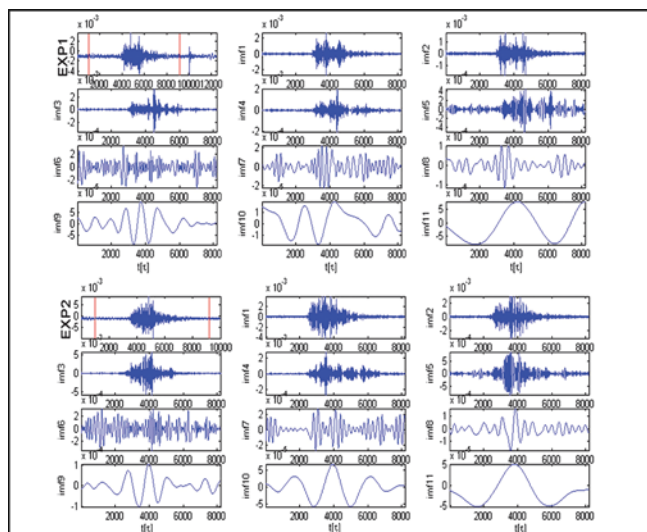
شکل ۵- رفتار زمانی محاسبه شده پارامترهای آرامش  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  برای زمین لرزه EQ1. سیگنال در قسمت (و) نشان داده شده است.

شکل ۴- رفتار زمانی محاسبه شده پارامترهای آرامش  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  برای انفجار EXP3. سیگنال در قسمت (و) نشان داده شده است.

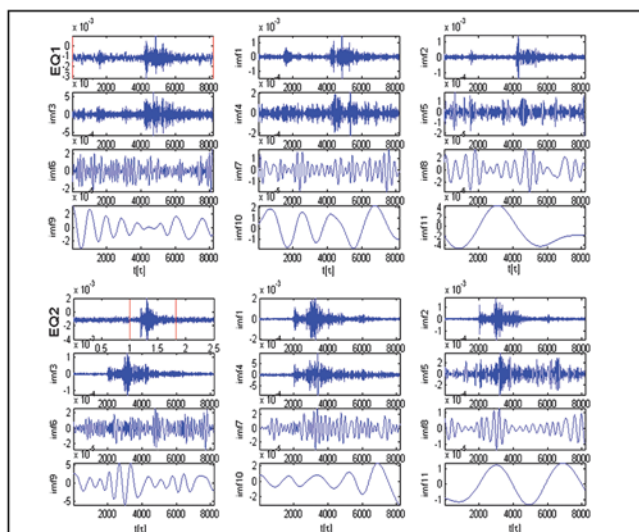


شکل ۶- رفتار زمانی اولین دو پارامتر آرامش  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  برای انفجار EXP3 (الف و ب) و برای زمین لرزه EQ1 (ج و د). خطوط تیره، توابع برازش شده روابط (۱۰) و (۱۱) را با پارامترهای متناظر نشان داده شده در جدول ۱ مشخص می‌کنند.

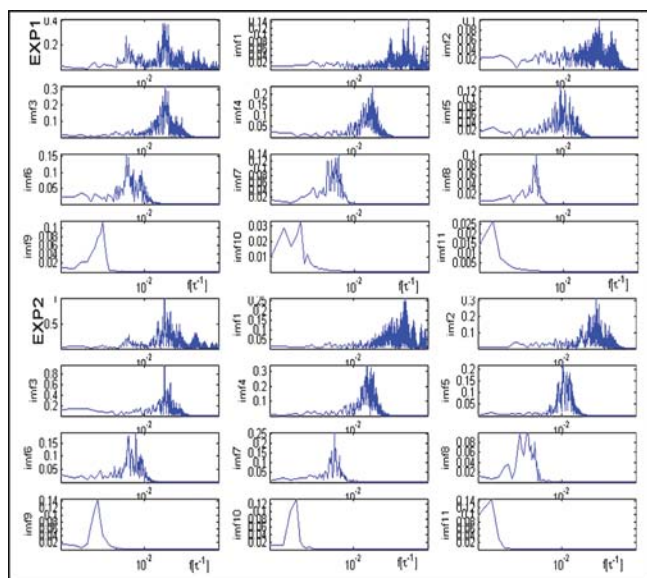




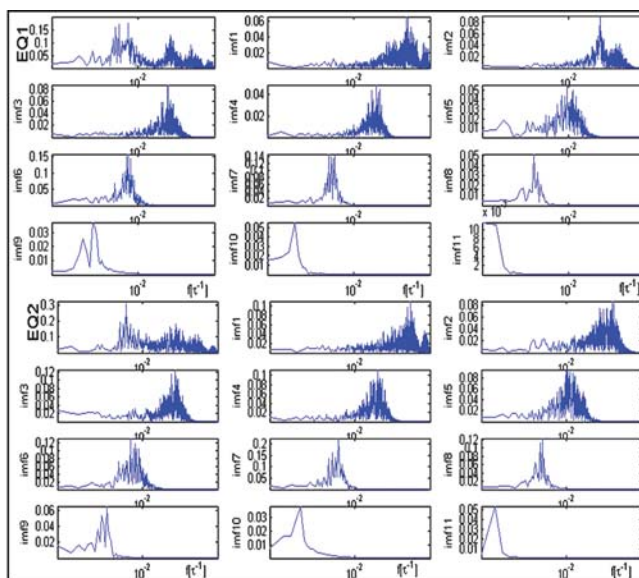
شکل ۷-ب) EMD لرزه‌نگاشت‌های دو انفجار انتخاب شده در شکل ۳. در هر مورد، اولین شکل ردیف اول زمین لرزه اصلی به کار برده شده در تحلیل و شکل‌های بعدی به ترتیب اولین تا یازدهمین IMF تولید شده از لرزه‌نگاشت اصلی را نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود با افزایش مرتبه IMF، هارمونیک‌های با دوره تناوب بالاتر ظاهر می‌شوند.



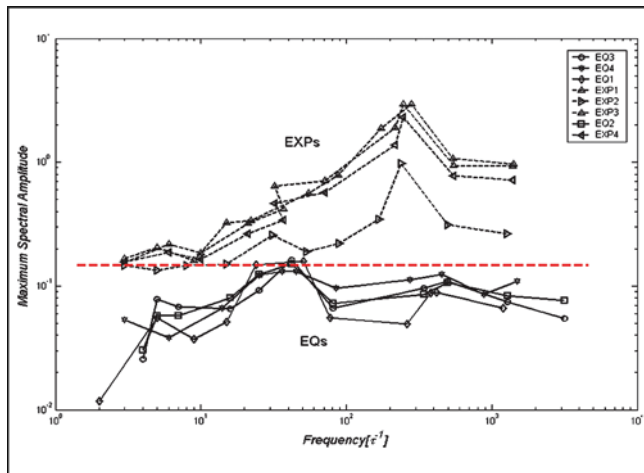
شکل ۷-الف) EMD لرزه‌نگاشت‌های دو زمین لرزه انتخاب شده در شکل ۳. در هر مورد، اولین شکل ردیف اول زمین لرزه اصلی به کار برده شده در تحلیل و شکل‌های بعدی به ترتیب اولین تا یازدهمین IMF تولید شده از لرزه‌نگاشت اصلی را نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود با افزایش مرتبه IMF، هارمونیک‌های با دوره تناوب بالاتر ظاهر می‌شوند.



شکل ۸-ب) طیف بسامدی EMD لرزه‌نگاشت‌های دو انفجار انتخاب شده در شکل ۳. در هر مورد، اولین شکل ردیف اول انفجار اصلی به کار برده شده در تحلیل و شکل‌های بعدی به ترتیب اولین تا یازدهمین طیف بسامدی IMF تولید شده از لرزه‌نگاشت اصلی را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش مرتبه IMF، بسامد ماکزیمم از مقادیر بالاتر به مقادیر پایین‌تر منتقل می‌شود.



شکل ۸-الف) طیف بسامدی EMD لرزه‌نگاشت‌های دو زمین لرزه انتخاب شده در شکل ۳. در هر مورد، اولین شکل ردیف اول زمین لرزه اصلی به کار برده شده در تحلیل و شکل‌های بعدی به ترتیب اولین تا یازدهمین طیف بسامدی IMF تولید شده از لرزه‌نگاشت اصلی را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش مرتبه IMF، بسامد ماکزیمم از مقادیر بالاتر به مقادیر پایین‌تر منتقل می‌شود.



شکل ۹- مقایسه ماکزیمم بسامدهای IMF های مختلف سیگنال‌های زمین لرزه و انفجار مختلف. همان‌طور که دیده می‌شود می‌توان یک مرز با دامنه طیفی مشخص (خط چین) را برای تفکیک امواج زمین لرزه و انفجار در نظر گرفت. انفجارها دارای بسامدهای IMF بالاتر نسبت به IMF های متناظر در زمین لرزه‌ها هستند.

## References

- Aki, K. & Tsai, Y., 1972- Mechanism of Love-wave excitation by explosive sources, *J. Geophys. Res.*, 77, 1452-1475.
- Bath, M., 1962- Seismic records of explosions-spatially nuclear explosions. Part III. Res. Inst. Natl. Def. (stockh.), Rep. A 4270-4271, 116 pp.
- Davis, J. B. & Smith, S. W., 1968- Source parameters of earthquakes and discrimination, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1503-1517.
- Derr, J. S., 1970- Discrimination of earthquakes and explosions by the Rayleigh-wave spectral ratio, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 60, 1653-1668.
- Geller, R. J. & Ohminato, T., 1994- Computation of synthesis seismograms and their partial derivatives for heterogeneous media with arbitrary neutral boundary conditions using the direct solution method. *Geophys. J. Int.* 116, 421-446.
- Huang, N.E., Shen Z., Long, S.R., Wu, M.L., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen N.C., Tung, C.C. & Liu, H.H., 1998- The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis, *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 454, 903-995.
- Marshall, P. D., 1970- Aspects of the spectral differences between earthquakes and underground explosions, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 20, 397-416.
- Muller, R. A. & Murphy, J. R., 1971- Seismic characteristics of underground nuclear detonations, part1, *Seismic spectral scaling*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 61, 1675-1692.
- Peng, Z.K., Tse, Peter W., Chu, F.L., 2005- An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 286, 187-205.
- Rilling G., Flandrin, P. & Goncalves P., 2003- Empirical Mode Decomposition as a filter bank, *IEEE Sig. Proc. Lett.*
- Scherbaum, F., 1994- Basic concepts in digital processing for seismologists. Berlin: Springer.
- Shamway, R. H., 2003- Time-frequency clustering and discriminant analysis, *Statistics and Probability Letters*, 63, 307-314.
- Weichert, D. H., 1971- Short-period spectral discriminate for earthquake-explosion distribution, *Geophys.*, 37, 147-152.
- Willis, D.E., 1963c- Comparison of seismic waves generated by different types of source, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 53, 965-978.
- Yulmetyev, R., Hanggi, P. & Gafarov, F., 2000- Possibility between earthquake and explosion seismogram differentiation by discrete stochastic non-Markov processes and local Hurst exponent analysis, *Phys. Rev. E*, 62, 6178.
- Yulmetyev, R., Mokshin, V., Hanggi, P., 2005- Universal approach to overcoming nonstationarity, unsteadiness and non-Markovity of stochastic processes in complex systems, *Physica A*, 345, 303-325.