

# تخمین بیشینه شتاب با استفاده از شبیه سازی جنبش نیرومند زمین

حسین حمزه لو، استادیار پژوهشکده زلزله شناسی پژوهشگاه hhamzehloo@dena.iiees.ac.ir

نصرتاله کمالیان، استادیار مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران Kamalian@chamran.ut.ac.ir

## ۱- چکیده

ویژگی جنبش نیرومند زمین برای طراحی سازه ها از اهمیت زیادی برخوردار است. شبیه سازی جنبش نیرومند زمین بویژه برای نواحی که از آن داده ای در دسترس نیست نقش مهمی را در تخمین آن ایفا می کند. در این پژوهش، روشهای شبیه سازی به اختصار مورد بررسی قرار گرفته، روش جدید پیوندی موجک، پوش موج نقشها و نوفه سفید فیلتر - شده معرفی گردیده است. بزرگا، طول و عرض گسل، راستا و شیب گسل، ابعاد عضو، سرعت امواج عرضی و سرعت گسیختگی و نقطه شروع گسیختگی پارامترهایی هستند که برای شبیه سازی مورد نیاز می باشند. سپس گسیختگی از نقطه آغاز، شروع شده و به مرکز اعضا می رسد. از مرکز اعضا انرژی به صورت موجک (Wavelet) آزاد می شود. مزیت این روش آن است که بیشینه شتاب اولیه که برای ایجاد پوش موج نقشها استفاده می شود با در نظر گرفتن پارامترهای مدل و هندسه گسیختگی به جای روابط تجربی تخمین زده می شود. شتابنگاشت نهایی با ضرب نوفه سفید فیلتر شده که از طیف  $\omega^{-2}$  پیروی می کند در پوش موج نقشها به دست می آید. بیشینه شتاب به روش ترکیبی مذکور به خوبی برای چهار زمین لرزه ایران بویژه برای ایستگاههای نزدیک به گسل، تخمین زده شده است.

**کلیدواژه ها:** بیشینه شتاب، شبیه سازی، جنبش نیرومند زمین، موجک، پوشش موج نقشها

## ۲- مقدمه

ناهمگن بودن ساختمان داخل زمین، لایه ای بودن پوسته، وجود چینها، گسلها، موجهای انعکاسی، شکست مرزی، موجهای تبدیل یافته و فرایند پیچیده کاهندگی (Attenuation) بر روی تخمین ویژگیهای جنبش نیرومند زمین تأثیر می گذارند. با توجه به ویژگیهای جنبش نیرومند زمین، روشهایی برای تخمین آنها معرفی شده است. این روشها را می توان به سه دسته تقسیم بندی کرد:

۱- در روش اول ابتدا شدت زمین لرزه و سپس جنبش زمین با استفاده از تبدیل شدت تخمین زده می شود.

۲- در روش دوم از روابط کاهندگی (Attenuation Relationships) برای تخمین جنبش زمین استفاده می شود. این روابط از سال ۱۹۶۰ به بعد معرفی شده اند. در این روابط عمدتاً بیشینه شتاب به صورت تابعی از فاصله، بزرگا، شرایط ایستگاه یا سازوکار زمین لرزه که با استفاده از داده های جهانی یا منطقه ای به دست می آید تعریف می گردد. از عمده ترین محدودیتهای این روش آن است که روابط مذکور بر اساس زمین شناسی و زمین ساخت منطقه خاص به دست آمده و استفاده از آنها برای ناحیه دیگر با ویژگیهای زمین شناسی و زمین ساخت متفاوت به صورت منطقی مطمئن نمی باشد. از طرف دیگر، به علت محدودیت اطلاعات نزدیک به گسل مربوط به زمین لرزه اکثر این روابط به علت در دسترس نبودن داده های حوزه نزدیک در فواصل نزدیک به گسل قابل کاربرد نیستند.

۳- ثبت اولین نگاهشت در نزدیکی گسل در زمین لرزه ۱۹۶۶ پارکفیلد زمینه را برای معرفی روش سومی، تحت عنوان شبیه سازی جنبش نیرومند زمین، برای تخمین ویژگیهای جنبش نیرومند زمین فراهم کرد. در این روش روند زمانی جنبش حرکات نیرومند زمین با استفاده از روشهای تئوری شبیه سازی می شود. این روشها عبارتند از:

- کاتوره ای (Random)؛

- تابع تجربی گرین (Empirical Green's Function)؛

- تابع نیمه تجربی گرین (Semi-Empirical Green's Function)؛

- مدل چشمه ترکیبی (Composite Source Model)؛

- شبکه عصبی (Neural Network)؛

در نظر گرفته می‌شود. جنبه انتشار موج با استفاده از تابع تئوری گرین که با تولید پرتو (*Generalized Rays*) محاسبه شده مدل سازی می‌شود [۵]. از موجک ریکر (*Ricker Wavelet*) و پوش موج نقشها (*Envelope Waveform*) نیز به جای اتفاق کوچک برای شبیه سازی جنبش حرکات نیرومندزمین استفاده شده است [۶، ۷ و ۸].

میدوری کاوا به جای استفاده از تابع تئوری گرین از پوش موج نقشها برای ایجاد اتفاق کوچک استفاده کرد. در این روش پوش موج نقشهای زمین لرزه هدف با ترکیب پوش موج نقشهای اتفاقیهای کوچک به دست می‌آید. بیشترین مقدار در پوش موج نقشهای زمین لرزه هدف (*Target Event*) بیشینه شتاب را مشخص می‌کند. خطری (*Khattri*) با ضرب کردن نونه سفید باند محدود که از طیف  $\omega^2$  پیروی می‌کند در پوش موج نقشهای زمین لرزه هدف روش میدوری کاوا را بهینه کرد. از محدودیتهای این دو روش استفاده از روابط میرایی برای تخمین بیشینه شتاب اتفاقیهای کوچک می‌باشد.

### ۳-۴-۴- روش مدل چشمه ترکیبی

در روش مدل چشمه ترکیبی، جنبش نیرومند زمین با استفاده از ویژگیهای فرایند چشمه زمین لرزه و تئوری انتشار امواج شبیه سازی می‌شود. در این روش، چشمه با منطبق کردن اتفاقیهای زیرمجموعه دایره‌ای توصیف می‌شود. اتفاقیهای کوچک دارای افت تنجش یکسان هستند. تعداد کل اتفاقیهای کوچک به صورتی در نظر گرفته می‌شود تا با گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه اصلی منطبق شود [۹]. سازوکار زمین لرزه، افت تنجش، مدل سرعت و مدل ضریب کیفیت ( $Q$ ) برای این روش مورد نیاز می‌باشد.

### ۳-۴-۵- شبکه های عصبی

مهندس طراح، علاقه مند به دانستن حداکثر نیرویی است که به یک سازه هنگام زمین لرزه وارد می‌شود؛ لذا، مفهوم طیف پاسخ بسیار مهم می‌باشد. در حالت تبدیل فوری، با انجام عمل معکوس فوری از طیف فوری، شتابنگاشت به دست می‌آید. اگرچه تنها یک طیف پاسخ برای هر تاریخچه زمانی وجود دارد، عکس آن صادق نمی‌باشد. به عبارت دیگر، به دست آوردن تاریخچه زمانی از طیف پاسخ مانند تبدیلات فوری ممکن نیست؛ زیرا، بیش از یک تاریخچه زمانی با یک

مزیت این روشها آن است که اطلاعات مربوط به چشمه زمین لرزه، انتشار موج بین چشمه و ایستگاه، شرایط ایستگاه و کاهندگی در شبیه سازی جنبش نیرومندزمین در نظر گرفته می‌شود که در نهایت باعث اطمینان بیشتری در تخمین ویژگیهای جنبش نیرومند زمین در حوزه زمان و فرکانس می‌گردد.

### ۳- روشهای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین

جنبش نیرومند زمین به روشهای مختلفی شبیه سازی می‌شود که عبارتند از:

#### ۱-۳- روش کاتوره ای

روشهای کاتوره‌ای به صورت گسترده‌ای برای پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، جنبشهای فرکانس بالای زمین لرزه به صورت اغتشاش باند محدود گوسی که از طیف  $\omega^2$  پیروی می‌کند نمایش داده می‌شود. از محدودیتهای این روش این است که زمین لرزه‌ها به صورت چشمه‌های نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند [۱].

#### ۲-۳- روش تابع تجربی گرین

روش تابع تجربی گرین برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط هارتزل معرفی گردید [۲]. در این روش انتشار گسیختگی به صورت تعیینی (*Deterministic*) و جنبه انتشار چشمه و تابش با فرض اینکه در پس لرزه‌ها وجود دارد برای شبیه سازی در نظر گرفته می‌شود. این روش توسط هادلی و هلمبرگر و ایریکورا بهینه شد [۳ و ۴].

از محدودیتهای روش مذکور این است که برای کاربرد آن باید پس لرزه‌ها موجود باشد. از طرفی دیگر، اگر پس لرزه‌ها یا به عبارت دیگر اتفاق کوچک (*Small Event*) تحت تأثیر اثر جهت پذیری (*Directivity*) در مقایسه با زمین لرزه هدف (*Target Event*) قرار گرفته باشد، بر اثر این پدیده جنبش نیرومند شبیه سازی شده زیاد یا کم تخمین زده می‌شود.

#### ۳-۳- روش تابع نیمه تجربی گرین

در حالتی که اتفاق کوچک در دسترس نباشد از روشهای نیمه تجربی برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین می‌توان استفاده کرد. در روش نیمه تجربی تابع گرین فرایند گسیختگی چشمه با استفاده از یک مدل جنبشی (*Kinematic*) براساس مطالعات اولین تکانه (*First Motion*)، مدل سازی دورلرزه (*Teleseismic*) و توزیع پس لرزه‌ها

در این روش جدید پیوندی ابتدا شتابنگاشت اولیه با استفاده از موجک شبیه سازی می گردد. گسیختگی شروع شده و به مرکز اعضا می رسد و از آنجا انرژی به صورت موجک آزاد می شود. موجکها از هر عضو با اختلاف زمانی متفاوت به ایستگاه مورد نظر می رسند و ترکیب آنها شتابنگاشت اولیه را ایجاد می کند (شکل ۲، الف). بیشینه شتاب اولیه از روی این شتابنگاشت اولیه به دست می آید. مزیت این روش در این است که بیشینه شتاب اولیه که برای ایجاد پوش موج نقشها استفاده می شود با در نظر گرفتن پارامترهای مدل و هندسه گسیختگی به جای روابط تجربی تخمین زده شده است.

در مرحله بعد از این روش پیوندی پوش موج نقشها با استفاده از بیشینه شتاب اولیه و پارامتر مدت از رابطه کامدا و ساجیتو به دست می آید [۱۳]:

$$a(t) = \left( \frac{P_{ap}}{t_d} \right) t \cdot \exp\left(1 - t/d\right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $P_{ap}$  بیشینه شتاب اولیه و  $t_d$  پارامتر مدت می باشد. سپس نوه سفید فیلتر شده که از طیف  $\omega^2$  پیروی می کند، در پوش موج نقشها ضرب شده و شتابنگاشت نهایی به دست می آید. شکل (۳) الگوریتم روش ترکیبی مذکور را نشان می دهد. شکل (۲) مراحل انجام این روش پیوندی را برای زمین لرزه طبس در ایستگاه طبس نشان می دهد.

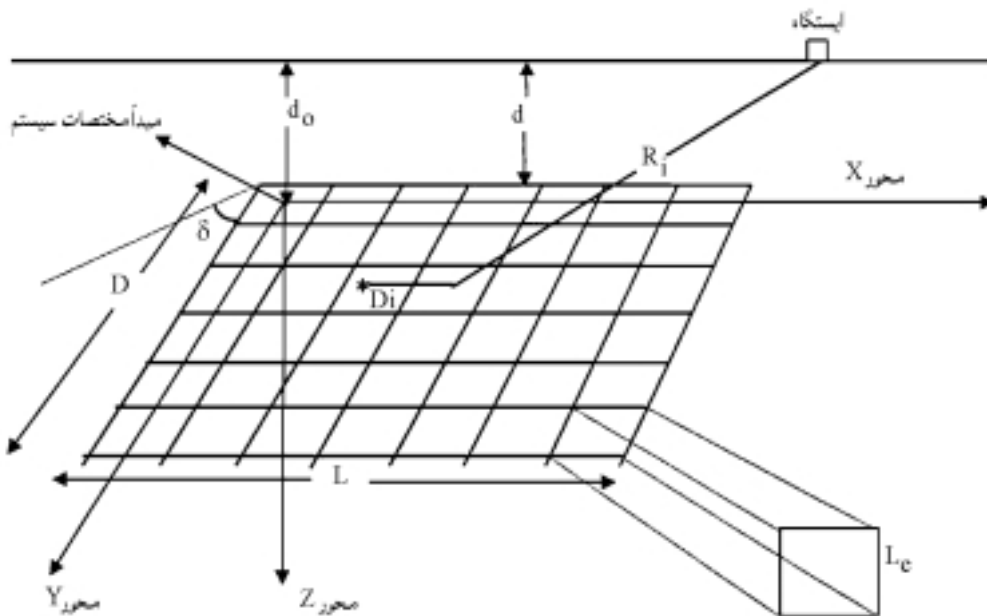
طیف پاسخ می تواند سازگار باشد. در روش شبکه های عصبی، شبکه های عصبی نقشه برداری معکوس را از طیف پاسخ به شتابنگاشت فرا- می گیرد. هدف اصلی در استفاده از شتابنگاشتهای ثبت شده تمرین یادگیری شبکه های عصبی در ارتباط دادن طیف پاسخ به شتابنگاشت مترادف آن می باشد و در این راستا قابلیت تولید شتابنگاشت را از طیف پاسخ فراهم می کند [۱۰].

### ۳-۶- روشهای پیوندی (Hybrid Methods)

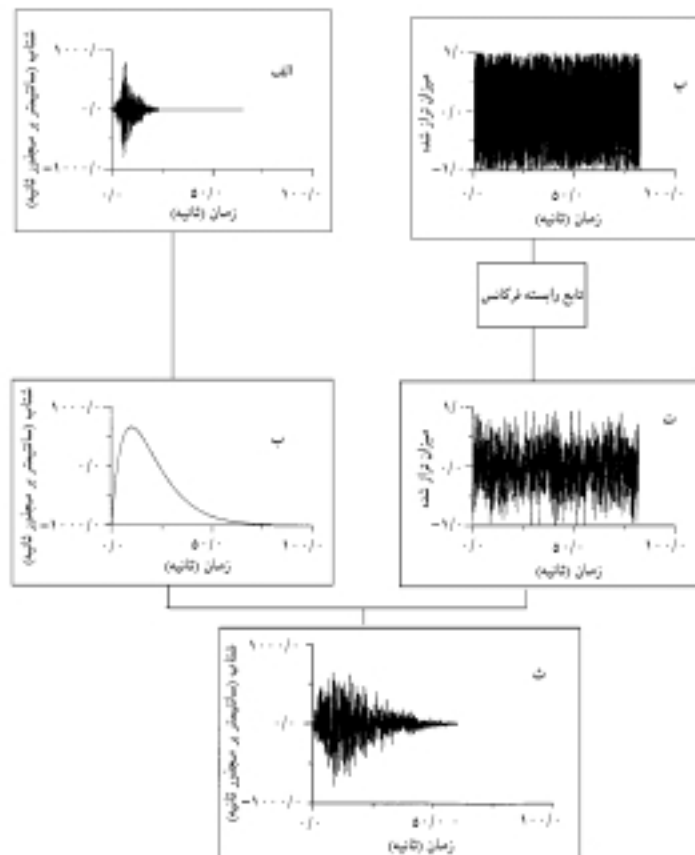
روشهای پیوندی روشهایی هستند که از پیوند دو یا چند روش که در قسمتهای قبل بحث شد برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین استفاده می شود. پیوند روشهای کاتوره ای و تابع نیمه تجربی گرین، روشهای کاتوره ای و تابع نیمه تجربی گرین و المانهای تفاضلی، پیوند دو روش تجربی تابع گرین نمونه هایی از این روشها می باشد [۱۱ و ۱۲].

### ۴- روش جدید پیوندی موجک، پوش موج نقشها و نوه سفید فیلتر شده

روش جدید پیوندی موجک، پوش موج نقشها و نوه سفید فیلتر شده توسط حمزه لو [۸] و حمزه لو و همکاران [۱۱] معرفی گردید. در روش مذکور گسل مربوط به زمین لرزه به  $N$  المان تقسیم می شود (شکل ۱). پارامترهایی که برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین مورد نیاز می باشد عبارتند از: طول ( $L$ ) و عرض ( $D$ ) گسیختگی، راستا و شیب گسل، ابعاد عضو، سرعت امواج عرضی، سرعت گسیختگی و نقطه شروع گسیختگی [۸].



شکل (۱): مدل گسل برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین



شکل (۲): مراحل مختلف برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین به روش جدید موجک، پروس موج نقشها و نوفه سفید فیلتر شده در ایستگاه طبس



شکل (۳): الگوریتم روش شبیه سازی جنبش نیرومند زمین با استفاده از روش موجک، پروس موج نقشها و نوفه سفید

جدول (۱): مقایسه بین بیشینه شتاب مشاهده شده و شبیه سازی شده برای ایستگاههای نزدیک به گسل

بیشینه شتاب شبیه سازی شده Cm/sec <sup>2</sup>	بیشینه شتاب افقی مشاهده شده Cm/sec <sup>2</sup>		نزدیکترین ایستگاه به گسل	زمین لرزه
	T	L		
۷۸۷	۹۱۵	۸۶۷	طبس	۱۳۵۷ طبس
۴۲۱	۴۰۴	۴۱۰	آب بر	۱۳۶۹ منجیل
۹۲۷	۱۰۱۷	۸۴۰	زنجیران	۱۳۷۳ زنجیران
۹۹	۱۲۱	۱۵۶	اردبیل	۱۳۷۵ اردبیل

عضو، سرعت امواج عرضی، سرعت گسیختگی و نقطه شروع گسیختگی تخمین زده شده است به خوبی با بیشینه شتاب افقی مشاهده شده سازگاری داشته است. این امر مبین آن است که روش مذکور، روش مناسبتری برای تخمین بیشینه شتاب، بویژه برای ایستگاههای نزدیک به گسل می باشد.

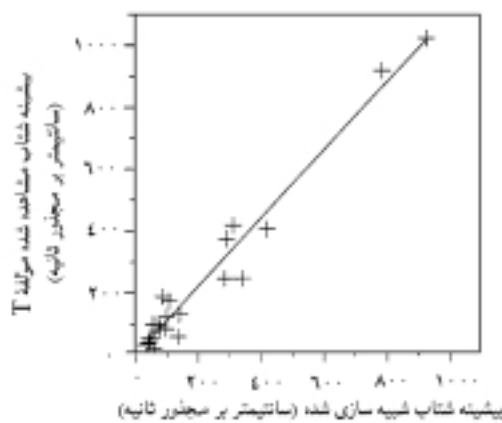
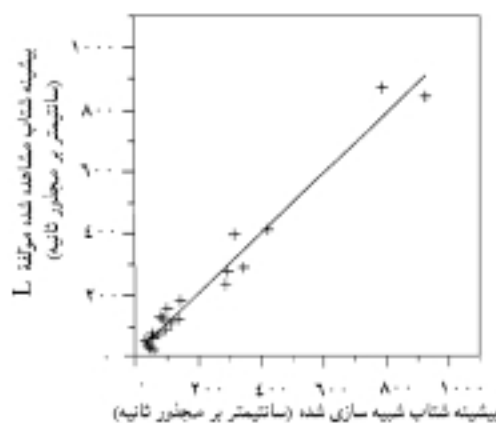
#### ۶- مراجع

1. Boo D.M. (1983). "Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based On Seismological Models of the Radiated Spectra", Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, No.6, pp. 1865-1894.
2. Hartzell, S.H. (1978). Earthquake Aftershocks as Green's Functions, Geophys. Res. Lett. Vol. 5, No. 1, pp.1-4.
3. Hadley, D.M., and D.V. Helmberger (1980), Simulation of Strong Ground Motions, Bull. Seim. Soc. Am., Vol. 70, No. 2, pp. 617-630.
4. Irikura, K. (1983), "Semi-Empirical Estimation of Strong

روش جدید پیوندی موجک، پوش موج نقشها و نوفه سفید فیلتر شده برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین برای زمین لرزه های ۱۳۵۷ طبس، ۱۳۶۹ منجیل، ۱۳۷۳ زنجیران و ۱۳۷۵ اردبیل آزمایش شد. جدول (۱) مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده شده بیشینه شتاب را برای ایستگاههای نزدیک به گسل برای این چهار زمین لرزه نشان می دهد. پارامتر بیشینه شتاب با استفاده از این روش به خوبی تخمین زده شده است.

ایستگاههایی که برای مقایسه بین شتاب افقی مشاهده شده و شبیه سازی در نظر گرفته شدند عبارتند از: ایستگاههای طبس، دیهوک، فردوس و بجستان برای زمین لرزه طبس، ایستگاههای آب بر، تنکابن، رودسر، قزوین، ابهر، زنجان، لاهیجان و گچسر برای زمین لرزه منجیل، ایستگاههای زنجیران، میمند، فیروزآباد و زرات برای زمین لرزه زنجیران و ایستگاههای اردبیل، آستارا، هورند، مشکین شهر، نمین، رضی و سراب برای زمین لرزه اردبیل. شکل (۴) مقایسه ای بین بیشینه شتاب مشاهده شده برای دو مولفه افقی و شبیه سازی شده در ۲۳ ایستگاه برای این چهار زمین لرزه را نشان می دهد. اثرهای کاهندگی گسل محدود (Finite-Fault) شامل هندسه گسیختگی و جهت پذیری که روی ویژگیهای جنبش زمین اثر می گذارند در این روش در نظر گرفته شده است.

مقایسه شتاب مشاهده و شبیه سازی شده نشان می دهد که روش مذکور قابل کاربرد برای تخمین بیشینه شتاب و تهیه نقشه خطر زمین لرزه می باشد. بیشینه شتاب شبیه سازی شده که با در نظر گرفتن پارامترهای مدل گسل شامل طول و عرض گسیختگی، راستا و شیب گسل، ابعاد



شکل (۴): مقایسه بین بیشینه شتاب مشاهده شده برای دو مولفه افقی و شبیه سازی شده برای ۲۳ ایستگاه برای چهار زمین لرزه ایران

- Ground Motions During Large Earthquakes”, Bull. Disaster Prevention Res. Inst. (Kyoto University), 33, pp.63-140.
5. Somerville, P., Sen, M., and Cohee, B. (1991), “Simulation of Strong Ground Motion Recorded During the 1985 Michoacan”, Mexico and Valparaiso, Chile Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 81, No. 1, pp. 1-27.
  6. Midorikawa, S. (1993), “Semi Empirical Estimation of Peak Ground Acceleration from Large Earthquakes”, Tectonophysics, 218, pp. 287-295.
  7. Khattri, K. N. (1998), “Simulation of Earthquake Strong Ground Motion for Seismic Hazard Estimation”, National Seminar on Recent Advances in Seismology, P 20. (Abstract Published in Souvenir), India.
  8. Hamzelo, H. (2000), “Seismic Modelling of Fault Rupture for Four Iranian Earthquakes”, Ph. D. Theses, University of Roorkee, India.
  9. Yu, G., Khattri, K. N., Anderson, J. G., Brune, J. N., and Zeng, Y. (1995), “Strong Ground Motion From the Uttarkashi, Himalaya, India, Earthquake: Comparison of Observations With Synthetics Using the Composite Source Mode”, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 85, No. 1, pp.31-50.
  10. Ghaboussi, J. and Chu-Chieh J. Lin (1998). “New Method of Generating Spectrum Compatible Accelerograms Using Neural Networks”, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 27, pp. 377-396.
  11. Hamzehloo, H., Sinvhal, A., Kamalian, N. and Sinvhal, H. (2000). “A Quantitative Comparison Between Observed and Simulated Strong Ground Motion for the 1978 Tabas (Ms 7.7), Iran”, Earthquake, Third Meeting of Asian Seismological Commission, Tehran, I.R.Iran.
  12. Kamae, K., Irikura K., and Pitaka, A. (1998), “A Technique for Simulating Strong Ground Motion Using Hybrid Greens Function”, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 88, No. 2, pp. 357-367.
  13. Kameda, H., and Sugito, M. (1978), “Prediction of Strong Earthquake Motion by Evolutionary Process Model”, Proc. 6th Japan Earthquake Engineering Symp., PP. 41-48. ◀