

## شبیه‌سازی حوزه نزدیک حرکات نیرومند زمین‌لرزه بم با استفاده از تابع گرین ترکیبی

سمیه شکیبا<sup>۱</sup>، حبیب رحیمی<sup>۲</sup>، مهرداد پاکزاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران [s.shakiba@ut.ac.ir](mailto:s.shakiba@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران [rahimih@ut.ac.ir](mailto:rahimih@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران [pakzad@ut.ac.ir](mailto:pakzad@ut.ac.ir)

### چکیده:

در این مقاله یک روش هیبریدی برای محاسبه‌ی لرزه‌نگاشت‌های جنبش‌قوی باند پهن، در حوزه نزدیک، به زمین‌لرزه‌بم اعمال می‌گردد. برای محاسبه لرزه‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده باند پهن (۰-۱۰ هرتز)، لرزه‌نگاشت‌های کاتوره‌ای فرکانس-بالا (HF) با لرزه‌نگاشت‌های قطعی فرکانس-پایین (LF) ترکیب می‌شود. توابع گرین پراکندگی فرکانس بالا (HF) مختص سایت برای یک محیط ناهمگن با پراکنده سازهای همسانگرد تصادفی و با تابع چشمه-زمانی که مشخصه و فرآیند گسیختگی است، ترکیب (کانوال) می‌شود. این پراکنده نگاشتها سپس با شکل موجهای قطعی فرکانس پایین، با استفاده از بهینه‌سازی حوزه فرکانس برای جور شدن دامنه و طیف فازی در محدوده فرکانس فصل مشترک هدف تطابق می‌یابند. پارامترهای پراکندگی محیط، تضعیف گسیختگی  $\eta_s$ ، تضعیف ذاتی  $\eta_i$ ، کاپای سایت، و همانندتضعیف وابسته به فرکانس، شکل موج و خصوصیات طیفی لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی (HF) را مشخص کرده و لذا بر لرزه‌نگاشت‌های ترکیبی باند پهن تاثیر می‌گذارند. این روش برای زمین لرزه ۲۰۰۳ بم اجرا شد و اعتبارسنجی رکورد ایستگاه بم، نشان داد که این تکنیک شکل موج‌های باند پهن واقعی را به درستی تولید می‌کند. این روش جدید شبیه‌سازی ترکیبی جنبش زمین، برای هر مدل چشمه زمین لرزه پیچیده دلخواه، قابل اجرا است این روش برای تحلیل خطر لرزه‌ای و تخمین جنبش زمین مناسب است. تخمین دقیق جنبش نیرومند زمین برای زمین‌لرزه‌های آینده برای مهندسان لازم است، تا بتوانند سازه‌هایی را طراحی کنند که در سطوح لرزش مورد انتظار دوام بیاورند و مقاومت کنند.

**کلیدواژه‌ها:** لرزه‌نگاشت‌های باند پهن ترکیبی؛ حرکت زمین نزدیک چشمه؛ لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی (HF)؛ لرزه‌نگاشت‌های قطعی فرکانس پایین (LF)؛ زمین لرزه بم

## Simulation of Near-Fault Bam-Ground Motion Using Hybrid Green's Function

Somayeh Shakiba<sup>\*</sup>, Habib Rahimi<sup>\*\*</sup>, Mehrdad Pakzad<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Graduate Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, [s.shakiba@ut.ac.ir](mailto:s.shakiba@ut.ac.ir)

<sup>\*\*</sup> Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, [rahimih@ut.ac.ir](mailto:rahimih@ut.ac.ir)

<sup>\*\*\*</sup> Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, [pakzad@ut.ac.ir](mailto:pakzad@ut.ac.ir)

### Abstract

In the present paper, a hybrid method is used for calculating broadband strong motion seismograms in near-field massive earthquakes. For this purpose, simulated broadband (0 – 10 Hz) seismograms were formulated by combining high-frequency scattering seismograms (HF), with low-frequency certain seismograms (LF), and finite-fault earthquake failure models existing in three-dimensional ground model were investigated. Site-specific Green functions of high-frequency scattering seismograms (HF) for a heterogeneous environment with randomly distributed isotropic scatters were convolved with source-time function which characterizes and describes the failure process expansion. Then, using optimization in the frequency domain, these scattered seismograms were correlated to (LF) certain waveforms to match their amplitude and phase spectrum within the target interface frequency. Environmental scattering, failure attenuation ( $\eta_s$ ), inherent attenuation ( $\eta_i$ ), and site-specific kappa determine frequency-dependent attenuation, waveform, and spectral characteristics of the synthetic seismograms (HF) and hence affect the hybrid broadband seismograms. The proposed method was implemented for the Bam Earthquake (2003) and validation of the near-surface record acquired at Bam Station showed that the proposed technique can reproduce waveform of real broadband waves appropriately. This new hybrid method for simulating ground motion offers an applicable technique to any complex earthquake source for the analysis of seismic risk and estimation of ground motion. Engineers need an accurate estimation of strong ground motions resulted from potential future earthquakes to design structures that can survive anticipated levels of vibration.

**Keywords:** hybrid broadband seismograms, near-source ground motion, synthetic seismograms (HF), scattering with low-frequency (LF), Bam Earthquake.

## ۱ مقدمه

در این مطالعه، یک روش برای محاسبه لرزه نگاشتهای چشمه نزدیک باند پهن واقعی برای اهداف مهندسی با ترکیب شبیه‌سازی‌های میدان موج قطعی LF با امواج پراکنده شده HF بکار می‌رود. در این روش از یک تفاضل محدود سه‌بعدی (اولسن ۱۹۹۴) برای محاسبه جنبش زمین در مدل‌های گسستگی چشمه پیچیده موجود در یک ساختار چگالی-سرعت سه‌بعدی استفاده می‌شود و شامل تمام موجهای مستقیم، فازهای تبدیل شده و امواج سطحی و همچنین جملات حوزه نزدیک تابش یافته توسط چشمه زلزله است. برای محاسبه میدان موج HF غالب توسط انرژی موج لرزه‌ای پراکنده‌ی غیر منسجم، توابع گرین پراکندگی سایت مشخصه را که با تابع زمانی چشمه کانولوشن شده و تحول زمانی فرایند گسستگی زلزله را کدگذاری می‌کند، محاسبه می‌گردد. لرزه نگاشتهای پراکندگی HF نهایی نیز با لرزه نگاشتهای تفاضل محدود LF در دامنه‌ی فرکانسی به گونه‌ای ترکیب می‌شود که دامنه و طیف فازی به صورت بهینه تطبیق می‌یابند. (مائی و بروزا ۲۰۰۳)

## ۲ روش تحقیق

## ۱-۲ محاسبه لرزه‌نگاشتهای باند پهن ترکیبی:

یک رویکرد سه مرحله‌ای اجرا می‌شود. در ابتدا، سنتیک‌های تفاضل-محدود LF برای یک گسیختگی زلزله گسل محدود در یک مدل سه بعدی زمین قرار گرفته است، محاسبه می‌شود. برای مدل‌های زمین لایه لایه ساده، از نظر محاسباتی، تکنیک‌های کم هزینه‌تری می‌تواند برای محاسبه لرزه‌نگاشتهای سنتیک میدان-موج کامل مورد استفاده قرار گیرد. سهم پراکندگی HF برای هر ناحیه مورد بررسی، با توجه به خواص پراکندگی متوسط مسیر و شرایط سایت منطقه‌ای بر اساس کاپای (k) سایت ایجاد می‌شود. در نهایت، دو مجموعه از لرزه‌نگاشتهای با یکدیگر در دامنه فرکانس برای شکل‌دهی لرزه‌نگاشتهای باند پهن ترکیبی منطبق می‌شوند. تصحیح اثر-سایت وابسته به فرکانس اضافی می‌تواند برای به کار بردن سنتیک‌های باند پهن مورد استفاده قرار گیرد، در ادامه، به اختصار تئوری برگشت پراکندگی (S-to-S) چندگانه، برای محاسبه میدان موج لرزه‌ای نا منطبق به وسیله ایجاد توابع گرین، برگشت پراکندگی ویژگی‌های امواج کدا را ثبت می‌کنند، توضیح داده می‌شود. لرزه‌نگاشت پراکندگی HF با استفاده از یک اپراتور کانولوشن خاص-گسیختگی (یعنی یک تابع زمان-چشمه با مقیاس مناسب) و تابع گرین پراکندگی، به دست می‌آید.

## ۲-۲ نظریه پراکندگی S-to-S چندگانه:

برای محاسبه سهم پراکندگی مشخصه سایت، تئوری پراکندگی موج لرزه‌ای برای پراکندگی چندگانه S-to-S به کار گرفته شد (زنگ و همکاران ۱۹۹۳) با شروع از معادله انرژی کلی در یک محیط با سرعت پس زمینه غیر آشفته  $v$  و پراکنده‌سازهای تصادفی، (زنگ و همکاران ۱۹۹۱) معادله انرژی-موج متداول را از معادله انرژی-موج، برای امواج پراکنده ناپیوسته از یکدیگر جدا می‌کنند. خصوصیات پراکندگی در محیط به وسیله توزیع یکنواخت پراکنده‌سازهای همگن تصادفی با چگالی  $n_0$  تشخیص داده می‌شوند. سپس انرژی موج-پراکندگی می‌تواند به عنوان محصولی از برش پراکندگی  $\sigma$ ، چگالی انرژی-موج در نقطه پراکندگی، و فاکتور گسترش هندسی و همچنین توزیع مجدد انرژی به دلیل پراکندگی موج الاستیک ( $\eta_s$ ) و تضعیف درونی به دلیل اتلاف انرژی ( $\eta_i$ ) که در امتداد مسیرهای موج از نقطه پراکندگی تا گیرنده رخ می‌دهد، مورد محاسبه قرار گیرد. (مانند مايدا و همکاران ۱۹۹۲ و ساتو و فهلر ۱۹۹۸). از آن جایی که پراکندگی لرزه‌ای در حجم  $V$  رخ می‌دهد که شامل چشمه و سایت است، انرژی پراکندگی کل با تلفیق سهم‌هایی از همه نقاط پراکندگی در  $V$  تعیین می‌شود.

$$E(\vec{r}, t) = \frac{\delta\left(t - \frac{r}{v}\right) e^{-\eta_i t}}{4\pi v r^2} + \sum_{n=1}^2 E_n(\vec{r}, t) + \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{i\Omega t}}{2\pi} d\Omega * \int_0^{\infty} \frac{\left(\frac{\eta_s}{k}\right)^3 * \left[ \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{i\Omega}{v}} \right) \right]^4 * \sin(kr)}{2\pi^2 v r \left[ 1 - \frac{\eta_s}{k} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{i\Omega}{v}} \right) \right]} dk \right) \quad (1)$$

که در آن  $r$  فاصله،  $t$  زمان و  $v$  سرعت لرزه‌ای محیط است.  $i\Omega$  به دلیل تغییر از دامنه لاپلاس به حل تبدیل فوریه در زمان بوجود می‌آید. اولین عبارت در معادله ۱ نشان دهنده ورود مستقیم است، در حالی که عبارت دوم  $\sum E_n$  انرژی پراکندگی

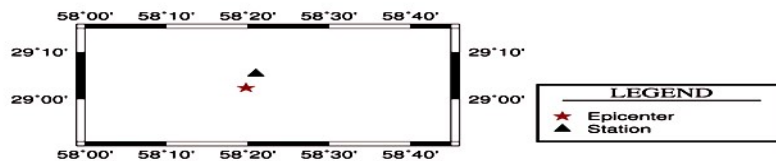
منفرد ( $n=1$ ) و انرژی پراکندگی دوگانه ( $n=2$ ) را نشان می‌دهد. بخش سوم شامل انرژی موج پراکنده چندگانه در محیط است. معادله ۱ تنها پراکندگی S-to-S را در نظر می‌گیرد و شامل پراکندگی موج-سطح نمی‌شود. برای استفاده از معادله ۱ در شبیه‌سازی‌های جنبش زمین فرکانس بالا، (زنگ و همکاران ۱۹۹۵) اصلاحاتی را پیشنهاد می‌کنند. در حالی که امواج پراکنده درست قبل از موج S وارد می‌شوند، توسط امواج تبدیلی S به P تحت تاثیر قرار می‌گیرند، که می‌تواند کاملاً توسط محاسبه تبدیل پراکندگی بین امواج S و P در نظر گرفته شوند (زنگ ۱۹۹۳)، تقریبی با تبدیل پراکندگی S-to-P منفرد (ساتو ۱۹۹۷) در زیر ارائه شده است.

$$E_{sp}(\vec{r}, t) = \frac{\eta_{sp} e^{-\eta \beta t}}{4\pi r \alpha t} \ln \frac{\frac{\vec{r}}{\beta t} + 1}{\frac{\vec{r}}{\beta t} - 1} \quad (2)$$

که  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی سرعت امواج P و S است. (زنگ و همکاران ۱۹۹۵). برای جامد پواسون، (زنگ ۱۹۹۳) نشان می‌دهد که  $\eta_{sp} = \eta_s (\beta/\alpha)^4 \approx 0.11\eta_s$  و اینکه انرژی‌های تبدیلی P-to-S و S-to-P به صورت  $E_{p-s} = E_{s-p}$  رفتار می‌کند. پراکندگی موج سطحی به طور صریح در معادله ۱ یا معادله ۲ وارد نمی‌شود، گرچه می‌تواند به طور بالقوه در سایت‌های دور دست به دلیل ویژگی  $1/\sqrt{r}$  واپاشی دامنه‌های موج سطحی دارای اهمیت باشد. با این حال، انرژی موج پراکنده S-to-S نیز به طور بالقوه با امواج سطحی طولانی مدت مواجه خواهد شد؛ در چنین مواردی، انتظار می‌رود که موج کدا S-to-D با دوره طولانی به اندازه کافی پراکندگی موج سطحی را تخمین بزند.

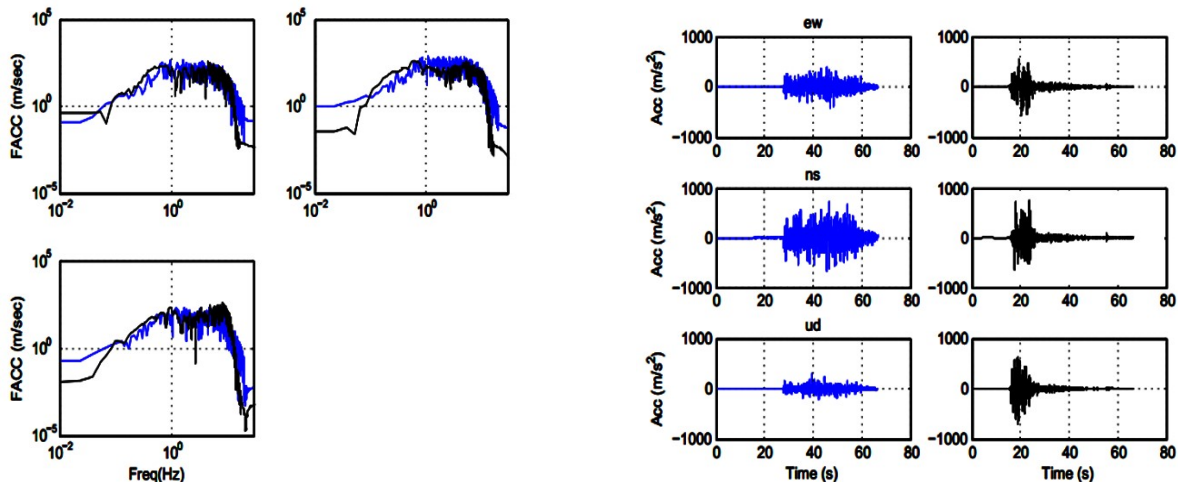
### ۲-۳ شبیه‌سازی‌های باند پهن برای زلزله بم در سال ۲۰۰۳

روش شبیه‌سازی جنبش زمین باند پهن برای زلزله بم با بزرگی ۶/۵ در سال ۲۰۰۳ اعمال می‌شود و ترکیب هیبریدی را به داده‌ی ثبت شده جنبش‌قوی در نزدیکترین سایت (شکل ۱) لحاظ گردید. زلزله بم برای اعتبارسنجی به دلیل مجموعه داده‌های جنبش‌قوی بزرگ آن انتخاب شده است.



شکل ۱: فاصله نزدیک ترین ایستگاه (بم) تا زمین لرزه بم

به دست آوردن لرزه نگاشت شبیه سازی شده با استفاده از کد BroadBand Toolbox انجام می‌گیرد. شبیه سازی باند پهن هیبرید با استفاده از لرزه نگاشت‌های از پیش محاسبه شده فرکانس پایین و بخش‌های فرکانس بالا بر اساس مدل پراکندگی چندگانه S-S توسط زنگ و همکاران (۱۹۹۳، ۱۹۹۱) پیشنهاد شد. لرزه نگاشت‌های فرکانس بالا و پایین، برای مطابقت دامنه و فاز، با استفاده از روش شناسی پیشنهادی می و بروزا (۲۰۰۳) ترکیب می‌شوند.



شکل ۳: نمایش طیف فوریه شتاب مولفه‌های افقی و عمودی نگاشت‌های (مشاهده‌ای به رنگ آبی و شبیه‌سازی به رنگ مشکی) ایستگاه بم

شکل ۲: تاریخچه زمانی- شتاب مولفه‌های افقی و عمودی شتاب نگاشت‌های (مشاهده‌ای به رنگ آبی و شبیه‌سازی به رنگ مشکی) در ایستگاه بم

### نتیجه‌گیری

روش‌های قطعی برای محاسبه میدان موج در فرکانس‌های پایین (تا حدود ۱ هرتز) در مدل‌های زمین سه بعدی، به خوبی بکار می‌رود. این روشها همچنین پیچیدگی‌های فرآیند گسیختگی زلزله را به خوبی توضیح می‌دهند. در مقابل، متدهای شبیه‌سازی جنبش زمین برای فرکانس‌های بالا ( $f \approx 1-10$  Hz) عمدتاً بر اساس روشهای تجربی-تصادفی بنا شده و به طور کلی فیزیک پراکندگی لرزه‌ای را به دلیل ساختار ناهمگن زمین کوچک مقیاس در نظر نمی‌گیرند یا شامل اثرات انتشار موج سه بعدی هستند. در این مطالعه، با روش جدیدی که شبیه‌سازی جنبش زمین باند پهن را بهبود میبخشد، با ترکیب لرزه نگاشت‌های مصنوعی تفاضل محدود سه بعدی فرکانس پایین با یک میدان موج پراکنده فرکانس بالا که توصیف کننده فیزیک رسیدهای لرزه‌ای گسسته (نامنسجم) به دلیل پس پراکندگی s به s در محیط همگن تصادفی یکنواخت است. روش ارائه شده مکانیسم‌های گسیختگی را که شامل پیچیدگی وابسته به فضا و زمان در تمام مقیاس‌ها است، به طور مستقیم بر روی میدان موج فرکانس پایین و به طور غیرمستقیم بر سهم موج پراکنده اثر می‌گذارد، فراهم می‌کند.

### منابع

- Bazzurro, P., B. Sjöberg, and N. Luco (2004). Post-elastic response of structures to synthetic ground motions, Report for Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center Lifelines Program Project, pp. 65–112.
- Mai, P. M., and G. C. Beroza (2003). A hybrid method for calculating near-source, broadband seismograms: Application to strong motion prediction, *Phys. Earth Planet. In.* 137, no. 1–4, 183–199.
- Mayeda, K., S. Koyanagi, M. Hoshihara, K. Aki, and Y. Zeng (1992). A comparative study of scattering intrinsic and coda Q1 for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15 Hz, *J. Geophys. Res.* 97, no. B5, 6643–6659.
- Olsen, K. B. (1994). Simulation of three-dimensional wave propagation in the Salt Lake basin, Ph.D. Thesis, University of Utah, Salt Lake City, Utah, 157 p.
- Sato, H., and M. Fehler (1998). *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*, Press AIP/Springer Verlag, New York, 308 pp.
- Zeng, Y. H. (1993). Theory of scattered P- and S-wave energy in a random isotropic scattering medium, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 83, 1264–1276.
- Zeng, Y. H., J. G. Anderson, and F. Su (1995). Subevent rake and random scattering effects in realistic strong ground motion simulation, *Geophys. Res. Lett.* 22, no. 1, 17–20.
- Zeng, Y. H., F. Su, and K. Aki (1991). Scattered wave energy propagation in a random isotropic scattering medium—Part 1. Theory, *J. Geophys. Res.* 96, no. B1, 607–619.