

مقایسه تعیین فرکانس غالب شهر بم با استفاده از پروفیل‌های لرزه ای و روش نسبت طیفی افقی به قائم پس لرزه های زلزله بم

دکتر غلامرضا لشکری پور، استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر حسین صادقی، استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد
* زینب سویزی، دانشجوی زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این مقاله با استفاده از ۱۰ پروفیل لرزه ای مطالعه شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی و اطلاعات ژئوتکنیکی در شهر بم فرکانس غالب محاسبه شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود این پارامتر به صورت قابل توجهی از منطقه ای به منطقه دیگر متفاوت است. با افزایش عمق سنگ بستر به سمت جنوب فرکانس غالب کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج بدست آمده از این روش با نتایج حاصله از روش نسبت طیفی افقی به قائم ۶۵ پس لرزه زلزله بم که توسط ۹ ایستگاه موقت لرزه نگاری ثبت شده نشان می‌دهد که روش کم‌هزینه نسبت طیفی، که بر اساس لرزه‌های خفیف زمین است در صورت عدم وجود اطلاعات دقیق ژئوتکنیکی منطقه، روش مناسبی برای تخمین فرکانس غالب می‌باشد.
کلمات کلیدی: فرکانس غالب، روش تحلیلی، زلزله بم، نسبت طیفی افقی به قائم

مقدمه

اثر ساختگاه یکی از عوامل مهم کنترل‌کننده میزان تخریب در نواحی شهری در اثر زلزله‌های بزرگ می‌باشد. تقویت حرکت زمین در فرکانس‌های $1-10\text{ Hz}$ به شدت تحت تأثیر شرایط سطحی محل شامل زمین‌شناسی و توپوگرافی نامنظم سطح قرار می‌گیرد. در زمان حرکت موج به سمت سطح زمین در حین عبور از لایه‌های خاک محتوای فرکانسی، دامنه حرکت زمین به طور گسترده‌ای تغییر می‌کند. وزن مخصوص، سختی، ضخامت و دیگر خواص فیزیکی لایه‌های خاک عوامل اساسی هستند که خصوصیات موجهای لرزه ای را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مطالعات زیادی در ارتباط با نقش زمین‌شناسی سطحی در حرکات لرزه ای صورت گرفته است برای مثال: (Cultrera et al., 1999; Frankel et al., 1999; Triantafyllidis et al., 1999).
(1999) نمونه برجسته از تقویت سایت مربوط به زلزله Michoacan (1985) مکزیکوسیتی با بزرگی $M_s=8.1$ می‌باشد. در این زلزله حرکت زمین در محدوده فرکانس $0.25-0.7\text{ Hz}$ به دلیل وجود رسوبات دریاچه ای نرم در زیر شهر تا 50 برابر تقویت شد (Singh and Ordaz, 1993).
در زلزله Killari (1993) در Latur هند با بزرگی $M_s=6.2$ ، بین اثرات ساختمانی و الگوی تخریب منطقه ارتباط وجود داشت. بطوریکه تخریب در بخشی از روستای Killari که در نزدیک رودخانه Tima واقع شده گسترده



بود. این روستا در محل آپی سنتر زلزله اصلی قرار داشت. ضخامت زیاد رسوبات آبرفتی در این منطقه باعث تقویت ۴ برابر امواج زلزله شده بود (Midzi et al., ۲۰۰۳). نتایج مطالعات (Aki, ۱۹۹۳)، در ایالات متحده و ژاپن حاکی از آن است که تقویت سایت بستگی به فرکانس حرکت زمین دارد و اینکه خاکهای نرم‌تر و جوانتر نسبت به خاکهای سخت‌تر و سنگ‌بستر بیشتر باعث تقویت حرکت زمین می‌شوند. از آنجا که ساختمانها بر سایت‌های متنوع از لحاظ زمین‌شناسی واقع می‌شوند ارزیابی پاسخ سایت در سراسر مناطق مسکونی در مناطق مستعد زلزله امری مهم به نظر می‌رسد. این ارزیابی معمولاً به روشهای متفاوتی صورت می‌گیرد. روش نسبت طیفی استاندارد (SSR) (Borcherdt, ۱۹۷۰)، روش نسبت طیفی افقی به قائم (HVSr) (Nakamura, ۱۹۸۹) و روش معکوس کلی (GIM) (Fletcher and Castro et al., ۱۹۹۹; Boatwright, ۱۹۹۱) از جمله روشهای کم‌هزینه‌ای هستند که در صورت عدم وجود اطلاعات زمین‌شناسی منطقه استفاده می‌شود.

در روشهای تحلیلی، با استفاده از بررسی‌های ژئوتکنیکی یا لرزه‌ای شامل انکساری و یا انعکاسی، خصوصیات فیزیکی و دینامیکی لایه‌های خاکی و سنگی منطقه مشخص می‌شود و سپس با استفاده از آنها پاسخ سایت تعیین می‌شود. در این مطالعه با استفاده از پروفیل‌های لرزه‌ای و ژئوتکنیکی موجود در مناطق مختلف شهر بم فرکانس‌های غالب تعیین و با روش نسبت طیفی افقی به قائم مقایسه شده است.

زلزله بم و زمین‌شناسی منطقه

زلزله بم در ۵ دیماه ۱۳۸۲ در ناحیه جنوب شرقی ایران به وقوع پیوست. سازوکارهای کانونی دورلرزه‌ای یک گسل لغزش جانبی راست را نشان دادند (USGS Database, ۲۰۰۳). USGS، مرکز عمقی زلزله را در $29.004^{\circ}N, 58.237^{\circ}E$ و عمق ۱۰ Km با بزرگی $M_w=6.6$ گزارش نمود. این زلزله موجب تخریب شدیدی در شهرستان بم با جمعیت ۱۴۲۰۰۰ نفر گردید به طوری که در اثر این زمینلرزه ۲۶۲۷۱ نفر کشته و دهها هزار نفر زخمی شدند (Statistics Center of Iran, ۲۰۰۳). از عوامل اصلی تخریب گسترده در اثر زلزله بم می‌توان به ضعف سازه‌ای ساختمانهای گلی و آجری و همچنین ارتباط بین موقعیت شهر بم و جهت انتشار گسیختگی اشاره کرد. با این وجود میزان تخریب در مقایسه با بزرگی زلزله غیر منتظره است. ماکزیمم تخریب در بخشهای شرقی و شمالی شهر بم که ساختمانها اکثراً قدیمی هستند مشاهده می‌شود در این مناطق بیشتر خانه‌ها واژگون شدند (بیش از ۸۰ درصد). در مقابل غرب و جنوب شهر که ساختمانها جدیدتر هستند و در روستای براوات تخریب زیادی رخ نداده است (کمتر از ۲۰ درصد). روستای براوات بر روی گسل ارگ بم (گسل عامل زلزله) و جهت انتشار گسیختگی قرار ندارد. این موقعیت مکانی ممکن است علت تخریب کمتر روستای براوات باشد (Nakamura et al., ۲۰۰۵). تصور می‌شد که شرایط خاک زیر سطحی ممکن است



شدت لرزه ای و میزان تخریب ناشی از آن را تحت تأثیر قرار داده باشد. این تصور با وجود کانال رودخانه پشت رود در نزدیک بخش خسارت دیده بیشتر محتمل می‌شد. روش نسبت طیفی افقی به قائم (HVSR) نشان داد که اثرات تقویت محلی نیز در ایجاد اختلاف در شدت تخریب مؤثر بوده است (دندهاریون، ۱۳۸۳). شهر بم از شمال محدود به رودخانه پشت رود و از قسمت شرقی و جنوب شرقی توسط روستای براوات احاطه می‌شود. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگهای آذرین خروجی ائوسن و توده سنگ گرانودیوریت (که سن آن در نقشه‌های زمین‌شناسی تعیین نشده است) می‌شود که در بخش شمال شهر رخنمون دارند و به سمت جنوب شیب دارند. همچنین رسوبات آبرفتی کواترنری عمدتاً شامل سیلت و ماسه ریز، سنگهای رسوبی پالئوژن که اطراف شهر بم و حومه آن را پوشانیده است (Amini et al., ۲۰۰۴).

روش کار

پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی (IIIES)، پروفیل‌های خاک را در طول ۱۰ خط با روش انعکاسی در شهر بم و اطراف آن بعد از وقوع زلزله اصلی برداشت کرده است (Konagai et al., ۲۰۰۴). بدین منظور ژئوفون‌ها را در فواصل ۴m نصب کرده و پروفیل خاک را با دقت ۲m در جهت عمودی بدست آورده‌اند. شکل ۱ موقعیت این پروفیل‌ها را نشان می‌دهد. ستونها در این شکل متوسط پروفیل خاک را در طول این خطها نمایش می‌دهد. مطابق شکل پروفیل خاک در شهر بم تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. در بخش جنوبی و میانی شهر ضخامت خاک زیاد است و با حرکت به سمت شمال ضخامت کاهش می‌یابد. به منظور افزایش دقت کار، نتایج حاصل از روش سونداژ وزنه‌ای سوئدی که در آن سرعت موج برشی تا عمق ۳m با دقت بیشتری قابل اندازه‌گیری است و در محل پروفیل‌های شماره ۵، ۶، ۷، ۸ انجام شده نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Towhata et al., ۲۰۰۴).

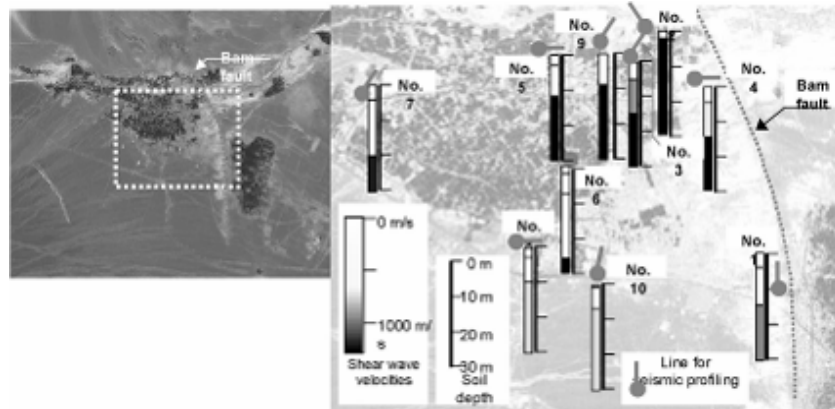
با استفاده از روابط زیر عدد نفوذ استاندارد (SPT) و بعد سرعت موج برشی (V_s) محاسبه شده است:

$$(SPT-N) = 0.02 W_{sw} + 0.067 N_{sw} \quad (Inada, 2000) \quad (1)$$

W_{sw} = بار اعمال شده در بالای سونداژ که در اینجا برابر با ۱۰۰ kgf است.

N_{sw} = تعداد چرخشهای ۱۸۰ درجه‌ای مورد نیاز برای یک متر نفوذ سونداژ

$$V_s = 8.0 N^{1/3} \quad (m/s) \quad (Japan Road Association, 2002) \quad (2)$$



شکل ۱- پروفیل‌های لرزه ای خاک - دایره های بالای هر ستون نشانگر خطی است که پروفیل لرزه ای در طول آن گرفته شده (Konagai et al., ۲۰۰۴، اقتباس از)

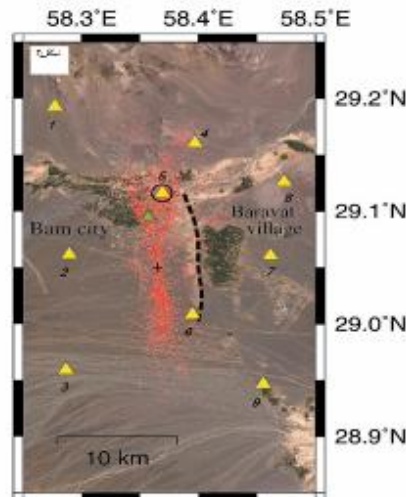
در این بخش با استفاده از فرمول زیر که برای لایه های افقی خاک ارائه شد (Bard, ۲۰۰۰) فرکانس غالب را برای هر یک از پروفیل‌های منطقه محاسبه شده است.

$$(2\pi f)^3 = (\sum_{i=1}^n V_i^2 H_i) / H^3 \quad (3)$$

در این رابطه، f فرکانس غالب، V_i ، H_i به ترتیب سرعت موج برشی و ضخامت i امین لایه و H ضخامت کل رسوبات است. نتایج محاسبات در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- فرکانس غالب محاسبه شده برای پروفیل‌های خاک با استفاده از رابطه شماره (۳)

شماره آرایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
فرکانس غالب (HZ)	۵,۸	۱۱,۵	۱۰,۰	۹,۷	۹,۷	۶,۱	۷,۴	۶,۱	۱۰,۰	۶,۱



فرکانس غالب محاسبه شده با ضخامت خاک منطقه تطابق دارد به طوریکه با افزایش ضخامت لایه سطحی به سمت جنوب فرکانس غالب منطقه کاهش مییابد.

با استفاده از ۶۵ پس لرزه ثبت شده زلزله بم توسط یک شبکه موقت لرزه نگاری با حساسیت بالا متشکل از ۹ سرعت سنج و یک شتاب نگار در شهر بم و اطراف آن (Nakamura et al., ۲۰۰۵) روش نسبت طیفی افقی به قائم برای تخمین فرکانس غالب به کار برده شد (قندهاریون، ۱۳۸۳). شکل ۲ موقعیت ایستگاههای لرزه نگار را نشان می دهد. با توجه به جدول شماره (۱) فرکانس های بالای بدست آمده برای محل پروفیل‌های های شماره ۲، ۳، ۴، ۵، ۹ (تقریباً بزرگتر از Hz) ۱۰ ممکن است مؤید تأثیر کم شرایط سطحی زمین در تقویت حرکات لرزه ای باشد. فرکانس غالب در بقیه پروفیلها در رنج ۷.۴-۵.۸ Hz قرار می گیرد که با فرکانس دومین پیک دامنه در نسبت طیفی، که در نواحی با تخریب زیاد شهر در محدوده ۶-۵ هرتز قرار می گیرد تقریباً منطبق است. با توجه به اینکه موقعیت مکانی ایستگاههای لرزه نگار و پروفیلها یکی نیستند اختلاف موجود بین نتایج دو روش دور از انتظار نیست.

نتیجه گیری

در این مطالعه فرکانس غالب برای ۱۰ پروفیل خاک در شهر بم که توسط پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله برداشت شده محاسبه گردید. با استفاده از نتایج بدست آمده مشاهده می شود که با افزایش ضخامت لایه سطحی به سمت جنوب فرکانس غالب منطقه کاهش می یابد. فرکانس غالب در پروفیل‌های بخش جنوبی در رنج ۷.۴-۵.۸ Hz قرار می گیرد. همچنین نتایج حاصل از این روش با نتایج روش نسبت طیفی افقی به قائم پس لرزه های زلزله بم جهت تخمین فرکانس غالب خاک، با هم مقایسه گردید.



نتایج بدست آمده نشان داد که روش کم هزینه نسبت طیفی همخوانی نسبتاً خوب و مورد قبولی را با روش تحلیلی دارد.

منابع

فندهاریون علی. اثرات محلی منطقه در تقویت دامنه امواج لرزه ای در زلزله بم. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش خاک و بی، دانشگاه فردوسی، ۱۳۸۳.

- Aki, K. "Local site effects on weak and strong ground motion", *Tectonophysics* 218, 93-111, 1993
- Amini Hosseini K., Mahdaviifar M.R., Keshavarz M. and Rakhshandeh M. "Engineering geology and geotechnical aspects of Bam earthquake", *IIEES*, 2004. (Available online at: http://www.iiees.ac.ir/English/bank/Bam/bam_report_english_geo.htm/)
- Bard P.Y. Lecture notes on "Seismology, seismic hazard assessment and risk mitigation". International Training Course, Potsdam, p:160, 2000
- Borcherdt R.D. "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay", *Bull. Seism. Soc. Am.* 60, 29-61, 1970
- Castro R.R., Anderson J.G. and Singh S.K. "Site response, attenuation and source spectra of s waves along the Guerrero, Mexico Subduction zone", *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 1481-1503, 1999.
- Cultrera G., Boore D.M., Joyner W.B. and Dietel C.M. "Nonlinear soil response in the vicinity of the Van Norman Complex following the 1994 northridge, California Earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 1214-1231, 1999.
- Fletcher J.B. and Boatwright J. "Source parameters of Loma Prieta aftershocks and wave propagation characteristic along the San Francisco Peninsula from a joint inversion of digital seismograms", *Bull. Seism. Soc. Am.* 81, 1783-1812, 1991
- Frankel A., Carver D., Cranswick E., Meremonte M., Bice T. and Overturf D. "Site response of seattle and source parameters of earthquake in the Puget Sound region", *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 468-483, 1999
- Inada M. "Interpretation of Swedish weight sounding". *Monthly Magazine of Japanese Geotechnical Society*, Vol. 8, No. 1, PP. 13-18, 2000
- Japan Road Association. "Specification for Highway Bridge", Part V Seismic Design, P. 28, 2002
- Konagai K., Yoshimi M., Meguro K., Yoshimura M., Mayorca P., Takashima M., Farahani A., Tahghighi H. and Keshavarz M. "Strain induced in cracked utility poles and damage to dwelling in the Dec. 26, 2003, Bam earthquake". *Bull. Earth. Res. Inst., Univ. Tokyo* 79: 59-67, 2004
- Midzi, V., Singh D.D., Atakan k. And Havskov J. "Local site effects in Latur, India: an empirical study based on the aftershocks of the Killari earthquake of September 29, 1993", *J. Eng. Geol.* 68, 251-258, 2003
- Nakamura T., Suzuki S., Sadeghi H., Fatemi Aghda S.M., Matsushima T., Ito Y., Hosseini S.K., Jafar Gandomi A., Maleki M. "Source fault structure of the 2003 Bam earthquake, southeastern Iran, inferred from the aftershock distribution and its relation to the heavily damaged area: Existence of the Arg-e-Bam fault proposed", *Geophys. Res. Lett.* 32, 109308, doi:10.1029/2005GLO22631.
- Nakamura Y. "A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface", *Quarterly Report RTRT, Jpn* 30, 25-33, 1989.
- Singh, S.K. and Ordaz M. "On the origin of long coda observed in the lake-bed strong-motion records of Mexico City", *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1298-1306, 1993
- Statistics Center of Iran "Number of fatalities, casualties and missing people as a result of Bam earthquake, 2003".



دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران،
دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵



Towhata I., Ghalandarzadeh A., Shahnazari H., Mohajeri M. and Shfief A. "Seismic behavior of local soil and foundation in Bam City During the 2003 Bam Earthquake in Iran". Bull. Earth. Res. Inst., Univ. Tokyo 79: 69-80, 2004

Triantafyllidis P., Hatzidimitriou P.M., Theodulidis N, Suhadolc P., Papazachos C., Raptakis D. and Lonzetidiz K. "Site effects in the City of Thessaloniki estimated from acceleration data and 1D local soil profiles", Bull. Seism. Soc. Am. 89, 521-537, 1999

USGS Database (Available online at <http://earthquake.usgs.gov>)