

بررسی خواص غیرخطی در ساختگاههای زلزله چنگوره - آوج و تعیین پارامترهای دینامیکی ساختگاه با استفاده از تحلیل بازگشتی

محمد رضا قائم مقامیان، اسنادیاری پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک / علیرضا نوجوان، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه

۱- چکیده

در این مقاله خواص غیرخطی در ساختگاههای زلزله چنگوره - آوج با محاسبه تابع بزرگنمایی ساختگاه و محاسبه تغییرات فرکانس غالب آن بررسی شده است. با توجه به رفتار غیرخطی خاک در شتابهای زیاد، ساختگاههایی که در این زلزله شتاب زیادی را تجربه نموده اند، بررسی گردیده اند. بدین منظور در ایستگاههای آوج، آبگرم، چنگوره، رزن، شیرین سو، درسچین و کبودرآهنگ که PGA از 90 cm/s^2 بیشتر بوده و رفتار غیرخطی در آنها محتمل است، بررسی و تابع بزرگنمایی آنها برای قسمت اصلی و انتهایی زلزله اصلی و قسمت اصلی پس لرزه ها محاسبه و با هم مقایسه شده است. از میان این ساختگاهها، چهار ساختگاه آوج، آبگرم، کبودرآهنگ و شیرین سو رفتار غیرخطی از خود نشان دادند که خواص دینامیکی خاک در این ساختگاهها با استفاده از تحلیل بازگشتی ارزیابی شده است.

در این مقاله خواص غیرخطی در ساختگاههای زلزله چنگوره - آوج با محاسبه تابع بزرگنمایی ساختگاه و محاسبه تغییرات فرکانس غالب آن بررسی شده است. با توجه به رفتار غیرخطی خاک در شتابهای زیاد، ساختگاههایی که در این زلزله شتاب زیادی را تجربه نموده اند، بررسی گردیده اند. بدین منظور در ایستگاههای آوج، آبگرم، چنگوره، رزن، شیرین سو، درسچین و کبودرآهنگ که PGA از 90 cm/s^2 بیشتر بوده و رفتار غیرخطی در آنها محتمل است، بررسی و تابع بزرگنمایی آنها برای قسمت اصلی و انتهایی زلزله اصلی و قسمت اصلی پس لرزه ها محاسبه و با هم مقایسه شده است. از میان این ساختگاهها، چهار ساختگاه آوج، آبگرم، کبودرآهنگ و شیرین سو رفتار غیرخطی از خود نشان دادند که خواص دینامیکی خاک در این ساختگاهها با استفاده از تحلیل بازگشتی ارزیابی شده است.

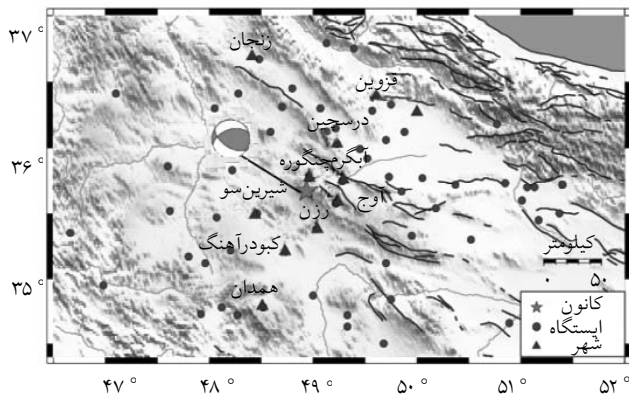
کلیدواژه ها: تابع بزرگنمایی، فرکانس غالب، تحلیل بازگشتی، خواص دینامیکی خاک، زلزله چنگوره - آوج

۲- مقدمه

در این تحقیق با استفاده از نسبتهای طیفی مؤلفه افقی به قائم، تابع بزرگنمایی ساختگاه محاسبه و فرکانس غالب ساختگاه تعیین شده است. تابع بزرگنمایی و فرکانس غالب متناظر آن برای پنجره زمانی زلزله اصلی (Main Part of Main Shock)،

پراکندگی خسارات زلزله به خوبی نشان می دهد که

روندهای ساختاری در منطقه زلزله زده با توجه به گسلهای با راستای عمومی شرقی-غربی (در راستای گسل ایپک که به روستای آبگرم ختم می شود) و گسلهای با راستای شمال غربی- جنوب شرقی در شمال ایران مرکزی مرتب شده اند. حرکت اصلی روی گسل معکوس با جهت شمال غربی- جنوب شرقی قرار داشته و عمق کانونی حدود شش کیلومتر تعیین شده است [۳]. مکانیسم کانونی این زلزله و موقعیت کانون آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): موقعیت کانون زلزله، ایستگاههای انتخاب شده و ایستگاههای ثبت زلزله آوج

۴ - نگاشتهای ثبت شده ونحوه انتخاب داده ها

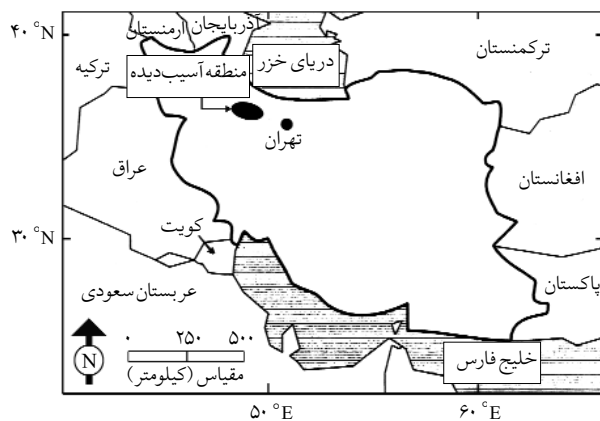
در استانهای قزوین، زنجان و همدان ۶۵ ایستگاه شتابنگاری در منطقه ای به شعاع ۲۵۰ کیلومتر، زلزله اصلی آوج را ثبت کردند. در ایستگاه آوج بیشینه شتاب حرکت زمین 500 cm/s^2 (PGA) و در ایستگاه رزن به مقداری بیشتر از 200 cm/s^2 رسید.

به منظور تحلیل، نگاشتهای کلیه ایستگاهها مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۲) و با توجه به اینکه اثر غیرخطی خاک با افزایش سطح بارگذاری نمایان می شود، از بین تمامی ایستگاهها، ایستگاههایی که سطح PGA آنها بالاتر از 90 cm/s^2 بود، انتخاب شدند [۱]. به منظور بررسی پاسخ

پنجره های انتهایی زلزله اصلی (Shock Coda Part of Main) و بخش اصلی پس لرزه ها (Main Part of Aftershocks) محاسبه شده است. این پنجره ها مبین سطوح متفاوت بارگذاری می باشند. کاهش فرکانس غالب در تابع بزرگنمایی با افزایش میزان شتاب زلزله (میزان بارگذاری)، نشانه رفتار غیرخطی خاک می باشد. بعلاوه با تعیین فرکانس غالب در ساختگاههای مورد مطالعه تحت بارگذاریهای مختلف (سطوح PGA متفاوت)، نحوه تغییرات خواص دینامیکی خاک در این بارگذاریها بررسی شده است.

۳ - زلزله چنگوره - آوج و مشخصات لرزه شناسی آن

زلزله چنگوره - آوج با بزرگای $6/4$ در اول تیرماه ۱۳۸۱، منطقه آوج از توابع شهرستان بومین زهرارابه لرزه درآورد. قدرت زیاد زلزله باعث شد تا منطقه وسیعی از استانهای قزوین، زنجان و همدان بر اثر این زمین لرزه متحمل خسارت گردند (شکل ۱). بر طبق گزارشهای رسمی، ۲۲۶ نفر کشته، ۳۰۰ نفر مجروح و ۵۰۰۰ خانه به طور کلی ویران شدند و یا آسیب جدی دیدند [۳]. منطقه با بیشترین آسیب در قسمت شمال غربی شهر آوج قرار داشت. بسیاری از بناهای این منطقه، سازه های غیر مهندسی مانند ساختمانهای یک طبقه خشتی و یا آجری بودند.



شکل (۱): نقشه منطقه آسیب دیده در زلزله آوج [۳]

ساختگاه در سطوح متفاوت بارگذاری نیز، نگاشت‌های مربوط به زلزله اصلی و پس لرزه‌های آن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب هفت ایستگاه آوج، آبگرم، چنگوره، رزن، شیرین سو، درسچین و کبودرآهنگ که در آنها شتاب بیشتر از 90cm/s^2 ثبت شده است، انتخاب شدند. در جدول‌های (۱) و (۲) موقعیت ایستگاه‌های انتخاب شده و بیشینه شتاب مؤلفه‌های نگاشت ثبت شده در هر ایستگاه در زلزله‌های اصلی و پس لرزه‌های آن آورده شده است.

جدول (۱): موقعیت جغرافیایی و بیشینه شتاب مؤلفه‌های نگاشت زلزله اصلی در ایستگاه‌های منتخب [۴]

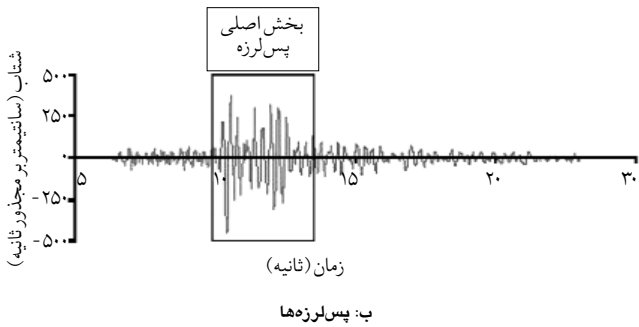
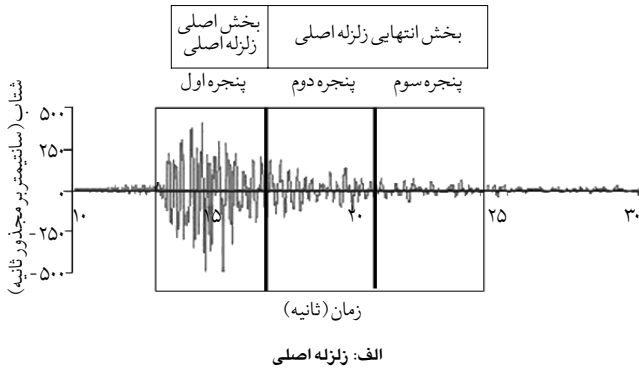
جنبش نیرومند زلزله چنگوره - آوج									
ارتفاع از سطح دریا (متر)	فاصله کانونی (کیلومتر)	بیشینه شتاب مؤلفه‌های نگاشت (cm/s^2)			مختصات جغرافیایی		شماره نگاشت	ایستگاه	ردیف
		T	V	L	عرض شمالی (درجه)	طول شرقی (درجه)			
۱۵۵۰	۳۳	۱۳۰/۳۷	۵۰/۹۹	۱۱۹/۶۶	۳۵/۷۵	۴۹/۲۸	۲۷۴۸-۱	آبگرم	۱
۱۹۷۰	۲۸	۴۸۴/۱۲	۲۷۱/۸۷	۴۹۸/۷۸	۳۵/۵۸	۴۹/۲۲	۲۷۴۹-۱	آوج	۲
۱۶۷۵	۵۶	۱۶۶/۱۹	۷۰/۹۱	۸۷/۵	۳۵/۲	۴۸/۷۲	۲۷۵۴-۱	کبودرآهنگ	۳
۱۸۴۰	۳۳	۲۰۰/۵۸	۱۳۴/۵۹	۱۸۳/۵۳	۳۵/۳۸	۴۹/۰۳	۲۷۵۶-۱	رزن	۴
۱۶۷۵	۴۸	۷۷/۶	۴۲/۳۲	۵۵/۶۷	۳۶/۰۳	۴۹/۲۳	۲۷۶۹-۲	درسچین	۵
۱۸۱۰	۴۶	۱۲۸/۰۷	۹۲/۵۴	۱۷۹/۷۶	۳۵/۵	۴۸/۴۶	۲۷۸۱	شیرین سو	۶

جدول (۲): موقعیت جغرافیایی و بیشینه شتاب مؤلفه‌های نگاشت پس لرزه‌ها در ایستگاه‌های منتخب [۴]

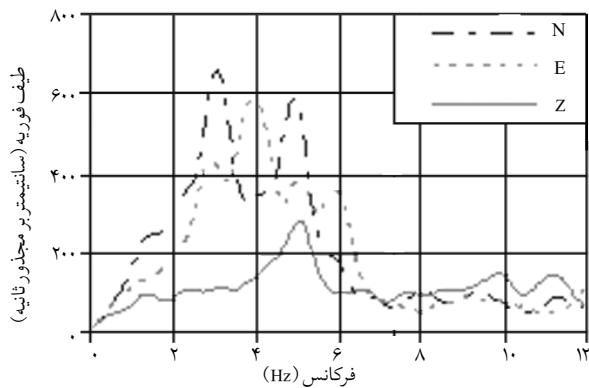
بیشینه شتاب مؤلفه‌های نگاشت (cm/s^2)			مختصات جغرافیایی		شماره نگاشت	ایستگاه	ردیف
T	V	L	عرض شمالی (درجه)	طول شرقی (درجه)			
۷۲/۶۷	۲۰/۹۶	۵۴/۳۲	۳۵/۷۵	۴۹/۲۸	۲۷۴۸-۳	آبگرم	۱
۱۶/۰۸	۷/۹۴	۱۴/۲۲	۳۵/۷۵	۴۹/۲۸	۲۷۸۲	آبگرم	۲
۲۵/۴۵	۱۲/۵۲	۳۵/۸	۳۵/۵۸	۴۹/۲۲	۲۷۴۹-۲	آوج	۳
۴۴/۵	۲۹/۲۸	۳۹/۱۳	۳۵/۵۸	۴۹/۲۲	۲۷۴۹-۵	آوج	۴
۱۴/۶۳	۶/۶۷	۱۰/۰۱	۳۵/۲	۴۸/۷۲	۲۷۵۴-۲	کبودرآهنگ	۵
۱۷/۶۷	۸/۰۶	۱۷/۰۷	۳۵/۳۸	۴۸/۰۳	۲۷۵۶-۱	رزن	۶
۱۵/۸۸	۱۰/۵۷	۱۳/۲۴	۳۵/۳۸	۴۹/۰۳	۲۸۱۶	رزن	۷
۴۱/۹۸	۲۳/۱۲	۵۲/۵۴	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۱۶	چنگوره	۸
۸۷/۸۵	۳۰/۸	۱۴۶	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۲۷-۲	چنگوره	۹
۳۶/۶۲	۳۱/۹۵	۲۵/۴۵	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۲۷-۱۳	چنگوره	۱۰
۲۹/۷۶	۲۹/۰۴	۲۴/۴۸	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۲۷-۱۲	چنگوره	۱۱
۱۳۳/۲۱	۲۱/۴۸	۲۶/۹۱	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۷۸۴	چنگوره	۱۲
۲۳/۶۳	۶۰/۵۵	۸۱/۱۲	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۷۴۸-۱	چنگوره	۱۳
۲۹/۲۲	۱۵/۶۱	۲۳/۴۶	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۲۷-۷	چنگوره	۱۴
۳۰/۲۳	۳۱/۳۱	۱۹/۰۵	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۷۸۸	چنگوره	۱۵
۲۰۰/۵۸	۱۹/۹	۲۵/۷۷	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۶۱	چنگوره	۱۶
۱۹/۵۲	۲۱/۹۲	۲۱/۳۷	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۷۶۴-۱	چنگوره	۱۷
۲۷/۸۳	۲۳/۸۸	۵۵/۵۶	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۷۶۴-۲	چنگوره	۱۸
۳۰/۲۳	۱۹/۹	۲۵/۷۷	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۴۱-۳	چنگوره	۱۹
۱۵۰/۲۸	۸۸/۸۸	۵۶/۶۷	۳۵/۷۷	۴۸/۹۶	۲۸۴۱-۵	چنگوره	۲۰

۵- نحوه تعیین تابع بزرگنمایی و بررسی اثر غیرخطی ساختگاه

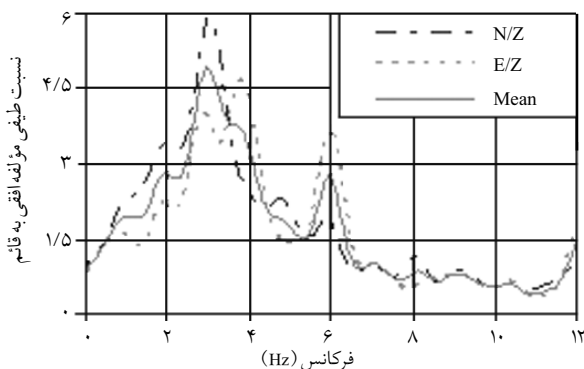
برای انجام تحلیل ابتدا مؤلفه‌های افقی و قائم نگاشت ثبت شده در ایستگاه مورد مطالعه، به پنجره‌های زمانی ۱۰ ثانیه‌ای از شروع موج S تا انتهای نگاشت تقسیم می‌شوند که نمایانگر سطوح متفاوت بارگذاری می‌باشد. در انتخاب پنجره‌های زمانی نیز معیار نسبت سیگنال به نوفه حداقل بالای ۲ لحاظ شده است. اولین پنجره از زمان ورود موج S در زلزله اصلی، بخش اصلی زلزله اصلی و پنجره‌های بعدی، بخش انتهایی زلزله اصلی می‌باشند و برای پس لرزه‌ها با توجه به نسبت سیگنال به نوفه، فقط بخش اصلی انتخاب شده است. در شکل‌های (۳، الف و ب) نحوه انتخاب پنجره‌ها و بخش‌های مختلف یک مؤلفه از نگاشت ثبت شده در ایستگاه آوج نشان داده شده است. پس از انتخاب پنجره‌های زمانی، برای هر پنجره زمانی طیف فوریه محاسبه و با استفاده از پنجره میانگین رونده، هموار شده است. طیف فوریه هموار شده برای مؤلفه‌های افقی و قائم بخش اصلی از نگاشت زلزله اصلی در ایستگاه آوج در شکل (۴) نشان داده شده است. سپس نسبت طیف‌های هموار شده مؤلفه‌های افقی به قائم در جهات مختلف (E/Z و N/Z) و میانگین آنها تعیین شده است (شکل ۵). این روند برای پنجره‌های زمانی مختلف زلزله اصلی و پس لرزه‌ها انجام و سپس توابع بزرگنمایی حاصله با هم مقایسه شده‌اند. از آنجایی که میزان بارگذاری در پس لرزه‌ها و بخش انتهایی زلزله اصلی پایین می‌باشد، رفتار غیرخطی محتمل نیست و انتظار می‌رود تابع بزرگنمایی آنها اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته باشند. این امر با مقایسه توابع بزرگنمایی محاسبه شده در شکل (۶) نیز قابل تأیید است. فرکانس غالب توابع بزرگنمایی در این پنجره‌های زمانی



شکل (۳): نحوه انتخاب پنجره‌های زمانی و نامگذاری بخش‌های مختلف نگاشت در ایستگاه آوج

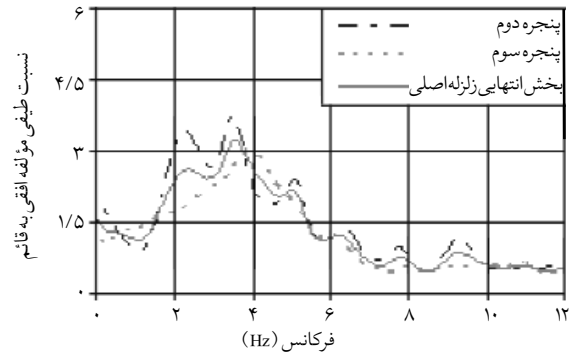


شکل (۴): طیف فوریه هموار شده مؤلفه‌های نگاشت زلزله اصلی ایستگاه آوج

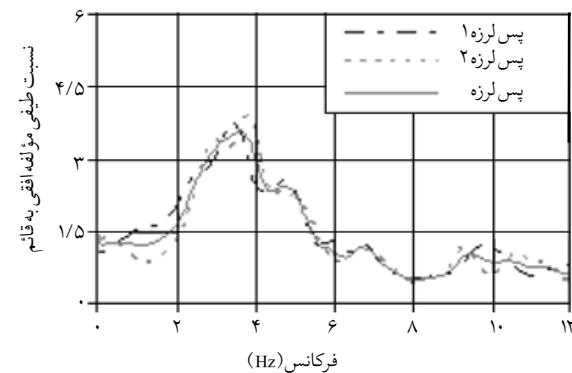


شکل (۵): نسبت‌های طیفی N/Z و E/Z و میانگین آنها، ایستگاه آوج

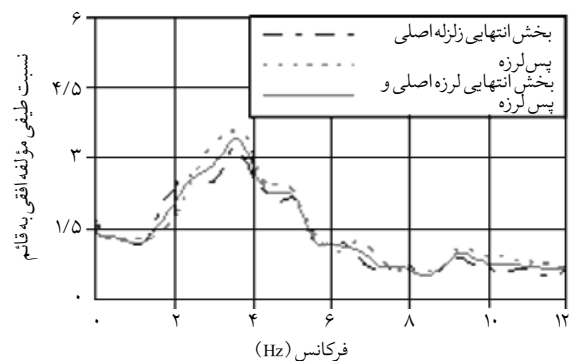
اختلاف مشخصی را نشان نمی‌دهند که نشانه رفتار خطی آنها تحت تأثیر این بارگذارها می‌باشد (شکل ۶).



الف: پنجره‌های زمانی بخش انتهایی زلزله اصلی (Coda Part)



ب: پس لرزه‌ها

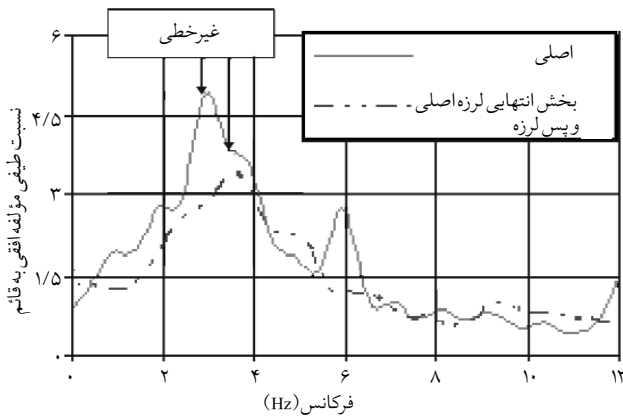


پ: میانگین بخش انتهایی زلزله اصلی و پس لرزه‌ها

شکل (۶): توابع بزرگنمایی مربوط به پس لرزه‌ها و قسمت انتهایی زلزله اصلی و میانگین آنها در ایستگاه آوج

در شکل (۷) میانگین توابع بزرگنمایی کلیه پس لرزه‌ها و پنجره‌های زمانی کودا در زلزله اصلی با تابع بزرگنمایی بخش اصلی زلزله اصلی برای بررسی اثر غیرخطی مقایسه شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که کاهش فرکانس غالب بین

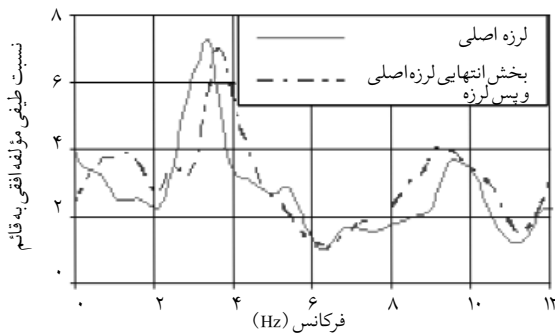
میانگین سطوح کم بارگذاری (پس لرزه‌ها و قسمت کودا در زلزله اصلی) و سطوح زیاد بارگذاری (قسمت اصلی زلزله اصلی)، مبین رفتار غیرخطی در این ساختگاه می‌باشد [۱].



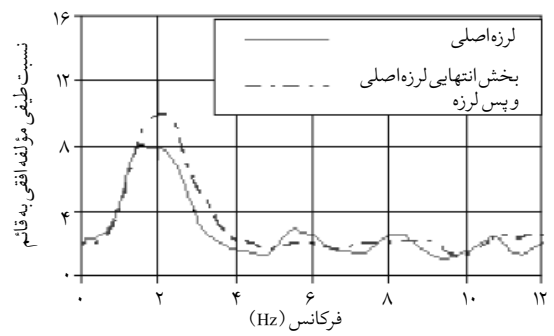
شکل (۷): تابع بزرگنمایی بخش اصلی زلزله اصلی و میانگین بخش انتهایی لرزه‌ها و مقایسه تغییرات فرکانس غالب، ایستگاه آوج

این بررسی در ایستگاههای آبگرم، کبودرآهنگ، رزن، درسچین، شیرین سو و چنگوره انجام و نتایج در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در ایستگاههای درسچین و شیرین سو پس لرزه‌ای ثبت نشده است.

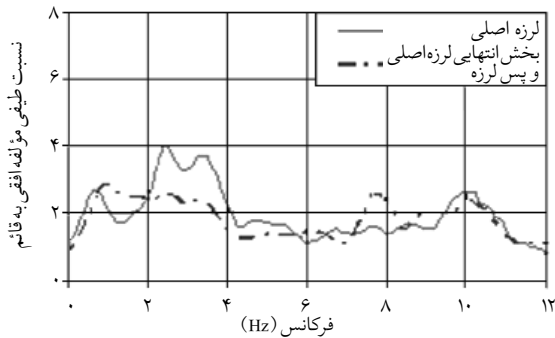
در ایستگاههای آبگرم، آوج، کبودرآهنگ و شیرین سو با توجه به کاهش فرکانس غالب با افزایش سطح بارگذاری (افزایش PGA)، اثر غیرخطی قابل مشاهده می‌باشد. در ایستگاههای رزن و درسچین تغییر قابل ملاحظه‌ای در فرکانس غالب بین زلزله اصلی و پس لرزه‌ها قابل مشاهده نمی‌باشد که بیانگر رفتار خطی در این ساختگاهها می‌باشد. در ایستگاه چنگوره روندی دوگانه ملاحظه می‌شود. بدین ترتیب که در محدوده فرکانسی تا ۶ هرتز اثر خطی و در محدوده فرکانسی ۶ تا ۸ هرتز اثر غیرخطی دیده می‌شود (شکل ۸). با توجه به عدم نصب دستگاه شتابنگار در این ایستگاه، زلزله اصلی ثبت نشده است و برای انجام تحلیل، میانگین نگاشته‌های ردیفهای ۹، ۱۳ و ۲۰ در جدول (۲) که PGA قابل توجهی دارند، به عنوان زلزله اصلی انتخاب شده است. با وجود



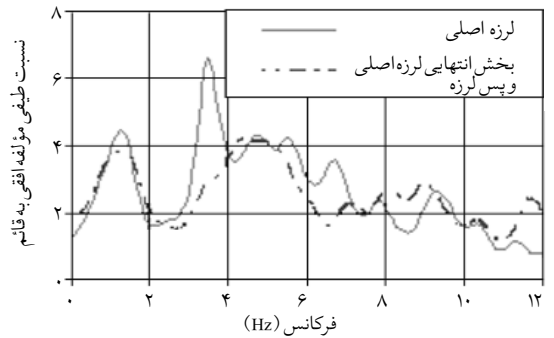
ب: کیودراهنگ



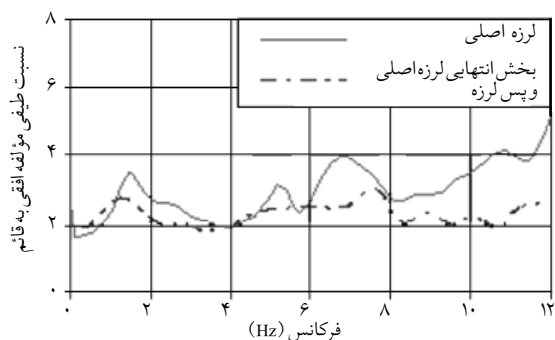
الف: آبگرم



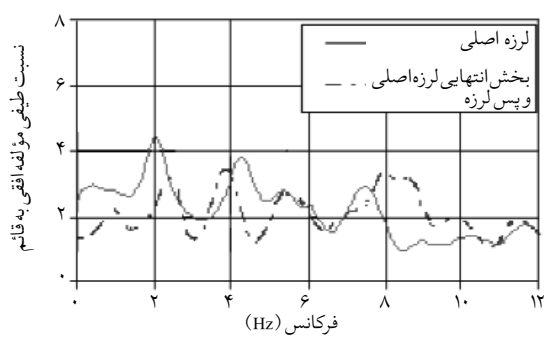
ت: درسچین



پ: رزن



ج: چنگوره



ث: شیرین سو

شکل (۸): تابع بزرگنمایی بخش اصلی زلزله اصلی (Main part - Main shock) و میانگین Coda Part و پس لرزه‌ها و مقایسه تغییرات فرکانس غالب در ایستگاهها

در این رابطه، f فرکانس غالب (فرکانس مد اول)، V_s سرعت موج برشی در لایه سطحی و h ضخامت آن می‌باشد. در نتیجه فرکانس غالب لایه به سرعت موج در لایه‌های سطحی وابسته است. فاصله از طرفی رابطه مدول برشی و سرعت لایه سطحی به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

با تلفیق روابط (۱) و (۲) رابطه (۳) قابل بیان است:

$$G = 16\rho h^2 f^2 \quad (3)$$

این، با توجه به نسبت کم سیگنال به نوفه و عدم ثبت زلزله اصلی، نتایج به دست آمده در این ایستگاه چندان قابل اعتماد نمی‌باشند [۵].

۶- تحلیل بازگشتی و تعیین خواص دینامیکی خاک

برای یک لایه سطحی روی یک بستر صلب رابطه (۱)

برقرار است [۶]:

$$f = \frac{V_s}{4h} \quad (1)$$

داد. بدین ترتیب تغییرات مدول برشی خاک با میزان بارگذاری که در تحلیل پاسخ دینامیکی ساختگاه اهمیت بسزایی دارد به صورت برجا و بدون انجام آزمایشهای هزینه بر تعیین گردیده است. متأسفانه به دلیل نبود چنین منحنی‌هایی، بیشتر از منحنی‌های تجربی که بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک انجام می‌شود و معمولاً مربوط به رسوبات مناطق دیگر به غیر از ایران می‌باشد، در تحلیل دینامیکی آبرفت تحت تأثیر زلزله‌های بزرگ استفاده می‌شود؛ لذا تعیین چنین منحنی‌هایی به صورت برجا و با استفاده از نگاهشهای مربوط به حرکات توانمند زمین می‌تواند گامی مؤثر به منظور برآورد ویژگیهای دینامیکی ساختگاه و یا کالیبره نمودن منحنی‌های تجربی آزمایشگاهی برای ایران باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این بررسی با محاسبه تابع بزرگنمایی برای ساختگاههایی از زلزله چنگوره - آوج که PGA قابل توجهی داشتند، فرکانس غالب ساختگاه در سطوح بارگذاری مختلف محاسبه و با توجه به روند تغییر آن در مقابل PGA خاصیت غیرخطی در هر ساختگاه بررسی شد. بدین ترتیب ساختگاههای آبگرم، آوج، کبودرآهنگ و شیرین سو رفتار غیرخطی و ساختگاههای رزن و درسچین رفتار خطی از خود نشان دادند. سپس با استفاده از تحلیل بازگشتی و با توجه به فرکانس غالب، مدول برشی خاک محاسبه و روند تغییرات نسبت مدول برشی با PGA برای ساختگاههای با رفتار غیرخطی بررسی شده است.

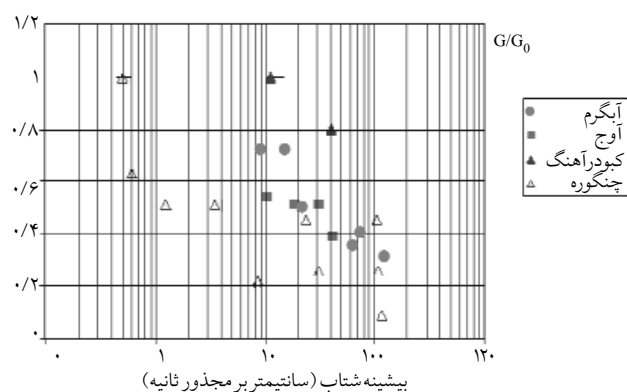
۸- مراجع

1. Ghayamghamian, M.R., Kawakami, H. (1996). On the characteristics of non-linear soil response and

با استفاده از رابطه (۳) می‌توان با تعیین فرکانس غالب، مدول برشی خاک را محاسبه نمود. از آنجا که با استفاده از داده‌های موجود نمی‌توان میزان کرنش (Strain) و نحوه تغییرات آن را با مدول برشی بررسی نمود، تغییرات مدول برشی با PGA مقایسه شده که این نمودار می‌تواند بیانگر روند تغییرات مدول برشی با سطح بارگذاری باشد. بدیهی است که این روند تابعی از نوع رسوبات هر ساختگاه است و می‌تواند برای هر ساختگاه متفاوت باشد. با محاسبه بزرگترین فرکانس غالب در هر ساختگاه به عنوان فرکانس محدوده خطی (f_0) و با استفاده از رابطه (۳)، با رابطه (۴) می‌توان نسبت مدول برشی را تعیین نمود:

$$\frac{G}{G_0} = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 = \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (4)$$

پس از تعیین نسبت مدول برشی با استفاده از رابطه (۴)، می‌توان رابطه بین مدول برشی و PGA را تعیین و روند تغییرات آن را در ساختگاهها بررسی نمود (شکل ۹). در این شکل ملاحظه می‌شود که طبق انتظار در ساختگاههای با اثر غیرخطی، با افزایش PGA یک روند کاهشی در مدول برشی قابل تشخیص است [۶]. این روند برای ساختگاههای مختلف با توجه به نوع رسوبات (دانه‌ای، چسبنده و...) متغیر می‌باشد که تغییرات مشاهده شده در روندهای کاهشی مدول برشی در ساختگاههای مختلف را می‌توان به این دلیل نسبت



شکل (۹): تغییرات نسبت مدول برشی در مقابل بیشینه شتاب برای ساختگاههای با خاصیت غیرخطی

dynamic soil properties using vertical array data in Japan. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, No.8, 857-870.

2. Ghayamghamian, M.R. (2005). Segmental cross-spectrum as a new technique in site response estimation using spectral ratio analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 9, No.2, 247-261

3. Ghayamghamian, M.R. (2004). Preferred direction of damage in the M=6.4 Avaj Earthquake of 22 June 2002. *Proc. of the 11th Int. conf. on soil dynamic and earthquake engineering (ICSDEE) and 4th earthquake geotechnical engineering (ICEGE)*. California: Berkeley.

4. BHRC Website : <http://www.bhrc.gov.ir>

۵. نوجوان، علیرضا. (۱۳۸۴). بررسی اثر خطی و غیرخطی

ساختگاه و طبقه‌بندی ساختگاههای شبکه شتابنگاری با استفاده از نگاشتهای زلزله‌های آوج، بم و زرنده. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

6. Ghayamghamian, M.R. (1997). Non-linear and linear response of the site with evaluation of actual dynamic soil properties using vertical array accelerograms and microtremors. Ph.D. Dissertation, Saitama University. ◀