

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

شهر اصفهان یکی از بزرگ‌ترین شهرهای ایران و جهان از لحاظ جمعیتی و صنعتی بوده و دارای میراث تاریخی و فرهنگی می‌باشد. متأسفانه در این منطقه از حیث شهرت به ایمن بودن در برابر زلزله، مطالعات بررسی اثر ساختگاه در برابر امواج لرزه‌ای بسیار اندک انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از به کارگیری روش‌های تحلیل عددی یک‌بعدی و دو بعدی و استفاده از نتایج میکروترمور، مطالعات ژئوتکنیک و لرزه‌زمین‌ساخت، بررسی منطقه اصفهان در دو راستای شمال-جنوب (هم‌راستا با تغییرات توپوگرافی شهر) و شرق-غرب هم‌راستا با مسیر رودخانه زاینده‌رود انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد رفتار اثر ساختگاه اصفهان را در راستای شمال-جنوب که همراه با تغییرات توپوگرافی می‌باشد به صورت دو بعدی و راستای شرق-غرب را با ملاحظاتی می‌توان به صورت یک‌بعدی در نظر گرفت. همچنین نتایج نشان می‌دهد برای یک نقطه مشخص رفتار دو راستا نتایج متفاوتی را ارائه می‌کنند، بنابراین لازم است در تحلیل‌ها این مورد در نظر گرفته شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد فرکانس طبیعی شهر اصفهان از ۰/۸ تا ۱۱ هرتز به ترتیب از سمت نواحی جنوبی شهر به سمت شمال دشت اصفهان تغییر می‌کنند.

واژگان کلیدی: اصفهان، مطالعات یک‌بعدی اثر ساختگاه، مطالعات دو بعدی اثر ساختگاه، بزرگنمایی.

ملاحظات در باره وضعیت ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر اصفهان

سید حسین هاشمی فشارکی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

محسن کمالیان (نویسنده مسئول)

استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، Kamalian@iiees.ac.ir

ابراهیم حق‌شناس

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

مسعود میرمحمد صادقی

استادیار، دانشگاه صنعت آب و برق، اصفهان، ایران

۱- مقدمه

اثرات و عدم دسترسی به ابزارهای مناسب جهت تحلیل دینامیکی این عوارض، خصوصاً در فضای زمان بوده است. در منطقه مورد مطالعه، هاشمی [۱] در سال ۲۰۱۰ مطالعات تحلیل یک‌بعدی اصفهان را با استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیک موجود شهر اصفهان انجام داد. بررسی وی نشان می‌داد بیشترین بزرگنمایی^۳ دامنه امواج شتاب زلزله در نقاط شمالی شهر ظاهر می‌شدند.

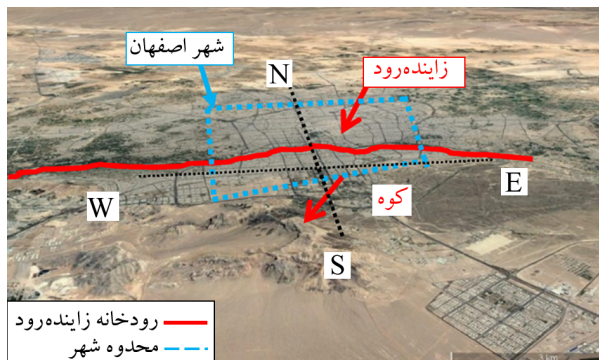
در خصوص مطالعات دو بعدی^۴ و سه‌بعدی اثر ساختگاه در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی انجام گرفته است. از جمله می‌توان به مطالعات کمالیان و سهرابی بیدار [۲] اشاره نمود. ایشان در بررسی خود رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌سینوسی منفرد را با روش اجزای مرزی^۵ در فضای زمان مورد بررسی قرار دادند. این محققان با بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دارای نسبت شکل ۰/۸ تا ۰/۷، نشان دادند که این عوارض می‌توانند با بزرگنمایی

مطالعات اثر ساختگاه^۱ در مناطق شهری و شهرهای بزرگ، به‌ویژه در شهری همانند اصفهان که از لحاظ تاریخی و میراث تمدنی ایران و همچنین از حیث صنعتی جایگاه ویژه و محوری در کشور دارد، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. متأسفانه در این خصوص در این منطقه مطالعات بسیار محدودی انجام گرفته است. اغلب آیین‌نامه‌های معتبر موجود در خصوص طرح لرزه‌ای ساختمان‌ها، علیرغم مشهود شدن اهمیت اثرات ساختگاهی چند بعدی، تنها اثرات ساختگاهی یک‌بعدی را بر پارامترهای حرکت لرزه‌ای زمین مد نظر قرار می‌دهند. نه تنها آیین‌نامه‌ها، بلکه دقیق‌ترین روش‌های ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای نیز که عمدتاً بر تحلیل‌های دینامیکی یک‌بعدی آبرفت متکی هستند، امواج مهاجم را قائم و لایه‌های خاک و سطح فوقانی زمین را افقی فرض می‌کنند. سبب اصلی عدم توجه به اثرات ساختگاهی ناشی از توپوگرافی^۲، فقدان شناختی جامع از چگونگی این

مطالعات لرزه‌ای انجام شده در منطقه و در نهایت تطبیق نتایج و به کارگیری روش‌های عددی جهت به دست آوردن مشخصات اثر ساختگاه و پروفیل لرزه‌ای منطقه استفاده شده است که از حیث TC4 جزو روش‌های درجه ۳ طبقه‌بندی می‌گردند.

۲- محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش مطالعات بررسی ژئوتکنیکی و لرزه‌ای اثر ساختگاه اصفهان^۲ همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است در دو مسیر اصلی شمال- جنوب (از کوه صفا در جنوب تا ورودی جاده تهران در شمال) و شرق- غرب (موازی امتداد رودخانه) انجام گرفت. مطالعه این دو مسیر با توجه به اهمیت آثار تاریخی‌ای که دربر دارند اهمیت دو چندان دارد. تصویر ماهواره‌ای زیر موقعیت محدوده مورد بررسی و عوارض شهر اصفهان را نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت رودخانه و کوه صفا.

مؤلفه موافق حرکت، ایجاد مؤلفه مخالف حرکت و همچنین ایجاد اختلاف فاز میان حرکت نقاط مجاور، پاسخ لرزه‌ای زمین در برابر امواج مهاجم صفحه‌های P و SV را به شکل قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهند. همچنین مطالعات پنجمی و همکاران [۳] بر روی تأثیر اثر توپوگرافی بر روی پاسخ امواج لرزه‌ای نشان می‌دهد که افزایش بزرگنمایی پاسخ، همسو با عمیق‌تر شدن دره اتفاق می‌افتد. نتایج ایشان نشان می‌دهد کف دره در پیوندهای مختلف همواره کوچک‌نمایی پاسخ را تجربه کرده و با افزایش طول موج‌های مختلف همواره کوچک‌نمایی پاسخ را تجربه کرده و با افزایش نسبت شکل (نسبت ارتفاع به عرض دره)، ضریب بزرگنمایی اثر ساختگاه به‌طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

در خصوص مطالعات مرتبط با زمین (به‌ویژه مخاطرات ژئوتکنیکی) توسط دستورالعمل‌های معتبر روش‌هایی به‌صورت درجه‌بندی شده برحسب دقت انجام مطالعه و هزینه پژوهش با نام روش‌های درجه ۱، ۲ و ۳ روش‌های درجه ۳ تهیه شده که در جدول (۱) پارامترهای مورد نیاز انجام مطالعات در هر یک بیان شده است.

در پژوهش حاضر نظر به اینکه هدف به کارگیری روش‌های با دقت بالا جهت مطالعات اثر ساختگاه بوده از نتایج میکروترمو^۶ انجام شده در منطقه، گزارش‌های ژئوتکنیک معتبر موجود در گستره مورد مطالعه نظیر مطالعات ژئوتکنیک قطار شهری که دارای عمق و نتایج مناسب می‌باشند و همچنین

جدول (۱): استفاده از سوابق و اطلاعات برای سه سطح پهنه‌بندی زمین [۴].

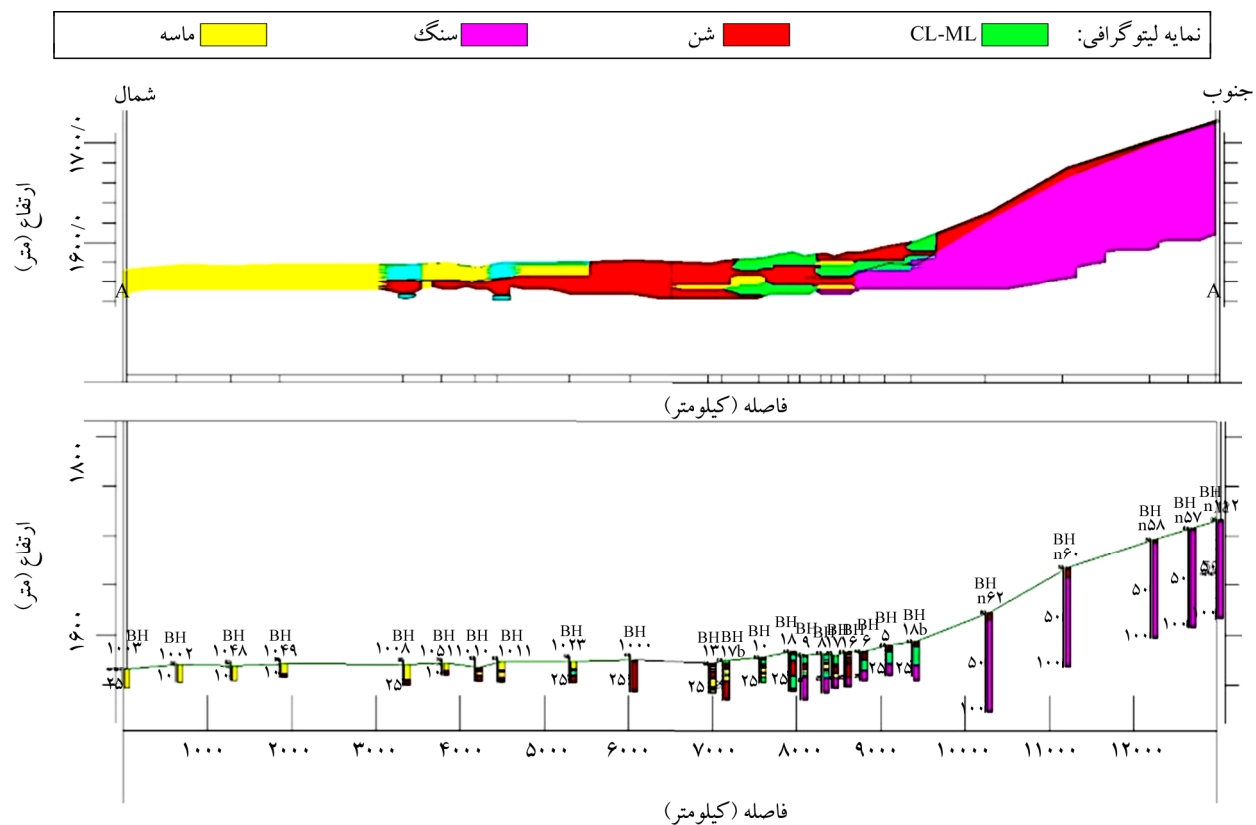
درجه ۳	درجه ۲	درجه ۱	
<ul style="list-style-type: none"> بررسی ژئوتکنیکی اثرات ساختگاهی تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ای زمین 	<ul style="list-style-type: none"> میکروترمو مطالعه ژئوتکنیکی ساده 	<ul style="list-style-type: none"> کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها و اطلاعات تاریخی موجود نقشه‌های زمین‌شناسی پرسشنامه و مصاحبه با ساکنان محلی 	حرکات زمین
<ul style="list-style-type: none"> بررسی ژئوتکنیکی تجزیه و تحلیل‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> عکس‌های هوایی و سنجش از راه دور مطالعات میدانی بررسی سوابق قبلی 	<ul style="list-style-type: none"> کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها و اطلاعات تاریخی موجود نقشه‌های زمین‌شناختی و زمین‌ساختاری 	ناپایداری دامنه‌ها و شیب‌ها
<ul style="list-style-type: none"> بررسی ژئوتکنیکی تجزیه و تحلیل‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> عکس‌های هوایی و سنجش از راه دور مطالعات میدانی مصاحبه با ساکنان محلی 	<ul style="list-style-type: none"> زمین‌لرزه‌ها و اطلاعات تاریخی موجود نقشه‌های زمین‌شناختی و زمین‌ساختاری 	روانگرایی
۱:۲۵۰۰۰~۱:۵۰۰	۱:۱۰۰۰۰~۱:۱۰۰۰۰	۱:۱۰۰۰۰۰~۱:۵۰۰۰۰	مقیاس نقشه‌برداری

۳- روش انجام مطالعه و تحلیل

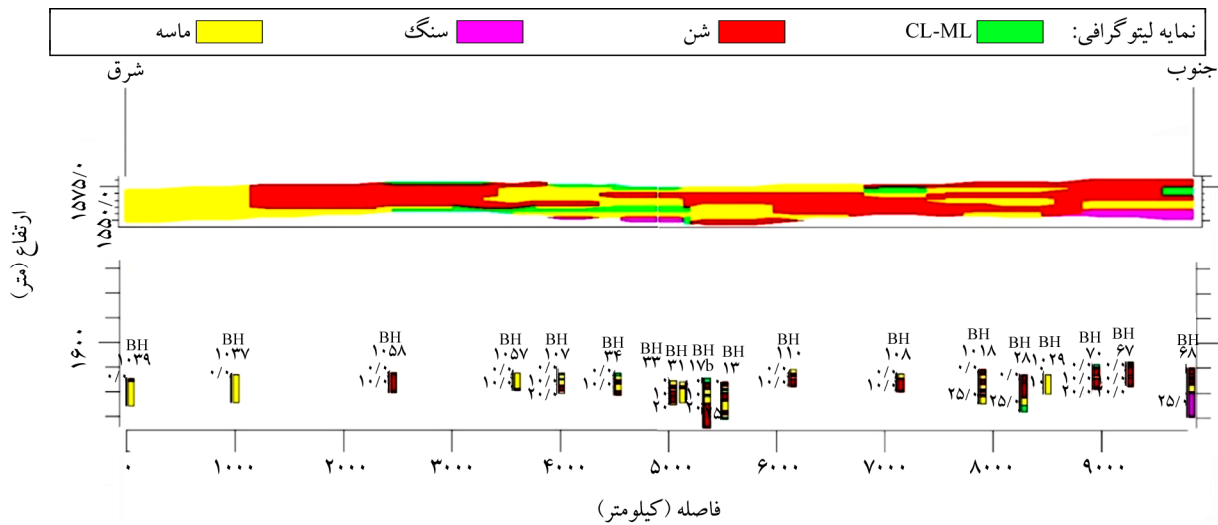
اندازه‌گیری خردلرزه در فواصل ۱۰۰۰ متری در ۲۵ نقطه از طول مسیر در هردو راستای مورد بررسی انجام شد. قابل ذکر است که در برخی مناطق نتایج مطالعات آزمایش‌های لرزه‌ای درون‌چاهی نیز موجود بود که از نتایج آن نیز استفاده شد. در شکل‌های (۲) و (۳) مدل ژئوتکنیکی مسیرهای مورد مطالعه نشان داده شده‌اند. جهت تخمین سرعت موج برشی از نتایج آزمایش‌های درون‌چاهی موجود در گمانه‌های خط ۱ و ۲ قطار شهری اصفهان و همچنین نتایج آزمایش‌های میکروترموور که توسط هاشمی [۷] در سال ۲۰۱۹ انجام شده استفاده است. قابل ذکر است در این مطالعه محیطی به‌عنوان سنگ کف لرزه‌ای در نظر گرفته شده که سرعت موج برشی آن بیش از حدود ۷۰۰ الی ۸۰۰ متر بر ثانیه باشد.

از لحاظ برآورد شتاب ماکزیمم سنگ (PRA) شهر اصفهان همان‌گونه که بیان شد مطالعات محدودی در این منطقه انجام شده است. از جمله مطالعات خادم‌الفقرا [۸] در سال ۲۰۰۸ که بر پایه روش احتمالاتی و استفاده از رابطه کاهندگی ۱۹۷۵ امبرسیز [۹] برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰ درصد احتمال افزایش در ۵۰ سال)

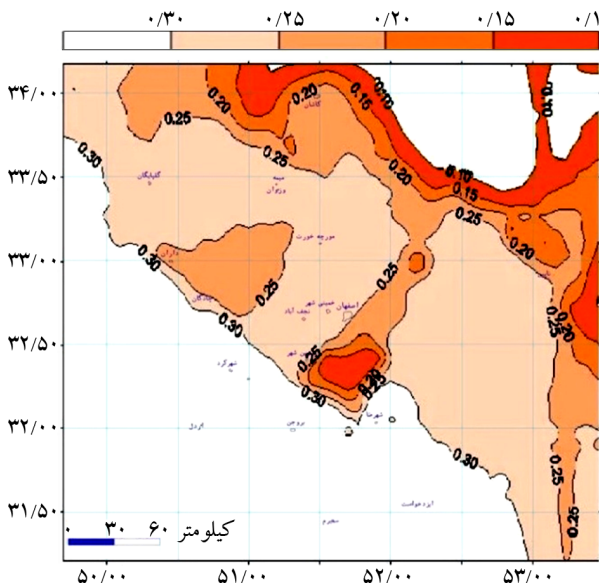
در این پژوهش رویکرد اصلی با توجه به گستره بسیار وسیع شهر اصفهان سعی شده با استفاده از روابط عددی و تحلیل‌های دو بعدی و استفاده از دستورالعمل‌های معتبر مطالعات ریز پهنه‌بندی نظیر TC4 [۴]، مدل ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر اصفهان طی محور شمال-جنوب که از مناطق کوهستانی شهر شروع و به مناطق دشت اصفهان منتهی می‌گردند و همچنین محور شرق-غرب در امتداد رودخانه زاینده‌رود که ساختار زمین‌شناسی اصفهان از آنها نشأت می‌گیرند انجام گیرد. بنابراین نتایج مطالعات ژئوتکنیک بیش از ۱۰۰ گمانه معتبر جمع‌آوری گردید (بیش از ۲۵۰ گمانه جمع‌آوری شد که ۱۰۰ نمونه از آن که عمدتاً نتایج ارگان‌های معتبر نظیر خط ۱ و ۲ قطار شهری اصفهان بوده دارای اعتبارسنجی مناسب می‌باشند) و نهایتاً در نرم‌افزار Rockwork مدل زمین‌شناسی و ساختار لایه‌بندی زمین در منطقه مورد مطالعه تهیه گردید که در شکل‌های (۲) و (۳) پروفیل زمین‌شناسی راستای مورد مطالعه نمایش داده شده‌اند [۵-۶]. همچنین مطالعات



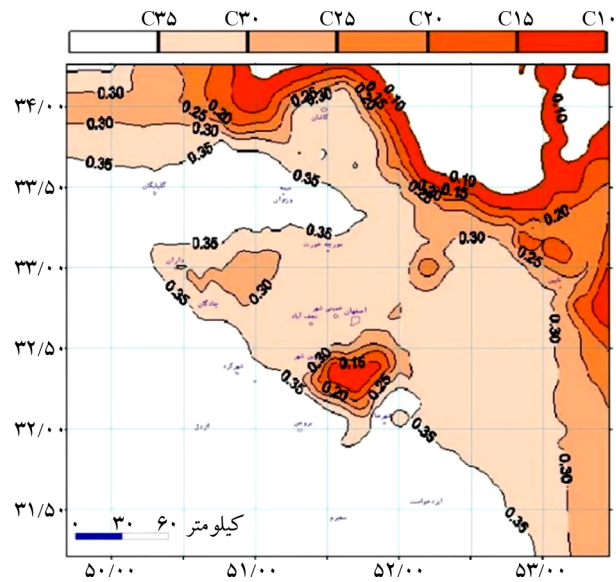
شکل (۲): مقطع ژئوتکنیکی شمال-جنوب شهر اصفهان بر اساس گمانه‌های قطار شهری در نرم‌افزار Rockwork.



شکل (۳): مقطع ژئوتکنیکی شمال - جنوب شهر اصفهان بر اساس گمانه‌های قطار شهری و آزمایشگاه‌های معتبر در نرم‌افزار Rockwork.



شکل (۵): نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳ درصد احتمال افزایش در ۵۰ سال) با استفاده از رابطه آمبرسیز [۹].



شکل (۴): نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰ درصد احتمال افزایش در ۵۰ سال) با استفاده از رابطه آمبرسیز [۹].

تحلیل یک‌بعدی در ۲۵ نقطه در طول مسیر و برای تحلیل دو بعدی نیز کل پروفیل مسیر شمال-جنوب و شرق-غرب در منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. از آنجایی که ضریب تشدید ماکزیمم با افزایش فرکانس طبیعی^۱ کاهش می‌یابد، بزرگ‌ترین ضریب تشدید در پایین‌ترین فرکانس طبیعی که به آن فرکانس اساسی نیز گفته می‌شود رخ می‌دهد که تقریباً برابر است با:

$$f_0 = \frac{n.V_s}{2H} = \frac{4H}{V_s} \quad (1)$$

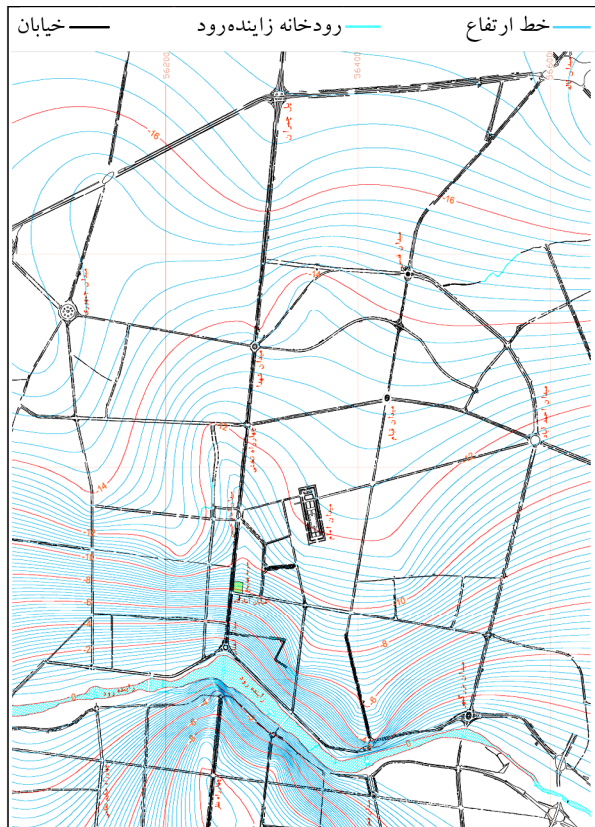
و همچنین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳ درصد احتمال افزایش در ۵۰ سال) مقادیر شتاب ماکزیمم سنگ بستر را برآورد نمودند که در شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر و موقعیت شهر اصفهان نشان داده شده‌اند.

جهت بررسی پتانسیل ساختگاه اصفهان و تعیین پریرود تشدید که برابر بزرگ‌ترین دامنه منحنی بزرگنمایی محیطی حاصل از نسبت طیف فوریه پاسخ سطح به پاسخ ورودی می‌باشد، با استفاده از داده‌های گمانه‌های ژئوتکنیک و زمین‌شناسی شهر اصفهان در

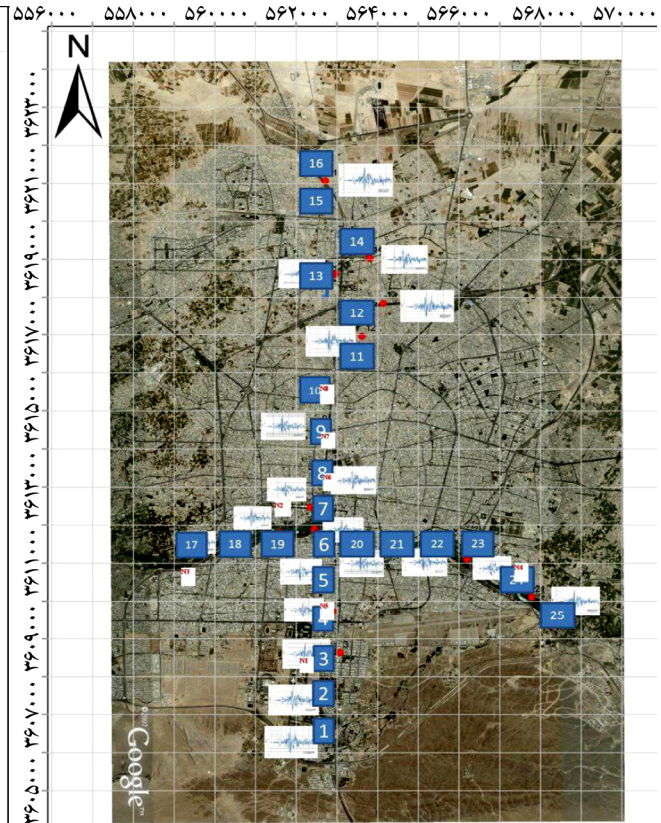
پریود مشخصه ساختگاه تنها به ضخامت خاک و سرعت موج برشی در خاک بستگی دارد که بیانگر پریودی از ارتعاش است که شدیدترین تشدید در آن پریود اتفاق می‌افتد (شکل ۶).

پریود ارتعاش متناظر با فرکانس اساسی را پریود مشخصه ساختگاه گویند.

$$T_s = \frac{2\pi}{f_0} = \frac{4H}{V_s} \quad (2)$$



(ب)



(الف)

جنس لایه	محدوده عمق (متر)
Man Main Fill (ML)	۴/۵۰-۰
CL	۸/۱۰-۴/۵۰
Gap-GM	۱۰-۸/۱۰
SM	۱۲-۱۰
GM	۱۳/۸۰-۱۲
Central Layer	۱۵/۶۰-۱۳/۸۰
CL	۱۶-۱۵/۶۰
GM	۲۵-۱۶
SM	۲۶-۲۵
GM	۲۷-۲۶
SM	۳۱/۱۰-۲۷
CL	۴۰-۳۱/۱۰

خاک رس	پایین تر	ماسه	شن	خاک رس بالا / سیلت	جنس لایه
۴۰-۲۸/۷۰	۲۳/۹۰-۱۱	۲۶/۴۰-۲۵/۳۰	۱۱-۹	۹-۲/۵۰	محدوده عمق (متر)
۲۸	-	-	-	۲۰	متوسط درصد رطوبت (w_N)
۲۲	NP	NP/۵	NP/۵	۱۶	متوسط شاخص خمیری (PI)
۲/۰۵	۲/۱۵±۰/۱	۲/۰۵±۰/۰۵	۲/۰۵±۰/۰۵	۲	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب) (γ_{wet})
۰/۴۲	-	-	-	۰/۴۲	چسبندگی
۰/۲۳	-	-	-	۰/۱۶	
۰/۱۴	۰	۰	۰	۰/۰۸	
۰	-	-	-	۰	زاویه اصطکاک
۲۶	-	-	-	۲۵	
۳۰	۲۵	۳۳	۲۸	۲۸	

(پ)

شکل (۶): (الف) نقاط مورد مطالعه در محدوده مورد مطالعه، (ب) نقشه آب زیرزمینی در گستره شهر اصفهان و (پ) یک نمونه پروفیل گمانه مستخرج از مطالعات خط ۲ مترو در محدوده دروازه دولت (محدوده ایستگاه شماره ۸) [۵-۶].

بزرگنمایی و در نظر گرفتن اثر سنگ بستر الاستیک، در این پژوهش از نسبت ضریب بزرگنمایی سنگ بستر الاستیک به صلب تحلیل یک‌بعدی استفاده شده است.

در نرم‌افزار Plaxis-2D بارهای زلزله در مرز پایین مدل شده و امواج برشی به سمت بالا حرکت می‌کنند. خاک به صورت کرنش مسطح مدل‌سازی شده و با توجه به محدودیت مدل‌سازی در آنالیز دینامیکی مرزهای جانبی توسط مرزهای جاذب انرژی محدود می‌گردند، در حالی که در واقعیت تا بی‌نهایت ادامه دارند. با این حال، در تجزیه و تحلیل دینامیکی، موج انتشار پس از برخورد به مرزهای عمودی به سیستم بازتاب می‌یابد و به همین دلیل انرژی در داخل مدل محبوس می‌شود. برای حل این موضوع می‌توان از ابزار اجزای مرزی و مرزهای جاذب استفاده نمود [۱۰].

به منظور صحت‌سنجی و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Plaxis Ver. 8.4، مطالعات انجام شده توسط دی [۱۴] که بر مبنای مدل‌سازی و بررسی اثر ابعاد مدل و سایز مش‌بندی در مدل تحت بار دینامیکی در این نسخه برنامه بوده انتخاب گردید. او تأثیر نسبت B/H‌های مختلف (که در آن B عرض مدل به صورت متغیر و H ارتفاع مدل که ثابت در نظر گرفته شده می‌باشند) را بر روی حرکت سطح زمین نسبت به حرکت ورودی برای مدل با مشخصات مفروض و تحت بار دینامیکی مشخص بررسی نمود که مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی بر اساس این مدل و نتایج دی [۱۴] کاملاً منطبق بوده و در ادامه نشان داده شده‌اند. مشخصات مصالح و مدل استفاده شده جهت مقایسه در جدول (۲) و شکل‌های (۷) تا (۹) است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد هرچه قدر نسبت عرض به ارتفاع مدل بیشتر باشد تأثیر شرایط مرزی مدل کمتر می‌گردد.

به منظور انجام تحلیل دو بعدی از نرم‌افزار Plaxis Ver 8.08 [۱۰] و برای تحلیل یک‌بعدی از نرم‌افزار Proshake [۱۱] استفاده شده است. جهت برآورد پیوند طبیعی ساختگاه اصفهان بر اساس زلزله‌های با دامنه شتاب ماکزیمم کم و سازگار با منطقه اصفهان، رفتار خاک در ناحیه کرنش‌های کوچک می‌باشد [۱۲]، بنابراین رفتار خاک به صورت خطی فرض می‌شود. در نرم‌افزار Plaxis جهت اطمینان از اینکه امواج زلزله از هر جزء لایه عبور می‌کنند، مش‌بندی معمولاً به صورت خودکار به شکل المان‌های مثلثی تعریف می‌شود. ابعاد المان‌ها می‌تواند بر اساس رابطه پیشنهادی لیزمر و کولمایر [۱۲] تقریب زده شود:

$$\text{Average element size} \leq \frac{\lambda}{4} = \frac{V_{S_{\min}}}{8f_{\max}} \quad (3)$$

که در آن، λ ، طول موج زلزله و $V_{S_{\min}}$ حداقل سرعت موج برشی لایه و f_{\max} ماکزیمم فرکانس موج ورودی می‌باشد. همچنین ماتریس میرایی، C، ترکیبی از ماتریس جرم و سختی در نظر گرفته می‌شود.

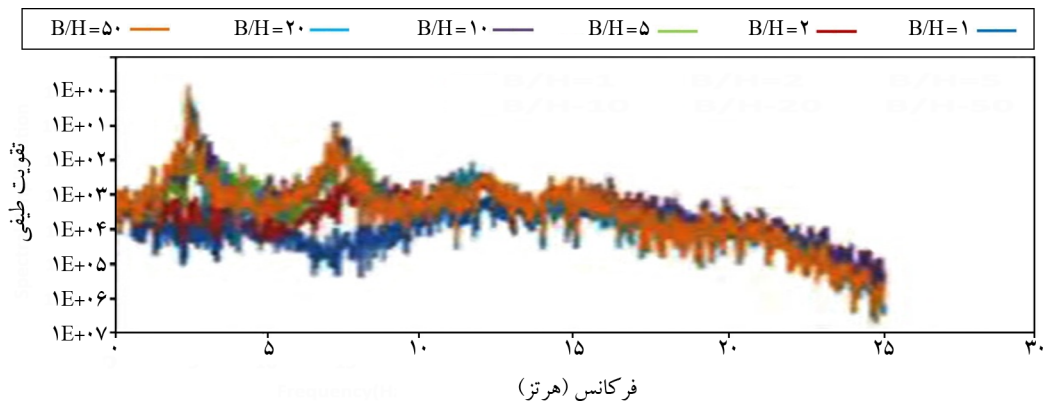
$$C = \alpha_R M + \beta_R K \quad (4)$$

که در این رابطه طبق نظر داس [۱۳] مقادیر α_R و β_R درصدی از میرایی بحرانی و تابع میزان ماکزیمم شتاب‌نگاشت زلزله ورودی (PRA) می‌باشد. داس [۱۳] پیشنهاد می‌کند محدوده این مقادیر بین ۱ درصد برای زلزله‌های با PRA پایین و ۱۰ درصد برای PRA بالا می‌باشد [۱۲].

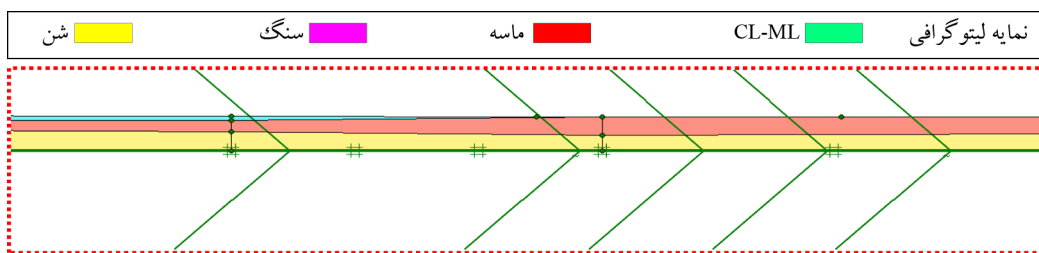
با توجه به مقادیر پائین شتاب زلزله سنگ بستر شهر اصفهان در این پژوهش محدوده مقادیر ۱ درصد شتاب ماکزیمم نگاشت ورودی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر می‌باشد از آنجایی که در نرم‌افزار Plaxis، سنگ‌بستر لرزه‌ای (محل انتشار امواج لرزه‌ای) صلب در نظر گرفته می‌شود جهت اصلاح مقادیر ضریب

جدول (۲): مشخصات مفروض در مدل در نظر گرفته شده توسط دی [۱۴].

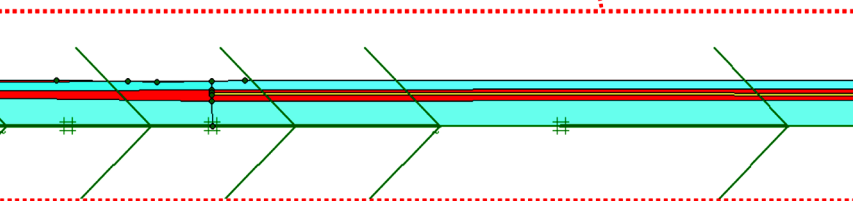
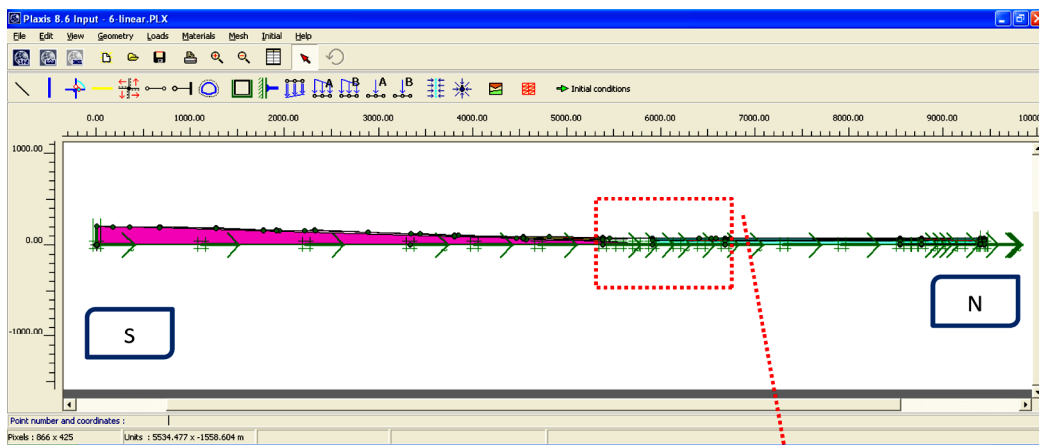
ارتفاع خاک	واحد غیر اشباع وزن	مدول الاستیک	نسبت پواسون	مدول برشی
۴۰ متر	۱۹/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب	$8 \times 10^5 E + 0.5$ کیلونیوتن بر مترمربع	۰/۳	$3/08 \times 10^5 E + 0.5$ کیلونیوتن بر مترمربع
مدول ادومتریک	سرعت موج S	سرعت موج P	نوع مدل	
$1/08 \times 10^6 E + 0.6$ کیلونیوتن بر مترمربع	۳۹۳/۲ متر بر ثانیه	۷۳۵/۷ متر بر ثانیه	مواد الاستیک خطی	



شکل (۷): مقایسه نتایج برای نسبت B/H های مختلف.



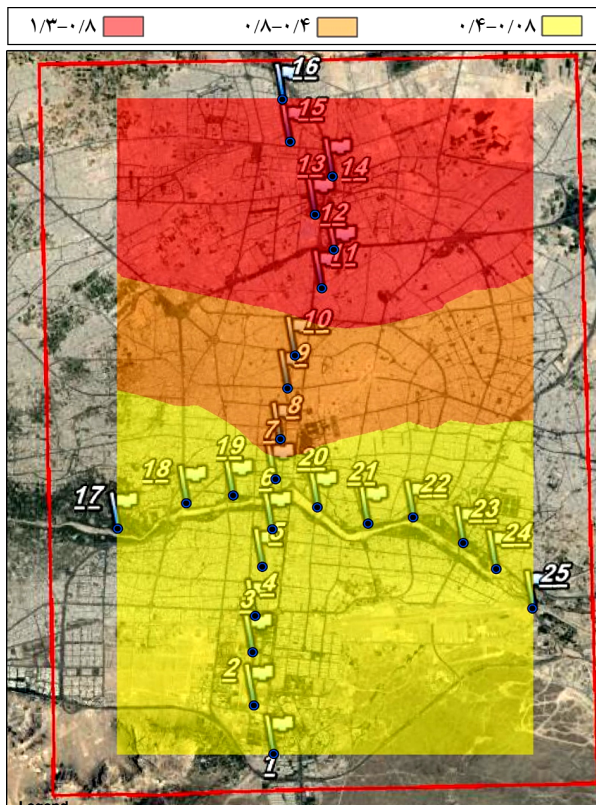
شکل (۸): بزرگنمایی مدل اولیه پروفیل شرقی - غربی در نرم افزار Plaxis.



شکل (۹): بزرگنمایی کل مدل اولیه پروفیل شمال - جنوبی در نرم افزار Plaxis.

می کنند. بررسی زمین لرزه های گذشته نشان می دهد که زمین ناهموار باعث پیچیدگی امواج لرزه ای می شود. ارتفاعات معمولاً باعث افزایش دامنه و دره ها باعث کاهش دامنه ای امواج می شوند [۳].

۴- بررسی پروفیل ژئوتکنیک لرزه ای شمال - جنوب و شرق - غرب و مقایسه با سایر نتایج
بررسی ها نشان داده است که توپوگرافی، هندسه و فاصله از منبع لرزه ای، نقش اساسی در تقویت حرکت لرزه ای زمین ایفا

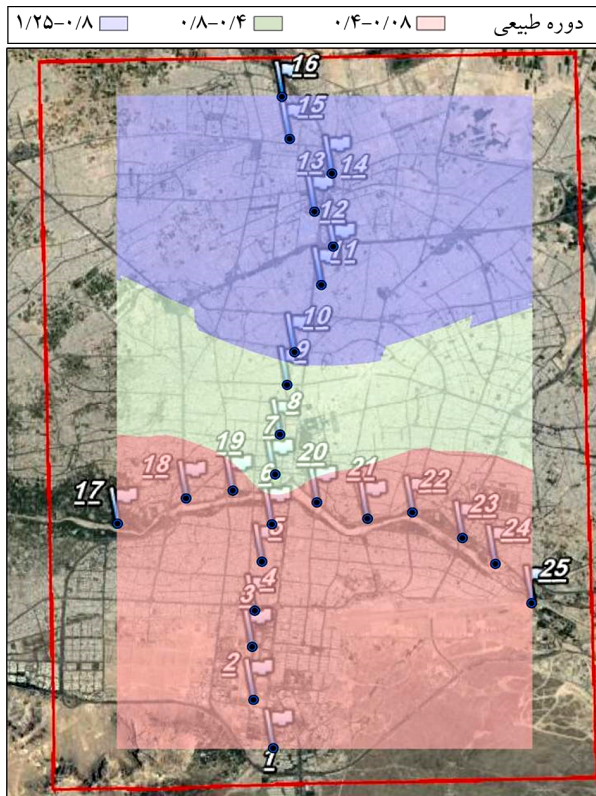


شکل (۱۱): پریود طبیعی شمال - جنوب و شرق - غرب حاصل از تحلیل یک بعدی اثر ساختمان (برحسب ثانیه).

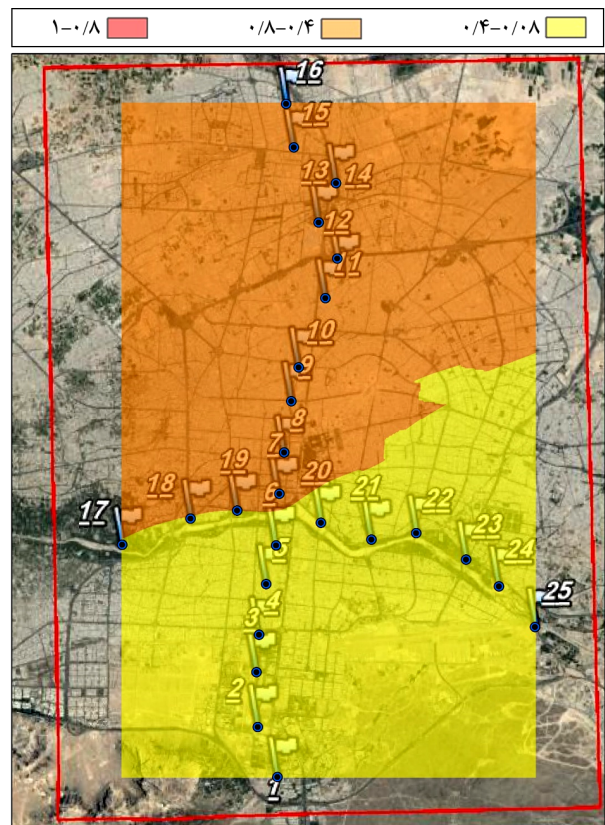
بدین صورت با بررسی پروفیل ژئوتکنیک لرزه‌ای اصفهان، وضعیت سنگ کف لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس محیطی به عنوان سنگ کف لرزه‌ای در نظر گرفته شد که سرعت موج برشی آن بیش از ۷۰۰ الی ۸۰۰ متر بر ثانیه است.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب روند تغییرات پریودهای طبیعی ساختمان در مسیر شمال - جنوب و شرق - غرب را که بر اساس بیشینه دامنه طیف فوریه حرکت سطح به حرکت ورودی از نتایج تحلیل‌های دو بعدی و یک بعدی در سایت به دست آمده را نشان می‌دهند. قابل ذکر است جهت تهیه طیف فوریه نقاط خروجی، از نرم افزار Seismosignal استفاده شده است.

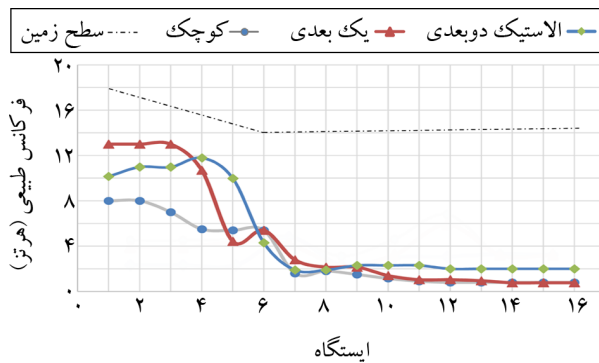
همچنین شکل (۱۲) مقادیر پریود طبیعی ساختمان در محدوده مورد مطالعه را بر اساس نتایج میکروترموور و همچنین تطبیق با نتایج تحلیل یک بعدی و دو بعدی نشان می‌دهد.



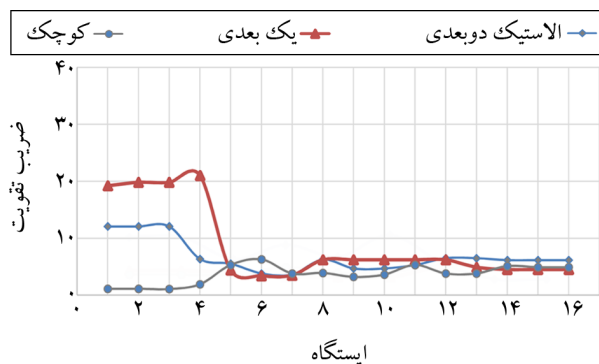
شکل (۱۲): پریود طبیعی ساختمان اصفهان در مسیر شمال - جنوب و شرق - غرب بر اساس ترکیب نتایج میکروترموور.



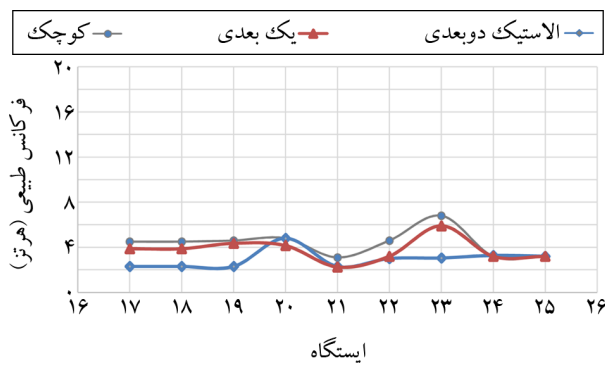
شکل (۱۰): پریود طبیعی راستای شمال - جنوب و شرق - غرب حاصل از تحلیل دو بعدی اثر ساختمان (برحسب ثانیه).



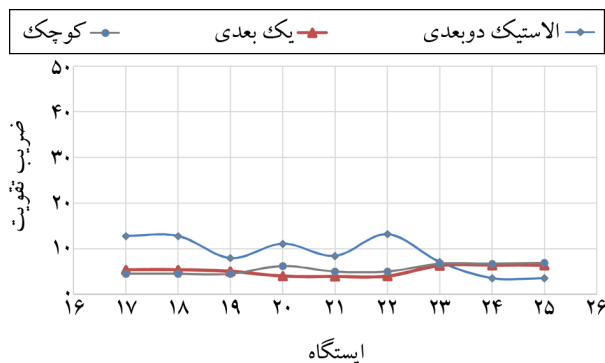
شکل (۱۳): مقایسه فرکانس طبیعی راستای شمال-جنوب.



شکل (۱۴): مقایسه ضریب بزرگنمایی راستای شمال-جنوب.



شکل (۱۵): مقایسه فرکانس طبیعی راستای شرق-غرب.



شکل (۱۶): مقایسه ضریب بزرگنمایی راستای شرق-غرب.

اندرکنش امواج می‌تواند بسته به هندسه‌ی بی‌قاعدگی‌ها و انواع آن، فرکانس‌ها و زوایای برخورد امواج ورودی، الگوی پیچیده‌ای از تشدید و میرایی را ایجاد کند. مطالعات پارامتری کوکس و همکاران [۱۵] بر روی رفتار لرزه‌ای شیب‌های رسی با زاویه‌ی ۲۹ درجه و سپس بر روی شیب‌های ۴۵ درجه نشان می‌دهد که شتاب سطحی ماکزیمم در تاج شیب‌ها بیشتر از پای شیب‌ها است.

در سال ۲۰۱۲، کمالیان و همکاران [۱۶] و همچنین دوسلیه و هیدنو [۱۷] اثر متقابل بین بی‌نظمی‌های توپوگرافی و حرکت لرزه‌ای زمین با استفاده از روش پیوندی را بررسی کردند. کمالیان و همکاران [۱۶]، پاسخ لرزه‌ای زمین در شیب‌ها را در حالت دو بعدی با تابش امواج عمودی مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تاج شیب یک نقطه‌ی بحرانی است؛ همچنین کمترین میزان تقویت در پایین شیب رخ می‌دهد و با زیاد شدن شیب میزان عوامل تقویت افزایش پیدا می‌کند.

نگاه بسیار اجمالی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای به اثر تقویت عامل توپوگرافی، پاسخگوی نیازهای طراحی در این موضوع نیست و لازمه‌ی ارزیابی اثرات توپوگرافی و بی‌قاعدگی‌های زیرسطحی، تحلیل‌های دو بعدی و حتی در برخی موارد، سه بعدی می‌باشد. در این پژوهش مقایسه نتایج تحلیل دو بعدی، یک بعدی و نتایج میکروترمور در راستای شمال-جنوب، این حقیقت را روشن می‌کند که در هنگام ارزیابی و تحلیل اثر ساختگاه تأثیر توپوگرافی محیط اطراف باید علاوه بر توپوگرافی محلی (نقطه‌ای) در نظر گرفته شود. نکته حائز اهمیت اینکه اگرچه عامل توپوگرافی محیط اطراف کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند، اما در مطالعات اثر ساختگاه این پروفیل نشان می‌دهد تأثیر آن در تشدید پاسخ لرزه‌ای زمین قابل توجه است. این موضوع در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) کاملاً مشهود است، به گونه‌ای که در بین ایستگاه‌های ۱ تا ۷ که پروفیل لایه‌ها به صورت شیب‌دار است نتایج تحلیل یک بعدی همخوانی کاملی با نتایج دو بعدی ندارند، زیرا یکی از فرضیات تحلیل یک بعدی افقی بودن لایه‌ها و عمود بودن بر امتداد انتشار موج می‌باشد (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).

ساختمان‌های مرتفع زیادی اخیراً در این مناطق احداث شده‌اند دارای پریرود طبیعی بالاتر از ۰/۸ را شامل می‌شوند.

- این در حالی است که طی پژوهشی که توسط مرکز تحقیقات راه و ساختمان انجام یافته حدود ۵۶ درصد از زلزله‌های ایران دارای زمان تناوب حاکم بین ۰/۲ تا ۰/۴ ثانیه می‌باشند و زمان تناوب بالای ۱ ثانیه به ندرت دیده می‌شود [۱۸]. همچنین مطالعه دیگری که جهت بررسی اثرات ساختگاه توسط کمالیان و همکاران [۱۹] در منطقه قم انجام گرفت، غالب شهر قم دارای پریرود مشخصه ۰/۴ تا ۰/۸ بوده‌اند.

- با بررسی نمودارهای راستاهای شمال- جنوب و شرق- غرب مشاهده می‌شود که بزرگ‌تر بودن تشدید در ساختگاه منطقه در راستای شمالی- جنوبی شاخص‌تر است.

- همچنین با مقایسه پروفیل شرق- غرب و شمال- جنوب و مقایسه نتایج تحلیل یک‌بعدی و تحلیل دو بعدی و میکروترمور، نتیجه دیگری که می‌توان اقتباس نمود، رفتار متفاوت راستای شمال- جنوب و شرق- غرب می‌باشد که بیانگر توپوگرافی جهت‌دار در ساختگاه اصفهان می‌باشد.

- با در نظر گرفتن ضوابط استانداردهای طراحی سازه‌ها نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران، تغییرات پریرود اصلی سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای بر حسب ارتفاع سازه به عنوان مهم‌ترین متغیر تعریف شده است [۲۰].

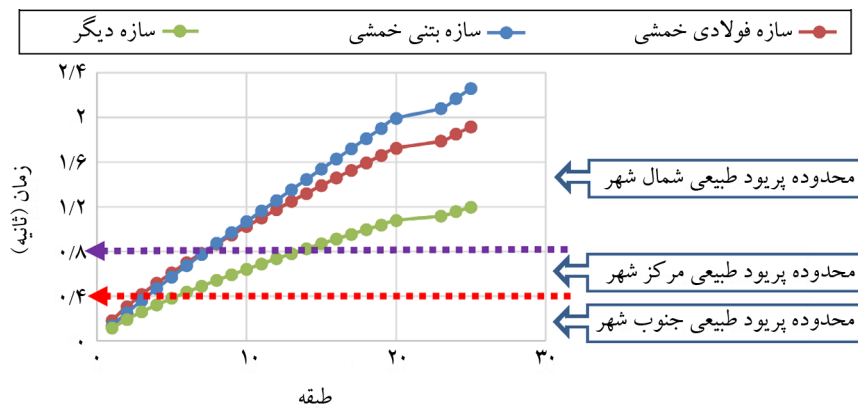
در شکل (۱۷) تغییرات پریرودیک سازه‌ها بر حسب ارتفاع و سیستم سازه‌ای و مقایسه با پریرود طبیعی سایت نشان داده شده است.

در پروفیل شمال- جنوب همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در مقایسه نتایج تحلیل دو بعدی و خردلرزه میزان دامنه تشدید در طی مسیر شیب‌دار (ایستگاه ۱ الی ۵) افزایش چشم‌گیری دارند. در واقع زمانی که موج از محیط پرسرعت وارد محیط کم‌سرعت می‌شود، پرتوهای موج به شکل منحنی به هم نزدیک می‌شوند و بدین شکل تمرکز انرژی در یک منطقه‌ی خاص رخ می‌دهد. این پرتوها پس از برخورد به سطح زمین بازتابش یافته و در یک منطقه‌ی دیگر تمرکز می‌یابند. عوارض در سطح زمین می‌توانند باعث تمرکز امواج در یک منطقه شود. در واقع، امواج لرزه‌ای در امتداد لبه‌های توپوگرافی انعکاس می‌یابد. به دلیل انعکاس‌های ایجاد شده، میدان موج حتی در خارج از توپوگرافی‌ها تغییر می‌کند و حرکت زمین به‌طور قابل توجهی تقویت می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

نتایجی که از این پژوهش به دست آمده به این شرح است:

- گستره مورد مطالعه را از لحاظ توزیع پریرود طبیعی آبرفت می‌توان در قالب سه گروه تقسیم‌بندی کرد. مطابق بررسی‌های انجام شده مناطق جنوبی شهر تا نزدیک رودخانه زاینده‌رود (مجاور پل‌های تاریخی اصفهان) در محدوده پریرود طبیعی کمتر از ۰/۴ می‌باشند. محدوده مرکزی شهر (مجاور دروازه دولت و عمارت چهل ستون) دارای محدوده پریرود طبیعی ۰/۴ تا ۰/۸ ثانیه و مناطق شمالی اصفهان که



شکل (۱۷): مقایسه پریرود اصلی ساختمان و پریرود اصلی ساختگاه اصفهان.

11. EduPro Civil System, Inc., ProShake (1998) *Ground Response Analysis Program by EduPro Civil System, Inc., Redmond, Washington.*
12. Lysmer, J. and Kulmeter, R.L. (1969) Finite dynamic model for infinite media. *ASCE J. of the Eng. Mech. Div.*, 850-877.
13. Das, B.M. (1995) *Fundamental of Soil Dynamics.* Elsevier.
14. Dey, A. (2011) Calibration of a PLAXIS finite element dynamic model: effect of domain width and meshing Schemes/AES. *3rd Indian Young Geotechnical Engineers Conference: 3IYGEC*, Indian Geotechnical Society, New Delhi.
15. Kovacs, W.D., Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971) Studies of seismic response of clay banks. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE (97-SM2)*, 441-455.
16. Kamalian, M., Mohazzab, K., Sohrabi Bidar, A., and Haghshenas, E. (2012) Seismic behavior of 2D semi-sine shaped hills against vertical SV waves. *Journal of Computational Methods in Engineering (JCME)*, **31**(1), 25-45 (in Persian).
17. Ducellier, A. and Hideo, A. (2012) Interactions between topographic irregularities and seismic ground motion investigated using a hybrid FD-FE method. *Bull. Earthquake Engineering*, **18**, 773-792.
18. Baziar, M.H., Siavoshnia, M., and Sadeghpour, N. (2006) An investigation on amplification of earthquake on soil sample of type IV in 2800 standard. *Technical Report of Iranian BHRC* (in Persian).
19. Kamalian, M. et al. (2006) *Seismic Geochemical Studies of Qom City* (in Persian).
20. Standard No. 2800 4th Edition. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings.*

نتایج نشان می‌دهد برای مناطق شمال شهر، برای ساختمان‌های بلند (تعداد طبقات زیاد) هم‌نواپی پریرود سازه و سایت و بالطبع تشدید اتفاق خواهد افتاد و برای مناطق مرکزی شهر برای ساختمان‌های با ارتفاع متوسط و برای نواحی جنوب برای ساختمان‌های با ارتفاع کم می‌تواند تشدید اتفاق افتد. قابل ذکر است در زلزله فروردین ماه ۱۳۹۲ اصفهان، این موضوع در بسیاری از ساختمان‌های مرتفع شمال شهر اصفهان توسط ساکنین شهر گزارش شده است.

مراجع

1. Hashemi, H. (2010) *The Influence of Local Soil Conditions on Seismic Ground Motions in Esfahan.* M.Sc. Thesis (in Persian).
2. Kamalian, M. and Sohrabibidar, A. (2008) Seismic behavior of two-dimensional half-sinus hills against SV waves. *Esteghlal Journal*, **36**(1), 109-130.
3. Panji, M., Kamalian, M., Asgarimarnani, J., and Jafari, M.K. (2013) Technical literature review on seismic analysis of topographic complications against SH waves. *JSEE*, **15**(4), 1-15.
4. TC4 (1999) *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards.* Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering.
5. Zaminfanavar Consultant Co. (2009) *Geotechnical Studies on Line-1 of Esfahan Urban Train.*
6. Azmonefoolad Consultant Co. (2015) *Geotechnical studies on Line-2 of Esfahan urban train.*
7. Hashemi, H. (2019) *Evaluation of Seismic Geotechnical Behavior on Semi of Esfahan City.* Ph.D. Thesis (in Persian).
8. Khademalfoghara, N. (2009) *Estimation of Probabilistic Earthquake Risk for Isfahan.* M.Sc. Thesis (in Persian).
9. Ambraseys, N.N. (1978a) Middle East-a reappraisal of seismicity. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, **11**(1), 19-32.
10. Brinkgreve, R.B. (2002) *Plaxis 2D Version 8.4: Reference.* Scientific and Dynamic Manuals, Lisse, Balkema.

واژه‌نامه

- | | |
|--|--------------------------------|
| Site Effect | ۱- اثر ساختمانگاه |
| Topography | ۲- توپوگرافی |
| Amplification | ۳- بزرگنمایی |
| Two-Dimensional Site Response Analysis | ۴- تحلیل دوبعدی اثر ساختمانگاه |
| Boundary Element Method | ۵- روش اجزای مرزی |

- ۶- میکرو ترمور
Microtremor
- ۷- اصفهان
Isfahan
- ۸- مدل ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر
Seismic Geotechnical Model of the City
- ۹- شتاب ماکزیمم سنگ
Peak Rock Acceleration (PRA)
- ۱۰- پریود طبیعی
Natural Site Period

Considerations about Seismic Geotechnical Characteristics of Esfahan

Hossein Hashemi Fesharaki¹, Mohsen Kamalian^{2*}, Ebrahim Haghshenas³ and Masoud Mirmohamadsadeghi⁴

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Arak branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
2. Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: Kamalian@iiees.ac.ir
3. Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
4. Associate Professor, Institute for Energy and Hydro Technology (IEHT), Esfahan, Iran

Conducting seismic geotechnical microzonation studies from the point of view of site effects requires an assessment of dynamic properties and especially the natural frequency of site in the study area.

Common methods for estimating these parameters include using microtremors measurements and real earthquakes. In addition, in order to study the exact behavior of the site and determine the exact seismic geotechnical model of the region, it is necessary to perform numerical analysis and use the results of microtremor experiments and use geological information in the region. Without using numerical methods, solving problems of the frequency domain is usually impossible. For this purpose, numerical methods obtain the relations and equations governing the domain by examining the differential behavior of the problem (the model under study). In this regard, finite element methods and modeling of energy absorbing boundaries to reduce the reflection data of seismic waves have been used in numerical analysis. Also, in microzonation studies, the scale of work must be selected from valid instruction like TC4. For this purpose, the method of grade 3 in TC4 has been used.

In this research, the study area of Esfahan has been selected, which is one of the important cities in terms of the existence of numerous historical monuments, relatively high population and strategic industries. Unfortunately, in this region, due to its reputation for safety against earthquakes, very few seismic studies and site effect studies have been conducted. Considering seismic characteristics of site in urban planning and design of structures can provide the basis for sustainable and safe development in cities. Carrying out studies in this regard can prevent the construct of structures in any area, which can be in the resonance period or take the necessary measures to minimize damage.

The main geology texture of Esfahan is influenced by two elements. Firstly, the Zayandehrood River, which flows east-west direction in the city of Esfahan, and next the mountains around Esfahan, especially Sofeh Mount, which the main part of the city are affected by its slope.

In this study, using one-dimensional and two-dimensional numerical analysis and microtremor results, geotechnical and seismic studies, the seismic geotechnical behavior of Esfahan region has been studied in the north-south direction (parallel to the topographic changes of the city) and east-west along the river.

One of the significant points identified in this study is the different seismic geotechnical behavior of the north-south and east-west directions with each other and the fact that the behavior of the north-south profile of Esfahan should be considered due to changes of the surrounding environment.

The results show that the behavior of Esfahan site in the north-south direction, which is affected by topographic changes, should be considered as two-dimensional and the east-west direction one-dimensionally can be considered. The results also show that the natural frequency values of Esfahan increase from southern area to northern area respectively. In this study, after related analyzes and comparison of seismic geotechnical results and dynamic analysis, the study area was classified into three categories: The southern areas of the city with a natural period less than 0.4, the central areas with a period range of 0.4 to 0.8 and the northern areas. The city is in the natural period above 0.8 seconds.

Keywords: Esfahan, 1-D Numerical Method, 2-D Numerical Method, Site Effect Analysis.