ریز پهنه‌بندی شهر اردکان مبتنی بر اثر ساخت‌گاه

*زهرا دهقانی، حمید مهرنهاد؛ دانشگاه یزد گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۱/۵/۱ **پذیرش** ۹۱/۱۲/۱۲

چکیده

ارزیابی پاسخ زمین از مهم‌ترین مسائلی است که در ژئوتکنیک لرزه‌ای مطرح می‌شود. در طول مسیر زلزله بسته به خاک محل، جنبش زمین در مکان‌هایی با خاک نرم عموماً از جنبش زمین در مکان‌هایی با خاک سخت و متراکم و یا رخ‌نمون‌های سنگی بزرگ‌تر است. این پژوهش برای شناسایی شرایط مؤثر خاک ساخت‌گاه اردکان بر لرزش‌های ناشی از امواج زلزله صورت پذیرفت. بنا بر این بعد از انجام حفاری‌های ژئوتکنیکی و انجام آزمون‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزکی امواج نزولی، لایه‌های خاک و ضخامت آن‌ها در نقاط مختلف شهر شناسایی شد. هم‌چنین سرعت موج برشی و چگالی لایه‌های خاک در نقاط مختلف ساخت‌گاه شهر اردکان تا عمق ٤٢ متری تعیین شد. با استفاده از این داده‌ها پس از شناسایی عمق سنگ بستر لرزه‌ای، مدل ژئوتکنیک لرزه‌ای نواحی مختلف شهر تعیین شد. در نهایت با استفاده از پارامترهای ضخامت، چگالی، سرعت موج برشی و منحنی‌های نسبت مدول‌های برشی و میرایی به واتنش برشی، بااستفاده از نرم‌افزار EERA و بر اساس روش محاسباتی خطی معادل، پارامترهای جنبش نیرومند زمین محاسبه شد. این محاسبات برای دورهٔ بازگشت‌های ۷۵، ٤۷۵ و ۲٤۷۵ سال تکرارشد و مشخص شد که قسمت‌های شمالی اردکان دارای بیش‌ترین بزرگ‌نمایی است.

واژه‌های کلیدی: اردکان، ژئوتکنیک لرزه‌ای، موج برشی، روش خطی معادل.

*نویسنده مسئول z.dehghani2024@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

مقدمه

امواج زمین‌لرزه با دور شدن از کانون زلزله و با گذشتن از لایه‌های آبرفتی دستخوش تغییر و تحول می‌شوند. پس از وقوع بعضی از زمین‌لرزه‌ها، مشاهدهٔ تفاوت زیاد مقدار تخریب در دو محل با فاصله نزدیک به یک‌دیگر، پدیده‌ای است که محققان مختلف، ناشی از اثرات ساخت‌گاه تشخیص داده‌اند. در این مورد اثرات ساخت‌گاه می‌توانند موجب افزایش شدت زمین‌لرزه به مقدار ۲ تا ۳ درجه در مقیاس مرکالی شوند [۱]. بیش‌تر شهرها و مناطق پرجمعیت، از دیدگاه زمین‌شناسی برروی رسوبات نرم واقع شده‌اند که می‌تواند دامنهٔ امواج لرزه‌ای را در بازهٔ بسامدی خاصی تقویت یا تضعیف کنند. دامنهٔ حرکات زمین در این مناطق با ویژگی‌های محلی خاک مانند هندسهٔ خاک، سرعت موج برشی و فشارشی، چگالی و ... به‌شدت کنترل می‌شود [۲]. مشاهدات حاصل از زمین‌لرزه‌های مختلف مؤید این مطلب است که خرابی حاصل از زمین لرزه در حوضه‌های رسوبی بسیار بیش‌تر و بزرگ‌تر از مناطق مستقر بر روی بسترهای سنگی است[۳].

علت اصلی تقویت و تشدید امواج لرزه‌ای، به دام افتادن این امواج به‌دلیل امپدانس میان رسوبات و سنگ بستر به‌شمار می‌رود. هرگاه رسوبات و ساختار های مربوط دارای لایه‌های افقی باشند، به دام افتادن امواج، تنها امواج حجمی که به سمت بالا و پایین حرکت می‌کنند را تحت تأثیر قرار می‌دهند [٤]. از لحاظ مهندسی امواج زلزله با ۳ مشخصه شتاب حداکثر، محتوای فرکانس و زمان لرزش بررسی می‌شوند، که این مشخصه‌ها را مستقیماً از شتاب نگاشت‌های به‌دست آمده در اثر این امواج، می‌توان استخراج کرد. بنا بر این تأثیر ساخت‌گاه عبارت است از تغییر این مشخصه‌ها در اثر وجود لایهٔ آبرفتی روی سنگ بستر، هم‌چنین در اثر توپوگرافی یا دیگر شرایط هندسی ساخت‌گاه. این پدیده‌ها وابسته به رفتار دینامیکی آبرفت است . این پارامترها توسط ویژگی‌های لرزه‌ای لایه‌های نزدیک سطح زمین و سازه‌ها به‌شدت متأثر می‌شوند که این موضوع بررسی حساسیت زمین و سازه‌ها را قبل از رخداد زمین لرزه امری ضروری می‌سازد [۵]. تأمین ایمنی در مقابل زلزله در دو راستا صورت می‌پذیرد، یکی تأمین ایمنی سازه در مقابل نیروهای دینامیکی زلزله و دیگری ایمنی خود محل در مقابل حدوث پدیده‌های ژئوتکنیکی است. ایمنی محل حین زلزله به پدیده‌های ژئوتکنیکی و حرکت گسل‌ها مربوط می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

مک‌مورد (۱۸۲٤) خاطر نشان ساخت که در زلزله کاچ (۱۸۱۹) در هندوستان، ساختمان‌هایی که بر سنگ مستقر بودند به اندازهٔ ساختمان‌هایی که شالوده آن‌ها به انتهای لایهٔ خاک نرسیده بود، تحت تأثیر قرار نگرفت. بوچرت[۱] و همکاران (۱۹۹۱) و مدودو[۲] و همکاران (۱۹٦۲) روابط بین سرعت موج برشی و مقدار تشدید را بررسی کردند [٦]، [۷].

اردکان واقع در استان یزد در بخش انتهایی کویر یزد واقع شده است. مختصات جغرافیایی شهر در قسمت مرکزی اردکان ٥٤ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۱۹ دقیقه عرض شمالی است و در ارتفاع متوسط ۱۰٥۰ متری از سطح دریا قرار دارد. وقوع شکستگی در نهشته‌های دوره کواترنری، عبور زون گسلی نائین- بافت از حاشیهٔ کویر اردکان و تأثیر این سیستم مهم به‌صورت ماگماتیسم و شکستگی در ایجاد ساختار منطقه موجب شده است که علی‌رغم این‌که منطقه بررسی شده از نظر آماری رتبهٔ بالایی را در منحنی‌های شدت و ریسک زلزله ندارد، ولی از مستعدترین مناطق برای وقوع زمین لرزه باشد. هم‌چنین پژوهش‌های اولیه انجام شده در این منطقه نشان داد که برای نقطهٔ مرکزی اردکان، بیشینهٔ شتاب افقی با توجه به برآورد خطر زمین‌لرزه به‌روش تعیینی(محاسباتی) ۰/٦۳g است که ناشی از گسل شمال یزد- اردکان است که از حاشیهٔ این شهر عبور می‌کند [۸] .

روش تحلیل استفاده شده

امروزه روش‌های تحلیلی یا ریاضی برای ارزیابی اثرات وضعیت خاک بر روی حرکات لرزه‌ای سطح زمین پیشرفت‌های زیادی کرده است. در اکثر این روش‌ها پروفیل‌های خاک به‌صورت یک سری لایه‌های افقی که بر روی سنگ بستر قرار گرفته‌اند در نظر گرفته می‌شوند، و فرض می‌شود که حرکات لرزه‌ای فقط موجب تغییر شکل‌های برشی در خاک شده و نحوهٔ گسترش جانبی لایه‌ها تأثیری روی واکنش آبرفت ندارد. هم‌چنین فرض می‌شود که حرکات به‌وجود آمده درلایه‌های خاک ناشی از انتشار عمودی امواج برشی است که از سنگ بستر وارد می‌شود. بنا بر این تحلیل واکنش بر اساس نظریهٔ انتشار عمودی امواج به‌صورت یک بعدی در محیطی لایه‌ای انجام می‌شود. امروزه روش رایج استفاده شده برای آنالیز، روش خطی معادل است. روش خطی معادل که در برنامه کامپیوتری شیک[۳] و ارا[٤] به‌کار گرفته شده است رفتار غیرخطی را با یک روش خطی معادل مدل می‌کند. آن‌چه که روش خطی معادل را از سایر

۱. Buchert ۲. Medvedev ۳. Shake ۴. Eera

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

روش‌ها متمایز می‌سازد، واکنش الاستیک خاک است که به‌وسیلهٔ این روش به‌دست می‌آید. به‌طوری‌که پس از پایان حرکت وارده، کل سیستم بدون هیچ‌گونه تغییر شکل دائمی به حال تعادل باز می‌گردد [۹]. براساس روش خطی معادل، پاسخ در هر دو نقطه در توده‌ای از خاک به‌صورت یگانه به یک‌دیگر وابسته است. در نتیجه، می‌توان حرکت یک بخش را در هر نقطه از خاک تعیین کرد و حرکت ایجاد شده در نقطه دیگر را محاسبه کرد. این امر امکان بهره‌گیری از حرکت یک تودهٔ خاک که در سطح زمین ثبت شده است را برای محاسبهٔ حرکتی که در بستر سنگی ایجاد می‌کند، نیز فراهم می‌کند [۱۰]. یوشیدا[۱] (۱۹۹٤)، هانگ[۲] و همکاران (۲۰۰۱) بر روی رفتار خاک در تحلیل خطی معادل پژوهش‌های وسیعی داشته‌اند [۱۱]، [۱۲].

مراحل انجام پژوهش

براساس آیین نامهٔ ۲۸۰۰ ایران، اردکان در پهنهٔ با خطر نسبی متوسط قرار گرفته است و شتاب مبنای طرح آن ۰/۲۵ شتاب ثقل زمین پیشنهاد شده است [۱۳]. بر این اساس بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ساخت‌گاه اردکان امری مهم و ضروری است. بنا بر این، این پژوهش با هدف تعیین پارامترهای جنبش نیرومند که تحت تأثیر شرایط ساخت‌گاه قرار دارند صورت پذیرفت. برای رسیدن به این مهم این مراحل باید بدست آید:

۱. شناخت لایه‌های خاک براساس خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و طبقه‌بندی خاک در سیستم یونیفاید
۲. تعیین سرعت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک با آزمون ژئوفیزیکی امواج نزولی و تعیین پارامترهای وابسته به سرعت موج برشی
۳. تعیین موقعیت سنگ کف لرزه‌ای در گسترهٔ شهر اردکان
٤. انجام تحلیل‌های دینامیک خاک و محاسبهٔ پارامترهای حرکت نیرومند زمین

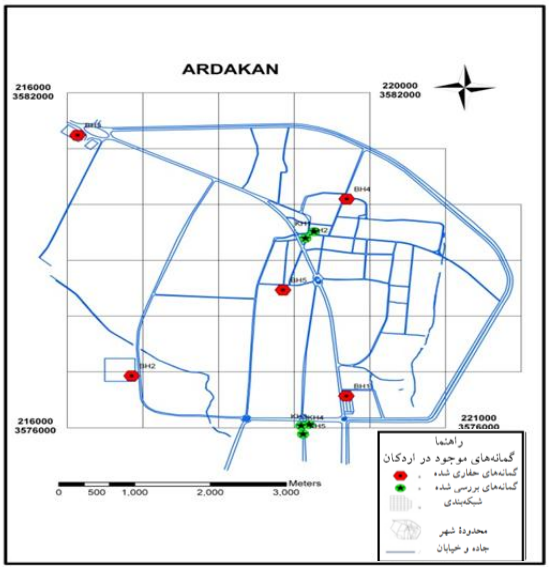
پیش از آغاز پژوهش‌های مفصل، براساس دستورالعمل آیین نامهٔ TC4 و با استفاده از نقشهٔ اردکان محدودهٔ این شهر به شبکه‌ای متشکل از ۳۲ واحد مربعی شکل با ابعاد یک کیلومتر در یک کیلومتر تقسیم شد [۱۳]. مجموعه پژوهش‌های لازم برای ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای در این واحدهای مربعی انجام شد.

۱.Yoshida ۲. Huang

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

به‌منظور شناسایی چگونگی گسترش رسوبات و تعیین ویژگی‌های دینامیکی لایه‌های خاک در منطقهٔ بررسی شده، اطلاعات ٤ گمانهٔ ژئوتکنیکی حفاری شده مربوط به پروژه‌های مختلف و هم‌چنین ۸ گمانهٔ حفاری شده به‌وسیلهٔ سازمان آب منطقه‌ای جمع‌آوری و تحلیل شد. از آن‌جا که هدف این پژوهش انجام ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای دقیق در محدودهٔ شهر اردکان است، برای انجام پژوهش‌های تکمیلی دقیق و هم‌چنین انجام آزمون‌های ژئوفیزیکی مورد نیاز اقدام به حفر ۵ گمانهٔ ژئوتکنیکی با پراکندگی مناسب به عمق ٤۲ متر شد (شکل ۱). پژوهش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی لازم با دقت زیاد در این ۵ گمانه انجام شد و اطلاعات حاصل از این پژوهش‌ها مبنای بررسی‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه قرار گرفت. به‌طورکلی در بررسی‌های ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای لازم است پژوهش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی به‌طور کامل انجام گردد. به این منظور پژوهش‌ها در دو بخش ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی انجام شد.



شکل ۱. وضعیت گمانه‌ها و شبکه‌بندی شهر اردکان

پژوهش‌های ژئوتکنیکی

در بخش پژوهش‌های صحرایی در ۵ گمانهٔ ژئوتکنیکی اصلی در حین حفاری نمونه‌برداری انجام شد، با انجام آزمون‌های آزمایش‌گاهی لازم وضعیت خاک اردکان از نظر آب محتوی،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

چگالی، وضعیت خمیری و دانه‌بندی معین شد و نمونه‌های برداشت شده در سیستم یونیفاید طبقه‌بندی شدند. در حین حفاری آزمون S.P.T نیز انجام شد. براساس نتایج این آزمون خاک اردکان در گروه خاک‌های سخت و متراکم تا نسبتاً سخت دسته‌بندی گردید. عمق آب زیرزمینی، تداوم لایه‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی مختلف مؤثر نیز در بازدیدهای صحرایی مشخص شدند.

پژوهش‌های ژئوفیزیکی

بررسی‌های مختلف بر روی انواع خاک‌های متفاوت نشان داده است که پاسخ خاک تحت شرایط تنش متفاوت اغلب غیرخطی است. در سطوح بسیار پایین واتنش، کم‌تر از $۱۰^{-۳}$، پاسخ خاک به شکل خطی است و اجازه می‌دهد که از نظریه الاستیک برای تشریح شرایط استفاده شود. در سطح متوسط واتنش یعنی $۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۲}$ پاسخ خاک غیرخطی است و در سطح بالای واتنش که بیش از $۱۰^{-۱}$ است پاسخ خاک غیرخطی باقی می‌ماند و شروع به تغییرشکل پلاستیک می‌کند و دور از واقعیت نخواهد بود اگر در این شرایط به‌عنوان جسمی ناپایدار بررسی شود [۱٤]. در این پروژه به‌منظور تعیین سرعت امواج P و S در ۵ گمانهٔ حفاری شده آزمون دان هول[۱] انجام شد. در حین این آزمایش از ضربهٔ قائم پتک برای ایجاد موج P و از ضربهٔ افقی بر دو سمت یک الوار برای ایجاد موج S استفاده شد. سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده پاسخ دینامیک زمین است. بنا بر این برای ارزیابی اثرات ساخت‌گاهی و ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای باید پروفیل سرعت موج برشی از سطح زمین تا سنگ‌بستر لرزه‌ای مشخص شود. با استفاده از این داده‌ها، پروفیل‌های جانمایی لایه‌های لرزه‌ای و سرعت موج برشی، هم‌چنین عمق سنگ بستر لرزه ای در واحدهای مربعی شهر اردکان تعیین شد.

خصوصیات فیزیکی مواد از قبیل چگالی، تخلخل، درصد اشباع، خواص الاستیک و مقاومت رابطهٔ معنی‌داری با سرعت امواج لرزه‌ای دارند. بر همین اساس، با داشتن سرعت امواج عبوری محیط‌های مختلف، خصوصیات یاد شده قابل تخمین هستند.

بعد از انجام مجموعهٔ پژوهش‌های ذکر شده وضعیت کلی اردکان بدین شرح مشخص شد:

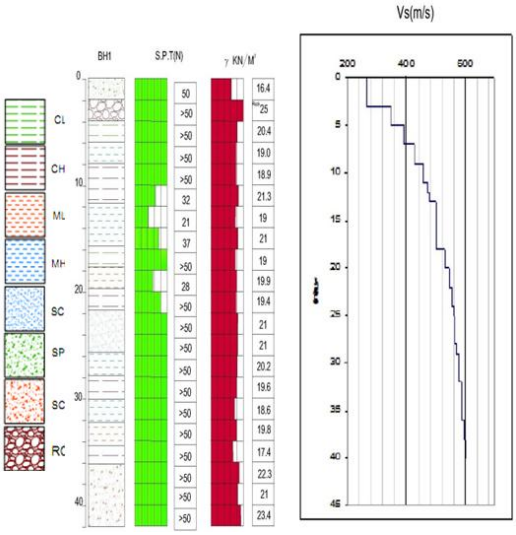
۱. Down hole

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

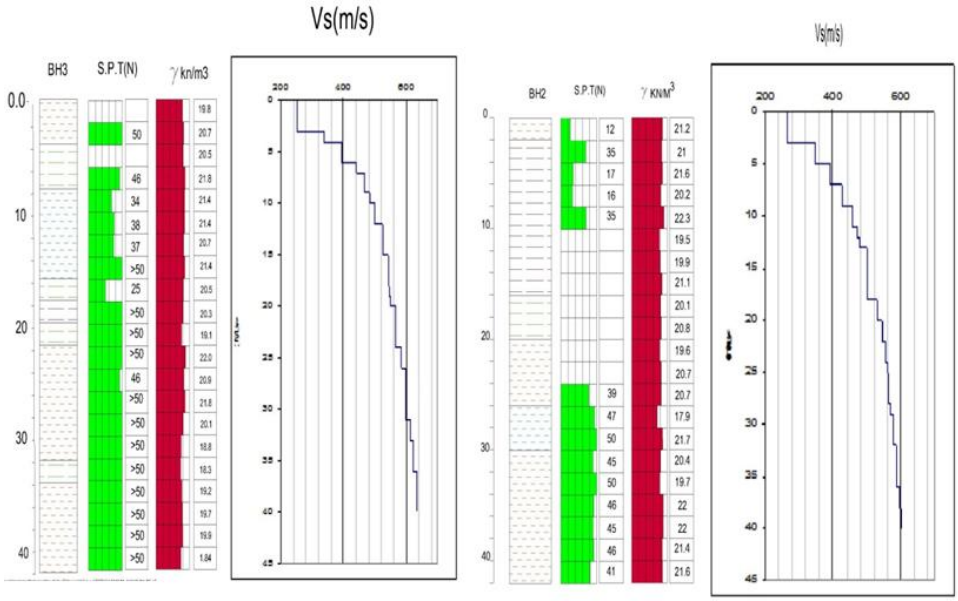
- خاک اردکان به‌طور غالب از انواع CH,CL,MH, ML تشکیل شده است که به سمت شمال‌شرق توالی رس ضخامت بیش‌تری پیدا می‌کند. در قسمت جنوب شرقی نیز نوع خاک به سمت انواع ماسه دار تغییر می‌کند.
- ضخامت رسوبات در بعضی قسمت‌های شهر به بیش از ۲۰۰ متر می‌رسد. اما عمق سنگ بستر لرزه‌ای که با توجه به سرعت امواج برشی و بررسی تراکم خاک تعیین شد از ٤٠ متر در قسمت جنوب شرق تا ٦٠ متر در شمال شرق شهر در تغییر است.
- با مقایسهٔ سرعت موج برشی به‌دست آمده در اعماق مختلف با اعداد حاصل از آزمون نفوذ استاندارد در این اعماق تطابق بسیار خوبی بین این دو پارامتر به‌دست آمد
- گسترهٔ اردکان دارای توپوگرافی هموار و شیب بسیار کمی است، در سمت راست جاده یزد–ارکان افتادگی مشخصی وجود دارد که می‌تواند ناشی از فعالیت گسل شمال یزد–اردکان باشد. هم‌چنین توالی لایه‌های رسوبی تقریبا افقی است.
- نوع ساخت‌گاه اردکان براساس نوع خاک محل و سرعت موج برشی (Vs_{30}) به‌دست آمده از گمانه‌ها مطابق آیین نامه۲۸۰۰ ایران به در تمامی سطح شهر به‌جز بخش شمال شرقی ساخت‌گاه نوع دو م و در بخش شمال شرقی ساخت‌گاه نوع سوم است.

شکل‌های ۲ تا ٦ لاگ‌های حاصل از پژوهش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی در محدودهٔ اردکان است.

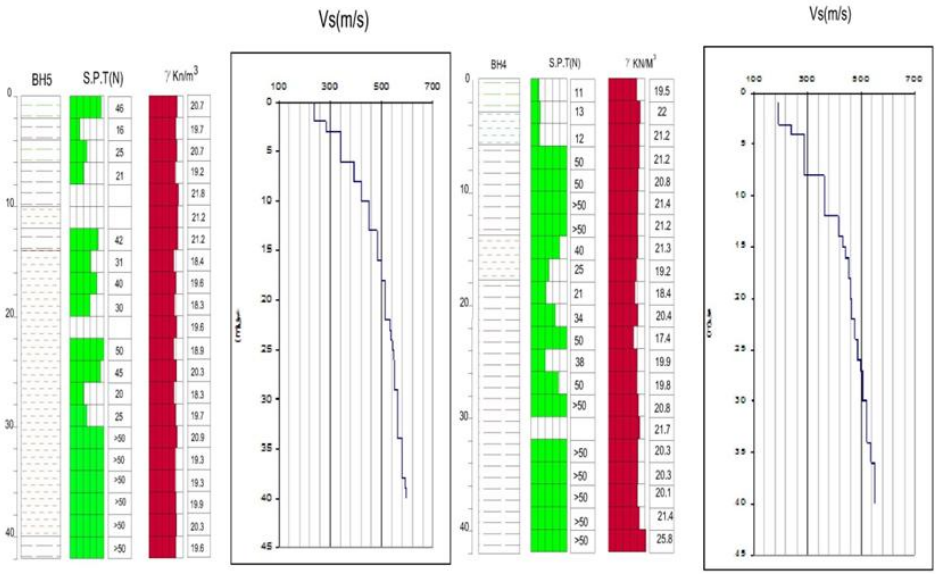


شکل۲. پروفیل ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی در گمانهٔ ۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]



شکل ۳. پروفیل ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی گمانهٔ ۲ شکل ٤. پروفیل ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی گمانهٔ ۳



شکل۵. پروفیل ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی گمانهٔ ٤ شکل٦. پروفیل ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی گمانهٔ ۵

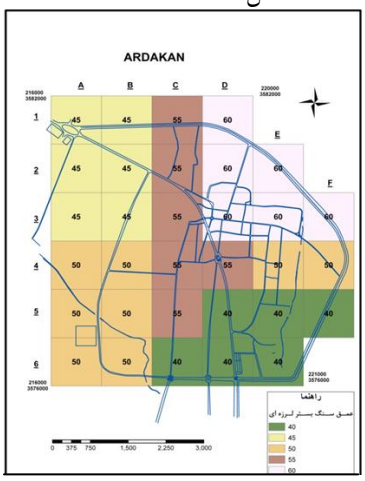
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

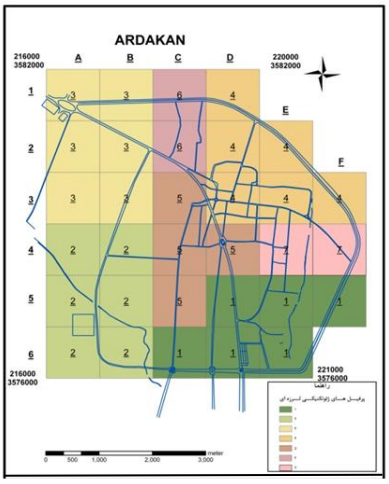
در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران به‌منظور دسته‌بندی نوع ساخت‌گاه به‌طور غیرمستقیم لایه‌هایی با سرعت موج برشی بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه معادل سنگ بستر لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. هم‌چنین دستورالعمل Tc4 ژاپن نیز لایه‌هایی با سرعت موج برشی بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه را برای ساختمان‌های کوتاه و متوسط برابر با سنگ بستر لرزه‌ای در نظر گرفته است [۱٤]. در این پروژه نیز از این قاعده در تعیین عمق سنگ بستر لرزه‌ای استفاده شده است و با توجه نتایج آزمون‌های ژئوفیزیکی انجام شده و شواهد موجود، در ارتباط با عمق سنگ بسترلرزه‌ای تصمیم‌گیری شد (شکل۷).

تحلیل دینامیکی و ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای

به‌منظور تحلیل رفتار خاک باید همهٔ لایه‌های مختلف خاک بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی و مهندسی زلزله تفکیک شوند. این پارامترها شامل بیشینهٔ مدول برشی، ضخامت لایه‌های خاک، وزن واحد حجم خاک، سرعت موج برشی، نوع خاک و حد خمیری آن است. به این منظور با استفاده از مجموعه یافته‌های بخش ژئوتکنیک و ژئوفیزیک و تلفیق این یافته‌ها مدل ژئوتکنیک لرزه‌ای اردکان به‌دست آمد. در مجموع هفت پروفیل ژئوتکنیکی در این مدل معرفی شدند که هرکدام دارای سرعت موج برشی، چگالی، آب محتوی، ضخامت لایه و حد خمیری منحصر به‌خودهستند (شکل۸).



شکل ۷ . نقشهٔ عمق سنگ بستر لرزه‌ای در واحدهای مربعی



شکل۸. نقشهٔ پروفیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای دراردکان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

با تعین ویژگی‌های لایه‌های لرزه‌ای فوق وضعیت میرایی و مدول برشی که بیشتر تابع حد خمیری و سرعت موج برشی هستند نیز در این لایه‌ها معین شد. با ترسیم و تفسیر منحنی‌های کاهش مدول، منحنی‌های میرایی، منحنی حرکت زمین، منحنی‌های واتنش و تنش، منحنی‌های طیف پاسخ زمین و منحنی تغییرات تنش برشی نسبت به‌عمق می‌توان ویژگی‌های دینامیکی خاک را به‌دست آورد [۱۶].

روش‌های تحلیل مختلفی برای ارزیابی اثرات ساخت‌گاهی ناشی از شرایط خاک محل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین وجود دارد. به‌طورکلی هریک از روش‌های تحلیل دینامیکی شامل سه مرحله هستند:

۱. تعیین مشخصه‌های حرکت سنگ‌بستر منطقه و انتخاب شتاب‌نگاشت‌های سازگار با این مشخصات
۲. تعیین مشخصه‌های دینامیکی خاک
۳. محاسبهٔ پاسخ لرزه‌ای لایه‌های خاک ناشی از حرکت سنگ‌بستر

تحلیل دینامیکی آبرفت مستلزم در اختیار داشتن چند شتاب‌نگاشت مناسب بر روی سنگ کف لرزه‌ای است. در صورتی‌که شتاب‌نگاشت‌های واقعی مربوط به یک منطقه موجود نباشد باید از شتاب‌نگاشت‌های مشابه استفاده کرد. به‌عبارت دیگر باید از شتاب‌نگاشت‌هایی استفاده شود که حتی‌الامکان با شتاب‌نگاشت‌های واقعی منطقه مشابه باشد. مهم‌ترین زمینه‌های تشابه شتاب‌نگاشت‌ها را بیشینهٔ شتاب و محتوای فرکانسی آن‌هاتشکیل می‌دهد. برای انجام تحلیل دینامیکی آبرفت ویژگی‌های لرزه‌خیزی سنگ‌بستر منطقه بررسی شد و براساس آن هفت زوج شتاب‌نگاشت از زمین‌لرزه‌های مختلف انتخاب شد که حرکت زمین را به ازاء زمین‌لرزه‌های محتمل منطقه مدل کند. انتخاب این شتاب‌نگاشت‌ها باید بر اساس توان لرزه‌زایی، عمق کانونی و مکانیزم گسلش متناسب با وضعیت گسل‌های ناحیهٔ بررسی شده باشد. از بین این هفت شتاب‌نگاشت، شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های طبس، بم و ناغان بیش‌ترین تأثیر را در ساخت‌گاه مورد نظر داشتند (جدول۱). این شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به پژوهش‌های تحلیل خطر منطقه و برآورد بیشینهٔ شتاب سنگ‌بستر در ناحیهٔ بررسی شده، با استفاده از نرم‌افزارهای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

سیسموسیگنال[1] و ارا برای دورهٔ بازگشت ۷۵، ٤۷۵، ۲٤۷۵ سال هم‌پایه شده‌اند. در پژوهش‌های اولیه با استفاده از مدل کاهیدگی بور و همکاران، برای دوره بازگشت ۷۵، ٤۷۵، ۲٤۷۵ سال طیف‌های هم احتمال برای گسترهٔ بررسی شده ترسیم و ارائه شده‌اند.هم‌چنین با توجه به نتایج مربوط به پژوهش‌ها محاسبهٔ طیف‌های پاسخ از تاریخچه‌های زمانی شتاب به‌روش آماری، بعد از تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی و تعیین چشمه‌های بالقوهٔ زمین، بیشینهٔ شتاب افقی به‌دست آمده است که به‌عنوان مبنای شتاب بر روی سنگ بستر لرزه‌ای معرفی شده برای دوره بازگشت‌های ذکر شده بدین شرح به‌دست آمده است [۱۷]:

- شتاب بیشینهٔ افقی برروی سنگ‌بستر لرزه‌ای با دورهٔ بازگشت ۷۵ سال، برابر است با ۰/۱۳٤g
- شتاب بیشینهٔ افقی برروی سنگ‌بستر لرزه‌ای با دورهٔ بازگشت ٤۷۵ سال، برابر است با ۰/۲٦g
- شتاب بیشینهٔ افقی برروی سنگ‌بستر لرزه‌ای با دورهٔ بازگشت ۲٤۷۵سال، برابر است با ۰/٤g.

جدول ۱. شتاب‌نگاشت‌های مؤثردر تحلیل لرزه‌ای اردکان

نام زمین‌لرزه	مؤلفه	شتاب(g)	بزرگی (ریشتر)	عمق کانونی (Km)
طبس	شمالی- جنوبی	۰/۸۳۵	۷/٦	۵
	شرقی- غربی	۰/۹۲۵		
ناغان	شمالی_ جنوبی	۰/۰٦	٦/٤	۲۵
	شرقی – غربی	۰/۰۷		
بم	شمالی – جنوبی	۰/۸۱	٦/۵	۳۲
	شرقی – غربی	۰/۷		

چنان‌که اشاره شد در تحلیل حرکت نیرومند زمین در محدودهٔ بررسی شده از روش خطی معادل و نرم‌افزار ارا استفاده شد. دراین روش تحلیل دینامیکی، شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده که در حوزهٔ زمان و برای سنگ‌بستر لرزه‌ای تعریف شده‌اند با توابع فوریه به حوزهٔ فرکانس منتقل می‌شوند. هم‌چنین تابع انتقال با توجه به‌ویژگی‌های دینامیکی و فیزیکی لایه‌های خاک در فاصله بین سنگ‌بستر تا سطح زمین تعیین می‌شود. سپس شتابگاشت‌های سنگ بستر که به حوزهٔ فرکانس منتقل شده‌اند، در توابع تبدیل ضرب می‌شوند. با این روش شتاب‌نگاشت‌های

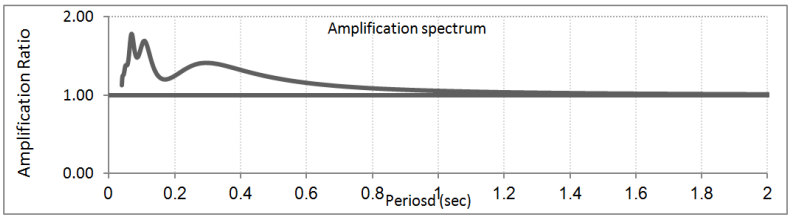
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

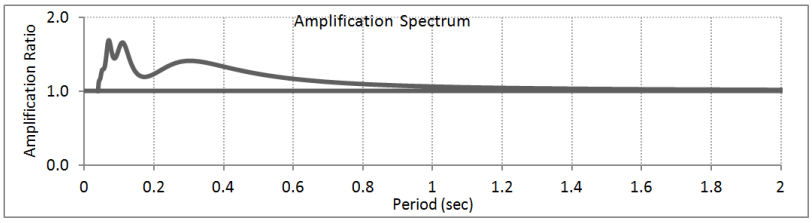
سطح زمین در حوزه فرکانس به‌دست می‌آیند. در نهایت با انتگرال‌گیری معکوس از شتاب‌نگاشت حاصل، این شتاب‌نگاشت در حوزهٔ زمان به‌دست می‌آید. با مقایسهٔ شتاب‌نگاشت سنگ‌بستر با شتاب‌نگاشت سطح زمین فرکانس تشدید و مقدار آن به‌دست می‌آید.

شکل‌های ۹ تا ۱۱ طیف پاسخ زمین را برای دوره بازگشت‌های مختلف نشان می‌دهد که پس از تحمیل حرکت ورودی باتوجه به دورهٔ بازگشت مورد نظر به سنگ‌بستر لرزه‌ای و تحت تأثیر مجموع خصوصیات فیزیکی و دینامیکی خاک که برای هر لایه مشخص شده است در پروفیل‌های مورد نظر برای سطح زمین به‌دست آمده است.

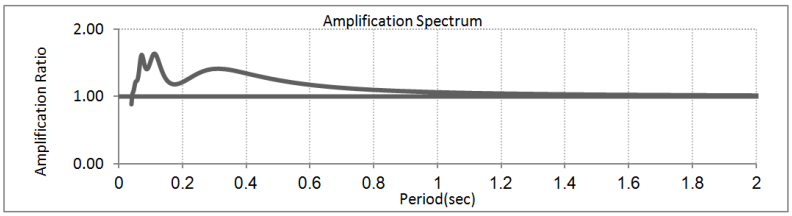
چنان‌که انتظار می‌رفت دورهٔ طبیعی به‌دست آمده در بیش‌تر قسمت‌های اردکان کم‌تر از ۰/٤ ثانیه است. در محدودهٔ پروفیل شمارهٔ ٤ واقع در بخش شمال‌شرقی اردکان دورهٔ طبیعی خاک بین محدودهٔ ۰/٤–۰/۸ ثانیه به‌دست‌آمد. که دلیل آن حضور خاک با سستی و چگالی متوسط است.



شکل۹. طیف پاسخ شتاب در پروفیل شمارهٔ ۳ با دورهٔ بازگشت ۷۵ سال



شکل۱۰. طیف پاسخ شتاب در پروفیل شمارهٔ ۳ با دورهٔ بازگشت ٤۷۵ سال



شکل ۱۱. طیف پاسخ شتاب در پروفیل شمارهٔ ۳ با دورهٔ بازگشت ۲٤۷۵ سال

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

نتیجه‌گیری

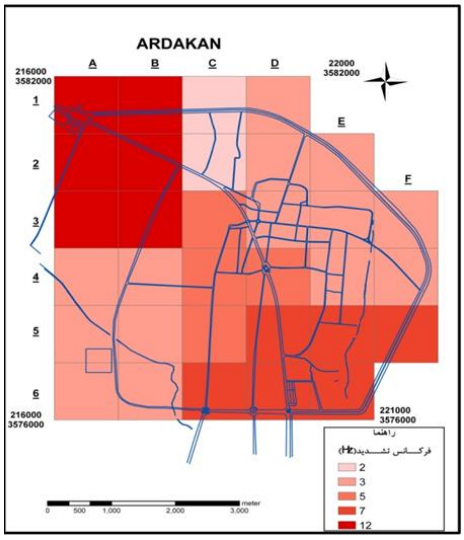
با انجام مجموع پژوهش‌های مذکور بیشینه شتاب افقی در سطح زمین، دورهٔ تشدید، دورهٔ طبیعی و دینامیکی آبرفت، نوع زمین اردکان از نظر آیین‌نامه۲۸۰۰ ایران و بیشینهٔ سرعت سطح زمین برای دورهٔ بازگشت‌های مختلف به‌دست آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش درجهٔ سستی آبرفت و ضخامت آن دورهٔ طبیعی و دینامیکی آن افزایش می‌یابد. درتمام شهر بیشینهٔ شتاب افقی به‌دست آمده برای دورهٔ بازگشت ٤٧٥ سال بیش از حداکثر شتاب طراحی که در آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ ایران برای اردکان در نظر گرفته شده است به‌دست آمد. البته از آن‌جایی که وضعیت فیزیکی و دینامیکی خاک اردکان تقریباً یک‌نواخت است، تغییرات در دورهٔ دینامیکی و طبیعی و پتانسیل بزرگ‌نمایی در بازه‌های کوچکی اتفاق می‌افتد. با وجود این بیش‌ترین مقدار تشدید و شتاب حاصل چنان‌که انتظار می‌رفت در پروفیل‌های شمارهٔ ۳ و ٤ واقع در بخش شمالی شهر به‌دست آمد. که با توجه به بررسی‌های انجام شده دلیل آن حضور خاک سست در بخش شمال‌شرقی شهر که در مرحلهٔ حفاری ژئوتکنیکی به آن برخورد شده بود، و اثر عمق سنگ بستر لرزه‌ای در این ناحیه است. هم‌چنین در پروفیل شمارهٔ ۳ سنگ‌بستر لرزه‌ای در عمق ٤٥ متری است و لایه‌های موجود بر روی سنگ‌بستر لرزه‌ای کم‌ترین چگالی را دارد که مجموع این عوامل بر روی نتایج تأثیر دارد. مجموع نتایج به‌دست آمده در محدودهٔ اردکان در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به این امر که گسترش این شهر از سمت غرب و شمال‌غرب در دستورالعمل توسعهٔ شهری قرار گرفته است و با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌منظور جلوگیری از وقوع پدیدهٔ تشدید مضاعف در ساختمان‌ها لازم است در ارتباط با ساخت و سازهای پراهمیت و حیاتی دقت لازم منظور شود و از ساخت و سازه‌هایی که فرکانس طبیعی آن‌ها با فرکانس طبیعی ساخت‌گاه مذکور برابر است جلوگیری شود و یا تدابیر لازم برای کاهش خسارات ناشی از پدیده تشدید در سازه‌ها اتخاذ گردد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ فرکانس تشدید و بیشینهٔ شتاب افقی به‌دست آمده در سطح زمین را برای محدودهٔ اردکان در واحدهای مربعی نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

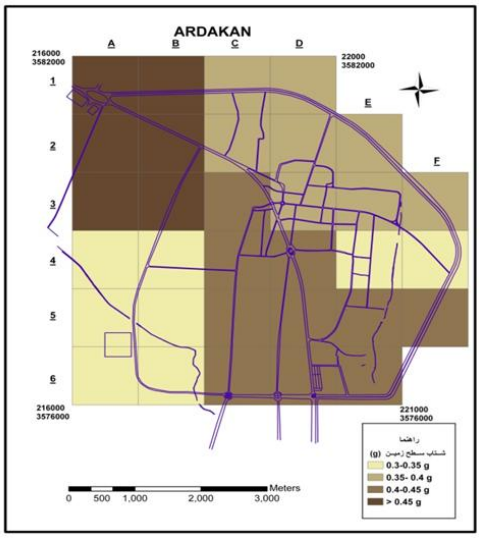
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل دینامکی انجام شده در هفت پروفیل لرزه‌ای

دورهٔ بازگشت / پروفیل لرزه‌ای	۷۵ سال			۴۷۵سال			۲۴۷۵سال			
	شتاب افقی (g)	مقدار تشدید	دورهٔ تشدید (s)	شتاب افقی(g)	مقدار تشدید	دورهٔ تشدید(s)	شتاب افقی(g)	مقدار تشدید	دورهٔ تشدید(s)	دورهٔ طبیعی(s)
پروفیل ۱	۰/۲	۱/۴۶	۰/۰۵	۰/۴	۱/۴۲	۰/۰۵	۰/۶۲	۱/۳۸	۰/۰۵	۰/۲۷
پروفیل ۲	۰/۱۹	۱/۴۲	۰/۳۱	۰/۳۴	۱/۳۸	۰/۳۳	۰/۵۱	۱/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸
پروفیل ۳	۰/۲۷	۱/۷۸	۰/۰۸	۰/۵۷	۱/۶۹	۰/۰۸	۰/۷۲	۱/۶۳	۰/۱۱	۰/۳۳
پروفیل ٤	۰/۲۳	۱/۷۷	۰/۱۱	۰/۳۷	۱/۶۹	۰/۱۲	۰/۵٤	۱/۶۵	۰/۳۵	۰/٤۸
پروفیل ۵	۰/۲۳	۱/۵۶	۰/۳۵	۰/٤۰	۱/۵۵	۰/۳۵	۰/۵۵	۱/۵٤	۰/۱	۰/٤۳
پروفیل ٦	۰/۲۱	۱/٤۹	۰/۳۸	۰/۳۵	۱/٤۲	۰/٤۱	۰/۵٤	۱/٤٤	۰/۳۸	۰/۳۸
پروفیل۷	۰/۱۹	۱/٤۰	۰/۳۵	۰/۳۲	۱/۳۹	۰/۳۵	۰/٤۸	۱/۳۵	۰/۳۸	۰/۳۸



شکل ۱۲. نقشهٔ توزیع فرکانس تشدید برای دورهٔ بازگشت ٤۷۵ سال



شکل ۱۳. نقشهٔ توزیع بیشینهٔ شتاب افقی با دورهٔ بازگشت ٤۷۵ سال

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

منابع

۱. مهرآیین آ.، تاتار م.، *مطالعهٔ اثر ساخت‌گاه در جنوب باختری تهران با استفاده از اندازه‌گیری میکروترمور*، مجلهٔ علوم زمین، سال هفدهم، شمارهٔ ٦٥ (١٣٨٦).

۲. قائم‌مقامیان م. ح، فریدونی آ.، *تحلیل آرایه‌ای میکروترمورها به‌روش ضرایب خودهم‌بستگی مکانی به‌منظور برآورد ساختار سرعتی موج برشی در جنوب خاور شهر بم*، مجلهٔ علوم زمین، سال هجدهم، شمارهٔ ۷۱ (۱۳۸۸).

3. Zagharia B., Radulina M., Popa M., Grecu B., Bala A., Tataru D., "Estimation of the local response using the Nakamura method for Bucharest area", National institute for earth physics, 12 calugareni st, Romania (2006).

4. Stewart J, P., batutay M., "uncertainty and Bias in ground motion Estimates from Ground Response Analyses", peer report, collage of Engineering University of california, Barkeley (2002) 206.

5 .Nakamura Y., "clear identification of fundamental idea of nakamura 's technique and its application", Proc. 12th word conference on Earthquake engineering, Auckland (2000).

6. Borcherdt R. D., Wentworth C. M., Janssen A., Fumal T., Gibbs J., "Methodology for predictive GIS mapping for special study zones for ground shaking in the San Francisco bay region", proc. Fourth international Conf. Seismic Zonation, 3 (1991) 545-552.

7. Medvedev S. V., "The forecast of seismic effects on constructions", Proc. Of Second world Conferense on Earth. Engineering Japan (1960).

۸. مهرنهاد ح.، *بررسی اثر شکستگی‌های دشت یزد- اردکان بر کیفیت و کمیت آب زیرزمینی دشت »*، طرح پژوهشی، دانشگاه یزد (۱۳۸۸).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]

۹. برگی خ.، *اصول مهندسی زلزله*، جهاد دانشگاهی مؤسسه انتشارات (۱۳۷۳).

۱۰. بهادری ه.، اسدزاده ق.، *بررسی پارامتریک تأثیر یک ساخت‌گاه بر پاسخ زمین با استفاده ازروش تحلیل خطی معادل*، پنجمین کنفرانس ملی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد (۱۳۸۹).

11. Yoshida N., "Applicational computer code SHAKE to nonlinear problem", In Proceeding of Symposium on amplification of ground shaking in soft ground (1994).

12. Haung HC., Shieh CS., Chiu HC, "Linear and nonlinear behaviors of soft soil layers using lotung downhole array in Taiwan", Terr atmos Acean Sci. VOL. 12 (2001).

۱۳. آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ استاندارد ملی ایران، *طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله-آیین‌کار*، تجدید نظرسوم، مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تجدید نظر سوم.

14. "Manual for zonation on seismic geotechnical hazards", technical committee for earthquake geotechnical engineering-TC4-of the International Societty for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, the Japanese Geotechnical Society (1999).

15. Leong E. C., Anand H. K., Cheong H. K., Pan T. C, "in-situ measurement of shear wave velicity at two soft soil sites in Singapore", Pacific conference on earthquake engineering (2003).

16. Seed HB., Wong R. T., Idriss I. M., Tokimatsu K, "moduli and damping for dynamic analyses of cohesionless soils", journal of geotechnical engineering, ASCE,VOL. 112, N.11 (1986)1016-1032.

۱۷. مهرنهاد ح.، ادیب ا.، *گزارشات تحلیل خطر لرزه‌ای شهر میبد*، مهندسین مشاور زمین‌ساخت ایرانیان (۱۳۸۹).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.3.2]