بررسی داده‌های سرعت موج برشی و برآورد عمق لازم برای تحلیل دینامیکی اثر آبرفت در شهر مشهد

روزبه یزدان‌فر*، ناصر حافظی‌مقدس، حسین صادقی؛
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکدهٔ علوم
محمدرضا قائمقامیان؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

تاریخ: دریافت ۹۱/٦/۲۵ **پذیرش** ۹۳/۸/۱۹

چکیده

متوسط سرعت موج برشی در سی‌متر بالایی علی‌رغم ضعف‌های متعدد در بیان دقیق ویژگی‌های دینامیکی ساختگاه هم‌چنان یکی از پارامترهای مورد اعتماد در طبقه‌بندی لرزه‌ای زمین از نظر آیین نامه‌های مختلف است. در تحقیق حاضر نتایج ارزیابی سرعت موج برشی در ۷۹ نقطه از شهر مشهد بررسی شده و روابط تجربی بین میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی خاک با عمق‌های کم‌تر به‌دست آمده است. هم‌چنین با توجه به اطلاعات پروفیل سرعت در ۷۹ گمانه مزبور و نیز داده‌های پریود تشدید موجود از شهر مشهد عمق مناسب برای تحلیل دینامیکی اثر آبرفت در محدوده شهر مشهد پیشنهاد شده است. بر این اساس عمق کاوش پروفیل سرعت لازم برای بررسی تحلیل اثر آبرفت در شهر مشهد به‌جز نواحی جنوبی و شمالی که در حاشیهٔ ارتفاعات قرار دارد بیش از ۳۰ متر است. این عمق برای بخش‌های مرکزی، شرق و شمال شرق شهر که پریود تشدید بیش از ۰/۷ ثانیه دارند به ۸۰ متر نیز می‌رسد. از این رو، عمق کاوش ۳۰ متر در شهر مشهد تنها برای طبقه‌بندی زمین از نظر آیین‌نامه مناسب است و برای تحلیل‌های تئوری نیازمند تحقیقات عمیق‌تر هستیم.

واژه‌های کلیدی: متوسط سرعت موج برشی، عمق کاوش، مشهد، استاندارد ۲۸۰۰

* **نویسنده مسئول** ro_yazdanfar@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

مقدمه

ساختارهای سرعت موج برشی نهشته‌های رسوبی از مؤلفه‌های کلیدی کنترل‌کننده جنبش‌های نیرومند زمین و خرابی‌های سازه‌ای حاصل در خلال زمین لرزه‌ها است [۱۵]. دانستن پروفیل سرعت موج برشی در یک ساختگاه برای پیش‌گیری و کاهش خطرات زمین‌لرزه ضروری بوده است و با روش‌های سنتی ژئوفیزیکی یا ژئوتکنیکی با استفاده از گمانه‌ها برآورد می‌شود [۱۷]. سرعت موج برشی در سی‌متر بالایی یکی از پارامترهایی استفاده شده در رده‌بندی لرزه‌ای زمین در اغلب آیین نامه‌ها و دستورالعمل لرزه‌ای ساختمان‌ها در دنیا است [۲]، [۲۲]. از جمله دلایل استفاده از این پارامتر این موارد را می‌توان ذکر کرد:

- عمق کاوش‌های زیرسطحی ژئوتکنیکی برای سازه‌های معمولی ۳۰ متر است.
- عمق خاک‌های مسئله‌دار نظیر خاک‌های روان‌گرا کم‌تر از ۳۰ متر است.
- بعد از عمق ۳۰ متر خاک متراکم و نسبتاً همگن است از این رو، میانگین سرعت تا ۳۰ متر مشخصه‌ای از تراکم خاک را به‌دست می‌دهد.

علی‌رغم کاربرد بسیار وسیع Vs^{30}، توافق کلی در مورد دقت آن به‌عنوان شاخص تقویت لرزه‌ای ساختگاه وجود ندارد. از جمله نقدهایی که به این پارامتر وارد است عدم قطعیت [۲۰] روش‌های مختلف برآورد آن که در خوش‌بینانه‌ترین حالت ۲۰ درصد برآورد شده [۷] و چگونگی ارتباط این پارامتر با تقویت ساختگاه است. با توجه به این‌که ۳۰ متر فوقانی غالباً کم‌تر از ۱ درصد فاصله منشأ تا ساختگاه را شامل می‌شود، بنا بر این بعید به‌نظر می‌رسد تقویت ساختگاه که پارامتر بسیار پیچیده‌ای است تنها به سرعت موج برشی در سی‌متر بالایی وابسته باشد [۱۳]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۱]. به عقیده برخی محققان میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی حتی برای ارزیابی فرکانس‌های تشدید خاک‌های با سختی متوسط برای طراحی ساختمان‌های دو الی سه طبقه نیز ممکن است کافی نباشد [۱٤] و در صورت استفاده از این معیار مقدارچشم‌گیری از تغییرات جنبش زمین ناشی از اثرات ساختگاه بدون پاسخ باقی می‌ماند [۹]، [۱۲]. از این رو، در بررسی‌های ارزیابی اثرات ساختگاهی به‌روش تئوری استفاده

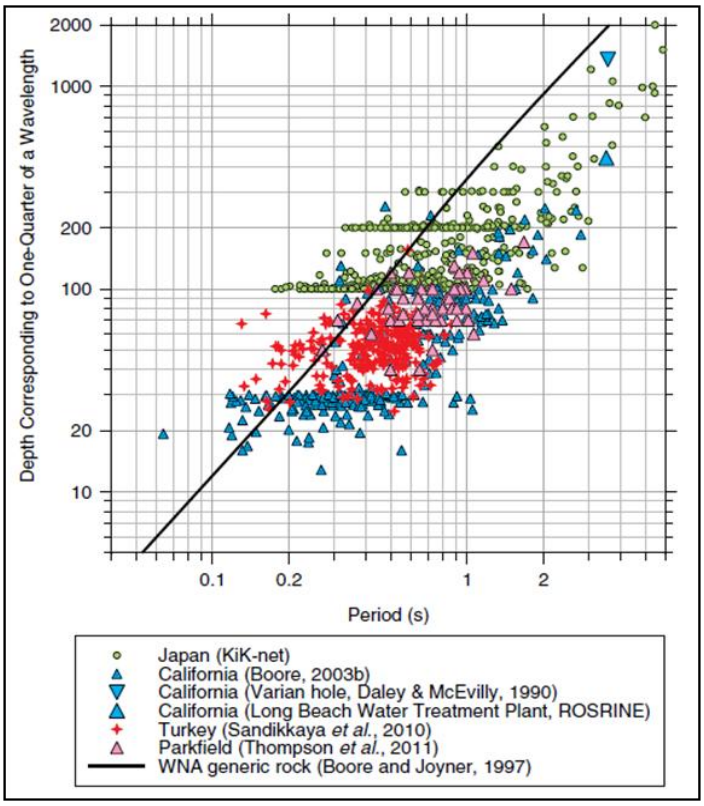
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

از ضخامت ۳۰ متر دقت لازم را ندارد و لازم است عمق مناسب آبرفت مطابق با خصوصیات ساختگاه برآورد شود.

بور و همکاران (۲۰۱۱) براساس عمق معادل یک چهارم طول موج موج برشی و پریود، بر پایه داده‌های ۵ منطقه مختلف شامل داده‌های شبکه کیوشین در ژاپن، داده‌های کالیفرنیا و ترکیه نموداری را برای برآورد حداقل عمق لازم برای حصول اطلاعاتی از تقویت ساختگاه در یک پریود مشخص ارائه کرده‌اند (شکل ۱) [۸]، [۱۱]. رسم نمودار بر اساس این فرض است که تقویت ساختگاه با سرعت‌های یک چهارم طول موج تا سطح کنترل می‌شود. مطابق این نمودار برای ساختگاه‌های با پریود حدود ۲ ثانیه، برای برآورد تقویت ساختگاه باید داده‌های سرعت تا عمق ۱۰۰ متری توسعه یابند. این مقدار برای ساختگاه‌های با پریود بین ۰/۶–۰/۲ ثانیه به سی‌متر می‌رسد.

هدف از این پژوهش بررسی آماری داده‌های پروفیل سرعت موج برشی در شهر مشهد و ارائهٔ رابطهٔ تجربی برای تعیین متوسط سرعت سی‌متر موج برشی براساس داده‌های کم عمق‌تر و نیز پیشنهاد عمق مناسب اکتشاف‌های صحرایی لازم در ارزیابی اثرهای ساختگاهی با توجه به پریود غالب ساختگاه بوده است. برای این منظور از اطلاعات برآورد سرعت موج برشی در بیش از ۷۹ نقطه از شهر مشهد و نیز نقشهٔ هم‌پریود تشدید خاک شهر مشهد مربوط به تحقیقات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای این شهر استفاده شده است. ابتدا با استفاده از روش مقایسهٔ بین مقادیر متوسط سرعت موج برشی در اعماق مختلف و مقادیر این پارامتر در عمق ۳۰ متری، رابطه‌ای برای تکمیل بانک داده‌های متوسط سی‌متر برقرار شد. سپس بر اساس عمق معادل یک چهارم طول موج امواج برشی و پریود موج عبوری در یک میانه عمودی از انتهای گمانه تا سطح زمین، حداقل عمق لازم برای کاوش متوسط سرعت موج برشی برای ارزیابی دقیق‌تر وضعیت دینامیکی ساختگاه بررسی شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]



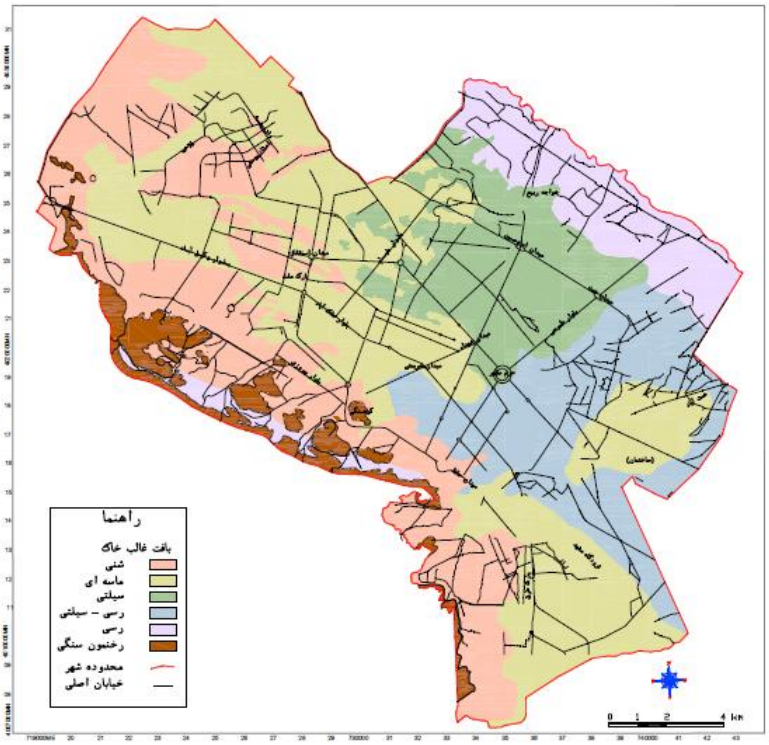
شکل ۱. رابطهٔ بین پریود و عمق معادل یک چهارم طول موج، براساس داده‌های مربوط به کشورهای مختلف [٦]، [٩]

زمین‌شناسی شهر مشهد

مشهد در منتهی‌الیه جنوب‌شرقی دشت مشهد قرار گرفته است. دشت مزبور از نظر جای‌گاه زمین‌شناسی در حد فاصل دو ایالت لرزه‌خیز ایران مرکزی و کپه داغ با شاخصه زمین‌لرزه‌های کم‌عمق (بین ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری) واقع شده است. ساختگاه شهر مشهد روی رسوبات عمیق کشف‌رود و رودخانه‌های فرعی که از ارتفاعات جنوب و جنوب غرب شهر سرچشمه می‌گیرد بنا شده است. در شکل ۲ نقشهٔ بافت خاک در مشهد نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

بافت خاک در این شهر تابعی از فاصله مسیل‌های اصلی تا ارتفاعات است. به‌طورکلی بافت خاک در سطح مشهد در سمت غرب و حاشیهٔ ارتفاعات جنوبی شن و ماسه درشت‌دانه است که به طرف مرکز شهر به ماسه و ماسه سیلتی تقلیل می‌یابد و به طرف شرق و شمال شرق به سیلت و رس تبدیل می‌شود [۳]. بیش‌ترین ضخامت این ته‌نشست‌ها حدود ۲۵۰ متر است [۳].



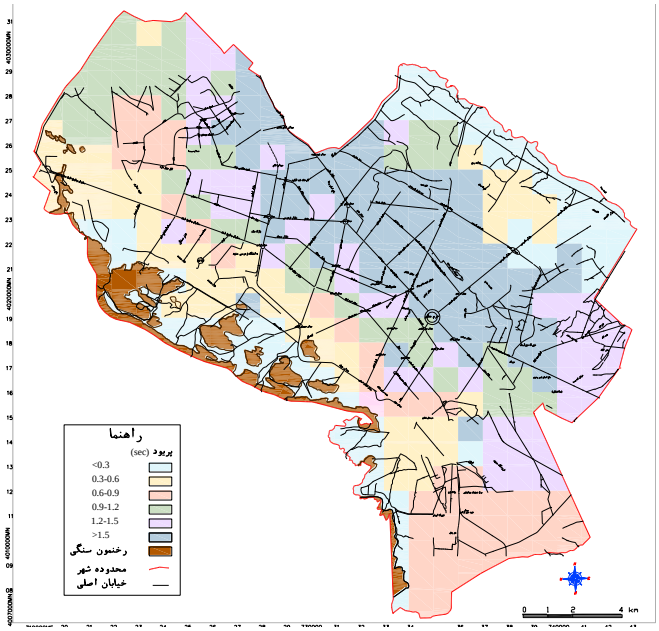
شکل ۲. نقشهٔ بافت خاک سطحی گسترهٔ مشهد [۳]

بررسی‌های ریز ارتعاش‌های تک‌ایستگاهی امروزه به‌عنوان اولین و مطمئن‌ترین راهکارها برای برآورد اثرات ساختگاهی است. پژوهش‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای مشهد در سال ۱۳۸۵ صورت پذیرفته است. به‌عنوان بخشی از این بررسی‌ها، اندازه‌گیری ریزارتعاشات تک ایستگاهی در حدود ۲۵۰ ایستگاه مستقر در نقاط مختلف این شهر صورت گرفته است [٤]. نتایج این پژوهش‌ها و دیگر بررسی‌های ریز ارتعاشات در گسترهٔ این شهر طی سالیان [۱]، [٦]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

حاکی از بلندپریود بودن (پریود بالای ۱ ثانیه) عمده ساختگاه مشهد است. با توجه به این مسئله توجه به اعماق بیش‌تر کاوش سرعت موج برشی ضروری است.

در شکل ۳ نقشه هم‌پریود آبرفت در مشهد نشان داده شده است. مطابق این نقشه، مناطق کوتاه‌پریود در بخش جنوبی شهر قرار دارد. در نواحی مرکزی و شرقی شهر به مقدار پریود افزوده می‌شودد و عمدهٔ مناطق بلند پریود در این بخش‌ها متمرکز شده‌اند. تغییرات پریود روند منظم و خاصی را نشان نمی‌دهد که می‌توان این مسئله را ناشی از تغییرات و ناهمگنی‌های زیرسطحی دانست.

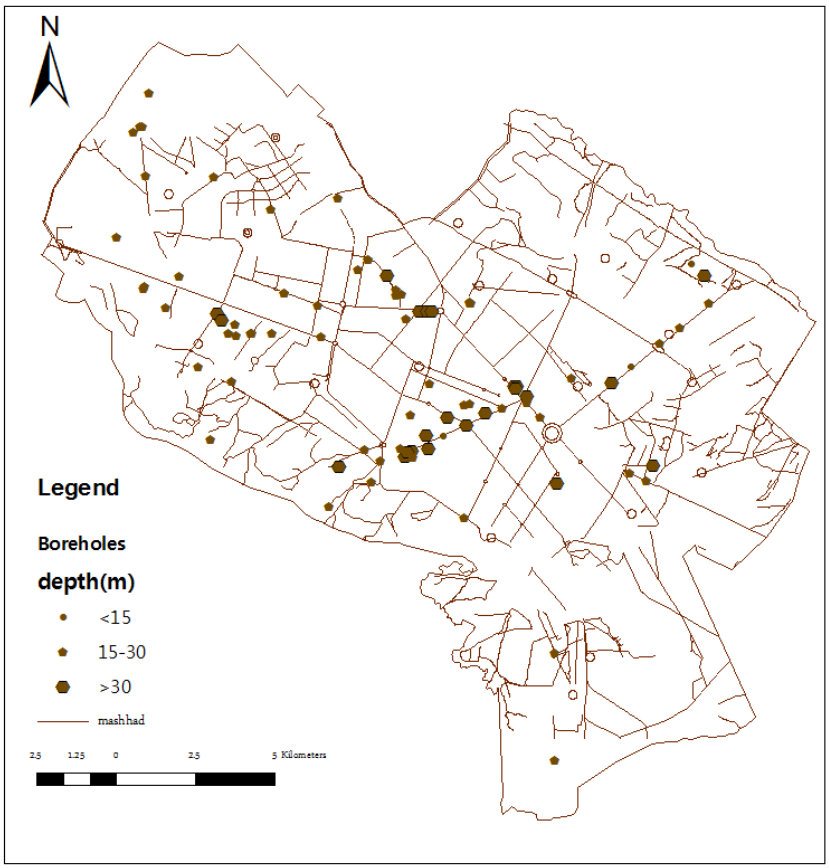


شکل ۳. نقشه هم‌پریود تشدید مشهد [٤]

بانک اطلاعات سرعت موج برشی استفاده شده

داده‌های استفاده شده شامل پروفیل سرعت در ۷۹ گمانه هستد که در نقاط مختلف شهر مشهد برای رده‌بندی لرزه‌ای ساختگاه به‌روش درون گمانه‌ای انجام شده‌اند. شکل ٤ نقشهٔ پراکندگی داده‌ها را نشان داده می‌دهد. در شکل ۵ نمودار فراوانی عمق گمانه‌ها آمده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]



شکل ٤. پراکندگی داده‌های آزمون لرزه‌ای درون گمانه‌ای استفاده شده در گسترهٔ شهر

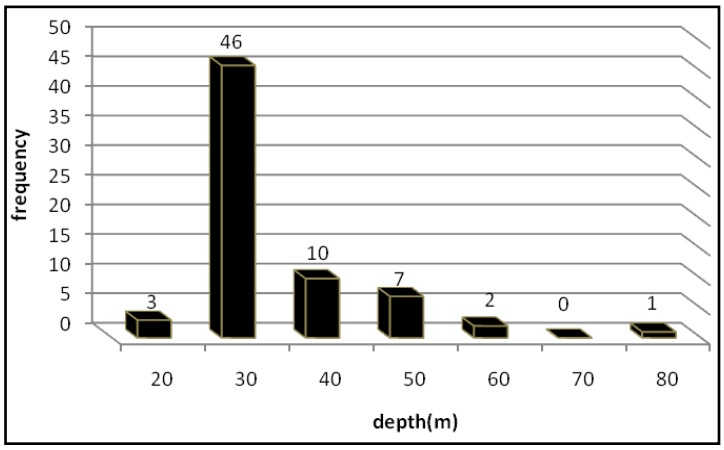
مطابق انتظار عمده فراوانی داده‌های عمق، مربوط به سی‌متر است. عمقی که متوسط سرعت موج برشی در آن ملاک رده‌بندی زمین در آیین‌نامه لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) است.

برآورد سرعت موج برشی سی‌متر از داده‌های اعماق کم‌تر

برخی از اندازه‌گیری‌های سرعت موج برشی به سی‌متر نمی‌رسند. این مسئله در حفاری‌های قدیمی‌تر بیش‌تر دیده می‌شود. هم‌چنین در ساختگاه‌هایی که اندازه‌گیری سرعت موج برشی به دلایل برخی محدودیت‌ها با روش شکست مرزی برآورد می‌شود، ممکن است عمق کاوش تا

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

حداکثر ۱۵ الی ۲۰ متری از سطح زمین محدود گردد [۸]، [۹]. به‌عنوان مثال سرعت‌های موج برشی در شبکه لرزه‌ای کیوشین (K-net) به‌جز یک استثنا به اعماق حداکثر ۱۰ الی ۲۰ متر محدودند. در کالیفرنیا بیش از ۵۰ درصد داده‌های سرعت موج برشی کم‌تر از سی‌متر است [۱۰] یا در تایوان عمده سایت‌های جنبش نیرومند زمین دارای گمانه‌های با عمق کم‌تر از سی‌متر هستند [۱۷]. برای تکمیل داده‌های سرعت موج برشی تا حداقل سی‌متر (معیار کدهای لرزه‌ای) روابط تجربی بین سرعت موج برشی داده‌های کم عمق و سی‌متر ارائه شده است [۸]، [۱۰]، [۱۱]. در پژوهش حاضر برای برآورد سرعت موج برشی سی‌متری از داده‌های کم‌تر از عمق سی‌متری روابط تجربی بین میانگین سرعت موج برشی سی‌متر و مقدار این پارامتر در عمقی به‌خصوص بررسی شده است. برای این منظور ابتدا تمامی داده‌های متوسط سرعت موج برشی مربوط به همهٔ اعماق در مقابل متوسط سرعت موج برشی سی‌متر رسم شده‌اند (شکل ٦). محور افقی متوسط سرعت موج برشی در اعماق ۲ تا ۲۸ متری و محور عمودی سرعت متوسط سی‌متر را نشان می‌دهد. خط ۱:۱ با رنگ قرمز مشخص شده است. چنان‌که انتظار می‌رود میانگین داده‌های سرعت موج برشی اعماق بیش‌تر قرابت بیش‌تری با میانگین سرعت موج برشی در سی‌متر دارند و به خط ۱:۱ مماس شده‌اند.



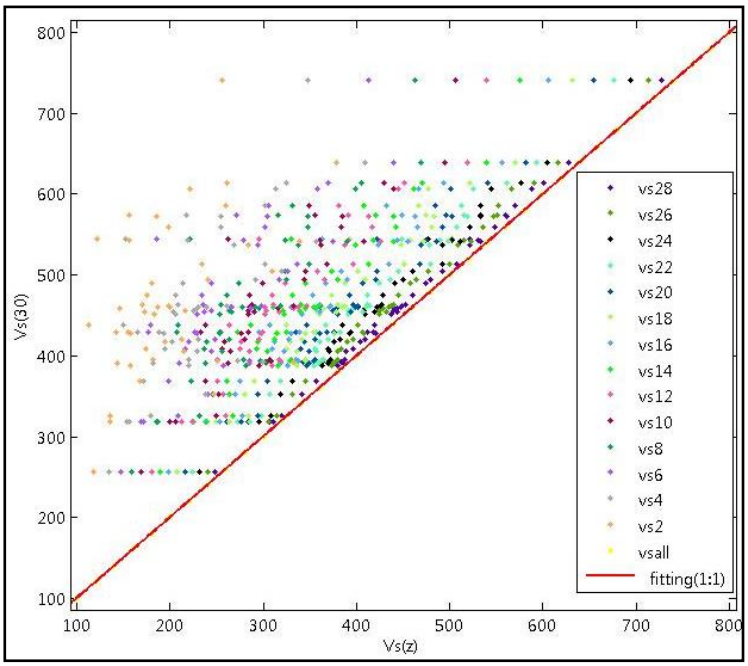
شکل ۵. نمودار فراوانی عمق داده‌های استفاده شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

برای استخراج رابطهٔ تجربی بین میانگین سرعت در اعماق کم‌تر از سی‌متر با عمق سی‌متر، میانگین سرعت موج برشی برای هر عمق در تمامی گمانه‌ها در مقابل متوسط سی‌متر این پارامتر رسم شدند. بالاترین ضریب هم‌بستگی مربوط به مدل خطی بدین‌شکل به‌دست آمد:

$$\bar{V}s(30) = a + b * \bar{V}s(z) \pm \varepsilon \quad (۱)$$

در این رابطه $\bar{V}s(30)$: متوسط سرعت موج برشی سی‌متر، $\bar{V}s(z)$: متوسط سرعت موج برشی در یک عمق خاص، ε: مقدار خطا، a: ضریب و b: ثابت رابطه هستند.



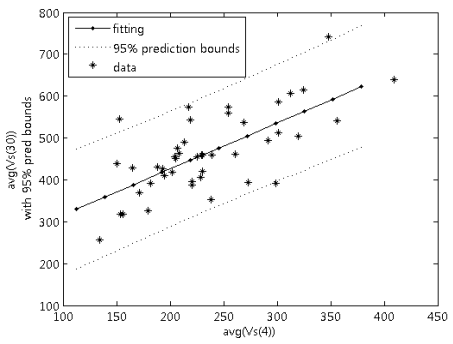
شکل ٦. متوسط سرعت موج برشی سی‌متر در مقابل سرعت موج برشی در اعماق بین ۲ الی ۲۸ متری. خط قرمز رابطه ۱:۱ داده‌ها است.

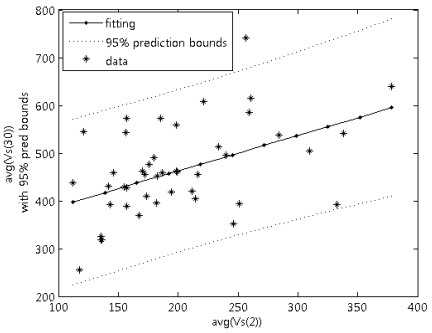
در جدول ۱ ضرایب رگرسیون و انحراف استاندارد و در شکل ۷ هم‌بستگی بین پارامترها برای اعماق مختلف نمایش داده شده است. در رسم نمودارها محدوده سطح اطمینان ۹۵ درصد برای هر عمق رسم شده است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. در شکل ۸ تغییرات خطای محاسبه و انحراف استاندارد نسبت به عمق نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

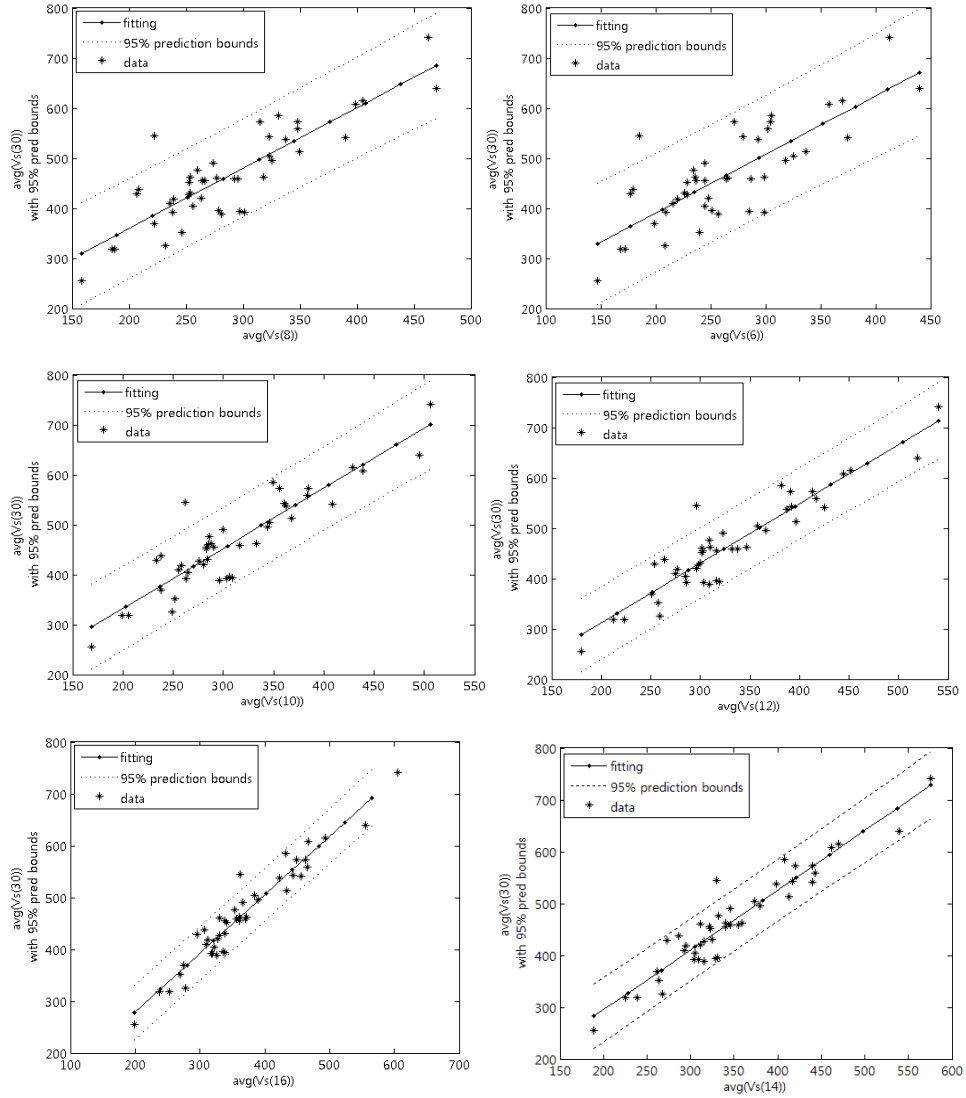
جدول۱. ضرایب رابطه بین پارامترهای مورد بحث به‌همراه ضریب هم‌بستگی، خطا و انحراف استاندارد مربوط به هر عمق

Z	a	b	ε	R^2	σ
2	0.74	314.5	83.65	0.207	0.63
4	1.098	206.5	67.35	0.486	0.39
6	1.171	156.3	57.62	0.62	0.29
8	1.207	118.2	48.03	0.735	0.21
10	1.199	93.27	40.5	0.81	0.15
12	1.182	75.68	34.36	0.866	0.12
14	1.154	64.01	29.24	0.9	0.09
16	1.129	53.76	25.04	0.928	0.07
18	1.1	45.68	21.4	0.948	0.06
20	1.08	34.33	17.73	0.965	0.05
22	1.06	27.98	13.52	0.979	0.03
24	1.04	18.96	10.17	0.988	0.02
26	1.029	12.3	6.67	0.995	0.02
28	1.015	5.865	3.6	0.998	0.01



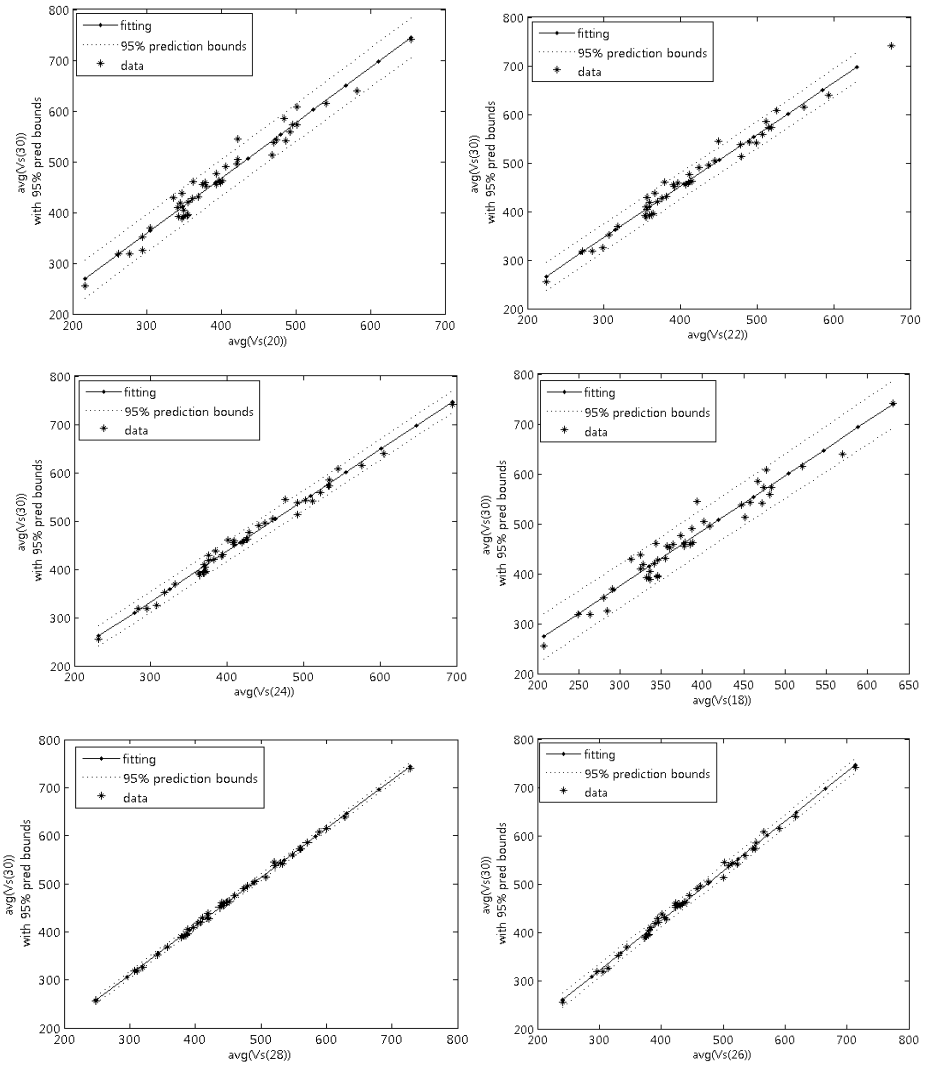


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]



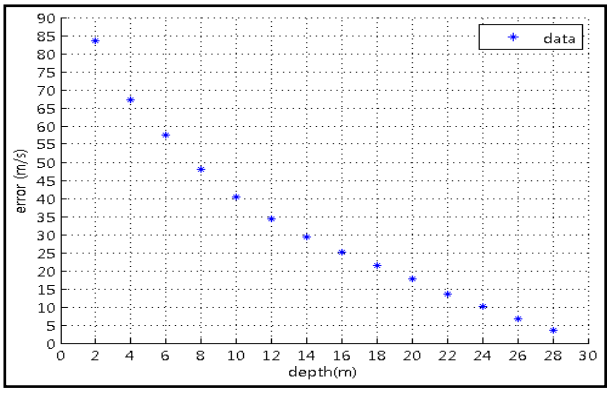
شکل ۷. برازش خط بین سرعت موج متوسط سی‌متر به‌صورت تابعی از متوسط هر عمق

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

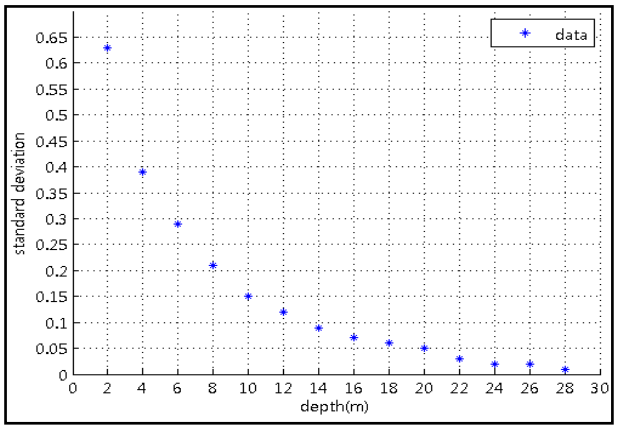


ادامه شکل ٧

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]



الف

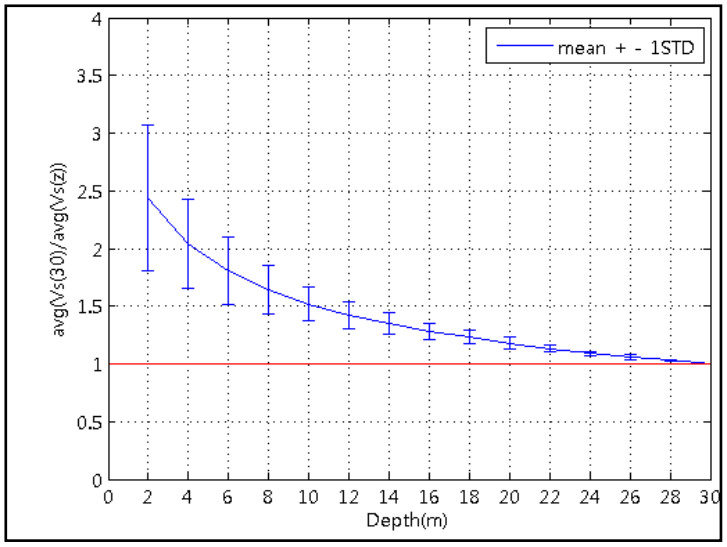


ب

شکل ۸. تغییرات خطا الف) انحراف معیار، ب) داده‌های سرعت با عمق

مطابق شکل‌های ۷ و ۸ در اعماق کم، پراکندگی داده‌ها حول خط هم‌بستگی زیاد است ولی از عمق بیش از ۱۶ متر خطای محاسبه به حدود ۳۰ متر بر ثانیه می‌رسد. ضریب هم‌بستگی ۰/۹ است و انحراف از استاندارد به زیر ۱ کاهش می‌یابد و محدودهٔ سطح اطمینان ۹۵ درصد در اطراف خط هم‌بستگی باریک شده است. در شکل ۹ رابطهٔ بین نسبت میانگین سرعت در ۳۰ متر فوقانی خاک و اعماق کم‌تر با عمق برای کل داده‌ای شهر مشهد نشان داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌گردد که تغییرات داده‌ها برای اعمق بیش از ۱۶ متر کم است از این رو، از روابط تجربی ارائه شده در شکل ۷ برای برآورد Vs_{30} استفاده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]



شکل ۹. نسبت متوسط سرعت سی‌متر به متوسط سرعت اعماق مختلف در مقابل عمق

برآورد عمق لازم برای تحلیل اثرات ساختگاه

استفاده از طبقه‌بندی لرزه‌ای زمین برای تعیین طیف ساختگاه برای سازه‌های معمولی مجاز است و برای سازه‌های بلندمرتبه و سازه‌های خاص براساس توصیه آیین‌نامه ۲۸۰۰ نیاز به پژوهشی مستقل و تعیین طیف طرح ویژه ساختگاه در سطح زمین است. روش معمول برای این منظور شامل این مراحل است:

۱. برآورد طیف طرح زلزله در سنگ کف لرزه‌ای
۲. انتخاب شتاب نگاشت‌های مناسب با شرایط تکتونیکی محدودهٔ بررسی شده
۳. مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها به طیف طرح در سنگ بستر لرزه‌ای
٤. تعیین مدل دینامیکی خاک از سطح زمین تا بستر لرزه‌ای
۵. وارد کردن نگاشت‌های مقیاس شده به مدل دینامیکی ساختگاه و به‌دست آوردن نگاشت اصلاح شده در سطح زمین
٦. و نهایتاً میانگین‌گیری از نگاشت‌های اصلاح‌شده و استخراج طیف طرح در سطح زمین است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

چنان‌که ملاحظه می‌شود برای استخراج طیف طرح، نیاز به مدل دینامیکی خاک تا سنگ بستر لرزه‌ای است. سنگ بستر لرزه‌ای افقی از زمین تعریف می‌شود که امواج زلزله در آن تقویت نمی‌شود. محققان و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مقادیر متفاوتی از سرعت موج برشی را برای تعریف بستر لرزه‌ای عنوان کرده‌اند. به‌عنوان مثال انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک (۱۹۹۹) حد 600 m/s، آیین‌نامه ساختمانی بین‌المللی(ICC, ۲۰۰۰) حد m/s ۷۶۰ و آیین‌نامهٔ لرزه‌ای ایران (آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم) سرعت ۷۵۰m/s را استفاده کرده‌اند [۵]، [٦]. در پژوهش حاضر با فرض سرعت ۷۵۰m/s برای بستر لرزه‌ای عمق اکتشاف لازم برای بررسی اثرات ساختگاهی در مشهد ارزیابی شده است. برای این منظور مطابق روش بور و همکاران (۲۰۱۱) عمل شده است. در این روش برای هر پروفیل سرعت، پریود نظیر آن و یک چهارم طول موج برشی که همان عمق بررسی است برای ۱۲۱ داده از اعماق مختلف بین ۳۰ تا ۸۰ متر تعیین شده و نتایج در شکل ۹ نمایش داده شده است. سرعت میانگین زمانی از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود:

$$\bar{V}s(z) = z/tt(z) \qquad (۲)$$

که زمان سیر (tt(z)) تا عمق z به‌وسیلهٔ رابطهٔ (۳) ارائه می‌شود:

$$tt(z) = \int_0^z \frac{dz}{V_{s(z)}} \qquad (۳)$$

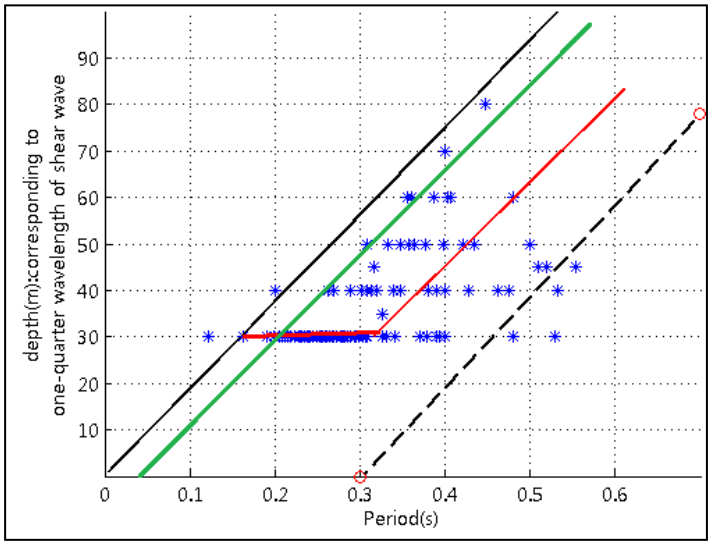
در رابطهٔ (۳)، $V_s(z)$ مدل سرعت وابسته به عمق است.

مرز بالایی داده‌ها در شکل ۹ (پریود پایین) بر مبنای رابطهٔ (۳) ترسیم شده است. مطابق این رابطه ضخامت لایه همگن خاک با میانگین سرعت ۷۵۰ متر بر ثانیه (با فرض این‌که در سرعت‌های بیش‌تر از آن اثرات ساختگاهی ناچیز باشد) برای پریودهای مختلف برآورد شده و خط مزبور ترسیم شده است. این خط حد نهایی عمق لازم برای کاوش سرعت موج برشی متناسب با پریود ساختگاه را مشخص می‌سازد. مرز پایینی (خط‌چین سیاه‌رنگ) براساس داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در مشهد و به موازات خط تئوری رسم شده و حداقل عمق لازم برای ارزیابی اثرات ساختگاهی را تعیین می‌کند. با توجه به کمبود داده در اعماق بیش از ۳۰ متر میانگین‌گیری از داده‌ها با خطا همراه است از این رو، به‌جای استفاده از میانگین داده‌ها،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

میانگی دو خط تئوری و خط ترسیم شده به‌موازات آن (خط قرمز) نمودار پیشنهاد در پژوهش حاضر است. منحنی خط چین برازش پیشنهادی بور و همکاران(۲۰۱۱) ارائه شده در شکل ۱ است.

مطابق منحنی پیشنهادی برای محدودهٔ پریودی کم‌تر از ۰/۳۳ ثانیه یا فرکانس تشدید بیش از ۳، عمق سی‌متر یا کم‌تر از آن به‌شرط رسیدن به سنگ کف زمین‌شناسی کفایت می‌کند و بعد از پریود ۰/۳۳ ثانیه عمق لازم کاوش با افزایش پریود به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به منحنی مزبور و نقشهٔ هم‌پریود تشدید مشهد (شکل ۳)، برای بخش عمدهٔ مشهد که پریود بالای ۰/۳۳ ثانیه دارند عمق اکتشاف برای ارزیابی اثرات ساختگاهی بیش از ۳۰ متر است و برای بخش‌های مرکزی به ۱۰۰ متر نیز می‌رسد. این منحنی از این جهت اهمیت دارد که معمولاً مهندسان طراح عمق گمانه‌های اکتشافی را براساس ارتفاع سازه و توزیع بار در پی تعیین می‌کنند و از همان گمانه‌ها برای ارزیابی اثرات ساختگاهی استفاده می‌شود. بعضاً عمق ۳۰ متر که مربوط به رده‌بندی خاک از نظر آیین‌نامه است با عمق لازم برای ارزیابی اثرات ساختگاهی اشتباه می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار عمق در مقابل پریود برای تعیین عمق مناسب کاوش سرعت موج برشی و حدود بالا و پایین آن، خط سبزرنگ برازش بور و همکاران(۲۰۱۱) است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا براساس داده‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای موجود از مشهد روابط تجربی بین متوسط سرعت در هر عمق با متوسط سرعت در سی‌متر فوقانی خاک ارائه شد. نتایج این هم‌بستگی‌ها حاکی از ارتباط مناسب بین پارامترهای بحث شده از عمق ۱۶ متر به بعد است. سپس بر اساس پروفیل‌های سرعت موج برشی موجود در نقاط مختلف شهر رابطهٔ بین عمق و پریود خاک برآورد شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که برای ارزیابی اثرات ساختگاهی در مشهد به‌خصوص بخش‌های مرکزی، شرق و شمال‌شرق شهر(داده‌های استفاده شده در تحقیق نیز عمدتاً مربوط به این مناطق است) که براساس بررسی‌ها ریز ارتعاشات تک ایستگاهی دارای پریود تشدید بالا است بسیار بیش‌تر از سی‌متر است. با استفاده از نقشه هم‌پریود تشدید مشهد حاصل بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای این شهر و گراف ارائه شده در این پژوهش حداقل عمق اکتشاف ژئوتکنیکی برای بخش‌های مختلف شهر به‌خصوص را می‌توان برآورد کرد.

منابع

۱. اکبری مجید، *ارزیابی اثرات ساختگاهی در شرق شهر مشهد با استفاده از مشاهدات میکروترمور*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۶).

۲. *راهنما و تفسیر آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله و مهندسی زلزله + آئین‌نامه۲۸۰۰*، ویرایش سوم، فراز اندیشان سبز (۱۳۸۵).

۳. حافظی‌مقدس ناصر، *ریزپهنه بندی لرزه‌ای مشهد*، جلد اول گزارش زمین‌شناسی مهندسی. سازمان مسکن و شهرسازی خراسان رضوی (۱۳۸۶).

٤. حافظی‌مقدس ناصر، *ریزپهنه بندی لرزه‌ای مشهد*، جلد پنجم گزارش اثرات ساختگاهی شهر مشهد. سازمان مسکن و شهرسازی خراسان رضوی (۱۳۸۶).

۵. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، *آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم*، وزارت مسکن و شهرسازی (۱۳۸٤).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

٦. یزدان‌فر روزبه، *ارزیابی پریود غالب ساختگاه در غرب مشهد با استفاده از مایکروترمورها*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸٦).

7. Asten M.W., Boore D. M., "Comparisons of shear-wave slowness in the Santa Clara Valley, California", using blind interpretations of data from invasive and non-invasive methods. Bulletin of the Seismological Society of America 98, 1, (2005) 983-2, 003.

8. Boore D.M., Thompson E.M., Cadet H., "Regional correlations of vs30 and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters", Seismol, Soc. Am. 101 (2011) 3046-3059.

9. Boore D.M.Z., "Estimating V S30 (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths <30m)", Bull. Seismol, Soc. Am. 94 (2004b) 591-597.

10. Boore D.M., "A compendium of P- and S-wave velocities from surface-to-borehole logging: Summary and reanalysis of previously published data and analysis of unpublished data", U.S. Geol. Surv. Open-File Report 03 (2003b).

11. Boore D.M., Thompson, E.M., Cadet H., "Regional correlations of vs30 and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters", 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion. August 23-26 (2011) University of California Santa Barbara.

12. Bragato P.L., "Limits for the improvement of ground-motion relations in Europe and the Middle East by accounting for site effects", Bull. Seismol, Soc. Am. 98 (2008) 2061-2065.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

13. Castellaro S., Mulargia F., Rossi P.L., "VS30: Proxy for seismic amplification?", Seismol. Res. Lett. 79 (2008) 540-543.
14. Castellaro S., "The VFZ Matrix: simplified seismic soil classification from a different perspective. ESG4", Santa Barbara (CA, USA), (2011), 23-26 August (2011).
15. Dobry R., Borcherdt R.D., Crouse C.B., Idriss I.M., Joyner W.B., Martin G.R., Power M.S., Rinne E.E., Seed R.B., "New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions", Earthq. Spectra 16 (2000) 41-67.
16. ICC, "International building code", International Code Council (2000).
17. Kou C.H., "Study and application of microtremor characteristics", Ph.D thesis (2009).
18. Lee V.W., Trifunac M.D., "Should average shear-wave velocity in the top 30m of soil be used to describe seismic amplification?", Soil Dynam. Earthq. Eng. 30 (2010) 1250-1258
19. Moss R.E.S., "Quantifying measurement uncertainty associated with thirty meter shear wave velocity (VS30)", Bull. Seismol. Soc. Am. 98 (2008) 1399-1411.
20. Mulargia F., Castellaro C., "Experimental Uncertainty on the Vs (z) Profile and Seismic Soil Classification", Seismol. Res. Lett. 80 (2009) 985-988.
21. Mucciarelli M., Gallipoli M.R., "Comparison between VS30 and other estimates of site amplification in Italy", Paper No. 270, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, a Joint Event of

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]

the 13th European Conference on Earthquake Engineering and 30th General Assembly of the European Seismological Commission, Geneva, Switzerland, 3–8 September 2006, available from http://www.earth-prints.org/handle/2122/1945 (last accessed July 2011).

22. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (1997) Washington, DC: Building Seismic Safety Council (1997).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.8.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3207]