ارزیابی ضخامت آبرفت در شهر مشهد بر اساس بررسی‌های میکروترمور

ناصر حافظی مقدس: دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
محمدرضا قایمقامیان: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله

تاریخ: دریافت ۸۶/۱۱/۲۸ **پذیرش** ۸۸/۶/۲۳

چکیده

در پژوهش حاضر بر اساس تحلیل نتایج بررسی‌های میکروترمور در ۲۰۰ نقطه از شهر مشهد به‌روش نسبت طیفی و اطلاعات پروفیل سرعت موج برشی در ۶۲ نقطه رابطهٔ توانی $h = 82\,fr^{-0.6}$ بین پریود تشدید و ضخامت آبرفت در شهر مشهد به‌دست آمده و بر مبنای آن نقشه هم‌ضخامت آبرفت و مقاطع عرضی از شرایط زیر سطحی شهر تهیه شده است. با توجه به رابطهٔ مذکور، حداکثر ضخامت آبرفت در جنوب شرق شهر حدود ۲۰۰ متر به‌دست آمده است. ضخامت آبرفت به‌طرف ارتفاعات جنوب و جنوب‌غرب و هم‌چنین به‌طرف گسل شمال مشهد در محدودهٔ خواجه ربیع کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خردلرزه‌سنجی، نسبت طیفی، پریود تشدید، ضخامت آبرفت، شهر مشهد

مقدمه

در سال‌های اخیر بررسی‌های میکروترمور علاوه بر برآورد فرکانس تشدید و ضریب بزرگ‌نمایی آبرفت کاربردهای متعدد دیگری نیز پیدا نموده است که از جمله آن‌ها تخمین ضخامت خاک نرم فوقانی و شناسایی ساختمان‌های زمین‌شناسی است(Arai and Yamazki, 2002 Asten,2004 Seht and Wohlenberg,1999، Delgado,et al,2000، Toshinawa et al., 2003) ارزیابی دقیق ساختمان‌های زمین‌شناسی معمولاً بر اساس روش برداشت شبکه‌ای میکروترمور و با استفاده از حل معکوس صورت می‌گیرد. برآورد ضخامت آبرفت سطحی در

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

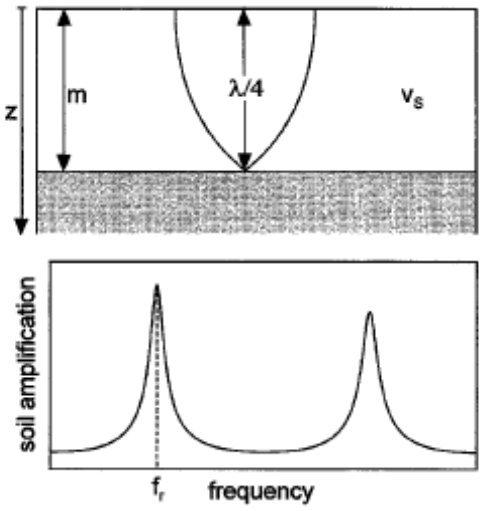
شرایطی که نهشته‌های زیر سطحی نسبتاً همگن باشند با استفاده از روش نسبت طیفی با دقت مناسبی امکان‌پذیر است. به‌صورت تئوری رابطهٔ زیر بین فرکانس تشدید (fr) و ضخامت آبرفت (Z) وجود دارد:

$$fr = \frac{Vs}{4Z} \qquad (۱)$$

این رابطه Vs میانگین سرعت موج برشی است. Seht & Wohlenberg(۱۹۹۹) با استفاده از مدل ساده دو لایه متشکل از سنگ بستر و رسوبات فوقانی با ضخامت m رابطهٔ تئوری(۲) را بین ضخامت آبرفت و فرکانس تشدید خاک ارائه کردند (شکل ۱).

$$Z = \left[\frac{Vs(1-x)}{4fr} + 1\right]^{\frac{1}{1-x}} - 1 \qquad (۲)$$

در رابطهٔ فوق Vs سرعت موج برشی سطحی برحسب متر بر ثانیه، x عمق مورد نظر به متر و fr فرکانس تشدید به هرتز است.



شکل ۱. مدل سادهٔ مورد استفاده در رابطهٔ (۱)

محققان یاد شده برای منطقه‌ای در حاشیهٔ رودخانهٔ راین در آلمان رابطهٔ زیر را بین دو پارامتر ضخامت آبرفت و فرکانس تشدید براساس روش نسبت طیفی پیشنهاد کردند.

$$h = 96\,fr^{-1.388} \qquad (۳)$$

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

همچنین پارواوی و همکارانش (۲۰۰۲) برای ناحیه کلوژن[۱] آلمان رابطهٔ زیر را به‌دست آوردند:

$$h = 108\, fr^{-1.551} \qquad (۴)$$

دلگادو[۲] و همکاران (۲۰۰۰) نیز رابطهٔ توانی زیر را بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیک و ژئوتکنیک در درهٔ رودخانهٔ سگورا[۳] اسپانیا ارائه کردند:

$$h = 55.11\, fr^{-1.256} \qquad (۵)$$

در پژوهش حاضر با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی و ژئوسایسمیک در ۶۲ نقطه از شهر مشهد که برداشت میکروترمور نیز در آن‌ها انجام شده، رابطهٔ سرعت موج و فرکانس تشدید به‌دست آمده و بر مبنای آن نقشه هم ضخامت آبرفت در محدودهٔ شهر تهیه شده است.

زمین‌شناسی و بافت خاک

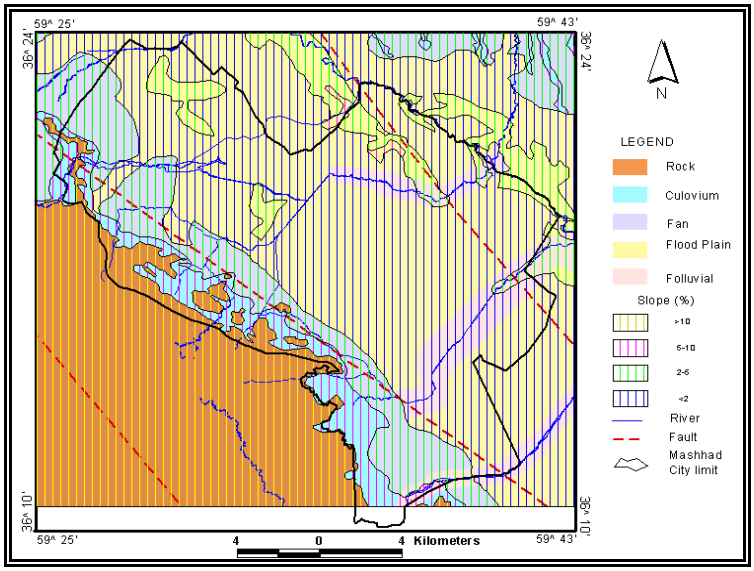
کلان شهر مشهد با وسعت حدود ۳۲۰ کیلومتر مربع، دارای جمعیت ساکن بیش از ۲/۵ میلیون نفر و جمعیت زائر و گردش‌گر حدود ۱۲ میلیون نفر در سال است. از نظر زمین‌شناسی شهر مشهد در حد فاصل بین دو پهنهٔ زمین ساختی کپه داغ در شمال و بینالود در جنوب قرار دارد. در ارتفاعات جنوب مشهد سنگ‌های مافیک و الترامافیکی رخ‌نمون یافته‌اند. در سمت غرب و جنوب‌غرب رخ‌نمون‌های دگرگونی اسلیت و فیلیت وجود دارد. دشت مشهد بین دو گسلهٔ فعال و کواترنری جنوب و شمال مشهد قرار گرفته است. گسلهٔ تراستی جنوب مشهد با روند شمال‌غرب- جنوب شرق حد بین کوه و دشت در جنوب مشهد را تشکیل می‌دهد. ادامهٔ گسلهٔ مذکور به‌طرف شمال‌غرب گسل چناران را تشکیل می‌دهد و ادامهٔ جنوب‌شرقی گسل بعد از دشت مشهد نامشخص است. در شمال دشت نیز گسلهٔ کواترنری شمال مشهد قرار دارد. این گسله شاخه‌ای از گسل کشف رود است که از گوشهٔ شمالی شهر در محدودهٔ خواجه ربیع و گل‌شهر عبور می‌کند (حافظی مقدس ۱۳۸۵).

۱.Cologne ۲.Delgado ۳.Segura

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

رسوبات بستر شهر مشهد از نظر منشأ به سه گروه الف) نهشته‌های دامنه‌ای (کلوویم) ب) نهشته‌های دشت سیلابی ج) نهشته‌های مخروط افکنه‌ای تقسیم می‌شود (شکل۲). نهشته‌های دامنه‌ای و مخروط افکنه عمدتاً به‌صورت شن و ماسه در حاشیه ارتفاعات جنوبی، جنوب‌غربی و محل خروجی آب‌راهه‌ها در غرب و جنوب‌غرب شهر وجود دارد. بخش عمدهٔ شهر مشهد پوشیده از رسوبات دشت سیلابی مربوط به آب‌راهه‌های فرعی است که از دامنه‌های جنوبی و جنوب‌غربی سرچشمه می‌گیرند. بافت خاک از غرب به شرق و همچنین از سطح به طرف عمق ریزدانه می‌شود(شکل۳).



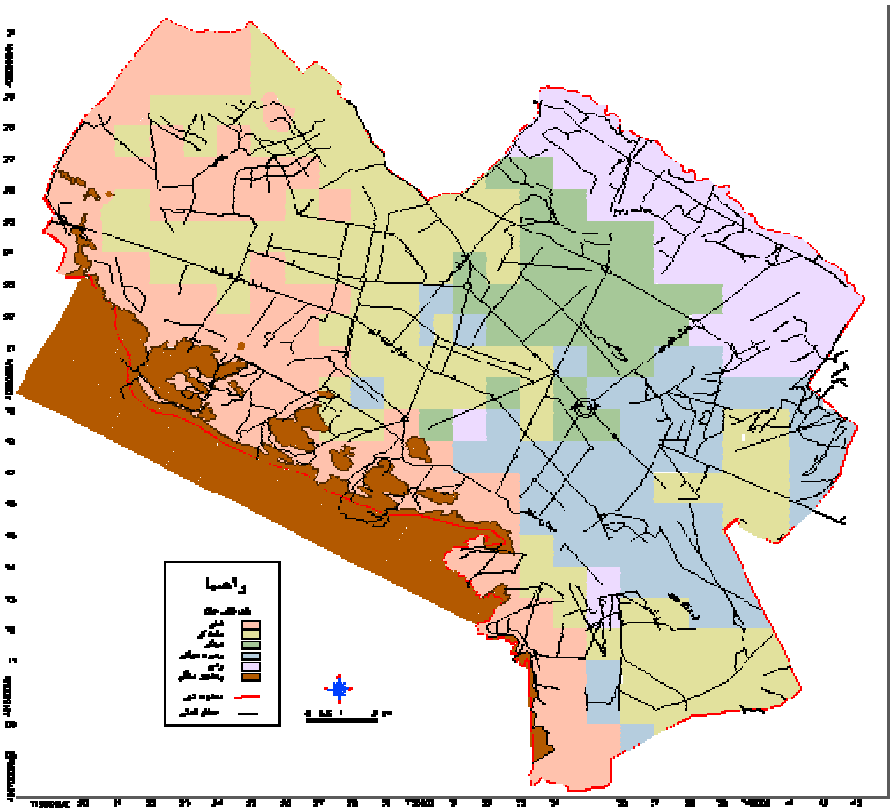
شکل۲. نقشهٔ پهنه‌بندی شهر مشهد از نظر محیط رسوبی (حافظی مقدس ۱۳۸۶)

بررسی‌های ژئوتکنیک و ژئوفیزیک

به‌منظور شناخت وضعیت زیرسطحی خاک در سطح شهر مشهد ابتدا اطلاعات ۶۰۰ گمانهٔ اکتشافی مربوط به پروژه‌های مختلف انجام شده در سطح شهر گردآوری شده است. سپس در ۲۰ نقطه که هیچ‌گونه اطلاعاتی از آن‌ها موجود نبوده و یا این‌که گمانه‌ها کم عمق بوده‌اند گمانهٔ اکتشافی تا عمق ۴۰ متر حفاری شده است. در داخل گمانه‌های مذکور آزمایش‌های عدد نفوذ استاندارد (SPT) و اندازه‌گیری سرعت موج برشی و طولی (down hole) در هر دو

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

متر عمق گمانه صورت گرفته است (آزادی، ۱۳۸۵). هم‌چنین برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مقاومتی نمونه‌های خاک از آن‌ها نمونه‌گیری دست‌خورده و دست‌نخورده صورت گرفته است (حافظی مقدس و نیکودل ۱۳۸۵).



شکل۳. بافت خاک سطحی در سطح شهر مشهد

ارزیابی پریود تشدید آبرفت

ارزیابی پریود تشدید خاک به دو روش نسبت طیفی امواج خردلرزه‌ای و روش تئوری خطی معادل تعیین شده است. عملیات برداشت امواج خردلرزه‌ای در ۲۰۰ نقطه از شهر مشهد با استفاده از دستگاه سه‌مؤلفه‌ای (Kinematics) از نوع SSR-1 انجام شده است. فرکانس طبیعی این لرزه سنج‌ها ۱ هرتز و با میرایی طبیعی ۰/۷ هستند. اندازه‌گیری‌ها در مدت زمان

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

حداقل ۲۰ دقیقه و با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه انجام گرفته است. نگاشت‌های ثبت شده ابتدا برای خطای دستگاهی، خطای فاصله از خط مبدأ و نیز خطای حاصل از مدوله شدن فرکانس‌های پایین بر سیگنال تصحیح و پردازش شدند. برای این منظور از نرم افزار Matlab و Pitsa استفاده شده است. سپس طیف فوریه مؤلفه‌های مختلف محاسبه و با پنجرهٔ صاف‌کننده از نوع Parzen در بازهٔ ۰/۴ هرتز صاف شده است. در هر نقطه اندازه‌گیری، نگاشت‌های ثبت شده به حداقل ۳۰ پنجرهٔزمانی ۴۰ ثانیه‌ای تقسیم شده و محاسبات فوق برای هر پنجره و هر مؤلفه (شرقی- غربی، شمالی-جنوبی و عمودی) تکرار شده است. سپس نسبت طیفی H/V برای پنجره‌های زمانی مختلف به‌دست آمده و میانگین محاسبه شده به‌عنوان تابع بزرگ‌نمایی ساخت‌گاه در آن نقطه منظور شده است. در روش تئوری نیز با استفاده از برنامه پروشیک (Proshake) تابع بزرگ‌نمایی آبرفت در ۶۲ نقطه که اطلاعات پروفیل سرعت موج برشی در آن‌ها به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شده یا با استفاده از روابط تجربی Vs-N برآورد شده به دست آمده است. در محاسبات تئوری سنگ کف لرزه‌ای لایه با سرعت بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است (حافظی‌مقدس و قایمقامیان، ۱۳۸۵). در شکل ۴ موقعیت گمانه‌های اکتشافی و نقاط برداشت میکروترمور نشان داده شده است.

طبقه‌بندی توابع بزرگ‌نمایی به‌روش نسبت طیفی

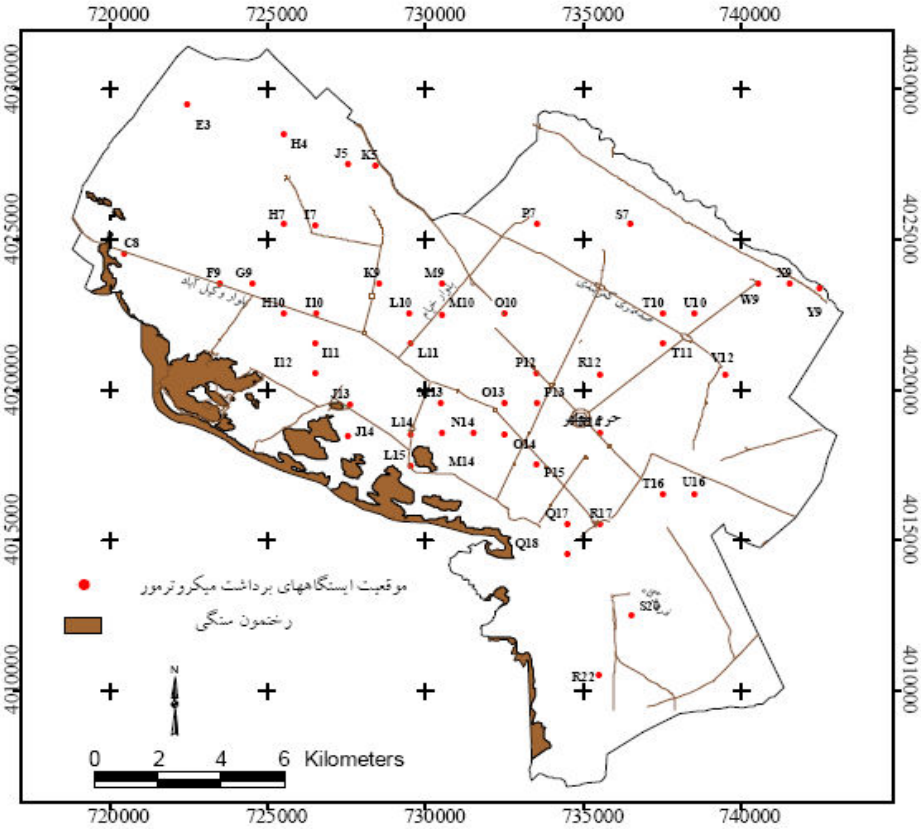
توابع بزرگ‌نمایی به‌دست آمده در ۲۰۰ نقطه از شهر با توجه به تغییرات بافت، ضخامت خاک و موقعیت نقطهٔ برداشت نسبت به لبه‌های حوزهٔ رسوبی طبیعتاً دارای فرم‌های متفاوت هستند. در منحنی‌های نسبت طیفی علاوه بر اوج اصلی معمولاً اوج فرعی دیگری نیز مشاهده می‌شود (شکل۵). در این بررسی براساس وضعیت پیک اصلی و پیک‌های فرعی توابع بزرگ‌نمایی به‌صورت زیر طبقه‌بندی شده‌اند.

الف) بر اساس کیفیت و موقعیت نقطهٔ اوج پنج گروه A) اوج اصلی کم‌تر از ۱ هرتز، B) اوج اصلی بین ۵-۱ هرتز، C) اوج اصلی بین ۱۰-۵ هرتز، D) اوج اصلی بیش از ۱۰ هرتز، E) فاقد اوج شاخص تقسیم شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

ب) بر اساس نقطه اوج دوم نیز پنج رده، a) اوج دوم کم‌تر از ۱ هرتز, b) اوج دوم بین۱ تا ۵ هرتز , c) اوج دوم بین ۵ تا ۱۰ هرتز, d) اوج دوم بیش از ۱۰ هرتز و e) فاقد اوج دوم مشخص طبقه‌بندی شده است.



شکل۴. ایستگاه‌های برداشت میکروترمور گمانه‌های اکتشافی

نتایج حاصل از طبقه‌بندی در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس نقشهٔ مزبور، این مناطق در شهر مشهد قابل شناسایی و تفکیک‌اند:

الف. مناطق حاشیهٔ ارتفاعات جنوبی: تابع بزرگ‌نمایی در این محدوده عمدتاً در گروه Ba قرار دارد. به‌طور استثنا گروه Bc یا Bd نیز مشاهده می‌شود. به‌نظر می‌رسد در این مناطق اوج دوم مربوط به اثر لبهٔ حوزهٔ رسوبی است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

ب. محدودهٔ جنوب‌غربی: در این مناطق پیک اصلی بین ۱ تا ۳ هرتز است و پیک دوم دارای فرکانس بالاتری است و عموماً در ردهٔ خاک Bc، Bd یا Be قرار دارد.

ج. بخش شمالی و شمال‌شرقی: در این محدوده تابع بزرگ‌نمایی عموماً در گروه Bd قرار گرفته است.

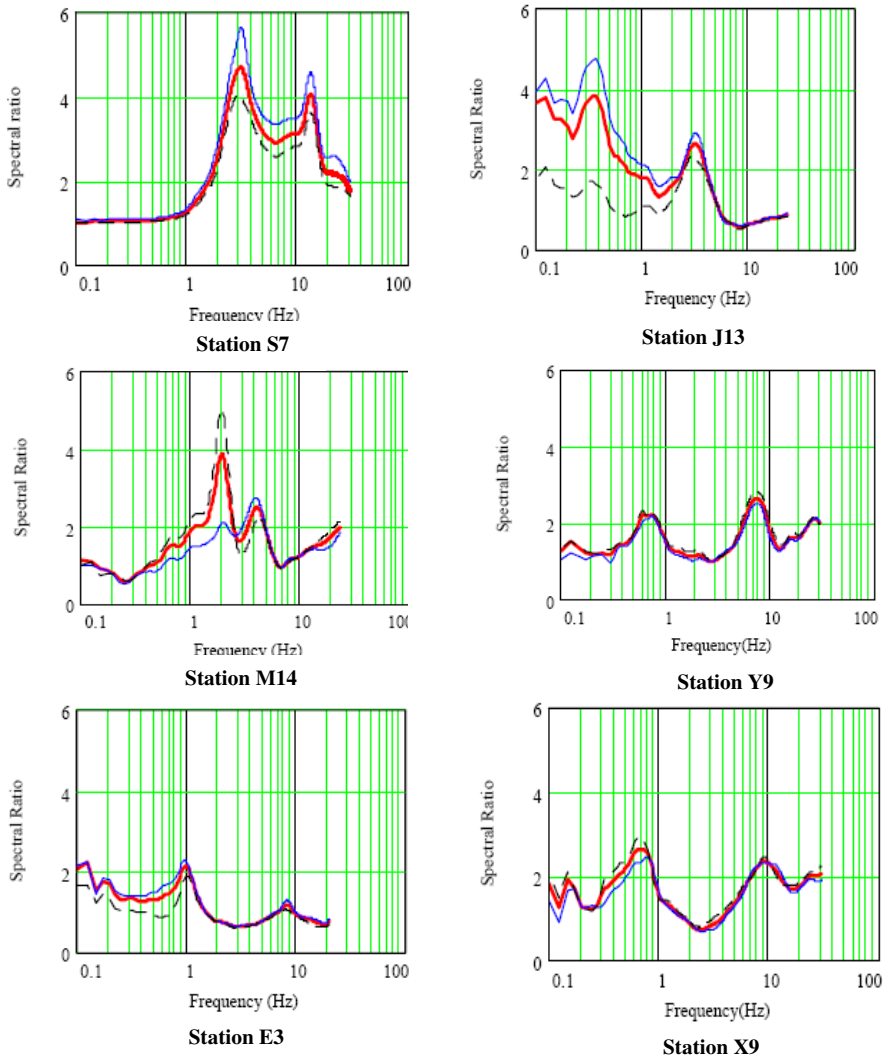
د. بخش مرکزی: از نظر پیک اصلی عموماً در رده A قرار می‌گیرند که نشان‌دهندهٔ ضخامت زیاد رسوبات در این بخش است. رده‌های خاک قابل مشاهده نیز شامل Ac و Ab است.

مقایسهٔ نتایج میکروترمور و تحلیل تئوری خطی معادل

در جدول۱ پریود تشدید به‌دست آمده به دو روش نسبت طیفی و تحلیل تئوری خطی معادل با استفاده از نرم‌افزار پروشیک (Proshake) در برخی از ایستگاه‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل در غالب ایستگاه‌ها تفاوت زیادی با هم نشان می‌دهند. در ایستگاه‌های واقع در نزدیک دامنهٔ ارتفاعات که ضخامت آبرفت کم و گمانه‌های اکتشافی ژئوتکنیک تا سنگ کف ادامه یافته معمولاً هم‌خوانی نتایج مناسب است (شکل۷). در جدول۲ مشخصات ژئوتکنیکی ایستگاه‌هایی که نتایج میکروترمور و پروشیک تقریباً مشابه هستند، نشان داده شده است. بررسی‌های ژئوتکنیک انجام شده در شهر مشهد تا عمق حداکثر ۴۰ متر انجام گرفته و معمولاً در حدود همین عمق نیز سرعت موج برشی بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه بوده است. ضخامت آبرفت در مرکز و شرق شهر چندین برابر این عمق است و با توجه به این‌که نتایج میکروترمور مربوط به کل پروفیل خاک است برای بخش‌های مرکزی و شرق مشهد هم‌خوانی بین اوج اصلی در این دو روش وجود ندارد. اما در برخی از ایستگاه‌ها پریود تشدید مربوط به اوج دوم میکروترمور نزدیک به پریود اوج پروشیک است (شکل۵). اوج دوم میکروترمور معمولاً دارای فرکانس بالاتر از فرکانس تشدید اصلی است و علت اصلی آن وجود یک لایه سطحی با سرعت زیاد بر روی نهشته‌های زیرین است.

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

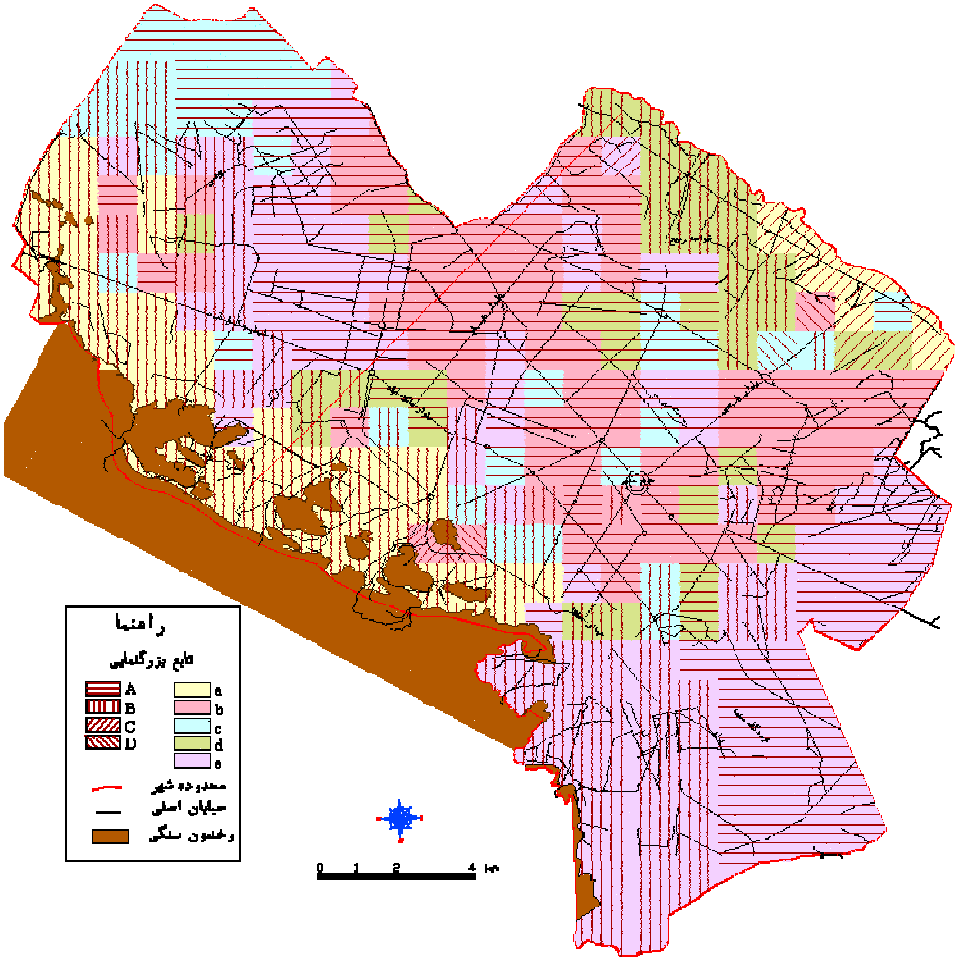
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]



شکل ۵. توابع نسبت طیفی در برخی از ایستگاه‌ها که دارای دو نقطهٔ اوج مهم هستند

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

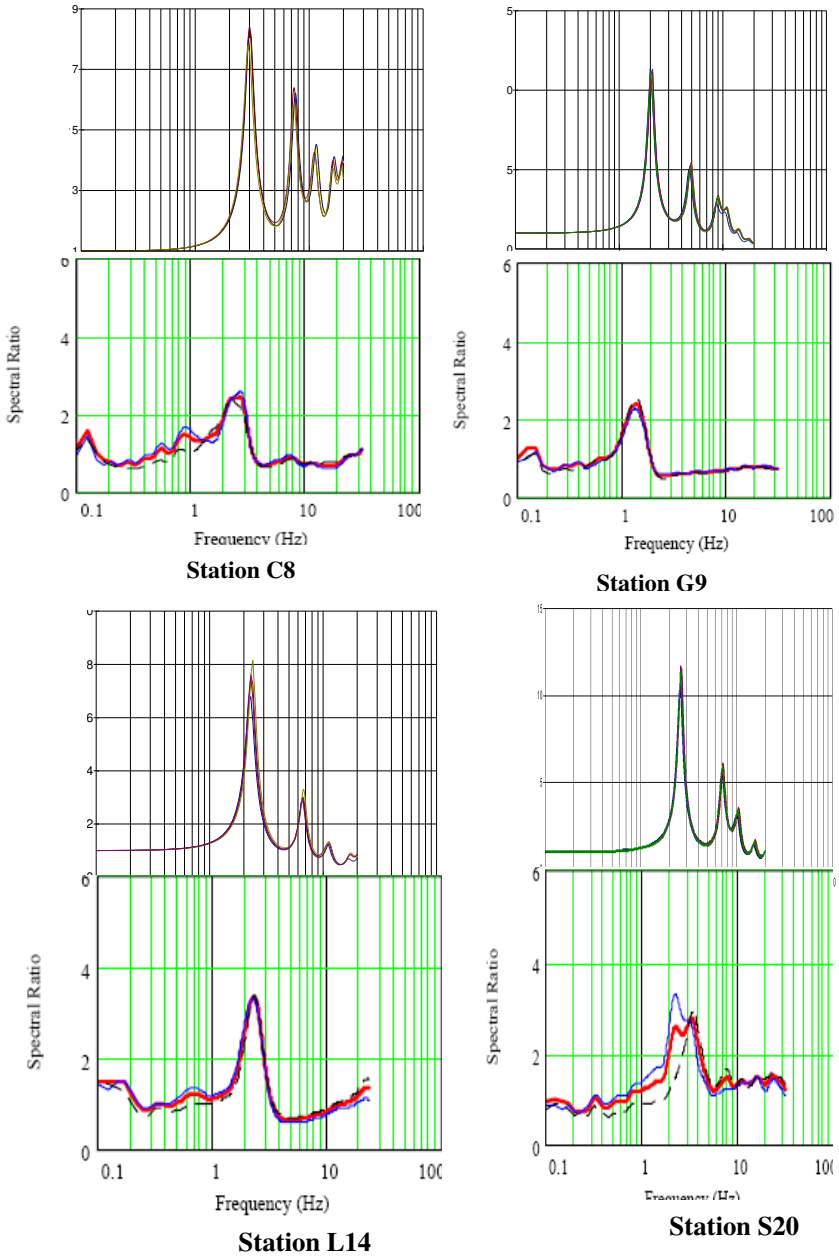
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]



شکل ۶. پهنه‌بندی گسترهٔ شهر مشهد براساس توابع بزرگ‌نمایی

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]



شکل ۷. برخی از ایستگاه‌هایی که هم‌خوانی مناسبی بین اوج اصلی میکروترمور و تئوری خطی معادل وجود دارد.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

جدول ۱. مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده از میکروترمور و پروشیک

شمارهٔ ایستگاه	فرکانس تشدید(Hz)			شمارهٔ ایستگاه	فرکانس تشدید(Hz)		
	نسبت طیفی		پروشیک		نسبت طیفی		پروشیک
	اوج اصلی	اوج دوم			اوج اصلی	اوج دوم	
C8	2.5	0.9	3	N14	4.3	2	2.3
F9	1.8	5	2.2	O10	3	0.45	2
G9	1.5	0.35	2	O13	4	0.8	2.8
H4	8	0.9	1.9	O14	4	1.2	1.6
H7	1	-	1.3	P7	4	0.4	2.3
H10	1.5	-	2.5	P12	4	0.6	2
I7	1	-	2.2	P13	2	0.5	1.2
I10	1	-	2.2	P15	2	0.6	1.6
I11	18	2	17	Q17	1.7	0.6	1.9
I12	20	1.5	13	Q18	2	_	1.6
J5	2.5	0.45	2	R12	4	0.5	4.3
J14	3.5	1.2	4.5	R14	3.5	0.65	1
K5	3	0.45	4.8	R17	10	1.7	1.6
K9	3	0.4	2	R22	4	1.5	5.5
L10	3	0.7	2.5	S20	3	_	2.7
L11	2	0.9	2	T10	3	_	1.5
L14	2.5	0.7	2.3	T11	1.5	0.35	2
L15	5.5	2.5	2.5	T16	1	_	3.5
M9	2.5	0.7	2	U10	12	5	3
M10	4	0.55	1.25	U16	1.3	_	1.25
M13	1.7	0.65	2	V12	2.5	0.3	4
M14	4.3	2	2.4	W9	5	0.8	4.5
N7	4	0.25	5.7				

***خانه‌های خاکستری ایستگاه‌هایی را نشان می‌دهند که در آن‌ها هم‌خوانی نسبی وجود دارد**

جدول۲. مشخصات ژئوتکنیکی برخی از ایستگاه‌هایی که در آن‌ها پریود تشدید میکروترمور و پروشیک مشابهند

ایستگاه	شماره لایه	جنس خاک	عمق (m)	دانسیته (KN/m3)	سرعت (m/s)
C8	1	ML	0-1	17	98
	2	SM	1-4	17.9	228
	3	SM	4-7	18	328
	4	SW-SM	7-12	18.7	314

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

399	18.8	12-16	SW-SM	5	
417	19	16-19	SP	6	
478	19	19-22	SP	7	
585	19.5	22-25	SP-SM	8	
845	19.7	25-28	SP-SM	9	
1040	19.9	28-30	SP	10	
417	19	0-2	GM	1	I11
529	18.6	2-5	CL-ML	2	
600	19.5	5-6.5	GM	3	
619	18.9	6.5-8	ML	4	
700	19	8-10	SM	5	
801	20	10-20	GM	6	
877	21	20-30	GM	7	
945	21	30-40	GM	8	
615	19.4	30-31.5	SC-SM	9	L14
626	19.4	32.5-34	SM	10	
2000	22	>32.5	ROCK	11	
292	18.4	0-1.5	GM	1	L15
419	18.4	1.5-4	CL	2	
451	18.6	4-9	GC-GM	3	
413	18.4	9-11	ML	4	
405	19.7	11-14.5	GM	5	
419	19.5	14.5-19.5	CL-ML	6	
478	19.6	19.5-20	GM	7	
571	19.7	20-30	GM	8	
619	19.7	30-32	GM	9	
244	17.1	0-5	ML	1	M14
292	17.5	5-9	SM	2	

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

234	17.3	9-12	ML	3	
315	17.6	12-16	ML	4	
529	19.6	16-19	GM	5	
443	18	19-22	ML	6	
621	19.6	22-25	GM	7	
662	19.7	25-35	SM	8	
715	19.7	35-40	SM	9	
493	19	29.5-33	CL	16	
644	19.1	33-36	CL	17	N14
674	19.2	36-40	SC	18	
132	16	0-1.5	CL	1	
254	16.3	1.5-4.5	ML	2	
261	17.8	4.5-11.5	SM	3	
307	17.1	11.5-16	ML	4	
307	18	16-17	SM	5	
261	18	17-19	SM	6	O14
478	18	19-20.5	SM	7	
423	18	20.5-22	SM	8	
407	17.4	22-23	ML	9	
355	18.4	23-26	SM	10	
613	17.6	26-30	ML	11	
675	17.8	30-40	ML	12	
280	17	0-2	ML	1	
350	17.5	2-4	ML	2	
400	18	4-6	CL-ML	3	
600	18.4	6-12	CL	4	R12
750	18.6	12-14	CL	5	
700	18.5	14-20	ML	6	
680	18.5	20-23	ML	7	

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

680	19	23-24.5	CL	8	
680	19.1	24.5-27	CL-ML	9	
700	19.4	27-39	CL	10	
800	19.5	39-40	CL	11	
400	18.9	0-3	GW	1	
360	18.8	3-5	GW	2	
360	18.7	5-7.5	GW	3	
515	18.6	7.5-11	SP	4	
545	18.4	11-17	GW	5	
515	18.2	17-18	GP	6	S20
515	18.1	18-22	GW	7	
515	18	22-25	SM	8	
515	18.9	25-26	SM	9	
550	19	26-36	CL-ML	10	
719	19.2	36-40	CL-ML	11	
132	18.4	0-1.5	CL-ML	1	
261	18.5	1.5-6	SM	2	
273	18.5	6-9	ML	3	
292	19.2	9-14	SM	4	
315	18.7	14-19	CL	5	U16
350	18.9	19-22	SW	6	
562	19.1	22-26	CL	7	
584	19.2	26-29	SM	8	
622	19.4	29-31	CL	9	
647	19.5	31-40	SM	10	
180	19.3	0-2	CL	1	
300	19.3	2-7.5	CL	2	W9
450	19.1	7.5-11.5	ML	3	
450	19.1	11.5-13.8	CL	4	

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

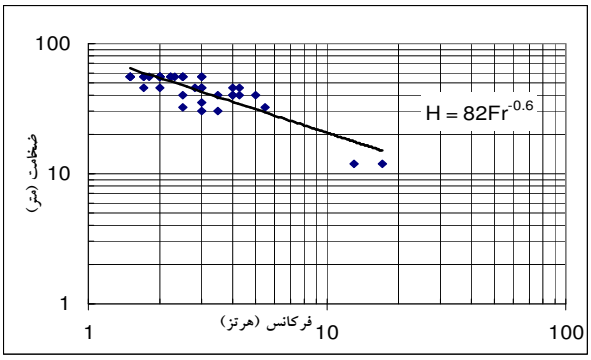
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

800	19.2	13.8-17.5	SM	5
800	19.4	17.5-20	GM	6
750	19.4	20-21.5	GM	7
750	19.3	21.5-23.5	SM	8
750	19.7	23.5-25	GM	9
760	19.7	25-27.5	GM	10
760	19.6	27.5-29.5	SM	11
630	19.8	29.5-32	ML	12
630	19.5	32-40	ML	13

رابطهٔ پریود تشدید و ضخامت خاک

برمبنای اطلاعات نقاطی که نتایج تحلیل تئوری بـه‌روش خطـی معـادل و میکروترمـور در آن‌ها هم‌خوان بوده است و به‌عبارت دیگر، شناسایی پروفیل خاک تـا سـنگ کـف ادامـه یافتـه است (جدول۱). رابطهٔ زیر بین ضخامت خاک و فرکانس تشدید در گسترهٔ شهر مشهد به‌دست آمده است (شکل ۸).

$$h = 82 fr^{-0.6} \quad (r=.74) \qquad (۴)$$

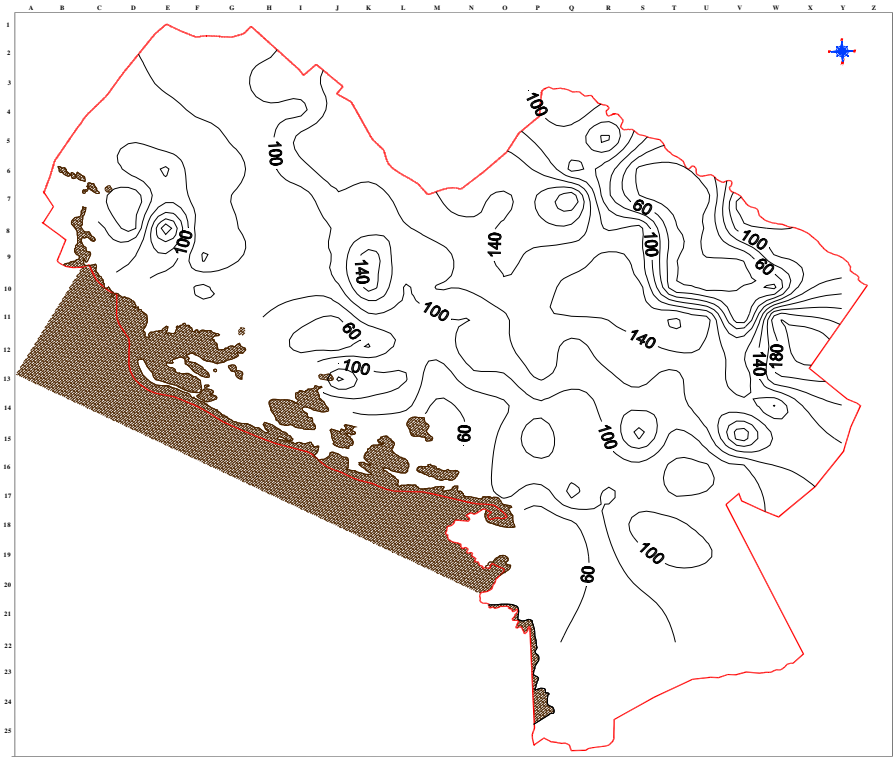


شکل ۸. رابطهٔ بین ضخامت و فرکانس آبرفت

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

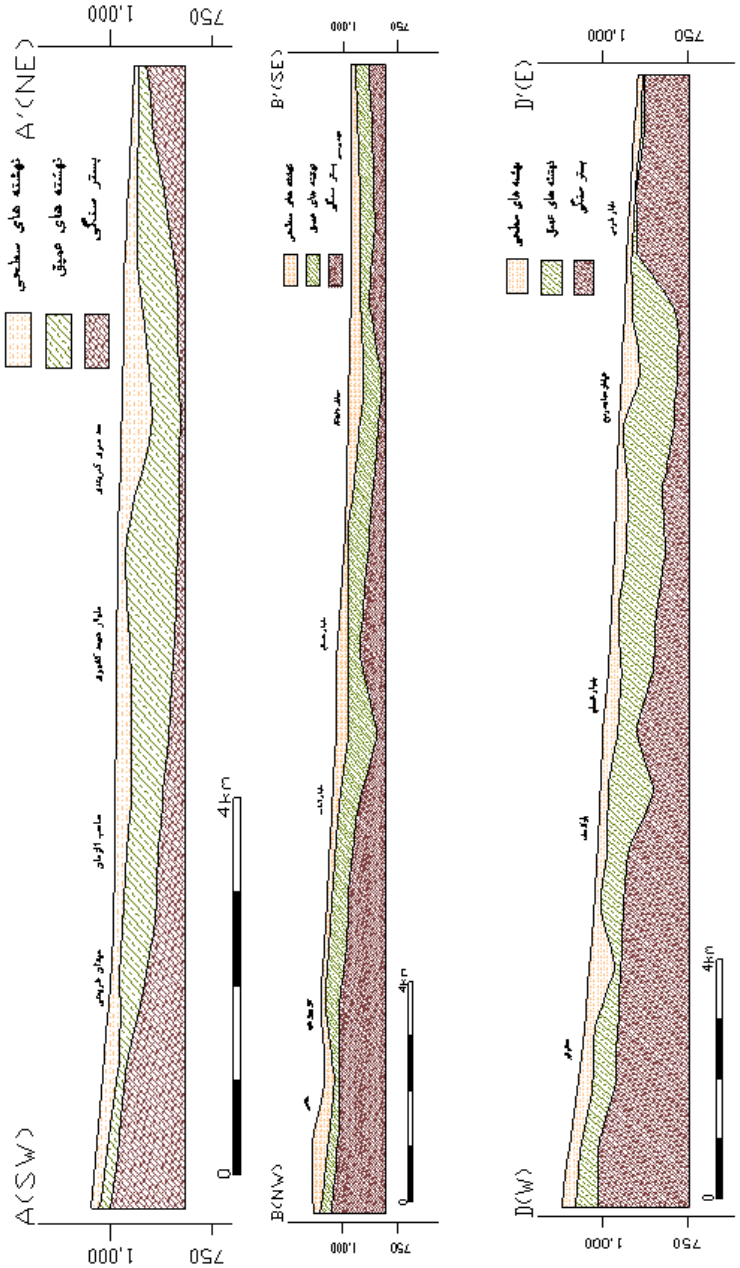
با توجه به رابطهٔ تجربی فوق و استفاده از پریود تشدید به‌دست آمده از روش نسبت طیفی در ۲۰۰ نقطه، ضخامت آبرفت در سطح شهر مشهد تعیین شده است. در شکل ۹ نتایج حاصل نشان داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود بیش‌ترین ضخامت آبرفت در جنوب شرق شهر است که به بیش از ۲۰۰ متر می‌رسد. در بخش مرکزی ضخامت آبرفت حدود ۱۵۰ متر است و به‌طرف شمال و غرب از ضخامت آن کاسته می‌شود. چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، در بسیاری از توابع تبدیل دو اوج در منحنی نسبت طیفی مشاهده می‌شود. اوج دوم در پریودهای کم‌تر از پریود تشدید دیده می‌شود که مربوط به لایهٔ سطحی با تغییر سرعت و امپدانس مشخص نسبت به لایه‌های زیرین است. ضخامت لایهٔ سطحی با توجه به پریود نقطه اوج دوم محاسبه و برآورد شده است. ضخامت لایه سطحی در بخش مرکزی شهر حدود ۶۵ متر و به‌طرف شمال به طور متوسط ۱۷ متر است.



شکل ۹. نقشهٔ هم ضخامت آبرفت در شهر مشهد

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]



شکل ۱۰. پروفیل عرضی نهشته‌های سطحی و عمیق

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

نتیجه‌گیری

در این پژوهش توابع تبدیل بزرگ‌نمایی آبرفت در ۲۰۰ نقطه از شهر مشهد بر اساس روش نسبت طیفی و در ۶۲ نقطه از شهر نیز به‌روش تئوری خطی معادل تعیین شده است. پریود تشدید برآورد شده با دو روش مذکور تنها در برخی از نقاط که حفاری ژئوتکنیکی تا سنگ کف زمین‌شناسی ادامه یافته، هم‌خوانی مناسبی دارد و در سایر نقاط اختلاف نسبتاً زیادی نشان می‌دهد. در بسیاری از توابع تبدیل اوج دومی در پریودهای کم‌تر از پریود تشدید دیده می‌شود که مربوط به لایهٔ سطحی با تغییر سرعت و امپدانس مشخص نسبت به لایه‌های زیرین است. بر اساس میانگین سرعت موج برشی و پریود تشدید در نقاطی که هم‌خوانی بین نتایج دو روش نسبت طیفی و تئوری خطی معادل مناسب بوده است رابطهٔ تجربی بین ضخامت آبرفت و پریود تشدید به‌دست آمده و براساس آن ضخامت آبرفت و نیز پروفیل زیر سطحی خاک در بخش‌های مختلف شهر مشهد برآورد شده است.

منابع

۱. حافظی مقدس، ناصر، *معرفی گسل شمال مشهد*، بیست و یکمین کنفرانس علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۳۸۵).

۲. حافظی مقدس ناصر و نیکودل محمدرضا، *گزارش بررسی‌های ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد ج ۳، گزارش ژئوتکنیک*، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان رضوی (۱۳۸۵).

۳. حافظی مقدس، ناصر و قایمقامیان محمدرضا، *گزارش بررسی‌های ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد ج ۴، ارزیابی اثرات ساختگاهی در شهر مشهد*، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان رضوی، (۱۳۸۵).

4. Delgado.J, Lopez Casado. C., Estevez . J.,Giner .L., Cuenca .A., Molina .S, *Mapping of soft soil in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremores as an exploration tool*, Journal of Applied Geophysics 45(2000) 19-23

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]

5. Seht M. I., Wohlenberg J., *Microtremor measurements used to map Thickness of soft sediments*, BSSA vol 89, No. 1(1999) 250-259.
6. Asten M. W. *Thicness and shear-velocity mapping of Holocene-Pleistocene sediments by array studies of microtremors*, USGS/NEHRP Program No. 04HQR0030.
7. Pintor G.M., Toshinawa T., Nishimura T., Amano H. *Use of microtremores for the evaluation of the shallow geologic structure* JSPS-DOST report.
8. Toshinawa, T., Inoue M., Yoneyama N., Hoshino Y., Mimura K., Yokoi Y., *Geologic-profile estimates of Kofu Basin*, Japan , by making use of microtremor observations, Geophysical Research Abstract, Vol. 5 (2003) 02079.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.1.1.2]