

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 مهندسی زلزله

پذیرش ۸۸/۶/۲۳

تاریخ دریافت ۸۶/۱۱/۲۸

چکیده

در پژوهش حاضر بر اساس تحلیل نتایج بررسی‌های میکروترمور در ۲۰۰ نقطه از شهر مشهد به روش نسبت طیفی و اطلاعات پروفیل سرعت موج برشی در ۶۲ نقطه رابطه‌توانی $h = 82fr^{-0.6}$ بین پرئود تشدید و ضخامت آبرفت در شهر مشهد به دست آمده و بر مبنای آن نقشه هم‌ضخامت آبرفت و مقاطع عرضی از شرایط زیر سطحی شهر تهیه شده است. با توجه به رابطه مذکور، حداکثر ضخامت آبرفت در جنوب شرق شهر حدود ۲۰۰ متر به دست آمده است. ضخامت آبرفت به طرف ارتفاعات جنوب و جنوب غرب و همچنین به طرف گسل شمال مشهد در محدوده خواجه ربیع کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خردلرزه‌سنجی، نسبت طیفی، پرئود 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

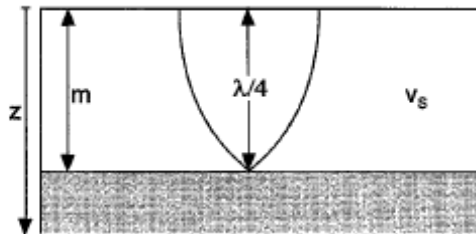
شرایطی که نهشته‌های زیر سطحی نسبتاً همگن باشند با استفاده از روش نسبت طیفی با دقت مناسبی امکان‌پذیر است. به صورت تئوری رابطه زیر بین فرکانس تشدید (fr) و ضخامت آبرفت (Z) وجود دارد:

$$fr = \frac{Vs}{4Z} \quad (1)$$

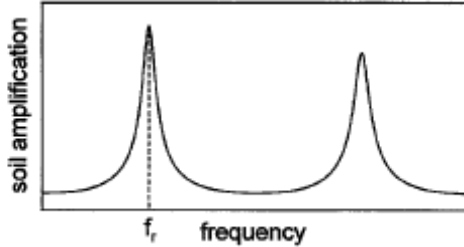
این رابطه Vs میانگین سرعت موج برشی است. Seht & Wohlenberg (۱۹۹۹) با استفاده از مدل ساده دو لایه متشکل از سنگ بستر و رسوبات فوقانی با ضخامت m رابطه تئوری (۲) را بین ضخامت آبرفت و فرکانس تشدید خاک ارائه کردند (شکل ۱).

$$Z = \left[\frac{Vs(1-x)}{4fr} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1 \quad (2)$$

در رابطه 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 ساده مورد استفاده در رابطه (۱)



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

$$h = 96 fr^{-1.388} \quad (3)$$

همچنین پاراوای و همکارانش (۲۰۰۲) برای ناحیه کلوزن^۱ آلمان رابطه زیر را به دست آوردند:

$$h = 108 fr^{-1.551} \quad (۴)$$

دلگادو^۲ و همکاران (۲۰۰۰) نیز رابطه توانی زیر را بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیک و ژئوتکنیک در دره رودخانه سگورا^۳ اسپانیا ارائه کردند:

$$h = 55.11 fr^{-1.256} \quad (۵)$$

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

زمین‌شناسی و بافت خاک

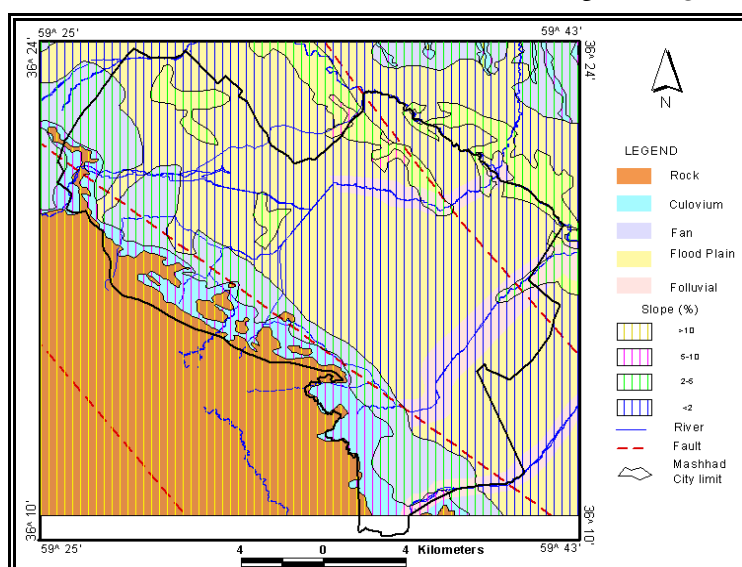
کلان شهر مشهد با وسعت حدود ۳۲۰ کیلومتر مربع، دارای جمعیت ساکن بیش از ۲/۵ میلیون نفر و جمعیت زائر و گردش‌گر حدود ۱۲ میلیون نفر در سال است. از نظر زمین‌شناسی شهر مشهد در حد فاصل بین دو پهنه زمین‌ساختی کپه داغ در شمال و بینالود در جنوب قرار دارد. در ارتفاعات جنوب مشهد سنگ‌های مافیک و الترامافیکی رخ‌نمون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

۱. Cologne

۲. Delgado

۳. Segura

رسوبات بستر شهر مشهد از نظر منشأ به سه گروه الف) نهشته‌های دامنه‌ای (کلوویم) ب) نهشته‌های دشت سیلابی ج) نهشته‌های مخروط افکنه‌ای تقسیم می‌شود (شکل ۲). نهشته‌های دامنه‌ای و مخروط افکنه عمدتاً به صورت شن و ماسه در حاشیه ارتفاعات جنوبی، جنوب‌غربی و محل خروجی آب‌راه‌ها در غرب و جنوب‌غرب شهر وجود دارد. بخش عمده شهر مشهد پوشیده از رسوبات دشت سیلابی مربوط به آب‌راه‌های 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 (شکل ۳).

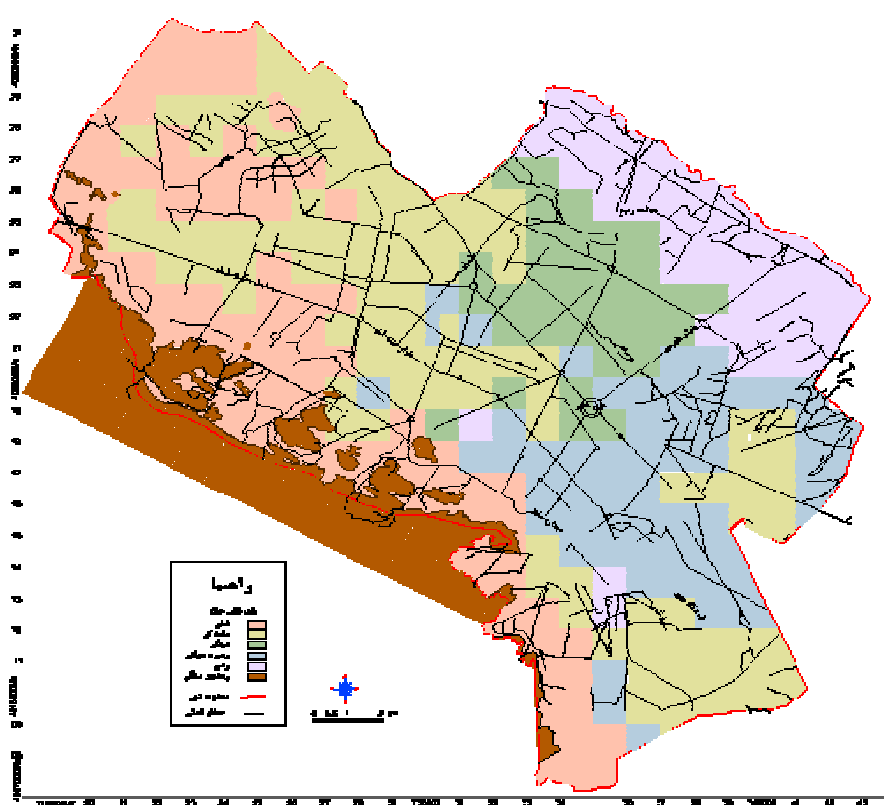


شکل ۲. نقشه په‌نه‌بندی شهر مشهد از نظر محیط رسوبی (حافظی مقدس ۱۳۸۶)

بررسی‌های ژئوتکنیک و ژئوفیزیک

به منظور شناخت وضعیت زیرسطحی خاک در سطح شهر مشهد ابتدا اطلاعات ۶۰۰ گمانه 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 گمانه 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

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).



شکل ۳. 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 لرزه‌سنج‌ها ۱ هرتز و با میرایی طبیعی ۰/۷ هستند. اندازه‌گیری‌ها در مدت زمان

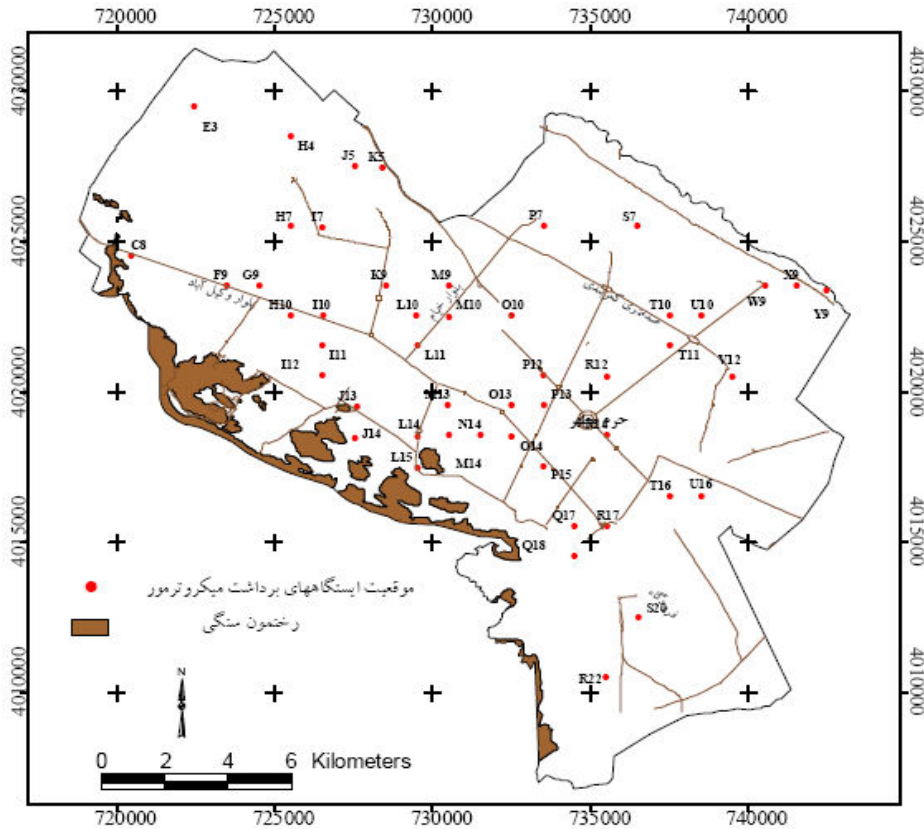
حداقل ۲۰ دقیقه و با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه انجام گرفته است. نگاشت‌های ثبت شده ابتدا برای خطای دستگاهی، خطای فاصله از خط مبدأ و نیز خطای حاصل از مدوله شدن فرکانس‌های پایین بر سیگنال تصحیح و پردازش شدند. برای این منظور از نرم افزار Matlab و Pitsa استفاده شده است. سپس طیف فوریه مؤلفه‌های مختلف محاسبه و با پنجره صاف‌کننده از نوع Parzen در بازه ۰/۴ هرتز صاف شده است. در هر نقطه اندازه‌گیری، نگاشت‌های ثبت شده به حداقل ۳۰ پنجره‌زمانی 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 به دست 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 شده است (حافظی مقدس و قایم‌قامیان، ۱۳۸۵). در شکل ۴ موقعیت گمانه‌های اکتشافی و نقاط برداشت میکروترمور نشان داده شده است.

طبقه‌بندی توابع بزرگ‌نمایی به روش نسبت طیفی

توابع بزرگ‌نمایی به دست آمده در ۲۰۰ نقطه از شهر با توجه به تغییرات بافت، ضخامت خاک و موقعیت نقطه برداشت نسبت به لبه‌های حوزه رسوبی طبیعتاً دارای فرم‌های متفاوت هستند. در منحنی‌های نسبت طیفی علاوه بر اوج اصلی معمولاً اوج فرعی دیگری نیز مشاهده می‌شود (شکل ۵). در این بررسی براساس وضعیت پیک اصلی و پیک‌های فرعی توابع بزرگ‌نمایی به صورت زیر طبقه‌بندی شده‌اند.

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

ب) بر اساس نقطه اوج دوم نیز پنج رده، (a) اوج دوم کمتر از ۱ هرتز، (b) اوج دوم بین ۱ 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.



شکل ۴. ایستگاه‌های برداشت میکروترموور گمانه‌های اکتشافی

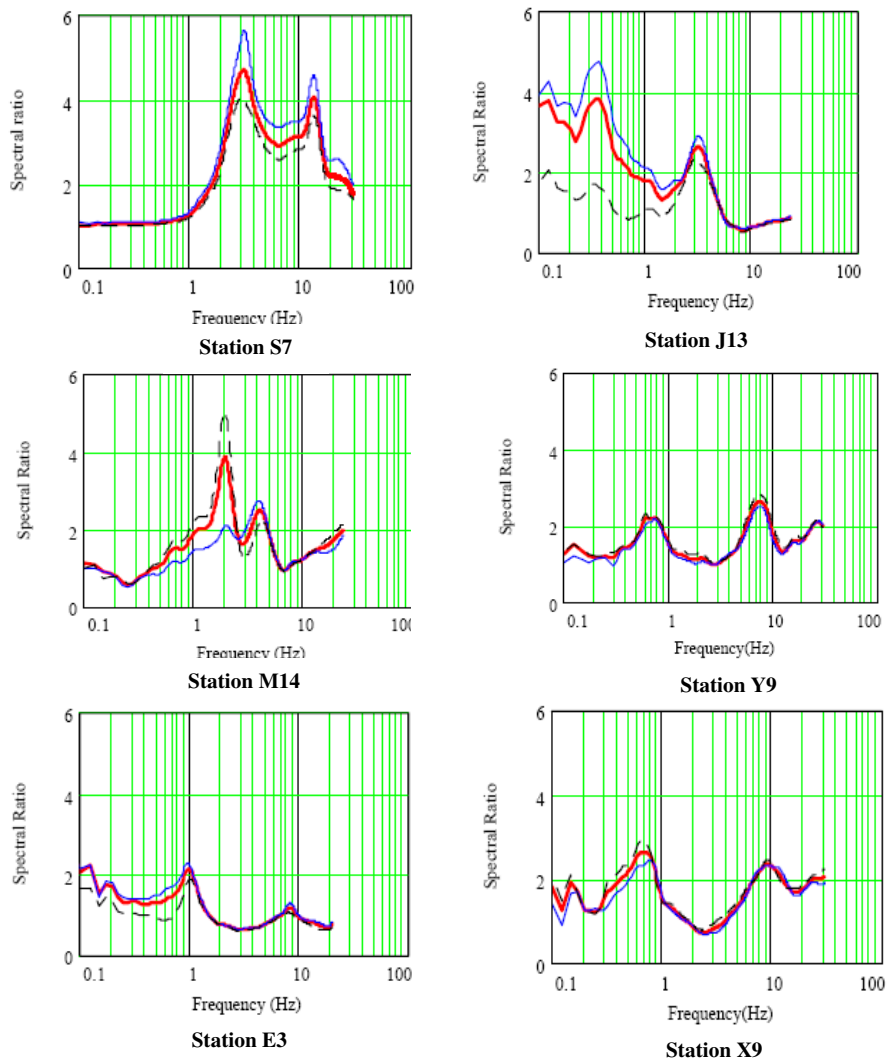
نتایج حاصل از طبقه‌بندی در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس نقشه مزبور، این مناطق در شهر مشهد قابل شناسایی و تفکیک‌اند:

الف. مناطق حاشیه 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 لبه حوزه رسوبی است.

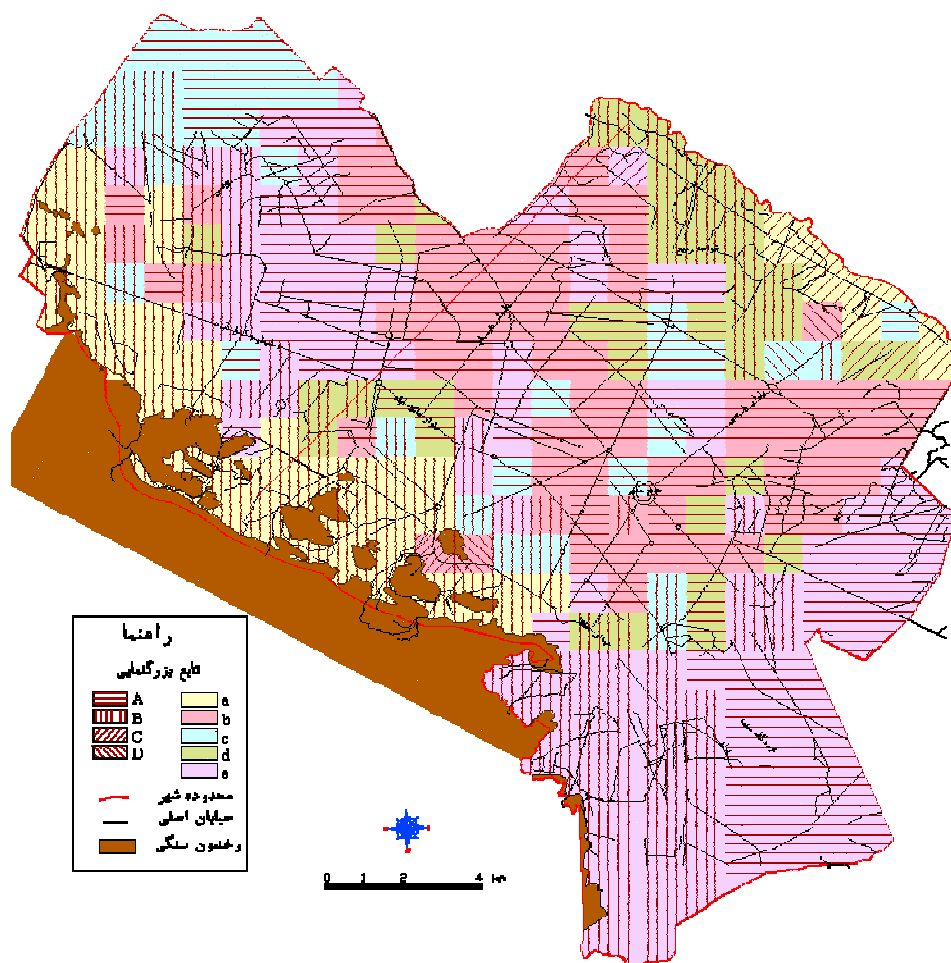
- ب. محدوده جنوب‌غربی: در این مناطق پیک اصلی بین ۱ تا ۳ هرتز است و پیک دوم دارای فرکانس بالاتری است و عموماً در رده خاک **Bc**، **Bd** یا **Be** قرار دارد.
- ج. بخش شمالی و شمال‌شرقی: در این محدوده تابع بزرگ‌نمایی عموماً در گروه **Bd** قرار گرفته است.
- د. بخش مرکزی: از نظر پیک اصلی عموماً در رده **A** قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده ضخامت زیاد رسوبات در این بخش است. رده‌های خاک قابل مشاهده نیز شامل **Ac** و **Ab** است.

مقایسه نتایج میکروترمور و تحلیل تئوری خطی معادل

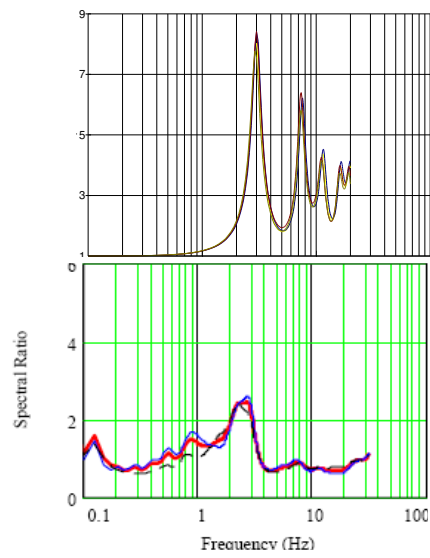
در جدول ۱ پریود شدید به دست آمده به دو روش نسبت طیفی و تحلیل تئوری خطی معادل با استفاده از نرم‌افزار پروشیک (Proshake) در برخی از ایستگاه‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل در غالب ایستگاه‌ها تفاوت زیادی با هم نشان می‌دهند. در ایستگاه‌های واقع در نزدیک دامنه ارتفاعات که ضخامت آبرفت کم و گمانه‌های اکتشافی ژئوتکنیک تا سنگ کف ادامه یافته معمولاً هم‌خوانی نتایج مناسب است (شکل ۷). در جدول ۲ 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 شدید مربوط به اوج دوم میکروترمور نزدیک به پریود اوج پروشیک است (شکل ۵). اوج دوم میکروترمور معمولاً دارای فرکانس بالاتر از فرکانس شدید اصلی است و علت اصلی آن وجود یک لایه سطحی با سرعت زیاد بر روی نهشته‌های زیرین است.



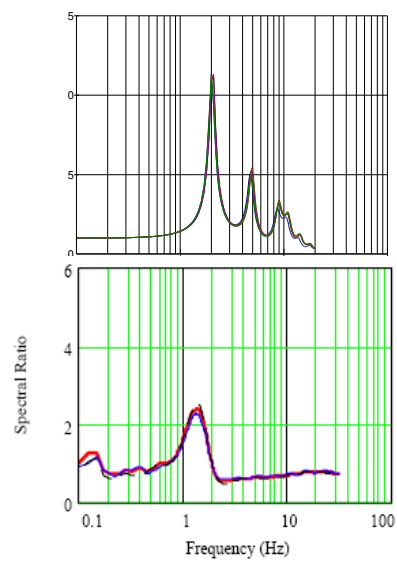
شکل ۵. توابع نسبت طیفی در برخی از ایستگاه‌ها که دارای دو نقطه اوج مهم هستند



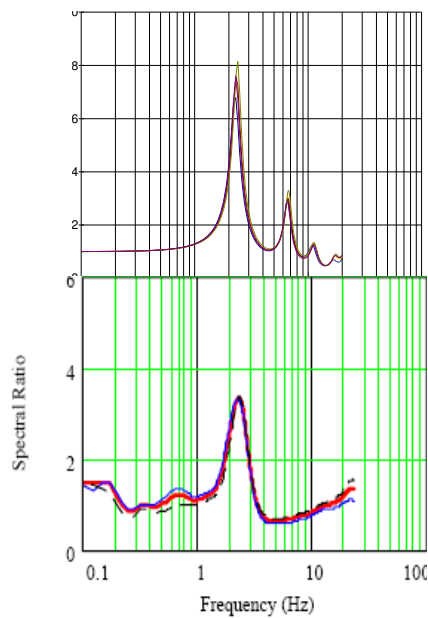
شکل ۶. پهنه‌بندی گستره شهر مشهد براساس توابع بزرگ‌نمایی



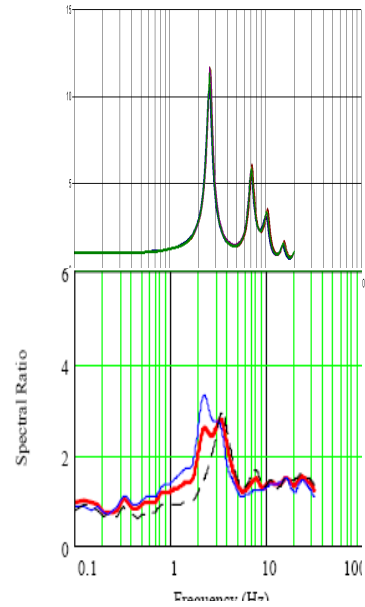
Station C8



Station G9



Station L14



Station S20

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

جدول ۱. مقایسه نتایج به دست آمده از میکروترمور و پروشیک

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

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

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی برخی از ایستگاه‌هایی که در آن‌ها پریرود تشدید میکروترمور و پروشیک مشابهند

ایستگاه	شماره لایه	جنس خاک	عمق (m)	دانسیته (KN/m ³)	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

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	
529	18.6	2-5	CL-ML	2	
600	19.5	5-6.5	GM	3	
619	18.9	6.5-8	ML	4	I11
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	
626	19.4	32.5-34	SM	10	L14
2000	22	>32.5	ROCK	11	
292	18.4	0-1.5	GM	1	
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	L15
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	

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	

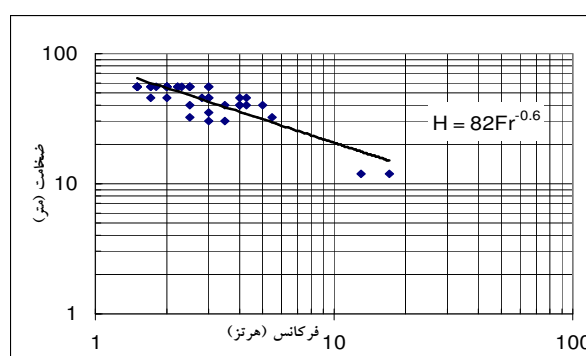
680	19	23-24.5	CL	8	
680	19.1	24.5-27	CL-ML	9	
700	19.4	27-39	CL	10	
800	19.5	39-40	CL	11	
<hr/>					
400	18.9	0-3	GW	1	
360	18.8	3-5	GW	2	
360	18.7	5-7.5	GW	3	
515	18.6	7.5-11	SP	4	
545	18.4	11-17	GW	5	
515	18.2	17-18	GP	6	S20
515	18.1	18-22	GW	7	
515	18	22-25	SM	8	
515	18.9	25-26	SM	9	
550	19	26-36	CL-ML	10	
719	19.2	36-40	CL-ML	11	
<hr/>					
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	
350	18.9	19-22	SW	6	U16
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	
<hr/>					
180	19.3	0-2	CL	1	
300	19.3	2-7.5	CL	2	
450	19.1	7.5-11.5	ML	3	W9
450	19.1	11.5-13.8	CL	4	

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 پیوند تشدید و ضخامت خاک

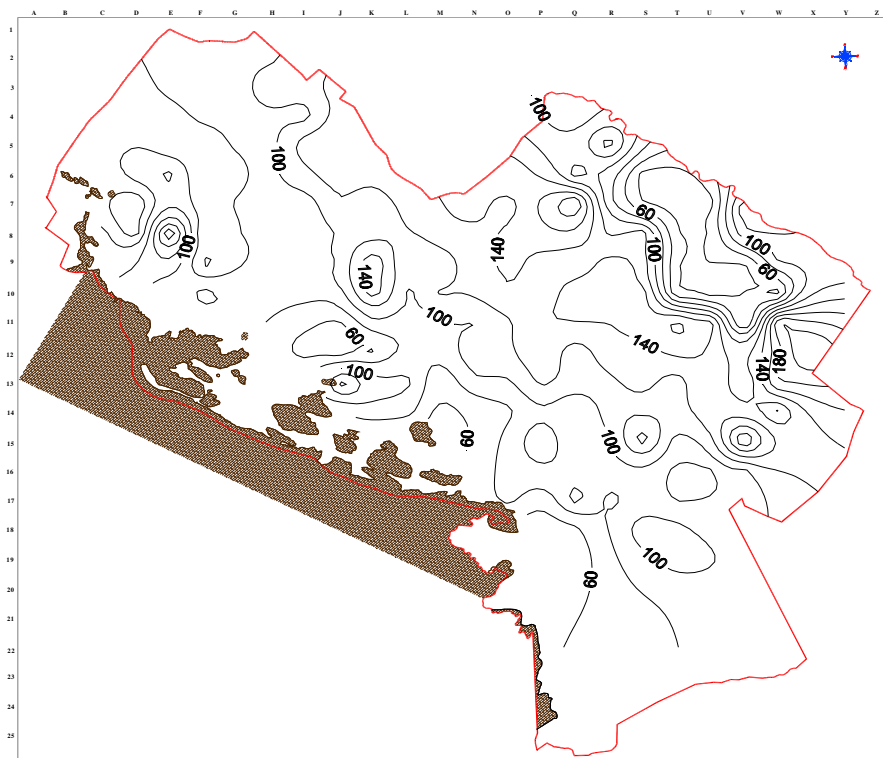
بر مبنای اطلاعات نقاطی که نتایج تحلیل تئوری به‌روش خطی معادل و میکروترمور در آن‌ها هم‌خوان بوده است و به‌عبارت دیگر، شناسایی پروفیل خاک تا سنگ کف ادامه یافته است (جدول ۱). رابطهٔ زیر بین ضخامت خاک و فرکانس تشدید در گسترهٔ شهر مشهد به‌دست آمده است (شکل ۸).

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

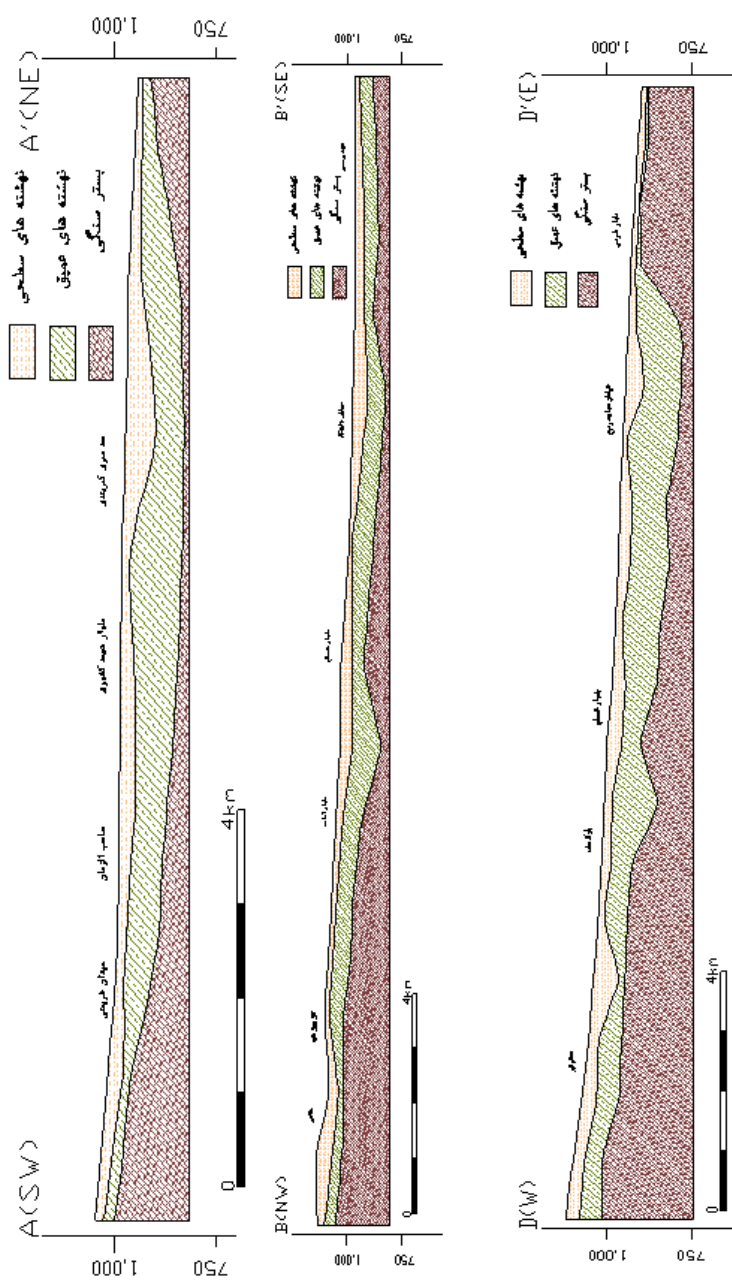


شکل ۸. رابطهٔ بین ضخامت و فرکانس آبرفت

با توجه به رابطه تجربی فوق و استفاده از پریود تشدید به دست 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 به طرف 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 لایه سطحی با تغییر سرعت و امپدانس مشخص نسبت به لایه‌های زیرین است. ضخامت لایه سطحی با توجه به پریود نقطه اوج دوم محاسبه و برآورد شده است. ضخامت لایه سطحی در بخش مرکزی شهر حدود ۶۵ متر و به طرف شمال به طور متوسط ۱۷ متر است.



شکل ۹. نقشه هم ضخامت آبرفت در شهر مشهد



شکل ۱۰. پروفیل عرضی نهشته‌های سطحی و عمیق

نتیجه گیری

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 به روش 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 لایه 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 رابطه تجربی بین ضخامت آبرفت و پریود تشدید به دست 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 قائم‌مقامیان 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

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.