

برآورد ساختار سرعت موجبرشی پروفیل خاک در ایستگاههای شتابنگاری شهر تهران و حومه با استفاده از وارونسازی نسبت طیفی H/V

امیر طالبی^۱، حبیب رحیمی^{۲®} و بهزاد ملکی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران ۲- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران ۳- کارشناس ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: rahimih@ut.ac.ir

چکیدہ	واژگان کلیدی
 در این تحقیق اثر ساختگاه با استفاده از شتابنگاشتهای ثبتشده در ایستگاههای شتابنگاری واقع در شهر تهران متعلق به	
سازمان تحقیقات مسکن و ستاد بحران شهرداری تهران و نیز چندین ایستگاه در اطراف تهران با استفاده از روش ناکامورا،	
بررسی شده و اثرات ناشی از خاک ساختگاههای مورد طالعه بر اساس فرکانس غالب بدست آمده و طبقهبندی شدهاند. در	
مرحله بعد، با استفاده از روش وارونسازی، بهترین و مناسبترین مدل برای خاک ازنظر ضخامت، سرعت، فاکتور کیفیت و	شدت
چگالی برای هر ایستگاه ارائه شده است و در نهایت نتایج بدست آمده با مقادیر حاصل از دیگر مطالعات مقایسه شده است.	اثر ساختگاه
در ایستگاههای مورد مطالعه، محدوده بسامدی متأثر از اثرات ساختگاهی بسیار گسترده و از یک هرتز شروعشده و تا ۸/۵	فركانس غالب
هرتز ادامه یافته است. با توجه به نتایج بدست آمده میتوان گفت رده ساختگاه در مناطق شمالی و شرقی تهران غالباً از نوع	سرعت برشی
II و در مناطق جنوبی و غربی شهر تهران غالباً بین III تا IV تغییر مینماید. به عبارت دیگر رسوبات شهر تهران از شمال	رسوبات
به جنوب و یا از شرق به غرب به تدریج رفتار نرم یا سست از خود نشان میدهند. همچنین سرعت موج برشی از سمت	
شمال به سمت جنوب تهران کاهش مییابد؛ به طوریکه میتوان تغییرات سرعت موج برشی را در شمال تهران بین ۲۰۰ تا	
۸۰۰ متر بر ثانیه و در جنوب تهران بین ۱۴۰ تا ۶۰۰ متر بر ثانیه تا عمق متوسط ۳۰ متر در نظر گرفت.	

۱- مقدمه

امواج زلزله در هنگام انتشار از سنگ بستر به سطح زمین تحت تأثیر خصوصیات دینامیکی آبرفت در فرکانسهای خاص تقویت و یا تضعیف می شود. لایه های رسوبی در سطح زمین به طور قابل ملاحظه ای حرکات ناشی از زمینلرزه را تقویت میکنند؛ که این پدیده به نام اثرساختگاهی مطرح است (Boatwrigth et al., 1991). این اثر نخستین بار در سال ۱۹۷۱ در زلزله سانفرانسیسکو توسط Seed et al., (1972) مورد توجه قرار گرفت. مطالعات این محققین دلالت بر اهمیت اثر لایههای خاک بر محتوای فرکانسی حرکات نیرومند زمین و بیشینه شتاب آن داشت. روشهای مختلفی برای تعیین اثر ساختگاهی به کار گرفته شدهاند، که برای بررسی خطر زمینلرزه برای سازههای خاص بکار گرفته میشوند (Ghayamaghamian, 1997). (Shayamaghamian, 1997) در تحلیل میکروترمورها برای اثر ساختگاهی باز کرد. شرایط ساختگاهی بر همه خصوصیات مهم زمین شامل دامنه، محتوی فرکانسی و مدت حرکت نیرومند زمین اثر قابل ملاحظهای می گذارد. در مطالعات مهندسی زلزله، تخمین اثر ساختگاه در حوزه فرکانس به دلیل سادگی روش و تسریع در محاسبه از اهمیت خاصی برخوردار است. استفاده از نگاشت امواج در روشهای تک ایستگاهی و آرایهای راهکار کارآمدی برای تعیین ویژگیهای پاسخ ساختگاه به شمار میآید (شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹). بر اساس تحليل ناكامورا (Nakamura (1989) و با استفاده از نسبت طيفي مؤلفه افقى به قائم (H/V) مىتوان فركانس غالب ساختگاه را تعیین کرد و اثر ساختگاه را ارزیابی نمود. سرعت موج برشی ازجمله مهمترین پارامترهای ژئوتکنیکی در تحلیلهای لرزهای-دینامیکی نظیر بزرگنمایی حرکات زمین و بررسی اندرکنش خاک-سازه میباشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی پروفیل سرعتی خاک برای هر ایستگاه و جنبههای مرتبط با آن شامل سرعت، چگالی و فاکتور کیفیت از الگوریتم بكار برده شده به وسيله (Herak (2008) استفاده شده است.

در عمل، در مرحله اول با استفاده از نگاشتهای ثبتشده حاصل از زلزلههای مختلف در ایستگاههای شتابنگاری موجود در شهر تهران و بکارگیری روش H/V، رده خاک هر ایستگاه بر اساس آییننامه ۲۸۰۰ ایران طبقهبندی می گردد و نسبت طیفی بدست آمده برای ایستگاههای مختلف به عنوان مدل مشاهدهای (H/V مشاهدهای) در نظر گرفته می شود.

در مرحله دوم، با توجه به این الگوریتم (Herak, 2008) یک مدل تئوری (Hrak, 2008) بیک مدل تئوری (H/ تئوری) بر اساس ویژگیهای خاک شامل سرعت، چگالی و فاکتور کیفیت برآورد گردیده و در نهایت با وارونسازی با روش مونت کارلو بین مدل مشاهدهای و مدل تئوری بهترین و بهینهترین مدل خاک برای ایستگاه مورد نظر برآورد می گردد. در این روش کاربر قادر خواهد بود تمام پارامترهای مرتبط با لایه را ثابت در نظر بگیرد؛ اما برای کاهش عدم قطعیت و اختلافات موجود در مقادیر معکوس شده، تعدادی از آنها را ثابت فرض می کند (به عنوان مثال سرعت موج P و چگالی که با استفاده

از مطالعات ژئوفیزیکی تعیین شدهاند). بعد از آغاز جستجو در روش مونت کارلو، کاربر قادر خواهد بود تعداد دفعات تکرار در فرآیند وارونسازی و نیز مقادیر مجاز در هر مدل دلخواه (لایهبندی مختلف) را برای رسیدن به یک مدل بهینه تعیین کند. از آنجا که ۳۰ متر بالایی خاک در مطالعات مهندسی از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ مشخصههای پروفیل خاک به طور متوسط تا این عمق تخمین زده شده است. مطالعات مختلفی در برآورد سرعت موج برشی با استفاده از روشهای مختلف در شهر تهران صورت گرفته است؛ که میتوان به مطالعات صورت گرفته توسط Shafiee and Azadi (2007)، (2002)، (2002)

در این تحقیق از مطالعات (2002) Jafari و همچنین مطالعات گمانهزنی که در سازمان تحقیقات مسکن برای تعیین سرعت موج برشی در شهر تهران انجام شده؛ به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده در این مطالعه استفاده شده است.

۲- روش پژوهش

۲-۱- دادهها و منطقه موردمطالعه

در این مطالعه از رکوردهای ثبت شده در ۶۰ ایستگاه شتابنگاری متعلق به مرکز تحقیقات راه و مسکن شهر سازی در استان تهران که از کیفیت لازم برخوردار بودند و همچنین دادههای پیوسته ثبت شده در ۱۰ ایستگاه سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران شامل ۸ ماه داده پیوسته از ۱ اکتبر ۲۰۰۹ تا ۳۱ می ۲۰۱۰ استفاده شد. موقعیت ایستگاههای مذکور در شهر تهران و اطراف آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت ایستگاههای شتابنگاری (مثلثهای مشکی رنگ) و مدیریت بحران (دایرههای سبز رنگ) شهر تهران و حومه

۲-۲- تعیین فرکانس غالب ساختگاه با روش ناکامورا H/V و طبقهبندی ایستگاهها

از میان روشهای مورد استفاده برای طبقهبندی ساختگاه روش

(H/V) میتواند پاسخ ساختگاه به حرکات قوی زمین را آشکار سازد. برتری این روش نسبت به سایر روشها استفاده از حداقل یک رکورد در هر ایستگاه است و تنها روشی است که برای هر موقعیتی قابل استفاده و کاربرد است. پس از تعیین فرکانس غالب با استفاده از روش H/V برای هر یک از ساختگاههای مورد مطالعه، میتوان طبقه خاک هر ساختگاه را که بیانگر مشخصات فیزیکی و دینامیکی لایههای آن میباشد، مشخص نمود. از آنجایی که رکوردهای بدست آمده علاوه بر ویژگیهای زمینشناسی ایستگاه، تابع عوامل چشمه و مسیر نیز هستند، بدیهی است نتایج حاصل از تعداد کمتر شتابنگاشت دارای سطح اطمینان کمتری نیز یک ایستگاه و میانگین گیری میتوان آثار چشمه و مسیر را کاهش داد و ایستگاه را در مراحل زیر خلاصه نمود:

الف- انتخاب پنجره زمانی از روی هر شتابنگاشت (پنجره انتخاب شده تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد)؛ لذا با در نظر گرفتن این موضوع که برای بسیاری از شتابنگاشتها، به خصوص نگاشتهای بدست آمده در فواصل نزدیک تفکیک پنجره P و S ممکن نیست؛ در این مطالعه پنجره توأم P و S در نظر گرفته شده است).

ب- برآورد طیف دامنه هر شتابنگاشت.

ج- تعیین نسبت طیفی H/V میانگین با بکارگیری هر دو مؤلفه افقی و

جدول ۱: طبقهبندی خاک بر اساس آییننامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم)

متوسط سرعت	1847 * 41 - 6-7	نوع		
موجبرشی (m/s)	توطيف تهستهما	زمين		
بیش از ۷۵۰	سنگ و شبهسنگ ، شامل سنگهای			
	آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاکهای	т		
	سمنته بسیار محکم با حداکثر ۵ متر			
	مصالح ضعیفتر تا سطح زمین			
$\mathbf{Y}\mathbf{d}\boldsymbol{\cdot} \leq \overline{V_s} \leq \mathbf{W}\mathbf{V}\mathbf{d}$	خاکهای خیلی متراکم یا سنگ			
	سست ، شامل شن و ماسه خیلی متراکم،			
	رس بسیار سخت با ضخامت بیش از ۳۰			
	متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش	Π		
	عمق به تدريج بهبود يابد.			
	سنگهای آذرین و رسوبی سست، مانند			
	توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده			
$\mathrm{TVA} \leq \overline{V_s} \leq \mathrm{VVA}$	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و			
	ماسه متراکم تا متوسط یا رس،های سخت با	III		
	ضخامت بیش از ۳۰ متر			
کمتر از ۱۷۵	خاک متوسط تا نرم، لایههای خاک			
	غیرچسبنده یا با کمی خاک چسبنده با	IV		
	تراکم متوسط تا کم، لایههای خاک کاملاً			
	چسبنده نرم تا محکم.			

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره6، شماره ۲، ۱۳۹۹.

تمامی شتابنگاشتهای ثبت شده در اثر زمینلرزههای مختلف در هر ایستگاه و نرم کردن نتایج در پنجرههای فرکانسی برای برآورد این نسبت طیفی، از طریق روابط آتی انجام میشود.

$$SR_{hv} = \frac{(\sqrt{1/2(S_{H1}(f)^2 + S_{H2}(f)^2)})}{(S_v(f))}$$
(1)

در این رابطه_IS_H و S_H طیف دامنه هر دو مؤلفه افقی و S_H طیف دامنه مؤلفه قائم شتابنگاشت میباشند. بنابراین تخمینی از اثر ساختگاهی با نسبت طیفی بین مؤلفههای افقی و عمودی حرکت در سطح بدست میآید. با استفاده از فرکانس غالب بدست آمده از روش H/V برای هر ایستگاه (شکل۲) و همچنین بکارگیری آییننامه ۲۸۰۰ ایران (جدول۱)، طبقهبندی خاک ایستگاههای مورد مطالعه ارائه شده است (شکل ۱۰).



شکل ۲: نسبت طیفی H/V برای ایستگاه ارجمند و TDM

۲-۲- تعیین پروفیل سرعتی در ایستگاههای شتابنگاری

فرآیند تعیین مدل HVSR (نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم) در برگیرنده مجموعهای از پارامترهای تعریف شده در الگوریتم هراک (Herak, 2008) شامل فرآیندهای تجزیه و تحلیل و تفسیر نوفههای محیطی (میکروترمورها) و یا دادههای شتاب اندازه گیری شده در یک ساختگاه مشخص است. این فرآیندها به طور خاص شامل مراحل زیر

- -۱ محاسبه HVSR مشاهدهای
 - ۲- محاسبه HVSR تئوری
- ۳- وارونسازی به روش مونت کارلو برای برآورد پروفیل خاک
- ۴- محاسبه مقدار خطای ایجاد شده در پارامترهای معکوس

1-۳-۲ محاسبه HVSR تئوری

در نظر گرفتن چگونگی انتشار امواج لرزهای از چشمه تا ساختگاه و ویژگیهای فیزیکی و هندسی لایههای خاکی نهشته شده تا حد زیادی پیچیده به نظر میرسد. برای حل چنین مشکلی، مطالعات اولیه توسط سزوا و کانای (Sezewa and Kanai, 1937) صورت گرفت. در این مطالعات زمین به صورت یک سیستم الاستیک خطی و N لایه افقی همگن و ایزوتروپ که از قانون کلی استرس-استرین تبعیت میکنند و بر

طالبی و همکاران، برآورد ساختار سرعت موج برشی پروفیل خاک برای ایستگاههای شتابنگاری و مدیریت بحران شهر تهران و حومه، صفحات ۱۹۵-۲۰۵.

روی یک نیم فضا قرار گرفتهاند؛ در نظر گرفته می شود. با این ساده سازی، انتشار امواج تنها در حالت یک بعدی مدنظر قرار می گیرد (Herak, 2008. در نهایت می توان مدل HVRS تئوری را طبق یک مدل اولیه و بر اساس رابطه آتی بدست آورد:

$$AMP(\omega) = \frac{1}{\left|\operatorname{Im}_{N+1}(\omega_{N})\right|} = \frac{1}{\alpha_{N}\left|\operatorname{Re}_{N}\sin\delta_{N} + \operatorname{Im}_{N}\cos\delta_{N}\right|_{\omega=\omega_{n}}} \qquad (\Upsilon)$$

که δ_N در رابطه (۲) برابر است با نسبت امپدانس بین لایهها و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\delta_N = K_N H_N \qquad K_N = \frac{\omega}{c_N(\omega)} \tag{7}$$

و c به ترتيب ضخامت و سرعت در هر لايه و k عدد موج مىباشد. H

T-۳-۲ وارونسازی HVSR مشاهدهای و تئوری

با در نظر گرفتن مدل تئوری بدست آمده از رابطه (۲) و مدل مشاهدهای حاصل از زلزلههای ثبت شده در هر ایستگاه، با استفاده از وارونسازی به روش مونت کارلو، مدل بهینهای که منجر به ایجاد کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهدهای و محاسبهای میشود؛ به کمک رابطه (۴) بدست میآید:

$$m = \sum_{i} \{ \left[HVSR_{OBS}(f_{i}) - HVSR_{THE}(f_{i}) \right] W_{i} \}^{2}$$
 (۴)
wi معبار وزنی است که مطابق رابطه (۵) تعریف می شود:

HVSR_{OBS} (مدل مشاهدهای) و HVSR_{THE} (مدل تئوری) میباشند. در شکل ۳ مراحل بدست آوردن ساختار سرعتی خاک ایستگاه تهران ۲۲ (مؤسسه ژئوفیزیک) به صورت مجزا نشان داده شده است. برای سایر ایستگاههای مورد مطالعه نتایج در پیوست ۱ و ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۳: مراحل بدست آوردن ساختار سرعتی خاک ایستگاه تهران ۲۲، الف-HVSR مشاهدهای، ب- وارونسازی مدل مشاهدهای با تئوری (رنگ آبی)، ج-تابع خطا حاصل از وارونسازی، د- نتایج وارونسازی

سرعت موج برشی بدست آمده در ایستگاه تهران ۲۲ با نتایج محققین دیگر مقایسه شده است (شکل۴). در این ایستگاه زمین لرزههای کجور-فيروز آباد (۲۰۰۴) و كهك-قم (۲۰۰۷) ثبت شده است. فاصله اين ایستگاه از رومرکز زمین لرزههای کجور-فیروز آباد (۲۰۰۴) و کهک-قم (۲۰۰۷) به ترتیب در حدود ۶۴ کیلومتر و ۱۴۰ کیلومتر و شتاب بیشینه ثبت شده در آن برای این دو زمین $V(s^2 - m/s^2)$ و می شدد. با دقت در شکل ۳ (الف) مشاهده می شود که ۹/۵ cm/s^2 روش H/V فركانس غالب ساختگاه را برای این ایستگاه در محدوده فرکانسی ۴/۲ Hz و بزرگنمایی در حدود ۴ معرفی مینماید. در شکل ۳ (ج) تابع خطای بدست آمده در طی فرآیند وارون سازی برای سرعت موج برشی لایه اول و سرعت موج برشی لایه دوم در مدل نهایی نشان داده شده است. با دقت در این شکل مشاهده می شود که برای سرعت موجبرشی لایه اول (که ۲۱۵m/s برآورد شده) در ناحیهای واقع شده که دارای کمترین مقدار خطا میباشد. این مقدار برای سرعت موج برشی لایه دوم ۳۸۶ m/s تخمین زده شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات (Jafari (2001، که با انجام مطالعات گمانهزنی در محل ایستگاه، پروفیل سرعتی خاک را بدست آوردهاند (شکل۴)؛ مشاهده می شود که تا عمق حدود هفت متری تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج بدستآمده وجود دارد. البته برای عمق های بیشتر از هفت متر اختلاف

 $W_i = [HVSR_{OBS}(f_i)]^E$ $E \ge 0$ (۵) کمی در سرعتهای بدست آمده وجود دارد. از آنجا که وجود هر بیشینه در مدل مشاهدهای را میتوان به یکلایهبندی خاص نسبت داد، عمقهای بیشتر را میتوان به فرکانسهای پایینتر از ۴/۲ H_Z نسبت داد. وجود دو قله ثانویه در این محدوده فرکانسی را نیز میتوان به عنوان دلیلی برای بوجود آمدن چنین اختلافی ذکر کرد. نتایج حاصل برای ایستگاه ورزشگاه تختی (تهران ۱۷) در جنوب شرق تهران نیز در شکل ۵ نشان داده شده



است.

شکل ۴: مقایسه سرعت موج برشی بدست آمده خاک ایستگاه ۲۲ با نتایج Data1 .Jafari (2001): نتایج حاصل از این تحقیق. Data2: نتایج حاصل از Jafari (2001).



شکل ۵: مراحل بدست آوردن ساختار سرعتی خاک ایستگاه تهران ۱۷ (ورزشگاه تختی)، الف- HVSR مشاهدهای، ب- وارونسازی مدل مشاهدهای با تئوری (رنگ آبی)، ج- تابع خطا حاصل از وارونسازی، د- نتایج وارونسازی



شکل ۶: مقایسه سرعت موج برشی بدستآمده در خاک ایستگاه ورزشگاه تختی (تهران ۱۷) با نتایج (2001) Data1 : نتایج حاصل از این تحقیق. Data2: نتایج حاصل از (2001) Jafari

۳-۳- تعیین پروفیل سرعتی خاک ایستگاههای مدیریت بحران تهران

برای تعیین ساختار سرعتی ایستگاههای مدیریت بحران شهر تهران از دادههای نوفه ثبت شده در این ایستگاه استفاده شد، که این دادهها در طی یک بازه زمانی هشت ماهه به ثبت رسیدهاند. نرخ نمونهبرداری دادهها ۱۰۰ هرتز است. در گام نخست دادههایی که از کیفیت نسبتاً مناسبی برخوردار بودند، انتخاب شده و سپس به صورت جداگانه در طی دو بازه

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره6، شماره ۲، ۱۳۹۹.

مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات جعفری و همکاران (شکل۶) نشانگر آن است که برای عمقهای کم (حدود ۹ متر)، تطابق چندانی وجود ندارد؛ که این مساله را میتوان با توجه به فاصله زیاد ایستگاه شتابنگاری تا رومرکز زلزلهها، توجیه کرد. از آنجایی که شتابنگاشتها برای ثبت حرکات نیرومند زمین در فاصله نزدیک بکار میروند و نگاشتهای ثبت شده در این ایستگاه مربوط به زلزلههای با فاصله میانگین رومرکزی ۱۰۰ کیلومتر میباشد. لذا مدل مشاهدهای بدست آمده برای لایههای سطحی که مربوط به فرکانسهای بالاتر و در واقع فاصلههای نزدیک تر میباشند، چندان قابل اعتماد نیست. از طرفی بیشینه اصلی در فرکانس میاشند، چندان قابل اعتماد نیست. از طرفی بیشینه اصلی در فرکانس عنوان یک فاکتور دیگر در بوجود آمدن چنین اختلاف سرعتی در عمقهای کمتر در نظر گرفت. هر چند برای عمقهای بیشتر، سازگاری دسبتاً خوبی میان نتایج بدست آمده با مطالعات (2002) Jafari دارد.

زمانی روز و شب مورد ارزیابی قرارگرفته و مقایسه شدند؛ که بهترین نتایج در بازه زمانی بین ساعت ۲۱ تا ۲۳ شب بدست آمد. این موضوع را می توان به دلیل وجود اسپایکهای کمتر در این بازه زمانی توجیه کرد. در هر ایستگاه، رکوردهای ثبت شده به پنجرههایی با طول معین تقسیم شد. کم بودن طول پنجره سبب می شود طول موجهای بزرگ در محاسبات وارد نشوند. از طرفی، طول زیاد پنجره موجب کم شدن تعداد پنجرهها و کاهش دقت ارزیابی خطای نمودار H/V می شود. طول پنجره-ها در این تحقیق بین ۵۰ تا ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین برای پوشش دادن تمامی فرکانسهای موجود، زمان پنجره ۱۰۰ ثانیه انتخاب شده است. به منظور حذف فركانس هاى نامطلوب، فيلتر ميان گذر ۰,۱ تا ۱۵ هرتز بر سیگنال اعمال شد. فرکانسهای بالا به دلیل این که همگی در گروه ساختگاه سنگی قرار می گیرند (Zhao et al., 2006)؛ باید از نتایج حذف گردند. در کنار این مورد، به منظور حذف نوفههای نامطلوب ناشی از منابعی مانند راه رفتن انسانها، ترافیک، ماشین آلات، كارخانجات و به طور كلى فعاليتهاى صنعتى از الگوريتم -anti triggering (در نرمافزار Geopsy)، به عنوان یک روش معمول در پردازش سیگنال، استفاده شد.

در این پژوهش STA برابر ۱ ثانیه و LTA برابر ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد؛ بنابراین نسبت STA/LTA برابر ۱/۳۰ است. به منظور کاهش اثر ناپیوستگی ابتدا و انتهای سری زمانی، پنجره انتخاب شده قبل از اعمال سری فوریه در یک (Taper) ضرب شده است. در شکل ۷ نتایج حاصل از وارونسازی نسبت H/V برای ایستگاه TDM نشان داده شده است.

طالبی و همکاران، برآورد ساختار سرعت موج برشی پروفیل خاک برای ایستگاههای شتابنگاری و مدیریت بحران شهر تهران و حومه، صفحات ۱۹۵-۲۰۰.



شکل ۷: مراحل مختلف تعیین پروفیل سرعتی خاک ایستگاه TDM، الف-HVSR مشاهدهای، ب- وارونسازی مدل مشاهدهای با تئوری (رنگ آبی)، ج-تابع خطا حاصل از وارونسازی، د- نتایج وارونسازی.

با توجه به عدم وجود اطلاعات ژئوتکنیکی قابلدسترس در مورد این ایستگاهها برای اعتبارسنجی پروفیلهای سرعتی بدست آمده، به طور کلی میتوان نتایج بدستآمده را ازن ظر ساختار زمینشناسی موجود در شهر تهران مورد ارزیابی قرارداد. از نظر ساختار زمینشناسی شهر تهران بر روی یک لایه رسوبی متعلق به دورههای کواترنری و پلیوسن که بر روی یک بستر سنگی نهشته شدهاند؛ قرار دارد (JICA, 2000). ضخامت این لایه آبرفتی از شمال تهران به سمت قسمت جنوبی افزایش میابد؛ به طوری که در قسمتهای جنوبی به ۱۲۰۰ متر میرسد. با در نظر گرفتن یک مقطع پروفیلی شمالی-جنوبی (همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده)، میتوان وضعیت لایههای آبرفتی موجود را نشان داد که از مواد با جورشدگی خوبی مانند سیلت و رس تشکیل شده است؛



شکل ۸: مدل ساختار زمینشناسی برای پروفیل شمالی-جنوبی تهران (Hamzehloo et al., 2006).

لایه ۲ شامل نهشتههای جوان همراه با کنگلومرا میباشد و لایه ۳ اساساً شامل کنگلومرا با مقادیر اندک لنزهای ماسهسنگ، سیلتاستون و گلسنگ است. از آنجا که اندازه گیری مستقیمی در محل این ایستگاهها وجود ندارد، از نتایج مطالعات (2002) Jafari و (2000) JICA که در جدول ۲ نشان داده شده، برای مقایسه نتایج استفاده شده است. بر اساس روش شکست مرزی و اطلاعات مربوط به مطالعات گمانهزنی،

سرعت موج برشی برای قسمت شمالی و جنوبی تهران تخمین زده شد؛ به طوری که سرعت موج برشی (Vs) برای شمال تهران بین 250m/s تا 700m/s و (V) بین 450m/s تا 1200m/s تا عمق ۲۵ متری از سطح زمین بدست آمد. این مقدار برای قسمت جنوبی تهران برای Vs بین 120m/s تا 735m/s و برای Vp بین 285m/s تا 285m/s تا عمق متری از سطح زمین تخمین زده شد. با توجه به موقعیت ایستگاههای 1610 و 2011 که در جنوبی ترین قسمت تهران قرار گرفتهاند، نتایج حاصل تطابق خوبی با مطالعات (2002) Jafari (2002) ماده تا به طوری که برای ایستگاه 1611 بازه سرعت موج برشی بدست آمده تا مقد ۲۱ متری بین 162m/s تعیین شده است.

Layer	$\rho(g/cm^3)$	$V_P(km/s)$	Q_P	$V_s(km/s)$	Q_s
1(Silt and clay)	1.8	0.45	60	0.25	25
2(Conglomeratic young alluvial deposits)	1.9	0.90	70	0.6	30
3(Conglomerates with a few lenses of sandstone, siltstone and mudstone)	2.0	1.20	125	1.7	50

جدول ۲: ویژگیهای ژئوفیزیکی لایههای رسوبی

در مورد ایستگاه D201 مقادیر بدست آمده برای Vs بین I98m/s تا 701m/s و برای Vp بین 370m/s تا 205m/s تا عمق ۲۵ متری محاسبه شده است. در قسمت شمالی تهران ایستگاه D071 قرار دارد، که مقادیر بدست آمده برای Vs بین 272m/s تا 449m/s و برای Vp بین 510m/s تا 810m/s تا عمق ۱۶ متری قرار دارد. با توجه به این که در محل ایستگاهها تاکنون هیچگونه عملیات ژئوفیزیکی صورت نگرفته، لذا نمی توان در مورد صحت نتایج بدست آمده به طور قطع اظهارنظر نمود؛ ولی بازه سرعتی بدست آمده یک بازه سرعتی کاملاً معقول و در تشابه نسبتاً خوبی با مطالعات قبلی است. میانگین سرعت موجبرشی در ۳۰ متر فوقانی در طبقهبندی استاندارد ۲۸۰۰ ایران به عنوان یک پارامتر کمکی مورد استفاده قرار گرفت؛ که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\overline{V_s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} (d_i / V_{si})}$$
(9)

که در آن Vs سرعت موج برشی میباشد، که با رعایت اثر ضخامت لایهها تا ژرفای ۳۰ متری از سطح زمین، میانگین گیری می شود. d_i و V_{si} نیز به ترتیب ضخامت لایه i ام و سرعت موج برشی در آن است. با استفاده از رابطه (۶) و پروفیل سرعتی حاصل از ایستگاهها، یک نقشه توزیع سرعت برای ۳۰ متری بالایی در شهر تهران ارائه شده است (شکل ۹).

51'100'E 51'200'E 51'200'E 51'200'E 51'200'E 51'300'E 51'30'E 51'30'E

۳۰ شکل۹: نقشه توزیع سرعت موج برشی در گستره تهران برای عمق متوسط ۳۰ متر. مسیر آبی رنگ در نقشه بیانگر محل پروفیل برداشت شده در مطالعه است.

با توجه به فقدان دادههای ثبتشده در ایستگاههای مختلف شتابنگاری در شهر تهران نمیتوان یک برآورد دقیق از توزیع سرعت بدست آورد؛ ولی یک دید بسیار خوب از نحوه توزیع سرعت در اختیار قرار خواهد داد. مسلماً در مناطقی با توزیع ایستگاهی مناسب و همچنین لرزهخیزی نسبتاً بالا، با در اختیار داشتن دادههای مناسب و کافی، برآورد مقدار و چگونگی توزیع سرعت دقیق تر خواهد شد.

۳- نتیجهگیری

در این تحقیق ۷۶ ایستگاه شتابنگاری واقع در استان تهران و البرز بر اساس فرکانس غالب بدست آمده از روش H/V از نظر رده ساختگاه و بر اساس آییننامه ۲۸۰۰ ایران طبقهبندی گردیدهاند. نتایج طبقهبندی حاکی از آن است که رده ساختگاه در مناطق شمالی و شرقی تهران غالباً از نوع II و در مناطق جنوبی و غربی شهر تهران غالباً بین III تا IV تغییر مینماید (شکل ۹). به عبارت دیگر میتوان گفت که رسوبات شهر تهران از شمال به جنوب و یا از شرق به غرب به تدریج رفتار نرم یا سست از خود نشان میدهند. این نتایج نشاندهنده خطر ناشی از پدیده تشدید و متعاقباً تخریب و آسیب بیشتر در مناطق جنوبی و غربی شهر تهران را در اثر وقوع زمین لرزه احتمالی آشکار می سازد. با توجه به نتایج حاصل، فرکانس طبیعی بدست آمده از ایستگاههای مختلف مقادیر کاهشی را از شمال شهر به سمت جنوب شهر نشان میدهد؛ که حاکی از افزایش ضخامت لايه رسوبات است. با توجه به تغييرات فركانس طبيعي خاك، همبستگی خوبی با تغییرات سرعت خاک در ۳۰ متر بالایی در منطقه مورد مطالعه مشاهده می شود. به عبارت دیگر می توان گفت رسوبات شهر تهران از شمال به جنوب و یا از شرق به غرب به تدریج رفتار نرم یا سست از خود نشان میدهند. این نتایج نشان دهنده خطر ناشی از پدیده تشدید و متعاقباً تخریب و آسیب بیشتر در مناطق جنوبی و غربی شهر تهران در اثر وقوع زمين لرزه احتمالي است.



شکل ۱۰. طبقه بندی نوع خاک ۶۰ ایستگاه شتابنگاری استان تهران بر اساس آییننامه ۲۸۰۰ ایران.

ساختار سرعتی برای هر یک از ایستگاههای شتابنگاری و مدیریت بحران شهر تهران با استفاده از وارونسازی مدل مشاهدهای (H/V) و مدل تئورى و با استفاده الگوريتم هراك تعيين گرديد. نتايج حاصل داراى تشابه مناسبی با نتایج بدست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی و گمانهزنی پژوهشگاه بینالمللی زلزلهشناسی و همچنین مطالعات جایکا دارد. با توجه به سرعت بدست آمده از این نتایج، می توان تغییرات سرعت موج برشی در شمال و جنوب شهر تهران را توضیح داد. از نظر ساختار زمین شناسی شهر تهران بر روی یک لایه رسوبی متعلق به دورههای کواترنری و پلیوسن که بر روی یک بستر سنگی نهشته شدهاند، قرار دارد. ضخامت این لایه آبرفتی از شمال تهران به سمت قسمت جنوبی افزایش مییابد. در جنوب تهران جوان ترین لایه نهشته وجود دارد، که از مواد با جورشدگی خوبی مانند سیلت و رس تشکیل شده است. شمال تهران شامل نهشتههای همراه با کنگلومرا است. بنابراین با توجه به این نوع لايهبندى، انتظار مىرود سرعت موج برشى از سمت شمال به سمت جنوب تهران کاهش یابد. با توجه به نتایج بدستآمده میتوان ادعا کرد که میزان بزرگنمایی بیشتر و محدوده فرکانسی متأثر از اثر ساختگاهی نیز گستردهتر از نتایج قبلی است. به طوری که تشدید ناشی از اثرات ساختگاهی در این مطالعه از ۱ هرتز شروع شده و تا ۸/۵ هرتز ادامه پیدا میکند. این مساله نه تنها در سایتهای ریزدانه جنوب شهر بلکه حتی برای مناطق مرکزی و شمالی شهر نیز مشاهده می شود. دو احتمال قرار گرفتن لایههای رسوبی ضخیم با روند تدریجی افزایش سرعت موج برشی، قرار گرفته بر روی سنگبستر بسیار سخت و اثرات چندبعدی حوضه رسوبی برای توجیه چنین مسالهای توسط (Haghshenas (2005) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در تعدادی از ایستگاهها علاوه بر بیشینه اصلی، یک بیشینه دیگر نیز مشاهده می شود. بیشینه دوم ممکن است در ارتباط با نوفه صنعتی با در اثر ساختگاه ایجاد شده باشد. با توجه به ویژگیهای زمینشناسی شهر تهران و مطالعات انجام شده میتوان نتیجه گرفت که بیشینه دوم مربوط به نوفههای صنعتی نیست و احتمالاً مربوط به یک لایه کم سرعت زیرسطحی است. به طور کلی می توان

طالبی و همکاران، برآورد ساختار سرعت موج برشی پروفیل خاک برای ایستگاههای شتابنگاری و مدیریت بحران شهر تهران و حومه، صفحات ۱۹۵-۲۰۵.

- Herak, M., (2008). Model HVSR-A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. Computers and Geosciences, 34: pp. 1514–1526.
- Jafari, M.K., Razmkhah, A., Keshavarz Bakhshayesh, M., Sohrabi, A., and Pourazin, Kh., (2001). Etude Complementaire de Microzonage Sismique au Sud de Téhéran. IIEES, Spec. Pub.
- Jafari, M.K., (2002). Seismic Geotechnical Microzonation of South-East of Tehran. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Tehran, Iran
- Japan International Cooperation Agency (JICA), (2000). The Study on Seismic Microzonation of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran, Final Report.
- Komak Panah, A., Hafezi Moghaddas, N., Ghayamaghamian M.R., Motasaka, M., Jafari, M.K., and Uromieh, A., (2002). Site Effect Classification in Earth-Central of Iran, journal of seismology and Earthquake engineering, vol. 4, No. 1.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quart. Rep. Railways Tech. Res. Inst. 30, pp. 25–33.
- Seed H.B., Whitman V. R, Idriss. I, (1972). Soil Condition and Building Damage in 1976 Cases, EQ, journal Soil Mechanic and Foundation Eng. ASCE, Aga, PP. 787-807.
- Sezewa, K., Kanai, K., (1937). Possibility of free oscillations of strata excited by seismic waves, Bull. Earthq. Res. Inst, 136, pp. 1–18.
- Shafiee, A., and Azadi, A., (2007). Shear-wave velocity characteristics of geological units throughout Tehran city, Iran, Journal of Asian Earth Science, 29, pp. 105-115.
- Zhao, J.X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P.G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., and Ogawa, H., (2006). An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio: Bulletin of the Seismological Society of America, 96 (3), pp. 914-925.

تغییرات سرعت موج برشی را در شمال تهران بین 200m/s تا 800m/s و این تغییرات در جنوب تهران بین 140m/s تا 800m/5 تا عمق متوسط ۲۰ متر در نظر گرفت. از آنجا که رکوردهای بدست آمده علاوه بر ویژگیهای زمینشناسی ایستگاه، تابع عوامل چشمه و مسیر نیز هستند؛ بدیهی است که نتایج حاصل از تعداد کمتر شتابنگاشت دارای سطح اطمینان کمتری نیز میباشد. هر چند با افزایش تعداد نگاشتهای حاصل از زلزلههای مختلف در یک ایستگاه و میانگین گیری، میتوان آثار چشمه و مسیر را کاهش داد و به نتایج بهتری دست یافت. لذا تعیین پروفیل سرعتی خاک برای ایستگاههایی که دارای رکوردهای بیشتر و با کیفیت بالاتری هستند، دقیق تر خواهد بود.

۴- سپاسگزاری

نگارندگان از سازمان تحقیقات مسکن و ستاد بحران شهرداری تهران برای در اختیار قرار دادن دادهها تشکر و قدرانی مینمایند.

۵- منابع

آییننامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، "استاندارد ۲۸۰۰"، ویرایش چهارم، ۱۳۹۵.

شعبانی، ۱. میرزایی، ن.، حقشناس، ۱. و اسکندری، م.، ۱۳۸۹، برآورد سرعت موج برشی با ترکیب روشهای آرایهای و وارونسازی منحنیهای بیضیواری در ساختگاهی در جنوب تهران، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۶، ۴-۱۳.

- Boatwrigth, j., Seekoing, L. C., Fumal, T.E., Liu, H.P., and Muller, C.S., (1991). Ground motion amplification in the marina desert. Bulletin of seismological society of America, 81, pp. 1980-1997.
- Ghayamaghamian, M.R., (1997). Non-linear and linear response of the site with evaluation of actual dynamic soil properties using vertical array accelerogram and microtremors. Department of civil and environmental engineering. Ph.D. Thesis, Saitama University, Japan.
- Haghshenas, E., (2005). Condition géotechnique et aléa sismique local à Téhéran, PhD Thesis, Joseph Fourier University, Grenoble (France), p. 288
 Hamzehloo, H., Vaccari, F., Panza, G.F., (2006). Towards a reliable seismic microzonation in Tehran, Iran, Engineering Geology, 93, pp. 1–16

۶- پيوست (۱)

پروفیل سرعتی ایستگاههای شتابنگاری تهران و حومه.



شکل۱۱: ایستگاه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (تهران ۱۸)



شکل۱۲: مقایسه نتایج بدست آمده برای ایستگاه تهران ۱۸ (ساختمان تحقیقات مسكن) با مطالعات (2001) Jafari



شکل۱۳: ایستگاه هتل آزادی (تهران ۳۳)



شکل۱۴: مقایسه نتایج بدست آمده برای ایستگاه تهران ۱۸ (ساختمان تحقیقات مسكن) با مطالعات (2001) Jafari.

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره6، شماره ۲، ۱۳۹۹.



شکل۱۵: ایستگاه فیروزکوه



شکل ۱۶: ایستگاه طالقان





457



شکل ۱۸: ایستگاه ارجمند

طالبی و همکاران، بر آورد ساختار سرعت موج برشی پروفیل خاک برای ایستگاههای شتابنگاری و مدیریت بحران شهر تهران و حومه، صفحات ۱۹۵-۲۰۵.





۷- پيوست (۲)

پروفیل سرعتی ایستگاههای مدیریت بحران شهر تهران



شکل۲۰۰: ایستگاه D071



a 0012.8 2.6

2

1.5

0.6

شکل۲۱: ایستگاه D012



شکل۲۲: ایستگاه D20





(JRAG) 2020, VOL 6, NO 2 (DOI): 10.22044/JRAG.2019.8061.1234



Estimation of shear wave velocity of soil in vicinity of Tehran strong motion stations using inversion of H / V spectral ratio

Amir Talebi¹, Habib Rahimi^{2*} and Behzad Maleki³

Ph.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
 Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
 M.Sc, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 23 February 2019; Accepted: 28 September 2019

Corresponding author: rahimih@ut.ac.ir

Keywords	Extended Abstract		
Intensity	Summary		
Site effect	The overall assessment of damage to structures and installations in an earthquake		
Predominate frequency	indicates that site conditions have a significant impact on the distribution of		
Shear velocity	damages in towns and villages. In this study, the effect of soil layering on strong		
Sediments	ground motion was investigated using accelerograms recorded at the Road,		
	Housing and Development Research Center as well as Tehran Disaster Mitigation		
	and Management Organization stations. Predominate frequency was estimated for		

each station based on Nakamora methods in order to identify the type of soil in the Tehran City. A good agreement was obtained between the results of this study with those obtained from experimental studies. Finally, the distribution of shear wave velocity from the surface to the depth of 30 m was presented in this study.

Introduction

Strong earthquakes in the Iranian plateau that have caused many catastrophic phenomena reveals the importance of basic research to diminish financial damages. Assessment of effect of soil layering to the earthquake characteristics on the surface in terms of maximum acceleration, frequency content and displacements is the one of the most important matters that is of interest to earthquake engineers. Considering most of the places in the Tehran City are located on the alluvial areas that can cause a great impact on seismic waves, thus, identifying the site and its effects on the design and construction of resistant structures is necessary. One of the essential characteristics of accelerogram for future applications is to identify the soil type of association stations. The present study is based on a method, which is referred to the ratio of horizontal spectral component to its vertical type. The mentioned method is applied to identify the type of soil in the Tehran accelerogram stations.

Methodology and Approaches

In this study, we used strong ground motion data recorded at 60 stations in Tehran province. Furthermore, 8 month of continues data belonging to the Tehran Disaster Mitigation and Management Organization were also used for this purpose. Nakamora methods were also applied to estimate the predominate frequency at all stations. A 2-D map of shear wave velocity in Tehran City was prepared. In the next step, using the inversion method, the best and most suitable model for the soil in terms of thickness, velocity, quality factor and density for each station was presented, and finally, the results were compared with the values obtained from other similar studies.

Results and Conclusions

In the stations considered in this study, the frequency band related to the different structural components is very wide ranging from 1 Hz to 8.5 Hz. According to the results, it can be seen that the type of construction in the northern and eastern parts of Tehran is often type II and in the southern and western parts of Tehran often changes between III and IV. In other words, the sediments of Tehran from north to south or from east to west gradually show soft or loose behavior. As a result, the shear wave velocity variations can be considered in the north of Tehran between 200 and 800 m/s and in the south of Tehran between 140 and 600 m/s up to an average depth of 30 m.