

تعیین سرعت موج برشی ساختگاه به روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW)

و تهیه نقشه های پهنه بندی سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری زمین با سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS

(مطالعه موردی شهر شاهرود)

عرفان شرفی^{۱*}، امیر بذرافشان مقدم^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: erfansharafi014377@gmail.com

واژگان کلیدی

چکیده

یکی از ارکان مهم مطالعات ژئوتکنیک لرزه ای، شناسایی ویژگی های رفتاری و خواص دینامیکی خاک با استفاده از روش های ژئوفیزیکی است. نتایج حاصل از این مطالعات در کنار مطالعات و آزمایش های ژئوتکنیکی در رده بندی ساختگاه با استفاده از آیین نامه های ساختمانی کاربرد گسترده ای دارد. سرعت امواج برشی از جمله پارامترهای بسیار مهم و مورد نیاز در مطالعات ژئوتکنیکی است که در ارزیابی مقاومت لایه های زیرسطحی، اثرات ساخت گاهی و تعیین پروفیل لایه های زیرسطحی بکار گرفته می شود. یکی از روش های تعیین مستقیم سرعت موج برشی، روش لرزه نگاری درون چاهی است که روشی مخرب، زمان بر و پرهزینه است. در مقابل این روش، روشی تحت عنوان تحلیل چندکاناله امواج سطحی معرفی شده است که یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب، سریع و کم هزینه است. در حقیقت این روش بر اساس تولید و ثبت امواج لرزه ای در سطح زمین، تغییر حوزه داده ها از حوزه زمان - فاصله به حوزه فرکانس - سرعت فاز با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی و در نهایت به دست آوردن سرعت امواج ریلی در فرکانس های خاص (منحنی پاشش) بنا شده است. در این مطالعه ابتدا روش تحلیل چند کاناله امواج سطحی به طور مختصر شرح داده شده است و سپس نتایج حاصل از ۱۲ آزمایش MASW انجام شده در سطح شاهرود و نقشه های پهنه بندی حاصل از نتایج تحلیل این آزمایش ها که تا عمق ۳۰ متری زمین با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS تهیه شده است، ارائه می گردد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که در بیش از ۹۰ درصد از مناطق شهر شاهرود میانگین سرعت موج برشی (V_s) بین ۷۵۰ - ۳۵۰ متر بر ثانیه است، بنابراین تیپ خاک بیشتر مناطق شاهرود بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ از نوع II است.

سرعت موج برشی
تحلیل چندکاناله امواج سطحی MASW
پهنه بندی
شاهرود

۱- مقدمه

فریزر، نزدیک ونکوور، بریتیش کلمبیا، کانادا مقایسه شد. انطباق بین روش‌ها خوب بود و یک تفاوت کلی ۱۵٪ یا کمتر بین سرعت موج‌برشی حاصل از دو روش مشاهده شد. پایگاه داده سرعت موج‌برشی مشتق شده از گمانه ذکرشده را می‌توان در (Hunter et al., 1998) یافت.

Long and Donohue (2007)، آزمایش‌های MASW را در هشت سایت تحقیقاتی نروژی جمع‌آوری کردند و نشان داده شد که پروفیل‌های سرعت موج‌برشی MASW شبیه به روش‌های دیگر، مانند روش لرزه‌ای درون‌چاهی متقاطع است.

Richwalski و همکاران از MASW، به موازات چهار تکنیک محبوب ژئوفیزیک دیگر، برای تخمین اثرات سایت محلی در آلمان استفاده کردند و به نتایج ثابتی از منحنی‌های پراکندگی موج ریلی دست یافتند. Thitimakorn و همکاران تفسیرهای دوبعدی MASW را برای تخمین مشخصات سرعت موج‌برشی و عمق سنگ‌بستر در مرکز شهر سنت لوئیس، میسوری، ایالات متحده انجام داد. آن‌ها نتایج تفسیر شده خود را با داده‌های گمانه، نفوذسنج مخروطی و نفوذسنج مخروطی لرزه‌ای مقایسه کردند و همبستگی خوبی بین این داده‌های ژئوتکنیکی و نتایج MASW یافتند.

Hoffman و همکاران داده‌های سرعت موج‌برشی از آزمایش‌های MASW را با روش‌های SCPT، سوراخ متقاطع و سرعت پالس اولتراسونیک مقایسه کرد و روش MASW را به عنوان سریع‌ترین و اقتصادی‌ترین تکنیک توصیه کرد.

۲- منطقه مورد مطالعه

شهر شاهرود، مرکز شهرستان شاهرود است و با داشتن وسعت ۵۱۴۱۹ کیلومتر مربع به عنوان پهناورترین شهرستان استان سمنان شناخته می‌شود. این شهر در شمال شرقی ایران و مرکز آن در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد که از شمال و غرب به جنوبی‌ترین دامنه‌های رشته‌کوه البرز شرقی و از جنوب و شرق به دشت شاهرود محدود می‌گردد. (مهندسین مشاور پارت، ۱۳۷۰)

گستره مورد مطالعه را می‌توان از دیدگاه زمین‌شناسی به سه بخش عمده تقسیم نمود که عبارت‌اند از:

الف) بخش شمال تا جنوب غرب که ارتفاعات شمال دشت شاهرود را تشکیل داده و بخشی از زون ساختاری - رسوبی البرز شرقی است.

ب) بخش جنوبی که ارتفاعات جنوب دشت شاهرود را تشکیل می‌دهد و شامل بخش شمالی زون ایران مرکزی است.

ج) بخش مرکزی یا همان دشت شاهرود که در حدفاصل دو پهنه ساختاری - رسوبی قرار گرفته است. (فردوست، ۱۳۷۸)

امروزه روش‌های لرزه‌ای بسیاری برای به دست آوردن پروفیل سرعت موج‌برشی لایه‌های زیرسطحی وجود دارد. یکی از دقیق‌ترین آن‌ها، روش لرزه‌نگاری درون‌چاهی است. بر اساس این روش امواج حجمی در سطح زمین تولید و در درون یک گمانه توسط یک گیرنده دریافت می‌شوند. نیاز به حفر گمانه در این روش باعث وقت‌گیر، پرهزینه و گاهی غیرقابل انجام بودن این روش گردیده است. بنابراین روش‌هایی که پروفیل سرعت موج‌برشی را بدون نیاز به حفر گمانه تعیین می‌کنند، مورد توجه هستند. این روش‌ها بر اساس پراکندگی امواج سطحی بنا شده‌اند. یکی از این روش‌ها روش ارتعاشات ایستای امواج ریلی است که در سال ۱۹۵۰ معرفی شده است؛ اما این روش در دو دهه اخیر توسعه یافته و روش‌های جدیدتری نظیر روش تحلیل طیفی امواج سطحی در سال ۱۹۹۴ توسط استوک و سپس روش کامل‌تری تحت عنوان تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW) در سال ۲۰۰۰ توسط Foti معرفی گردید. این روش بر اساس تولید و ثبت امواج لرزه‌ای در سطح زمین و تغییر حوزه داده‌ها از حوزه زمان - فاصله به حوزه فرکانس - سرعت فاز با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی و در نهایت به دست آوردن سرعت امواج ریلی در فرکانس‌های خاص (منحنی پاشش) بنا شده است. در جهان و کشور ما نیز مطالعاتی در خصوص استفاده از روش غیرمخرب تحلیل چندکاناله امواج سطحی انجام شده است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

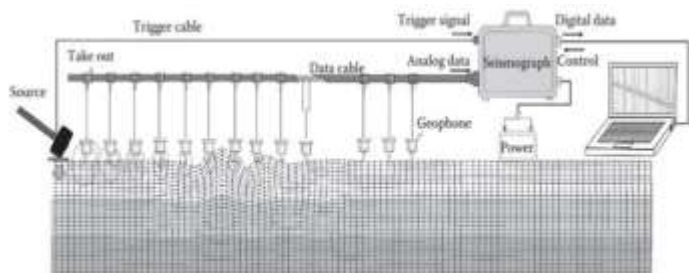
سیاه کوهی (۱۳۸۴)، به کاربرد روش‌های لرزه‌ای-*MASW (Multi-Refraction) SFR و channel Analysis of Surface Wave seismic method* در محاسبه مدل سرعت امواج S و ضرایب کشسانی لایه‌های سطحی پرداختند. در این مطالعه دو روش برای تعیین سرعت امواج برشی معرفی می‌شود که بر اساس وارون منحنی پاشش امواج ریلی حاصل از داده‌های لرزه‌ای چندکاناله هستند.

به منظور ارزیابی کارایی روش‌های مورد مطالعه، نرم‌افزارهای تدوین شده بر روی دودسته داده‌های لرزه‌ای واقعی از پروژه‌های مختلف اعمال و نتایج به دست آمده نشان داده می‌شود. نتایج به دست آمده علاوه بر همخوانی با مقادیر سرعت امواج برشی حاصل از لرزه‌نگاری انکساری، محدودیت افزایش پیوسته سرعت با عمق را ندارد.

صمدی (۱۳۸۲)، به بررسی و تعیین سرعت امواج برشی با روش SASW چندکاناله و لرزه‌نگاری P و S پرداخت.

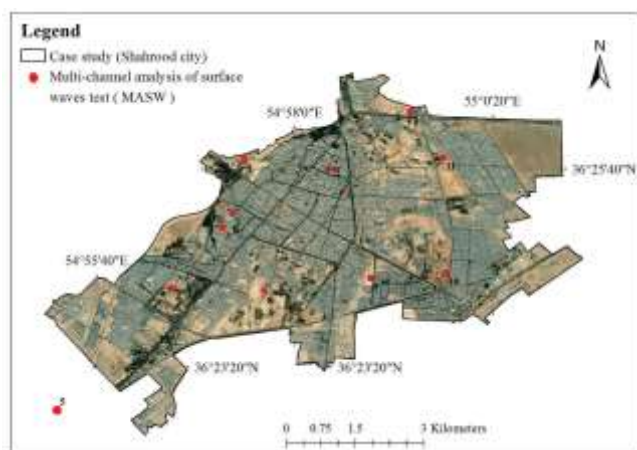
شاهسونی و همکاران (۲۰۰۸)، به تعیین سرعت موج‌برشی ساختمانی شهر شاهرود به روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی پرداختند. در این مطالعه، در یک مطالعه موردی نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از روش لرزه‌نگاری درون‌چاهی مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد، انطباق قابل قبولی بین نتایج حاصل از روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی و نتایج حاصل از روش لرزه‌نگاری درون‌چاهی وجود دارد.

Xia و همکاران (۲۰۰۲)، برای تأیید روش MASW، پروفیل‌های سرعت موج‌برشی MASW از نظر آماری با پروفیل‌های سرعت موج‌برشی اندازه‌گیری شده در هشت گمانه در رسوبات تجمیع نشده دلتای رودخانه



شکل ۲ نحوه انجام عملیات صحرایی به روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی (foti et al., 2014)

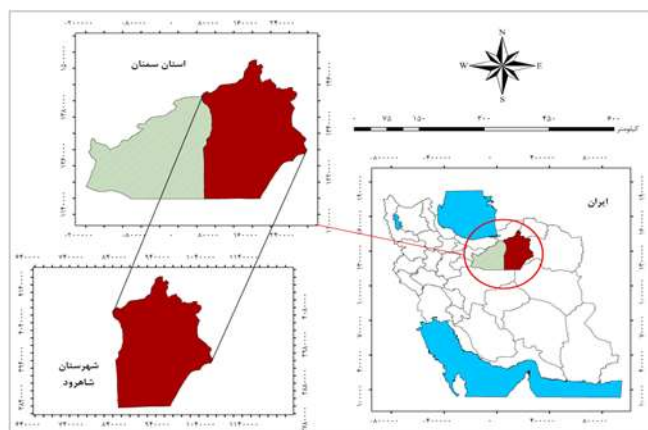
به منظور تخمین پروفیل سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری، عملیات برداشت داده در ۱۲ نقطه از سطح شاهرود که هم دارای پراکندگی کافی باشند و هم فضای کافی جهت انجام آزمایش وجود داشته باشد مطابق شکل ۳ انجام شد.



شکل ۳ موقعیت تست‌های لرزه‌نگاری

در تحقیق حاضر برای جمع‌آوری داده‌ها از منبع لرزه‌ای فعال (پتک) استفاده شده و عمق هدف برای بررسی ۳۰ متر در نظر گرفته شده. همچنین طول زمان ثبت رکورد ($msec$) ۸۰۰ است. هندسه و طرح برداشتی که مورد استفاده قرار گرفته استفاده از ۱۲ گیرنده عمودی با فاصله‌های یکسان و در یک راستا با منبع لرزه‌ای است. به دلیل اینکه عمق هدف برای بررسی ۳۰ متر در نظر گرفته شده است فاصله بین گیرنده‌ها در ۱۱ تست انجام شده ۵ متر و فقط در ۱ تست به علت محدودیت در فضا، فاصله گیرنده‌ها ۲ متر در نظر گرفته شده؛ بنابراین طول آرایه جهت برداشت داده ۶۰ متر است.

در آزمایش‌های انجام شده به جهت داشتن داده‌ها و نتایج بیشتر و تحلیل‌های دقیق‌تر ساختگاه، برای هر آزمایش موقعیت منبع لرزه‌ای در ۵ نقطه مختلف از طول آرایه قرار گرفته و در نتیجه ۵ شات با موقعیت‌های مکانی مختلف منبع، برداشت شده است که به قرار زیر هستند:



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهر شاهرود در استان

۳- روش انجام تحقیق

روش لرزه‌نگاری تحلیل چندکاناله امواج سطحی در سه گام تا رسیدن به مرحله نهایی که همان پروفیل سرعت موج برشی است، انجام می‌گیرد. (park et al., 2000)

۱. عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها

۲. پردازش داده‌ها و به دست آوردن منحنی پاشش

۳. معکوس سازی منحنی پاشش و به دست آوردن پروفیل سرعت موج برشی

۴- عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها

برای انجام آزمایش تحلیل چندکاناله امواج سطحی، برداشت داده‌های لرزه‌ای به طور معمول با یک منبع فعال سطحی و ثبت جبهه موج ناشی از آن صورت می‌گیرد. منبع مورد استفاده برای تولید امواج سطحی می‌تواند ضربه‌ای و ارتعاشی باشد. منبع‌های ضربه‌ای در اکثر مواقع چکش‌های کوچک برای تولید فرکانس‌های بالا و سقوط وزنه برای تولید فرکانس‌های پایین است. برای ثبت ارتعاشات نیز از ژئوفون‌های موج P و موج S استفاده می‌شود که به دستگاه ثبت داده‌های دیجیتال متصل است. تعداد گیرنده‌ها، فاصله آن‌ها و بازه‌های ضبط داده‌ها نیز برای یک داده‌برداری با کیفیت دارای اهمیت است. درواقع برای داده‌برداری در این مرحله از دستگاه لرزه‌نگاری که حداقل دارای ۱۲ کانال است، استفاده می‌شود. فاصله بین ژئوفون‌ها باید یکسان در نظر گرفته شوند. این فاصله معمولاً بین ۱ تا ۵ متر در نظر گرفته می‌شود، با توجه به عمق مورد بررسی و منبع مولد موج انتخاب می‌شود. (foti et al. 2014)

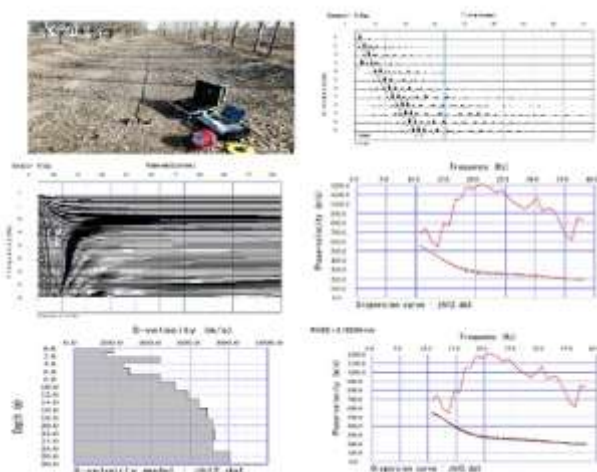
همچنین منبع مولد موج و ژئوفون‌ها باید بر روی یک خط راست قرار گیرند. نحوه انجام عملیات صحرایی و تجهیزات مورد نیاز در روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی در شکل (۲) نشان داده شده است.

تحلیل فرکانس- سرعت فاز ارائه شده است که در آن: (الف) داده‌های میدانی؛ (ب) طیف فرکانس - سرعت فاز؛ (ج) منحنی پاشش، می‌باشند.

۴-۲- برگردان منحنی پاشش

واژه برگرداندن در ژئوفیزیک به معنای تخمین پارامترهای یک مدل فرض شده است. برگرداندن آخرین مرحله روش امواج سطحی است که شامل تخمین پارامترهای یک مدل لایه‌بندی با استفاده از منحنی پاشش به‌دست‌آمده در سایت است. (Strobbia et al., 2003)

جهت برگردان منحنی پاشش در ابتدا یک سری پارامترهای اولیه برای مدل در نظر گرفته می‌شود و سپس منحنی پاشش نظری باتوجه‌به پارامترهای اولیه محاسبه می‌شود که این فرایند به مدل‌سازی پیشرو معروف است و در تمامی تحلیل‌های برگردان به کار می‌رود. سپس منحنی پاشش داده‌های آزمایشگاهی میدانی نیز محاسبه می‌شود و در این مرحله سعی می‌گردد که منحنی پاشش آزمایشگاهی و نظری بیشترین مطابقت را باهم داشته باشند و میزان خطا حداقل گردد و بدین ترتیب پارامترهای خاک به دست می‌آیند. (Strobbia et al., 2003)



شکل ۵ مراحل کلی انجام آزمایش تحلیل چندکاناله امواج سطحی

برای تحلیل داده‌های برداشت‌شده از آزمایش‌ها و تهیه منحنی‌های پاشش و پروفیل سرعت موج‌برشی از نرم‌افزار *Pickwin* و *WaveEq* که از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار *SEISIMAGER* هستند، استفاده شده است. داده‌های برداشت شده بعلاوه وجود نوفه و نویزهای محیطی بصورت خام برای استخراج منحنی پاشش مناسب نیستند و برای بهبود و کاهش خطا از فیلترهای *BFP* و *Reduce DC* برای حذف نویز و فیلتر فرکانس‌های کمتر از ۱ و بیشتر از ۵۰ هرتز استفاده شده است.

۵- پروفیل‌های سرعت موج‌برشی

پس از برداشت و تحلیل و برگردان منحنی پاشش به‌دست‌آمده، پروفیل‌های سرعت موج‌برشی در شکل‌های ۶ تا ۱۷ ارائه شده است.

۱- اولین شات در فاصله‌ای برابر با ۵ برابر فاصله گیرنده‌ها از سمت ژئوفون اول (شات دور)

۲- دومین شات در نزدیکی ژئوفون اول

۳- سومین شات در فاصله بین ژئوفون ۶ و ۷ (شات وسط)

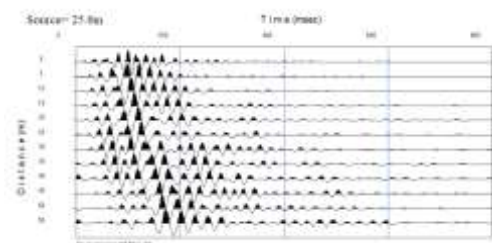
۴- چهارمین شات در نزدیکی ژئوفون دوازدهم

۵- پنجمین شات در فاصله‌ای برابر با ۵ برابر فاصله بین گیرنده‌ها از سمت ژئوفون دوازدهم (شات دور)

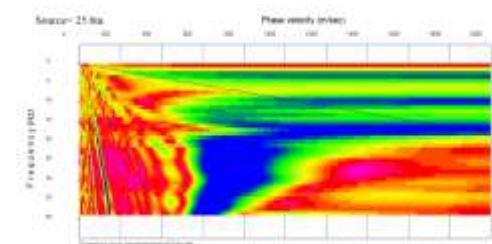
لازم به ذکر است برای استخراج منحنی‌های پاشش از داده‌های شات چهارم استفاده شده. برای انجام آزمایش *MASW* از دستگاه لرزه‌نگار ۱۲ کاناله مدل *SPSEISw-12* استفاده گردیده است و ژئوفون‌های مورد استفاده نیز از نوع ۴،۵ هرتز است.

۴-۱- پردازش داده‌ها

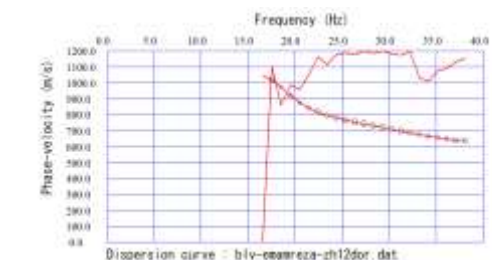
پردازش همان استخراج منحنی پاشش از داده‌های آزمایشگاهی ثبت‌شده است. برای به‌دست‌آوردن این منحنی پاشش، روش‌های تحلیلی زیاد وجود دارد که اساس کار اکثر آن‌ها تبدیل فوریه است. درواقع با تبدیل فوریه می‌توان مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال‌ها را از هم جدا نمود. سپس سرعت‌های فازی را محاسبه کرد. در این تحقیق از روش فرکانس - سرعت فاز برای تحلیل منحنی پاشش استفاده شده است. در شکل (۴) منحنی پاششی با برداشتن بیشینه‌های نمودار فرکانس - سرعت فاز به دست می‌آید.



(الف)



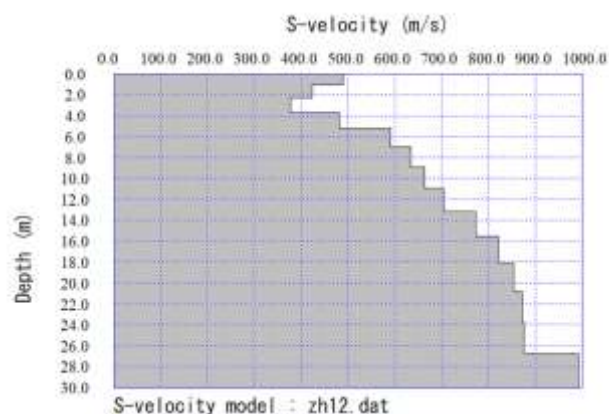
(ب)



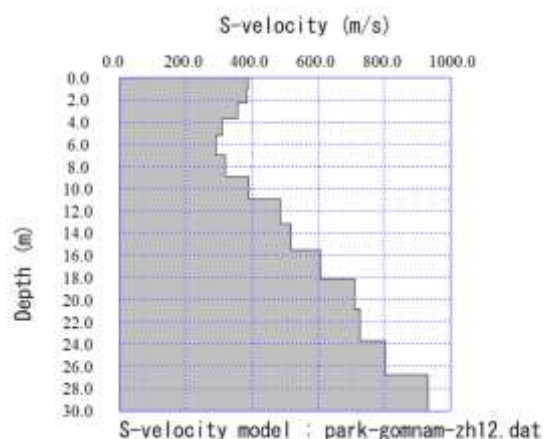
(ج)

شکل ۴ نمونه‌ای از پردازش داده‌های آزمایشگاهی

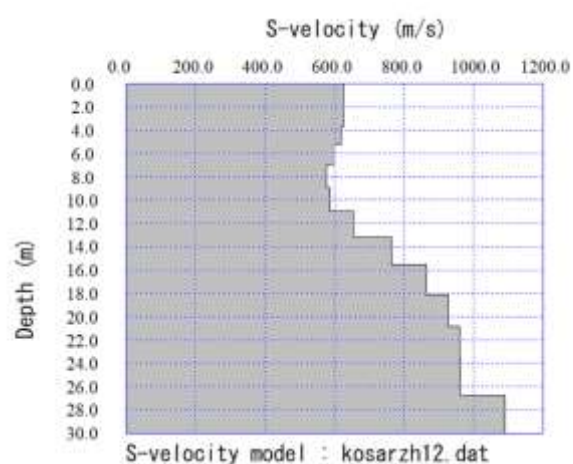
در شکل (۴) نمونه‌ای از پردازش داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از



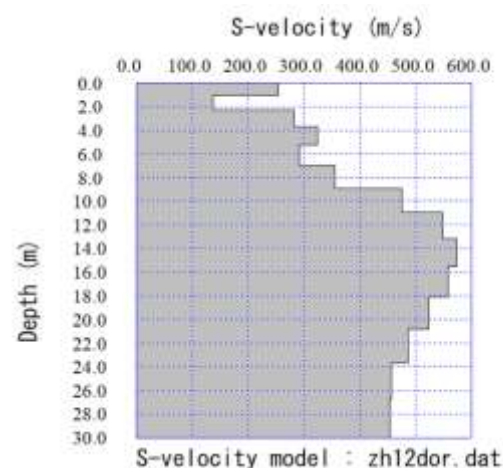
شکل ۸. پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۳ (کاج)



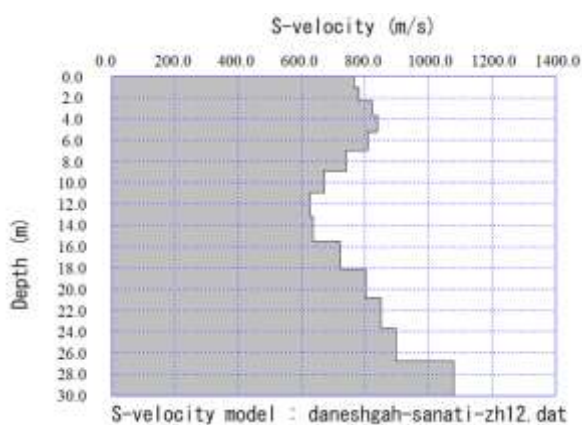
شکل ۶. پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۱ (شهیدای گمنام)



شکل ۹. پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۴ (شهرک کوثر)

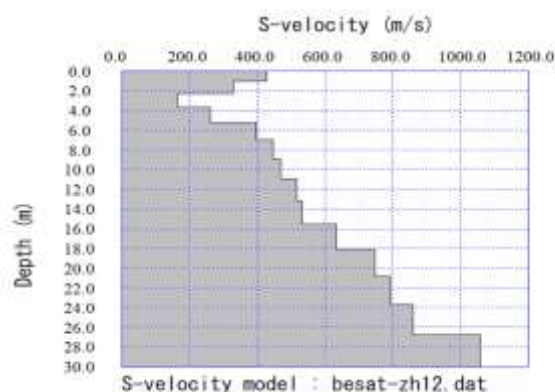


شکل ۷. پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۲ (شهید مدنی)

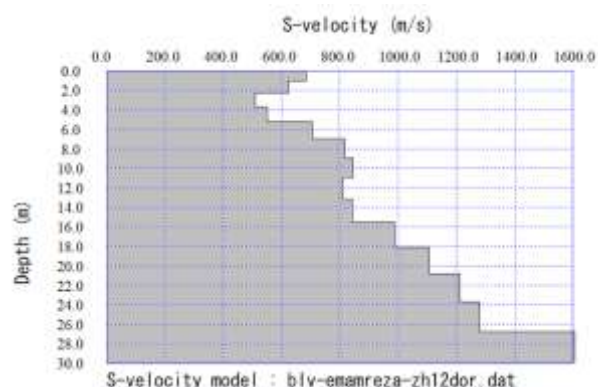


شکل ۱۰. پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۵ (دانشگاه صنعتی)

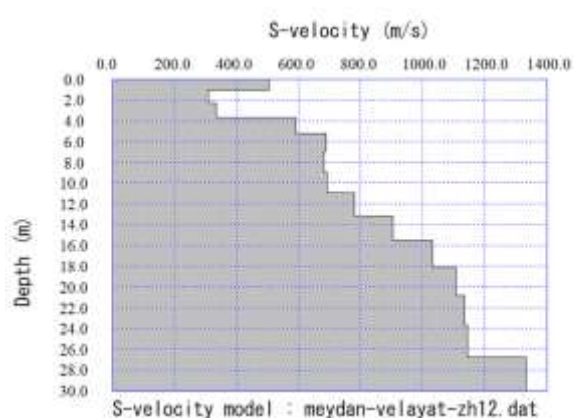
تعیین سرعت موج برشی ساخته‌گاه به روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW)، شرفی و بذرافشان مقدم، صفحات ۴۱-۵۱.



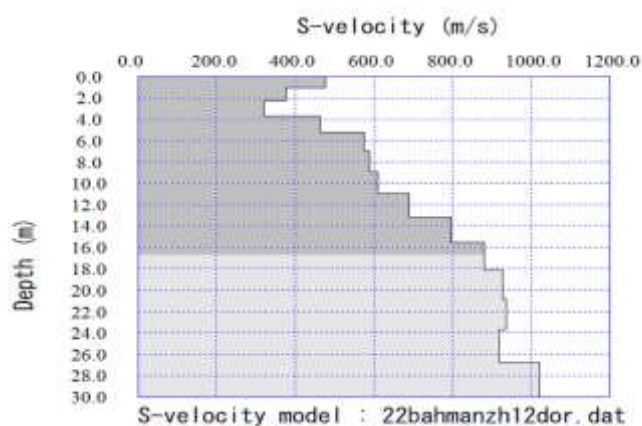
شکل ۱۴ پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۹ (شهرک انقلاب)



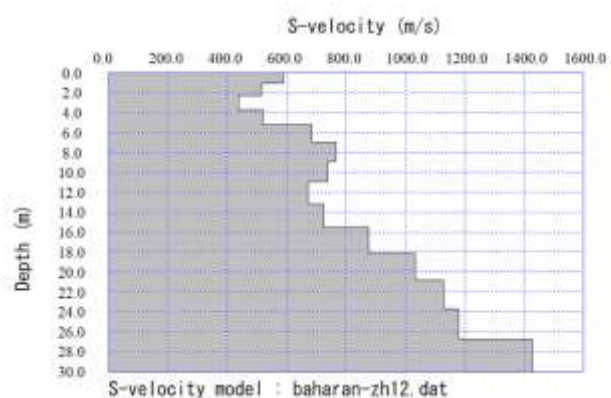
شکل ۱۱ پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۶ (بلوار امام رضا)



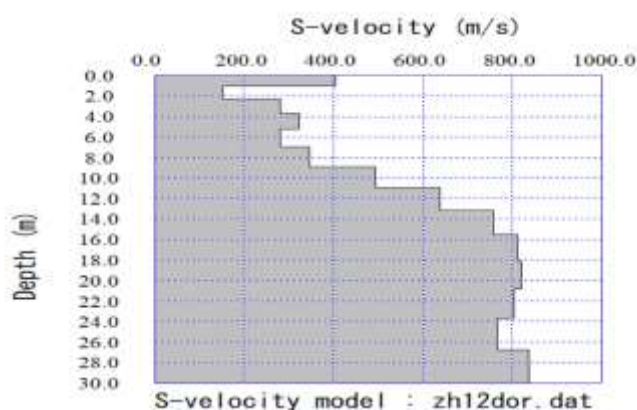
شکل ۱۵ پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۱۰ (میدان ولایت)



شکل ۱۲ پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۷ (۲۲ بهمن)



شکل ۱۶ پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۱۱ (بلوار بهاران)



شکل ۱۳ پروفیل سرعت موج برشی تست شماره ۸ (بلوار کرامت)

بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه‌ی مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به طول یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند.

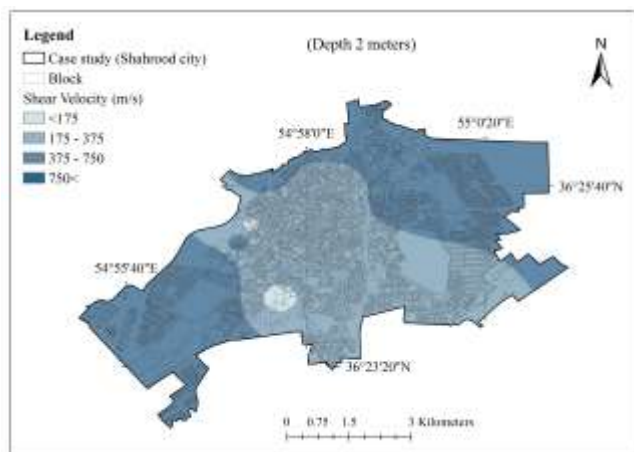
تحلیل‌های لازم بر روی پارامتر سرعت موج‌برشی (V_s) در لایه‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متری انجام و در جدول ۱ روش استفاده‌شده برای هر عمق به همراه مقدار خطا ارائه شده است.

جدول ۱. روش درون‌یابی و مقدار خطا برای سرعت موج‌برشی

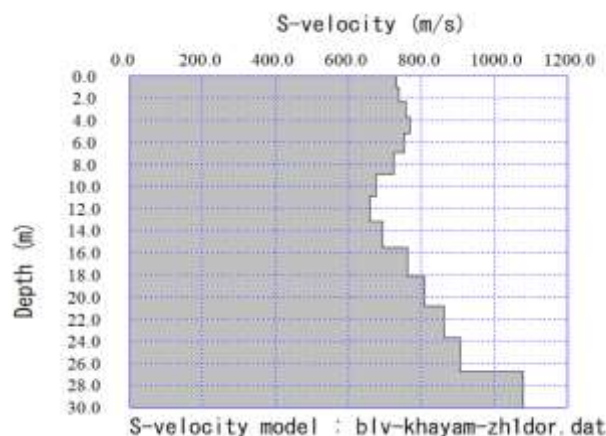
عمق	روش درون‌یابی	مدل	RMSE
۲ متر	IDW: power:2.4	-	۱۹۰,۳
۵ متر	IDW: power:2.4	-	۱۴۴,۴۶
۱۰ متر	IDW: power:1.5	-	۱۳۳,۲۶
۱۵ متر	IDW: power:2.4	-	۱۱۰,۶۱
۲۰ متر	IDW: power:2.4	-	۹۸,۴۳
۲۵ متر	IDW: power:2.4	-	۱۱۵,۰۲
۳۰ متر	IDW: power:2.4	-	۱۱۵,۰۲

۷- نتایج پهنه‌بندی

پس از استخراج میانگین سرعت موج‌برشی از روی پروفیل‌های سرعت موج‌برشی در عمق‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متری، تحلیل‌های لازم با استفاده از نرم‌افزار ۱۰ ArcGis انجام و نقشه‌های پهنه‌بندی ترسیم گردیده است.



شکل ۱۸ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲ متری



شکل ۱۷ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۱۲ (بلوار خیام)

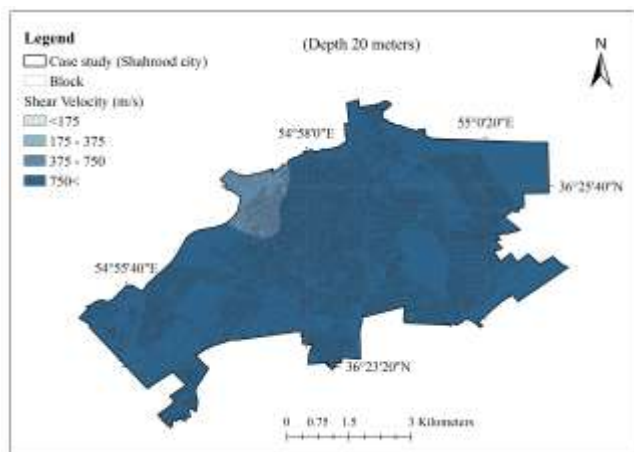
۶- انتخاب روش درون‌یابی

پس از تحلیل نتایج و به‌دست‌آوردن پروفیل‌های سرعت موج‌برشی تا عمق ۳۰ متری برای هر یک از ۱۲ تست انجام‌شده در سطح شهر شاهرود، اقدام به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از میانگین سرعت موج‌برشی محاسبه‌شده در هر عمق با نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی ARC GIS شده است؛ لذا لازم است برای داشتن نقشه‌هایی با دقت و کیفیت بالا روش‌های مختلف درون‌یابی با استفاده از داده‌های موجود مورد ارزیابی قرار بگیرد و درنهایت بهترین روش درون‌یابی انتخاب شود. برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی از روش ارزیابی متقابل استفاده شده است. در این روش یک نقطه به‌صورت موقتی حذف و با اعمال درون‌یابی موردنظر برای آن نقطه مقداری برآورد می‌گردد، سپس مقدار حذف‌شده در جای خود برگردانده شده و برای بقیه نقاط به‌صورت مجزا این برآورد صورت می‌گیرد. در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده می‌توان مقدار خطا روش استفاده‌شده را برآورد کرد. در این تحقیق برای این کار و جهت انتخاب مدل بهینه از معیار RMSE استفاده شده است. باتوجه‌به انجام روش‌های درون‌یابی مختلف، درنهایت روش درون‌یابی IDW که دارای کمترین مقدار خطا RMSE بود، برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سرعت موج‌برشی انتخاب گردید.

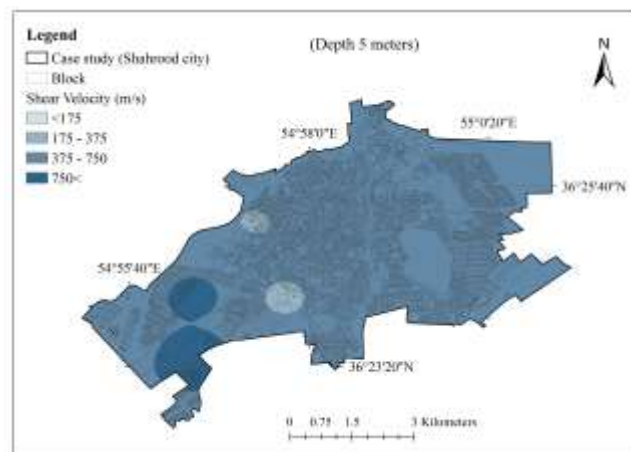
۶-۱- روش درون‌یابی IDW

در این روش مقادیر نقاط مجهول از طریق میانگین‌گیری مقادیر نقاط معلوم در نزدیکی تخمین زده می‌شود. هرکدام از نقاط در محاسبه دارای وزنی می‌باشند، به طوری‌که هر چه فاصله نقطه معلوم به نقطه مجهول کمتر باشد، ارزش وزنی آن نیز بیشتر است و هر چه این فاصله بیشتر شود، اثربخشی نقطه معلوم در تخمین نقطه مجهول و محاسبه میانگین نیز کاهش می‌یابد، پس فواصل نزدیک‌تر وزن بالاتری می‌گیرند. این وزن‌ها توسط توان وزن دهی کنترل می‌شوند، به‌طوری‌که توان‌های

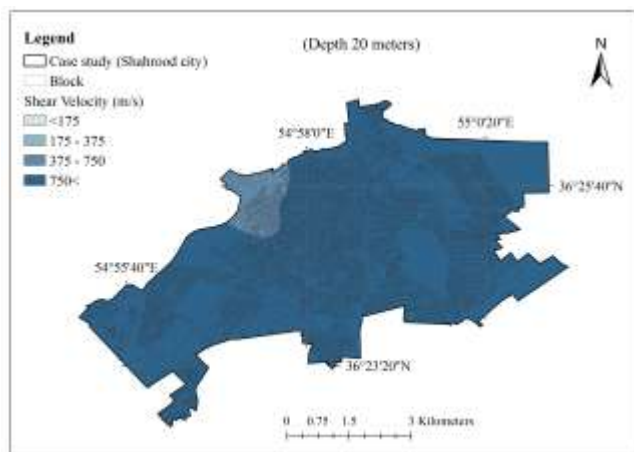
تعیین سرعت موج‌برشی ساخته‌گاه به روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW)، شرفی و بذرافشان مقدم، صفحات ۴۱-۵۱.



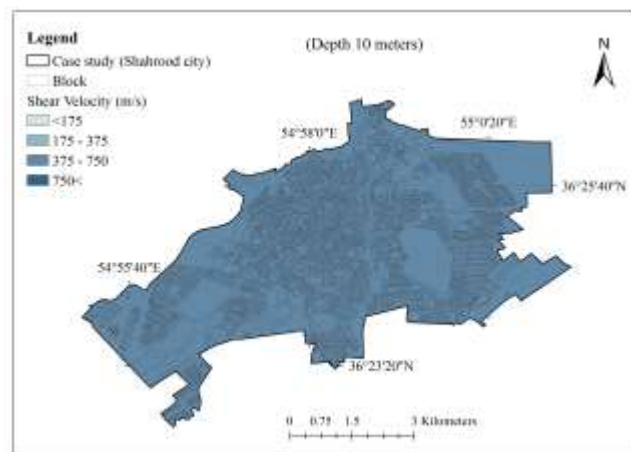
شکل ۲۲ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲۰ متری



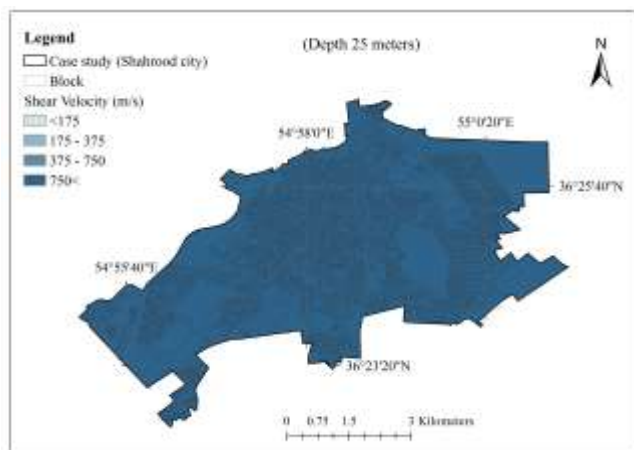
شکل ۱۹ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۵ متری



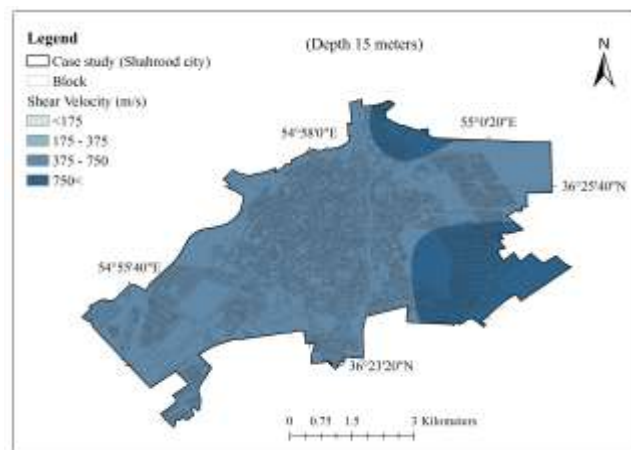
شکل ۲۳ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲۰ متری



شکل ۲۰ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۱۰ متری



شکل ۲۴ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲۵ متری



شکل ۲۱ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۱۵ متری

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۱، ۱۴۰۴.

پارامتر سرعت موج‌برشی شاهرود در عمق‌های مختلف پهنه‌بندی گردید. این پهنه‌بندی تقریب خیلی خوبی را از میانگین سرعت موج‌برشی خاک به مهندسان ارائه می‌دهد که در طراحی‌ها می‌توان از آن استفاده نمود. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد:

۱. نقشه‌های پهنه‌بندی سرعت موج‌برشی نشان می‌دهد که مطابق انتظار سرعت موج‌برشی با افزایش عمق از سطح زمین در حال افزایش است.

۲. در عمق ۲ متری مشاهده می‌شود که قسمت مرکزی، جنوب و جنوب غربی و شمال دارای خاک با سرعت موج‌برشی بین ۳۷۵-۱۷۵ متر بر ثانیه و بخش‌های غربی و شرقی از خاک متراکم و قوی‌تری برخوردار هست و می‌توان گفت تیپ خاک در شرق و غرب نوع ۲ و در سایر مناطق نوع ۳ است.

۳. با پیشروی در عمق مشاهده می‌شود که در عمق ۵ متری ۹۰ درصد مناطق دارای سرعتی بین ۷۵۰-۳۷۵ است و تیپ ۲ می‌باشد.

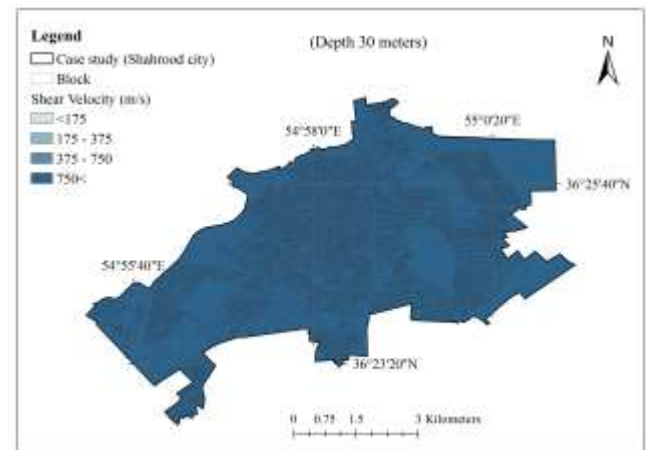
۴. در عمق ۱۰ متری از سطح زمین تمام شهر دارای خاکی از نوع تیپ ۲ هستند و با افزایش عمق در ۱۵ متری مشاهده می‌شود که قسمت‌های جنوب غربی و شمال غربی دارای سرعت موجی بالاتر از ۷۵۰ هستند.

۵. در عمق ۲۰ متری می‌بینیم که تمام مناطق خاکی از نوع تیپ ۱ دارند به‌جز منطقه کوچکی از شمال شرقی که تیپ ۲ است.

۶. و درنهایت در عمق‌های ۲۵ و ۳۰ متری شاهد یکدست شدن رنگ نقشه هستیم که به معنی این است که سرعت موج‌برشی از عمق ۲۵ متری به بعد بالای ۷۵۰ است و می‌توان گفت که سنگ است.

۷. باتوجه‌به داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های *MASW*، میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۳۰ متری در محدوده خیابان شهید مدنی تا خیابان دانشجو کمتر از ۳۷۵ متر بر ثانیه است و این منطقه ضعیف‌ترین نوع خاک را در سطح شاهرود دارا است. همچنین قسمت‌های نوار شمالی شاهرود با میانگین سرعت موج‌برشی بالاتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه قوی‌ترین قسمت‌های شهر از نظر تیپ خاک می‌باشند و سایر مناطق میانگین سرعتی بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه دارند و می‌توان گفت بخش عمده خاک شاهرود از نوع II است.

۸. باتوجه‌به اینکه میانگین سرعت موج‌برشی در عمق‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متری اندازه‌گیری شده و نقشه‌های پهنه‌بندی آن‌ها تهیه شده است. با بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی می‌توان نتیجه گرفت که مطابق انتظار با پیشروی در عمق سرعت



شکل ۲۵ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۳۰ متری

جدول ۲. تقسیم‌بندی نوع زمین از نظر لرزه‌ای بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰- ویرایش چهارم)

نوع زمین	توصیف لایه‌بندی زمین	میانگین $v_s (m/s)$
I	سنگ و شبه سنگ، شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاک‌ها سیمانته بسیار محکم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف‌تر تا سطح زمین خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل شن و ماسه خیلی متراکم، رس	>750
II	بسیار سخت باضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن به‌تدریج با افزایش عمق بهبود یابد	$750-375$
III	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت باضخامت بیشتر از ۳۰ متر خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک	$375-175$
IV	غیرچسبنده یا باکمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم	<175

۸- نتیجه‌گیری

با انجام ۱۲ آزمایش لرزه‌نگاری تحلیل چندکاناله امواج سطحی (*MASW*) و تحلیل داده‌های برداشت‌شده با نرم‌افزار *SEISMAGER*، پروفیل‌های سرعت موج‌برشی و میانگین سرعت موج‌برشی در عمق‌های مختلف تهیه شد، سپس با به‌کارگیری نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی *ArcGis*

- Geotechnical Journal, vol. 44, no. 5, pp. 533-544, 2007.
- Park, C.B., (2000). User Manual of SurfSise Software. Kansas Geological Survey.
- S. M. Richwalski, M. Picozzi, S. Parolai et al., "Rayleigh wave dispersion curves from seismological and engineeringgeotechnical methods: a comparison at the Bornheim test site (Germany)," Journal of Geophysics and Engineering, vol. 4, no. 4, pp. 349-361, 2007.
- S. Foti, C. G. Lai, G. J. Rix, and C. Strobbia, Surface wave methods for near-surface site characterization: CRC Press, 2014
- T. Thitimakorn, N. L. Anderson, R. Stephenson, and W. Liu, 2- D Shear Wave Velocity Profile Along Test Segment of Interstate I70, Site Characterization and Modeling, ASCE, St. Louis, Mo, USA, 2005.

موج برشی افزایش یافته است و در عمق ۱۰ متری تیپ خاک تمام شاهرود از نوع II است و از عمق ۲۰ متر به بعد در تمام مناطق سرعت موج برشی بالاتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه است و از نوع I است.

۹. با توجه به تعداد و پراکندگی نقاط آزمایش و تعمیم آنها به محدوده بزرگی مانند شهر شاهرود، لازم است که نقشه های تهیه شده با استفاده از اطلاعات کمکی به منظور راستی آزمایی بیشتر در مطالعات بعدی ارزیابی شوند.

۹- مراجع

- حمیدرضا سیاه کوهی، غزاله رسانه، " کاربرد روش های لرزه ای MASW و SRF در محاسبه مدل سرعت امواج S و ضرایب کشسانی لایه های سطحی " دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اسفندماه ۱۳۸۴
- شرکت مهندسين مشاور پارت، (۱۳۷۰): " طرح جامع (توسعه عمران حوزه نفوذ) شاهرود". اداره كل مسكن و شهرسازى استان سمنان.
- فردوست، ف.ا. (۱۳۷۸): " تهیه نقشه زمین شناسی ۱:۵۰،۰۰۰ شاهرود"، طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- لطیف صمدی، " تعیین سرعت امواج برشی با روش SASW چند کاناله و لرزه نگاری P و SH " خلاصه مقالات یازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، آذر ماه ۱۳۸۲ تهران
- هاشم شاهسونی، ایرج پیروز، حافظی مقدس، ناصر (۲۰۰۸)، تعیین سرعت موج برشی ساختگاه به روش تحلیل چند کاناله امواج سطحی (مطالعه موردی در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود)
- C. Strobbia, "Surface wave methods: acquisition, processing and inversion," Torino: Politecnico di Torino, 2003.
- D. Hoffman, R. W. Stephenson, R. Luna, and N. L. Anderson, "Non-destructive testing of earthquake hazard mapping, Southern Missouri, USA," in Ground Modification and Seismic Mitigation, pp. 433-440, ASCE, 2006.
- Foti S. (2000). Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD dissertation, Politecnico di Torino, Italy
- J. Xia, R. D. Miller, C. B. Park, J. A. Hunter, J. B. Harris, and J. Ivanov, "Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multi-channel surface wave with borehole measurements," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 22, no. 3, pp. 181-190, 2002.
- J. A. Hunter, R. A. Burns, R. L. Good, and C. F. Pelletier, "A compilation of shear wave velocities and borehole geophysical logs in unconsolidated sediments of the Fraser River delta," Geological Survey of Canada, Open File No. 3622, 1998.
- M. Long and S. Donohue, "In situ shear wave velocity from multi-channel analysis of surface waves (MASW) tests at eight Norwegian research sites," Canadian