JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دانشگاه صنعتی شاهرود
انجمن ژئوفیزیک ایران - ۱۳۵٤
Iranian Geophysical Society- 1975

دوره ۸، شماره۴، سال ۱۴۰۱، صفحات ۳۱۵ - ۳۲۶

شناسه دیجیتال(DOI): 10.22044/JRAG.2024.14290.1357

تعیین سرعت موج‌برشی ساختگاه به روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW) و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سرعت موج‌برشی تا عمق ۳۰ متری زمین با سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS (مطالعه موردی شهر شاهرود)

عرفان شرفی[1*] ، امیر بذرافشان مقدم[2]

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

سرعت موج‌برشی
تحلیل چندکاناله امواج سطحی MASW
پهنه‌بندی
شاهرود

چکیده

یکی از ارکان مهم مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای، شناسایی ویژگی‌های رفتاری و خواص دینامیکی خاک با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی است. نتایج حاصل از این مطالعات در کنار مطالعات و آزمایش‌های ژئوتکنیکی در رده‌بندی ساختگاه با استفاده از آیین‌نامه‌های ساختمانی کاربرد گسترده‌ای دارد. سرعت امواج برشی ازجمله پارامترهای بسیار مهم و موردنیاز در مطالعات ژئوتکنیکی است که در ارزیابی مقاومت لایه‌های زیرسطحی، اثرات ساخت گاهی و تعیین پروفیل لایه‌های زیرسطحی بکار گرفته می‌شود. یکی از روش‌های تعیین مستقیم سرعت موج‌برشی، روش لرزه‌نگاری درون‌چاهی است که روشی مخرب، زمان‌بر و پرهزینه است. در مقابل این روش، روشی تحت عنوان تحلیل چندکاناله امواج سطحی معرفی‌شده است که یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب، سریع و کم‌هزینه است. در حقیقت این روش بر اساس تولید و ثبت امواج لرزه‌ای در سطح زمین، تغییر حوزه داده‌ها از حوزه زمان - فاصله به حوزه فرکانس - سرعت فاز با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی و درنهایت به‌دست‌آوردن سرعت امواج ریلی در فرکانس‌های خاص (منحنی پاشش) بناشده است. در این مطالعه ابتدا روش تحلیل چند کانالهٔ امواج سطحی به طور مختصر شرح داده شده است و سپس نتایج حاصل از ۱۲ آزمایش *MASW* انجام‌شده در سطح شاهرود و نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از نتایج تحلیل این آزمایش‌ها که تا عمق ۳۰ متری زمین با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی *GIS* تهیه‌شده است، ارائه می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در بیش از ۹۰ درصد از مناطق شهر شاهرود میانگین سرعت موج‌برشی(V_S) بین ۷۵۰ – ۳۵۰ متر بر ثانیه است، بنابراین تیپ خاک بیشتر مناطق شاهرود بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ از نوع *II* است.

۱- مقدمه

امروزه روش‌های لرزه‌ای بسیاری برای به‌دست‌آوردن 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 گاهاً غیرقابل‌انجام بودن این روش گردیده است. بنابراین روش‌هایی که پروفیل سرعت موج‌برشی را بدون نیاز به حفر گمانه تعیین می‌کنند، موردتوجه هستند. این روش‌ها بر اساس پراکندگی امواج سطحی بناشده‌اند. یکی از این روش‌ها روش ارتعاشات ایستای امواج ریلی است که در سال ۱۹۵۰ معرفی‌شده است؛ اما این روش در دو دهۀ اخیر توسعه‌یافته و روش‌های جدیدتری نظیر روش تحلیل طیفی امواج سطحی در سال ۱۹۹۴ توسط استوکو 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 درنهایت به‌دست‌آوردن سرعت امواج ریلی در فرکانس‌های خاص (منحنی پاشش) بناشده است. در جهان و کشور ما نیز مطالعاتی در خصوص استفاده از روش غیرمخرب تحلیل چندکانالۀ امواج سطحی انجام‌شده است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

سیاه کوهی (۱۳۸۴)، به کاربرد روش‌های لرزه‌ای *MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave)* و *SFR (seismic method Refraction)* 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.

به‌منظور ارزیابی کارایی روش‌های موردمطالعه، نرم‌افزارهای تدوین‌شده بر روی دودسته داده‌های لرزه‌ای واقعی از پروژه‌های مختلف اعمال و نتایج به‌دست‌آمده نشان داده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده 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 ساختگاه 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* ازنظر آماری با پروفیل‌های سرعت موج‌برشی اندازه‌گیری شده در هشت گمانه در رسوبات تجمیع نشده دلتای رودخانه 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*، به‌موازات 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 به‌عنوان سریع‌ترین و اقتصادی‌ترین تکنیک توصیه کرد.

۲- منطقه موردمطالعه

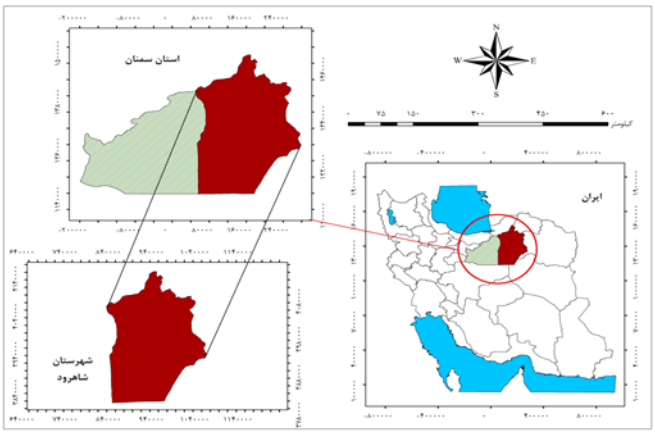
شهر شاهرود، مرکز شهرستان شاهرود است و با داشتن وسعت ۵۱۴۱۹ کیلومترمربع به‌عنوان پهناورترین شهرستان استان سمنان شناخته می‌شود. این شهر در شمال شرقی ایران و مرکز آن در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد که از شمال و غرب به جنوبی‌ترین دامنه‌های رشته‌کوه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

گستره موردمطالعه 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)



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهر شاهرود در استان

۳- روش انجام تحقیق

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

۱. عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها

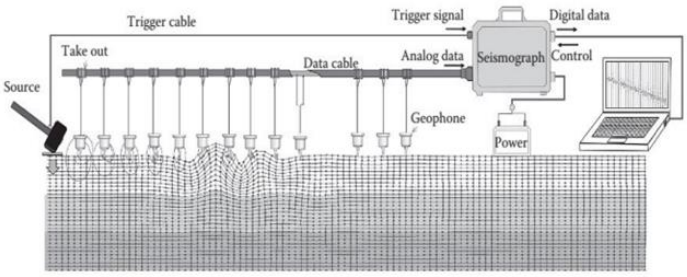
۲. پردازش داده‌ها و به دست آوردن منحنی پاشش

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

۴- عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها

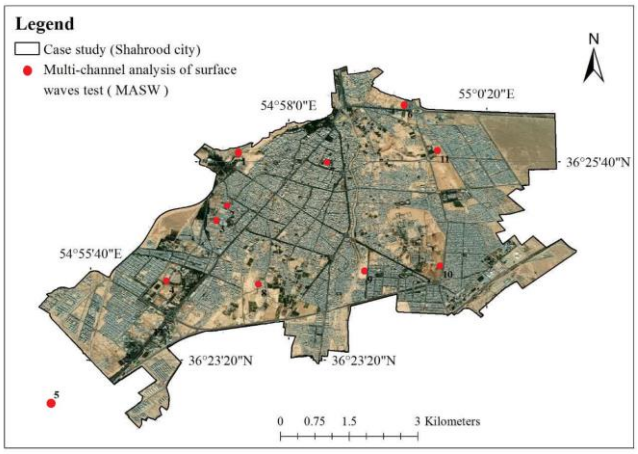
برای انجام آزمایش تحلیل چندکاناله امواج سطحی، برداشت داده‌های لرزه‌ای به طور معمول با یک منبع فعال سطحی و ثبت جبههٔ موج ناشی از آن صورت می‌گیرد. منبع مورداستفاده برای تولید امواج سطحی می‌تواند ضربه‌ای و ارتعاشی باشد. منبع‌های ضربه‌ای در اکثر مواقع چکش‌های کوچک برای تولید فرکانس‌های بالا و سقوط وزنه برای 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، فاصلهٔ آن‌ها و بازه‌های ضبط داده‌ها نیز برای یک داده‌برداری باکیفیت 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، باتوجه‌به 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. نحوهٔ انجام عملیات صحرایی و تجهیزات موردنیاز در روش تحلیل چندکاناله امواج سطحی در شکل (۲) نشان‌داده‌شده است.



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

به‌منظور تخمین پروفیل سرعت موج‌برشی 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 گرفته‌شده. همچنین طول زمان ثبت رکورد *(msec)* ۸۰۰ است. هندسه و طرح برداشتی که مورداستفاده قرارگرفته استفاده از ۱۲ گیرندهٔ عمودی بافاصله‌های یکسان و در یک راستا با منبع لرزه‌ای است. به دلیل اینکه عمق هدف برای بررسی ۳۰ متر در نظر گرفته‌شده است فاصله بین گیرنده‌ها در ۱۱ تست انجام‌شده ۵ متر و فقط در ۱ تست به علت محدودیت در فضا، فاصله گیرنده‌ها ۲ متر در نظر گرفته‌شده؛ بنابراین طول آرایه جهت برداشت داده ۶۰ متر است.

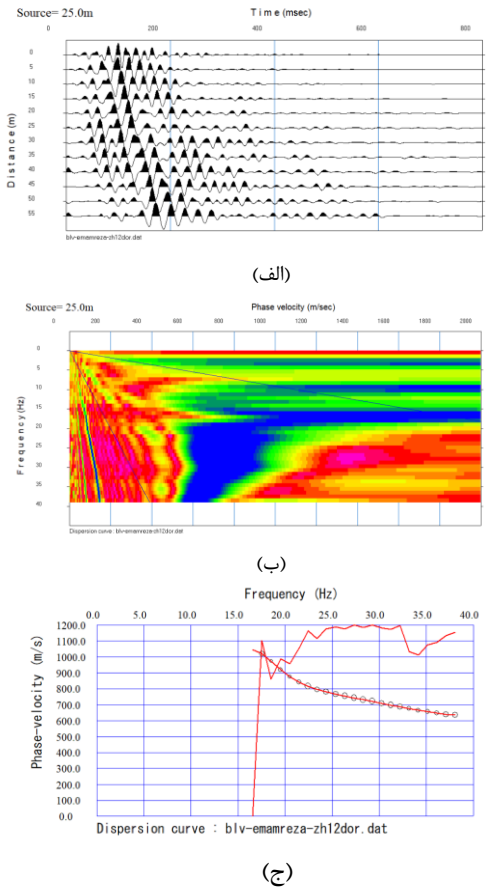
در آزمایش‌های انجام‌شده به جهت داشتن داده‌ها و نتایج بیشتر و تحلیل‌های دقیق‌تر ساختگاه، برای هر آزمایش موقعیت منبع لرزه‌ای در ۵ نقطه مختلف از طول آرایه قرارگرفته و درنتیجه ۵ شات با موقعیت‌های مکانی مختلف منبع، برداشت‌شده است که به قرار زیر هستند:

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 منحنی های پاشش از داده های شات چهارم استفاده شده. برای انجام آزمایش *MASW* از دستگاه لرزه‌نگار ۱۲ کاناله مدل *SPSEISw-12* استفاده گردیده است و ژئوفون های مورداستفاده 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 پاشش با برداشتن بیشینه‌های نمودار فرکانس – سرعت فاز به دست می‌آید.



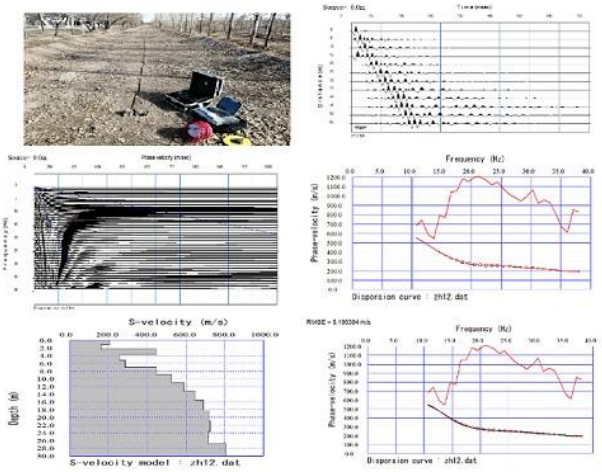
شکل ۴ نمونه‌ای از پردازش داده‌های آزمایشگاهی

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

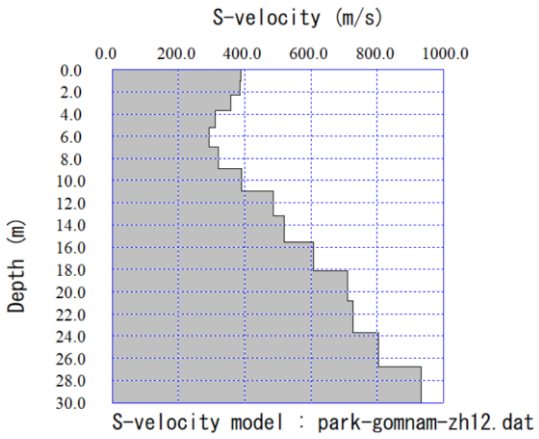


شکل ۵ مراحل کلی انجام آزمایش تحلیل چندکاناله امواج سطحی

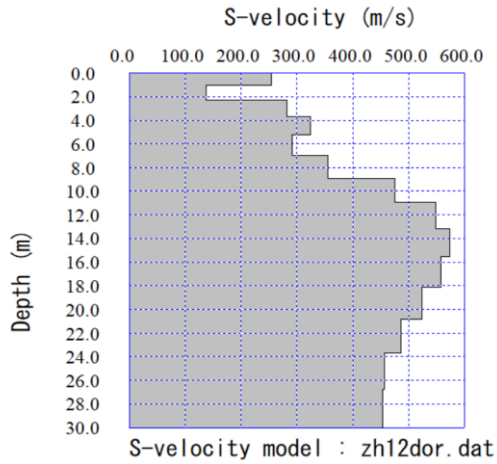
برای تحلیل داده‌های برداشت‌شده از آزمایش‌ها و تهیه منحنی‌های پاشش و پروفیل سرعت موج‌برشی از نرم‌افزار *Pickwin* و *WaveEq* که از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار *SEISIMAGER* هستند، استفاده‌شده است. داده های برداشت شده بعلت وجود نوفه و نویزهای محیطی بصورت خام برای استخراج منحنی پاشش مناسب نیستند و برای بهبود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

۵- پروفیل‌های سرعت موج‌برشی

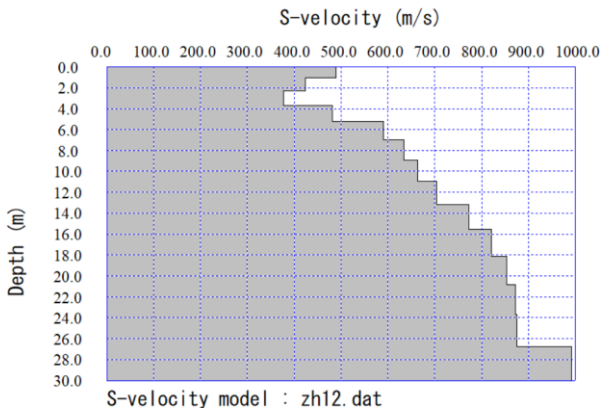
پس از برداشت و تحلیل و برگردان منحنی پاشش به‌دست‌آمده، پروفیل‌های سرعت موج‌برشی در شکل‌های ۶ تا ۱۷ ارائه شده است.



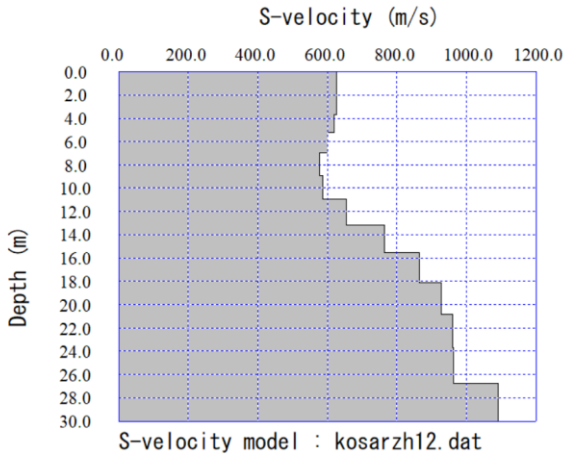
شکل ۶ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۱(شهدای گمنام)



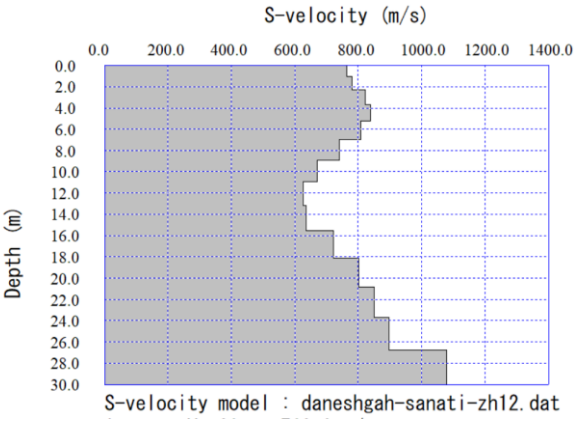
شکل ۷ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۲(شهید مدنی)



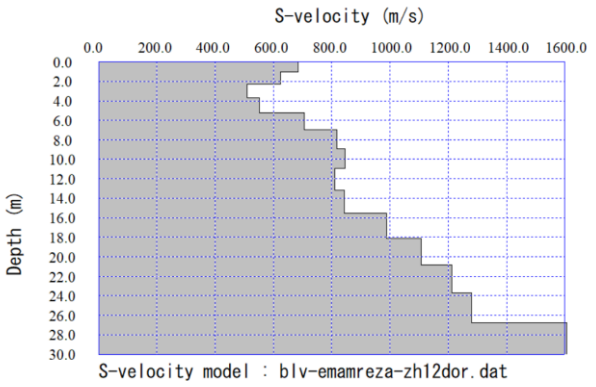
شکل ۸ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۳(کاج)



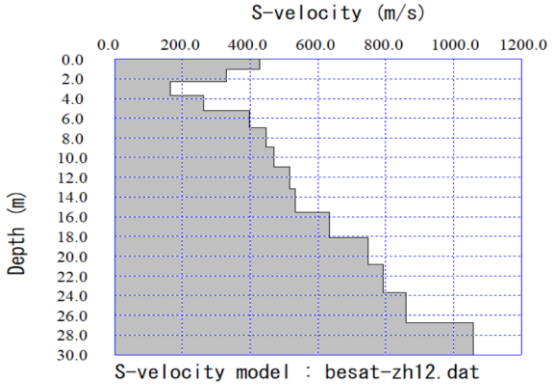
شکل ۹ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۴(شهرک کوثر)



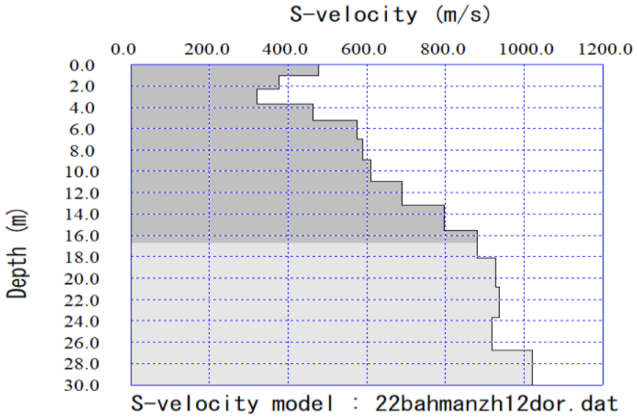
شکل ۱۰ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۵(دانشگاه صنعتی)



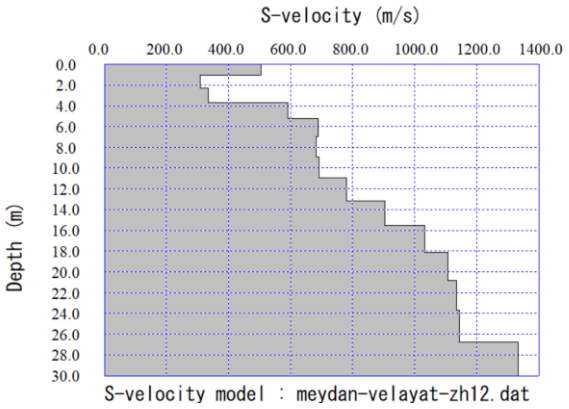
شکل ۱۱ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۶(بلوار امام رضا)



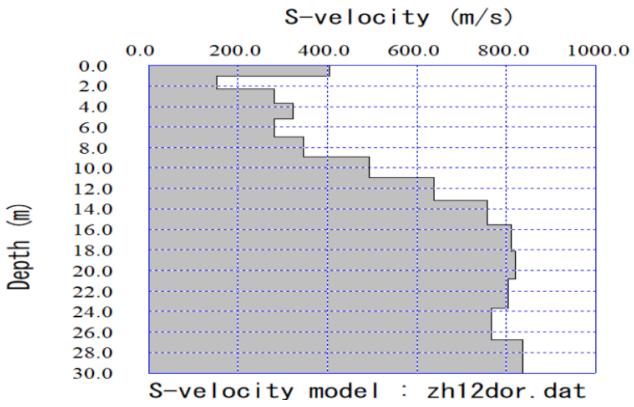
شکل ۱۴ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۹(شهرک انقلاب)



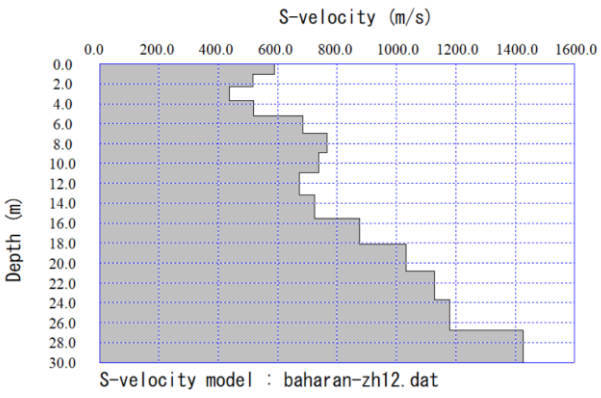
شکل ۱۲ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۷(۲۲ بهمن)



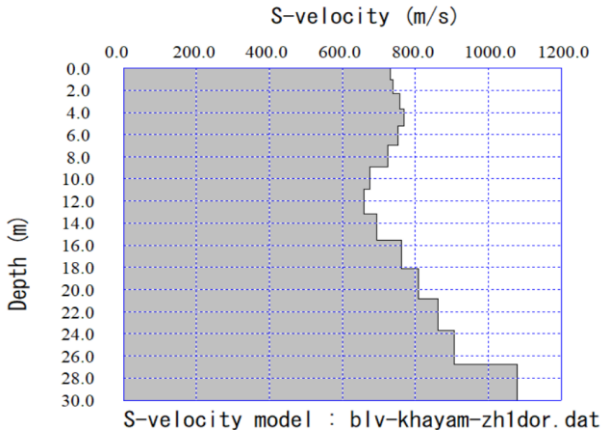
شکل ۱۵ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۱۰(میدان ولایت)



شکل ۱۳ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۸(بلوار کرامت)



شکل ۱۶ پروفیل سرعت موج‌برشی تست شماره ۱۱(بلوار بهاران)



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

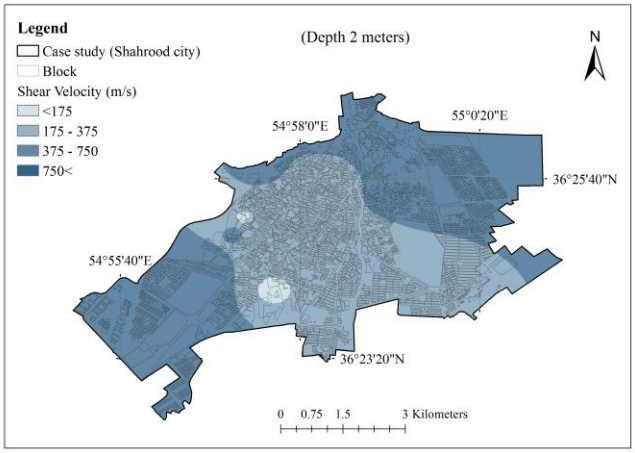
تحلیل‌های لازم بر روی پارامتر سرعت موج‌برشی(V_s) در لایه‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متری انجام و در جدول ۱ روش استفاده‌شده برای هر عمق به همراه مقدار خطا ارائه‌شده است.

جدول ۱. روش درون‌یابی و مقدار خطا برای سرعت موج‌برشی

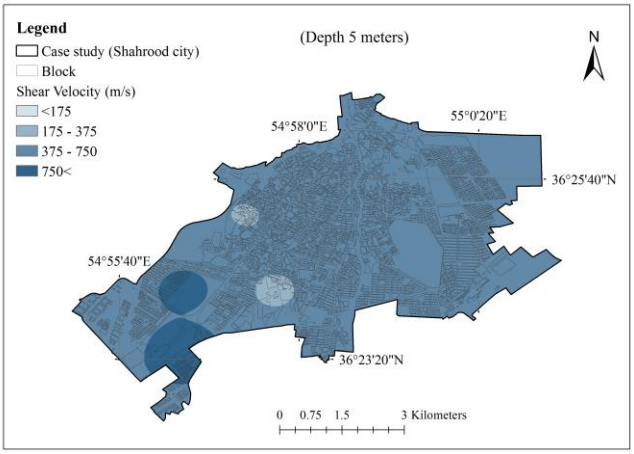
عمق	روش درون‌یابی	مدل	*RMSE*
۲ متر	*IDW:power2.4*	-	۱۹۰,۳
۵ متر	*IDW: power:2.4*	-	۱۴۴,۴۶
۱۰ متر	*IDW: power:1.5*	-	۱۳۳,۲۶
۱۵ متر	*IDW: power:2.4*	-	۱۱۰,۶۱
۲۰ متر	*IDW: power:2.4*	-	۹۸,۴۳
۲۵ متر	*IDW: power:2.4*	-	۱۱۵,۰۲
۳۰ متر	*IDW: power:2.4*	-	۱۱۵,۰۲

۷- نتایج پهنه‌بندی

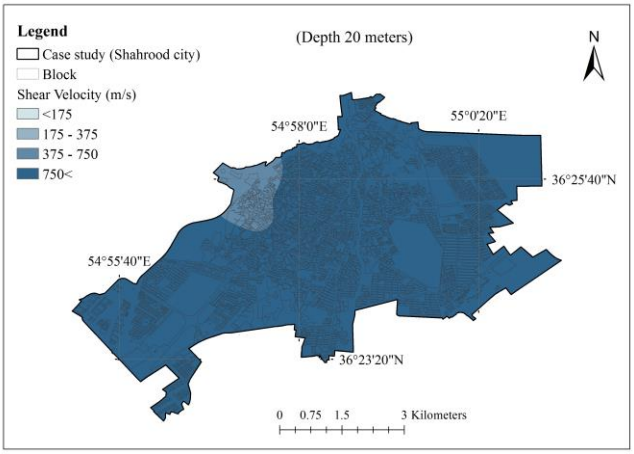
پس از استخراج میانگین سرعت موج‌برشی از روی پروفیل‌های سرعت موج‌برشی در عمق‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متری، تحلیل‌های لازم با استفاده از نرم‌افزار *ArcGis* ۱۰ انجام و نقشه‌های پهنه‌بندی ترسیم گردیده است.



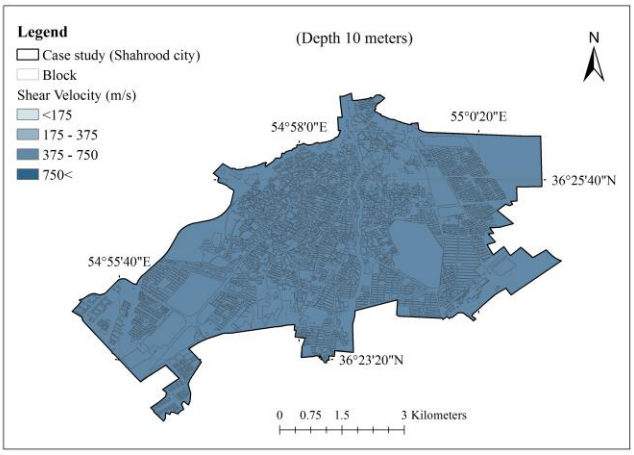
شکل ۱۸ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲ متری



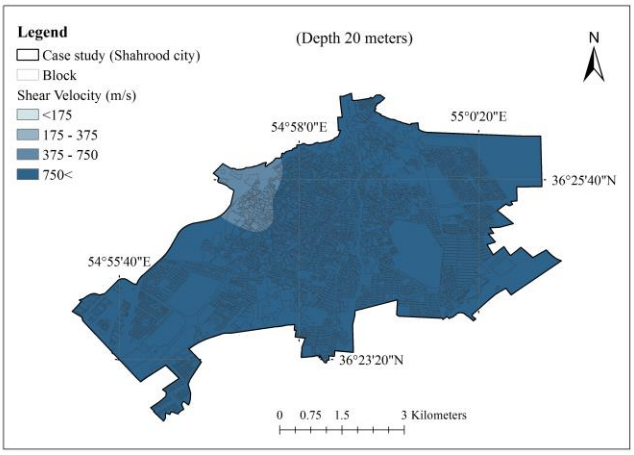
شکل ۱۹ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۵ متری



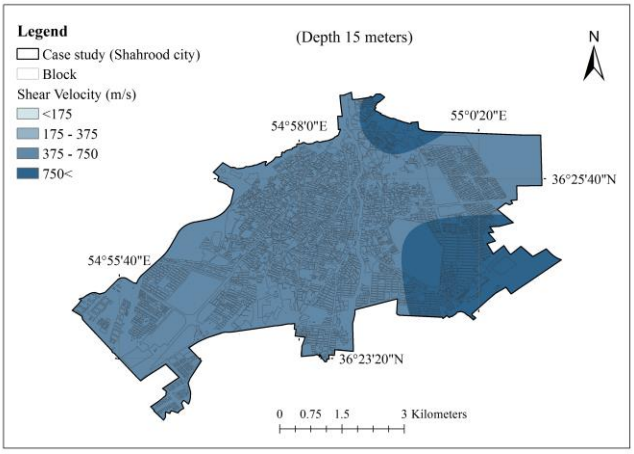
شکل ۲۲ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲۰ متری



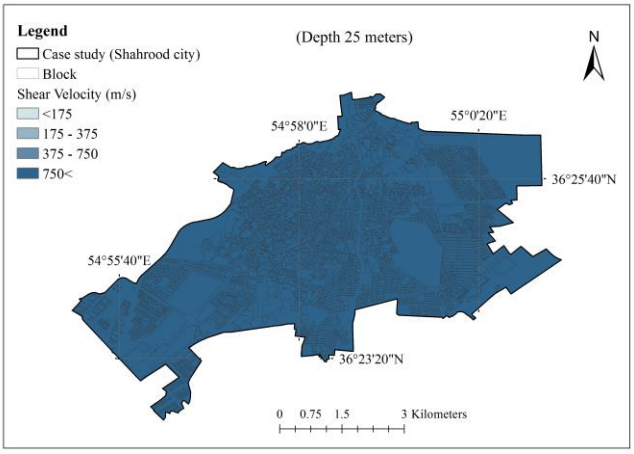
شکل ۲۰ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۱۰ متری



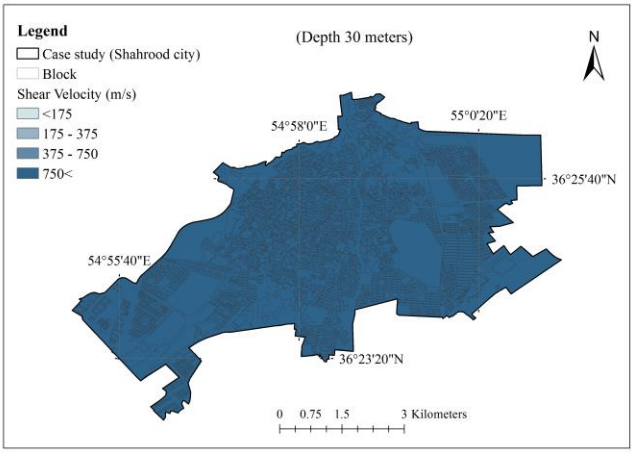
شکل ۲۳ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲۰ متری



شکل ۲۱ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۱۵ متری



شکل ۲۴ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۲۵ متری



شکل ۲۵ نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت موج‌برشی در عمق ۳۰ متری

جدول ۲. تقسیم‌بندی نوع زمین ازنظر لرزه‌ای بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آئین‌نامه – 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	**>750**
II	خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل شن و ماسه خیلی متراکم، رس بسیار سخت باضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن به‌تدریج با افزایش عمق بهبود یابد	**۷۵۰-۳۷۵**
III	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت باضخامت بیشتر از ۳۰ متر	**۳۷۵-۱۷۵**
IV	خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک غیرچسبنده یا باکمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم	**<۱۷۵**

۸- نتیجه‌گیری

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

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 ازنظر 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 تهیه‌شده است. با بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی می‌توان نتیجه گرفت که مطابق انتظار با پیشروی در عمق سرعت

موج‌برشی افزایش‌یافته 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 موج‌برشی 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 روش‌های لرزه‌ای MASW و SRF در محاسبه مدل سرعت امواج S و ضرایب کشسانی لایه‌های سطحی" دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اسفندماه ۱۳۸۴

شرکت مهندسین مشاور پارت، (۱۳۷۰):" طرح جامع (توسعه عمران حوزه نفوذ) شاهرود".اداره کل مسکن و شهرسازی 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 (مطالعهٔ موردی در محوطهٔ 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, Poletechnic 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 measure-ments,” 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 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.