

کاربرد روش آرایه‌ای خردلرزه‌ها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی لایه‌های تحت‌الارضی در یک سایت نمونه در شهر تهران (پارک شقایق)

محمد داودی^۱، ابراهیم حق‌شناس^۲ و مصطفی میرجلیلی^۳

۱- استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران،
m-davood@iiees.ac.ir

۲- استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

تهران، ایران

چکیده

به منظور سنجش کاربری تکنیک پردازش آرایه‌ای ارتعاشات محیطی در تعیین پروفیل سرعت موج برشی، آرایه‌ای متشکل از ۳ دایره متحد‌المرکز در یک سایت نمونه در جنوب شهر تهران با استفاده از ۱۵ دستگاه لرزه‌نگار به مدت ۱۵ ساعت برداشت گردید. تحلیل همزمان تک‌ایستگاهی میکروترمور (روش H/V) و آرایه‌ای آن با دو روش فرکانس عدد موج ($f-k$) و روش خودهمبستگی مکانی ($SPAC$) جهت برآورد پریود طبیعی ساختگاه و مشخصات پراکندگی امواج سطحی انجام شد و سپس با استفاده از الگوریتم برگشتی همسایگی، تلاش گردید تا پروفیل سرعت موج برشی تا عمقی که با توجه به ابعاد آرایه امکان‌پذیر است، برآورد گردد. در تحلیل آرایه‌ای ترکیب‌های مختلف از ایستگاهها، مشخصات پراکندگی امواج رایلی در محدوده‌های مختلف فرکانسی استخراج گردید و نتایج تحلیل برگشتی حاصل از مدل‌های ورودی مختلف از نظر تعداد و عمق لایه‌ها و محدوده‌های مختلف سرعت موج برشی با یکدیگر و با نتایج مطالعات قبلی ژئوتکنیکی در ساختگاه مقایسه گردید. با بررسی نتایج تحلیل آرایه‌ها مشاهده شد که روش $Espace$ نسبت به روش $f-k$ موفقتر عمل می‌کند. همچنین مشخص گردید در تحلیل برگشتی، با در نظر گرفتن مدل‌های چند لایه‌ای با حداقل تعداد لایه‌های سایت مورد مطالعه، نتایج مناسبتری از وضعیت ساختگاه به دست می‌آید و در صورتی که تعداد لایه‌های پیشنهادی بیشتر از تعداد لایه‌های سایت باشد، تغییرات ناچیزی در مقادیر سرعت موج برشی در پروفیل مشاهده می‌شود.

کلید واژه‌ها:

ثبت آرایه‌ای میکروترمورها؛
پروفیل سرعت موج برشی؛
روش فرکانس - عدد موج؛
روش خودهمبستگی مکانی؛
الگوریتم همسایگی

۱- مقدمه

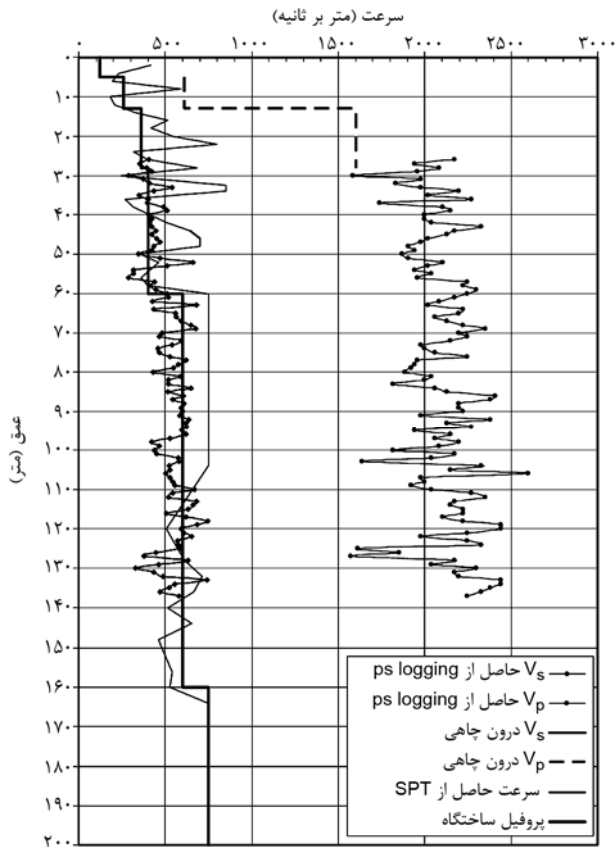
آن لزوم بررسی سرعت موج برشی در لایه‌های زیرسطحی این شهر را بیش از پیش نمایان ساخته است [۱]. از این‌رو در این تحقیق برآورد سرعت موج برشی با بکارگیری روشهای آرایه‌ای میکروترمور در سایتی نمونه در جنوب این شهر مد نظر قرار گرفت. در این مقاله ضمن بیان نتایج مطالعات قبلی ژئوتکنیکی و لرزه‌نگاری سایت انتخابی، به بررسی و توضیح آرایه‌های انتخابی در سایت مورد نظر پرداخته می‌شود و نتایج به دست آمده تشریح می‌گردد.

۲- موقعیت منطقه و مطالعات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی انجام شده در سایت

از آنجایی که در این بررسی جنبه تحقیقاتی کار بر جنبه کاربردی آن غلبه دارد، به منظور بررسی اعتمادپذیری نتایج

تعیین سرعت موج برشی لایه‌های تحت‌الارضی زمین از پارامترهای مهم در مطالعات ژئوتکنیک، بویژه ژئوتکنیک لرزه‌ای است. از جمله روشهای متداول برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی، اندازه‌گیریهای ژئوفیزیکی سطحی و درون چاهی هستند که در عین شناخته بودن با محدودیتهایی از جمله عمق قابل بررسی، هزینه سنگین و مشکل اجرا در محیطهای شهری روبرو هستند. از این‌رو در دهه اخیر تحقیقات بر روی روشهای کم هزینه‌تر و با امکان اجرا در محیطهای شهری تمرکز یافته است. از جمله این روشها، روشهای مبتنی بر ثبت آرایه‌ای امواج میکروترمور می‌باشد، که بر اساس خصوصیات ذاتی امواج سطحی استوار هستند و از لحاظ اقتصادی و سرعت عمل بسیار مقرون به صرفه می‌باشد.

اهمیت اثرات ساختگاهی در تهران بویژه در مناطق جنوبی



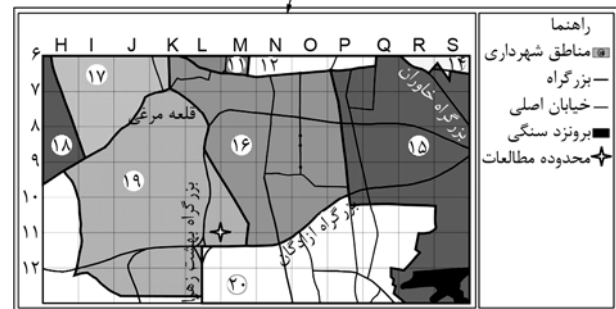
شکل ۲. پروفیل سرعت موج برشی و فشاری سایت مورد مطالعه بر اساس آزمایش ps logging و آزمایش درون‌چاهی انجام گرفته در نزدیک سایت به همراه پروفیل نماینده ساختگاه [۴-۲].

به صورت سه دایره هم‌مرکز با شعاعهای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ متر با یک ایستگاه در مرکز در بخش مسطحی از پارک که بیشترین فاصله از بزرگراههای اطراف را داشت مورد استفاده قرار گرفت، شکل (۳- الف).

اندازه‌گیری از ساعت ۱۶:۳۰ مورخ ۸۶/۱/۸ الی ساعت ۷ صبح مورخ ۸۶/۱/۹ به صورت پیوسته، با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ sps انجام شد. هم‌زمانی مطلق اندازه‌گیری برای ایستگاهها از طریق GPS متصل به هر ایستگاه تأمین شد. شکل (۳- ب) تاریخچه زمانی رکوردهای مؤلفه قائم برای کلیه ایستگاهها در مدت زمان اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

ترکیبهای مختلفی از ایستگاهها در پردازش داده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند که از این به بعد به ترتیب آرایه A، B، C، D و E نامیده می‌شوند. سه آرایه اول، آرایه‌های دایره‌ای با شعاعهای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ هستند. آرایه D آرایه‌ای مرکب از آرایه‌های A و C و آرایه E آرایه متشکل از ایستگاههای مستقر بر روی رؤس دو مثلث نمایش داده شده در شکل، همراه با ایستگاه مرکزی هستند. لازم به ذکر است منابع خطا در اندازه‌گیریها عمدتاً ناشی

تحلیل سعی گردید اندازه‌گیری در محلی که قبلاً مطالعات میدانی و آزمایشگاهی صورت گرفته، انجام شود تا بتوان تأثیر عوامل مختلف در نتایج تحلیل را مورد بررسی قرار داد. به دلیل موقعیت استراتژیکی شهر تهران، مطالعات فراوانی در خصوص پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای و ارزیابی پروفیل سرعت موج برشی در این شهر انجام گرفته است [۲-۴]. بر همین اساس با بررسی مطالعات گذشته در شهر تهران از جمله موقعیت گمانه‌ها و چاههای حفاری شده در آنها و همچنین سهولت انجام آزمایش، پارک شقایق واقع در منطقه ۱۹ شهرداری تهران برای این تحقیق انتخاب گردید. این پارک از غرب به بزرگراه شهید تندگویان و از جنوب به بزرگراه آزادگان محدود می‌گردد، شکل (۱).



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه جهت انجام آزمایش ثبت آرایه‌ای ارتعاشات محیطی.

بر اساس مطالعات ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای انجام گرفته توسط آژانس همکاریهای بین‌المللی کشور ژاپن در سال ۱۳۷۵ [۲] و همچنین مجموعه مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در زمینه ریز پهنه-بندی ژئوتکنیکی شهر تهران در سال ۱۳۸۱ [۳-۴] پروفیل نماینده استخراج شده برای ساختگاه مورد بررسی در شکل (۲) آورده شده است.

۳- نحوه برداشت داده‌ها

بر اساس مطالعات صورت گرفته در ادبیات فنی در خصوص تعداد و نحوه استقرار ایستگاههای لرزه‌نگار در اندازه‌گیریهای آرایه‌ای خردلرزه‌ها [۵]، در تحقیق حاضر ۱۵ دستگاه لرزه‌نگار از نوع لرزه‌نگارهای سه مؤلفه‌ای گورالپ CMG-6TD [۶]

پردازش داده‌ها برای این ساعت در قالب تحلیل تک‌ایستگاهی و آرایه‌های مختلف در این بخش نشان داده شده است.

۴-۱- تحلیل تک‌ایستگاهی (H/V)

در مرحله اول از پردازش داده‌ها، به منظور برآورد فرکانسهای طبیعی ساختمانی و نیز مقایسه نتایج با مطالعات قبلی انجام شده در تهران [۴-۱] نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم (H/V) برای هر ایستگاه به روش زیر محاسبه گردید:

۱- انتخاب پنجره‌های زمانی ۴۰-۶۰ ثانیه‌ای مانا در طول

یک ساعت نگاشت ثبت شده؛

۲- محاسبه طیف دامنه هر پنجره برای سه مؤلفه قائم،

شمالی- جنوبی و شرقی- غربی با استفاده از تبدیل فوریه سریع؛

۳- هموار کردن ($Smoothing$) طیف دامنه پنجره انتخابی

با استفاده از روش کونو و اهمیت‌چپی [۷]؛

۴- محاسبه طیف دامنه میانگین برای دو مؤلفه افقی

$$(H = [(NS^2 + EW^2)/2]^{1/2})$$

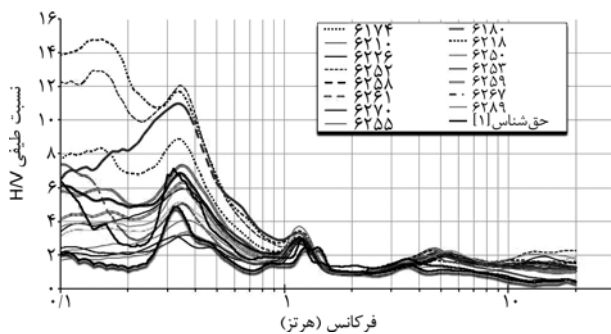
۵- محاسبه نسبت طیفی H/V برای هر پنجره انتخابی و در

آخر میانگین نسبت طیفی برای پنجره‌های زمانی

مختلف.

نتایج این تحلیل برای تمام ایستگاهها در شکل (۴) ارائه

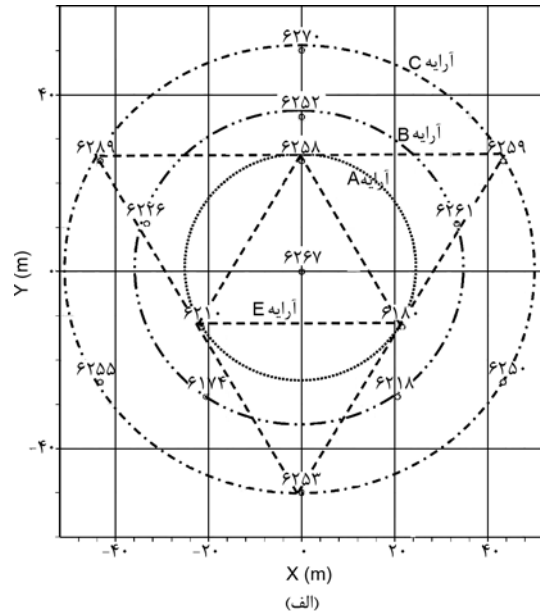
شده است.



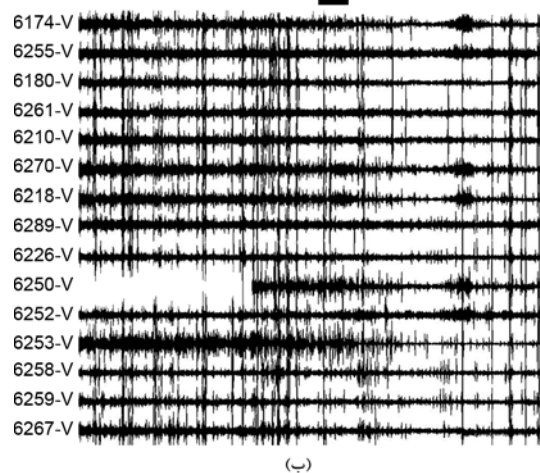
شکل ۴. خلاصه نتایج تحلیل H/V تمام ایستگاههای مستقر در آزمایش تهران (پارک شقایق) [۵].

همانگونه که مشاهده می‌شود منحنی‌های به دست آمده دارای سه قله مشخص در فرکانسهای ۰/۳۴، ۱/۲ و ۵ هرتز هستند که تطابق کاملی با نتایج به دست آمده توسط حق شناس [۱] برای سایت بیمارستان مفرح در نزدیکی محل مورد بررسی در این مطالعه نشان می‌دهند. نامبرده با مطالعه تفصیلی رفتار هر کدام از این قله‌ها در طول زمان و خصوصیات دیگر مانند میرایی و پلاریته ارتعاشات ورودی مشخص نمود که قله مشاهده شده ۱/۲ هرتز دارای منشأ صنعتی بوده و ارتباطی با

از خطاهای دستگاهی، تراز نبودن سنسورها، وقوع ارتعاشات مصنوعی مزاحم در اطراف سنسورها و ... تولید می‌شود که با توجه به آزمایش کالیبراسیون نسبی کلیه دستگاههای لرزه‌نگار و کنترل کامل سایت در زمان آزمایش، خطاهای اندازه‌گیری به حداقل ممکن کاهش پیدا کرده است.



17:30 19:30 21:30 23:30 1:30 3:30 5:30 7:30
16:30 18:30 20:30 22:30 00:30 2:30 4:30 6:30



شکل ۳. (الف) نمایش نحوه استقرار دستگاههای $CMG-6TD$ در سایت تهران (پارک شقایق). (ب) مؤلفه قائم تاریخچه زمانی نگاشت‌های ثبت شده با ۱۵ دستگاه لرزه‌نگار در آزمایش تهران.

۴- پردازش داده‌ها

با توجه به بارندگی‌های پراکنده در زمان انجام عملیات میدانی و همچنین نزدیکی محل انجام عملیات به بزرگراهها، با مشاهده چشمی نگاشت‌ها، یک ساعت از رکوردهای ثبت شده در زمان نیمه‌شب جهت پردازش مناسبتر تشخیص داده شد. نتایج

اثرات ساختگاهی ندارد؛ اما دو قله دیگر، منعکس‌کننده اثر خصوصیات زمین‌شناسی محلی بر جنبش لرزه‌ای در سطح زمین هستند. تفسیر دقیق این قله‌ها مستلزم اطلاعات عمیق از شرایط زیرسطحی می‌باشد و مطالعه حاضر از گامهای اولیه در این راستا است. به طور ساده با فرض ساختار یک بعدی حوضه رسوبی، که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود فرضی نه چندان صحیح می‌باشد [۸-۹] با استفاده از رابطه تئوری

$$W(\kappa_x, \kappa_y) = \quad (2)$$

$$\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \exp[-i\kappa_x(x_i - x_j) - i\kappa_y(y_i - y_j) + i\omega(\tau_i - \tau_j)]$$

در روش SPAC با بکارگیری داده‌های حاصل از مشاهده و برداشت یک آرایه دایروی و با این فرض که میکروترمورها، امواج ایزوتروپیک هستند و از تمامی راستاها دریافت می‌شوند، منحنی ضریب خودهمبستگی مکانی از رکوردهای امواج میکروترموبر آورده می‌گردد. بر اساس رابطه (۳) ثابت می‌شود ضریب خودهمبستگی مکانی در فرکانس f ، از طریق تابع بسل نوع اول مرتبه صفر با سرعت فاز $c(f)$ ارتباط دارد. در این رابطه r شعاع آرایه می‌باشد [۱۰].

$$\rho(f, r) = J_0(2\pi fr / c(f)) \quad (3)$$

از آنجایی که تئوری روش SPAC مبتنی بر وجود تعداد زیاد گیرنده بر روی یک دایره است که در عمل غیرممکن است، لینگ و اوکادا [۱۱] روش ESPAC (Extended Spatial Autocorrection Method) را با قابلیت بکارگیری تعداد ایستگاههای محدودتر و نیز پردازش توأمان آرایه‌های مختلف پیشنهاد کردند که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. کلمه توسعه یافته دلالت بر شروع تحلیل با آرایه‌های با شعاع کوچکتر و توسعه آن به آرایه‌های با شعاع بزرگتر در حین انجام پردازش دارد و به معنای توسعه و گسترش اصول اساسی روش SPAC نمی‌باشد. برای اطلاعات مفصل در رابطه با تئوری روشهای آرایه‌ای به اوکادا [۱۰]، کاپن [۱۲] و میرجلیلی [۵] رجوع گردد.

پس از برآورد منحنی پراکندگی و منحنی ضریب خودهمبستگی مکانی، به منظور برآورد پروفیل سرعت موج برشی عملیات برگشتی انجام می‌پذیرد. برای انجام عملیات برگشتی از الگوریتم همسایگی (Neighbourhood) که توسط سمبریج [۱۳] و بر پایه تقسیم‌بندی فضای پارامتری به سلولهای Voronoi می‌باشد، استفاده گردید [۱۴]. در الگوریتم همسایگی، جهت استخراج پروفیل سرعت تعداد زیادی مدل ایجاد می‌شود و با محاسبه منحنی پراکندگی و یا منحنی ضریب SAPC نظیر برای هر کدام از مدل‌های ایجاد شده و مقایسه آن با منحنی پراکندگی و یا منحنی ضریب SPAC مشاهده شده، میزان خطا برای هر مدل محاسبه می‌گردد. مقادیر خطا (Misfit) میزان انطباق مدل تولید شده با داده‌های مشاهده شده را نشان می‌دهد. در نهایت مدل‌هایی که حداقل میزان خطا را داشته باشند به عنوان مدل سایت انتخاب می‌گردد.

چندان صحیح می‌باشد [۸-۹] با استفاده از رابطه تئوری $f_0 = \frac{V_s}{4H}$ و فرض سرعت موج برشی متوسط حدود ۶۰۰ متر بر ثانیه برای لایه‌های آبرفتی، قله مشاهده شده در فرکانس ۰/۳۴ هرتز حاکی از وجود یک کنتراست در عمق حدود ۴۴۰ متری است. لازم به ذکر است بالا بودن نسبت طیفی در فرکانسهای کمتر از ۰/۳۴ هرتز می‌تواند به بالا بودن نویز در این محدوده فرکانسی مرتبط باشد که به نسبت می‌تواند دامنه پیک در فرکانس ۰/۳۴ هرتز را به صورت محلی و نه به علت مشخصات ساختگاه متأثر نماید.

برای قله مشاهده شده در فرکانس ۵ هرتز با فرض لایه‌ای کم‌سرعت با سرعت موج برشی حدود ۱۲۰ متر بر ثانیه، بر اساس مطالعات ژئوفیزیک انجام شده در محل‌های مجاور [۴]، ضخامت این لایه آبرفتی در حدود ۶ متر برآورد می‌گردد.

۴-۲- تحلیل آرایه‌ای داده‌ها

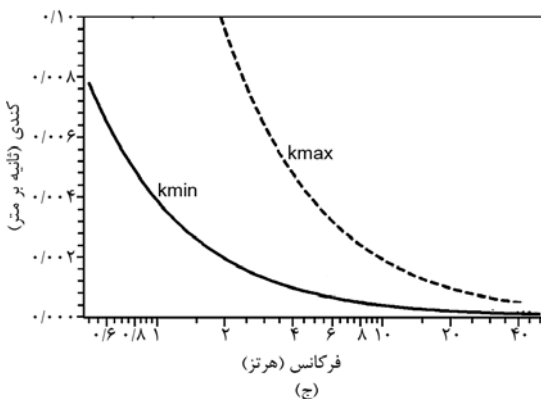
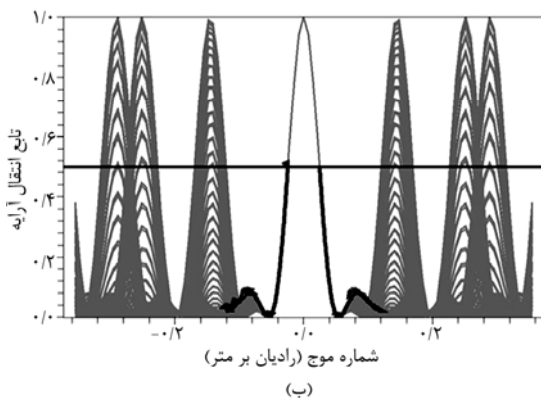
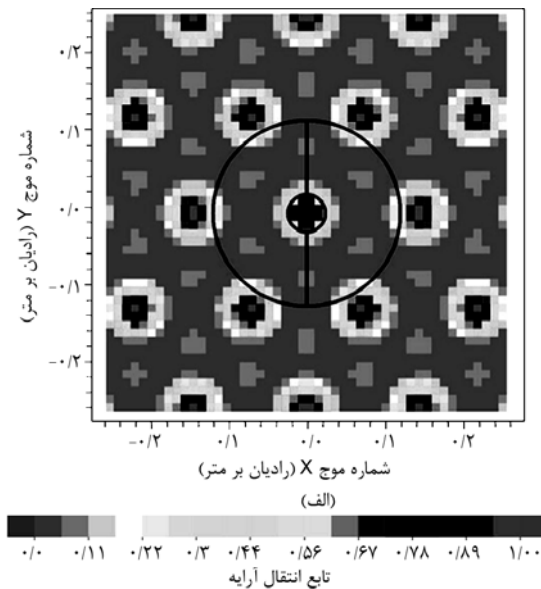
روشهای تحلیل آرایه‌ای ارتعاشات محیطی بر اساس ویژگی پراکندگی (Dispersion) امواج سطحی در لایه‌های زیرسطحی استوار هستند و دو دسته کلی فرکانس-عدد موج ($f-k$) و خودهمبستگی مکانی (SPAC) را شامل می‌گردند. در روش فرکانس-عدد موج داده‌های امواج میکروترموبر با استفاده از یک آرایه که اندازه‌اش متناسب با عمق مورد بررسی می‌باشد برداشت می‌شود؛ سپس تابع چگالی طیف توان $f-k$ بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود و امواج رایلی در ارتعاشات میکروترموبر با تغییرات سرعت فاز بر حسب فرکانس شناخته می‌شوند [۱۰].

$$\hat{P}(k_x, k_y, \omega) = \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y) P(\kappa_x, \kappa_y, \omega) d\kappa_x d\kappa_y$$

در این رابطه تابع وزنی $W(\kappa_x, \kappa_y)$ که "پاسخ آرایه (Array Response)" نامیده می‌شود، تنها مربوط و منحصر به موقعیت ایستگاههای (x_i, y_i) توزیع شده در آرایه است که توسط رابطه (۲) محاسبه می‌گردد که N بیانگر تعداد ایستگاههای آرایه مورد نظر، τ_i مشخصه تأخیری در هر

تئوری آرایه برای آرایه C در صفحه (k_x, k_y) در شکل (۵-الف) آورده شده است. همچنین در شکل‌های (۵-ب) و (۵-ج) به ترتیب توابع انتقال برای جهت‌های مختلف انتشار امواج برای آرایه C (منحنی‌های خاکستری) و مقادیر K_{min} و K_{max} در حوزه فرکانس-کندی ($frequency-slowness$) نمایش داده شده است.



شکل ۵. (الف) پاسخ تئوری آرایه برای هفت سنسور با آرایش دایره‌ای در صفحه (k_x, k_y) برای آرایه C . (ب) توابع انتقال برای جهت‌های مختلف انتشار (منحنی‌های خاکستری). (ج) مقادیر K_{min} و K_{max} در حوزه فرکانس-کندی [۵].

برای انجام تحلیل آرایه‌ای داده‌ها در مطالعه حاضر از نرم‌افزار *Sesarray* تهیه شده به‌وسیله وائلت و همکاران [۱۵] استفاده گردیده است. در مجموع در تحقیق حاضر، چهار آرایه A, B, C و D با روش *ESPAC* و آرایه E با روش $f-k$ تحلیل شده‌اند.

مراحل پردازش داده‌ها به شرح زیر است:

۱. آماده‌سازی داده‌ها شامل اعمال ضرایب دستگامی اصلاح شده، تصحیح خط مبنا و اعمال فیلتر میان‌گذر مناسب در محدوده فرکانسی ۳۰-۰/۱ هرتز؛
۲. معرفی پارامترهای ورودی مثل محدوده فرکانسی و تعداد نمونه‌های مورد علاقه از منحنی پراکندگی و خود همبستگی مکانی، طول پنجره‌های زمانی پردازش، نسبت مناسب STA/LTA جهت گزینش پنجره‌های مانا، مقدار قابل قبول طیف ارتباط ($Coherency Spectrum$) در محدوده فرکانسی مورد مطالعه و انتخاب حلقه‌های مناسب برای محاسبه ضریب خودهمبستگی مکانی در حالت استفاده از روش *ESPAC*؛
۳. برآورد مشخصات پراکندگی امواج رایلی از روی مؤلفه قائم ارتعاشات ثبت شده در هر ایستگاه؛
۴. انجام تحلیل برگشتی براساس ضریب همبستگی *SPAC* یا منحنی پراکندگی امواج سطحی خروجی از روش $f-k$ و ارائه مدل‌های ورودی مختلف و استخراج مدل‌هایی که بهترین انطباق را با مشخصات پراکندگی داشته باشند.

۴-۲-۱- محاسبه پاسخ تئوری آرایه‌ها در سایت تهران

پاسخ تئوری آرایه، تنها مربوط و منحصر به موقعیت ایستگاه‌های (x_i, y_i) توزیع شده در آرایه است که توسط معادله (۲) محاسبه می‌گردد. $W(k_x, k_y)$ همواره یک ماکزیمم مرکزی در نقطه $k_x, k_y = 0$ با مقدار واحد را نمایش می‌دهد و در سایر پیکهای جانبی فرعی مقدار دامنه کمتر از یک می‌باشد. جهت پرهیز از بروز خطای آلیاس، پاسخ تئوریک آرایه و مقادیر K_{max} و K_{min} برای آرایه‌های پیشنهادی محاسبه و در روند تحلیل منظور گردید. خلاصه نتایج محاسبات فوق در جدول (۱) و پاسخ

جدول ۱: مقادیر K_{min} و K_{max} برای آرایه‌های پیشنهادی سایت انتخابی [۵].

ردیف	آرایه	تعداد سنسورها	K_{min}	K_{max}
۱	A	۴	۰/۱۰۶۱۹۹۲	۰/۲۳۷۳۸۴
۲	B	۶	۰/۰۷۱۱۳۳	۰/۱۸۰۰۳۸
۳	C	۷	۰/۰۴۹۰۳۶۶	۰/۱۲۰۵۸۷
۴	D	۱۰	۰/۰۶۳۴۱۳۸	۰/۱۵۱۰۳۷
۵	E	۷	۰/۰۵۹۹۵۲۸	۰/۲۶۹۷۸۴

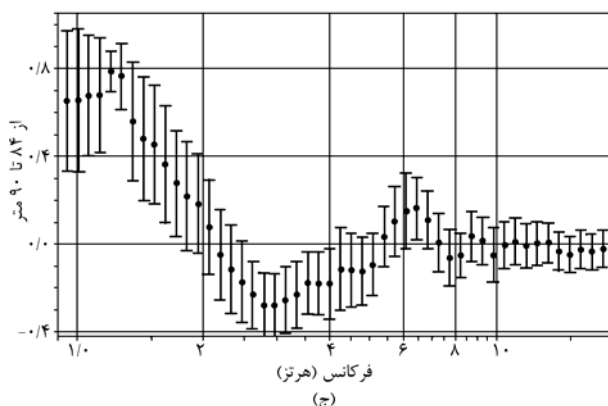
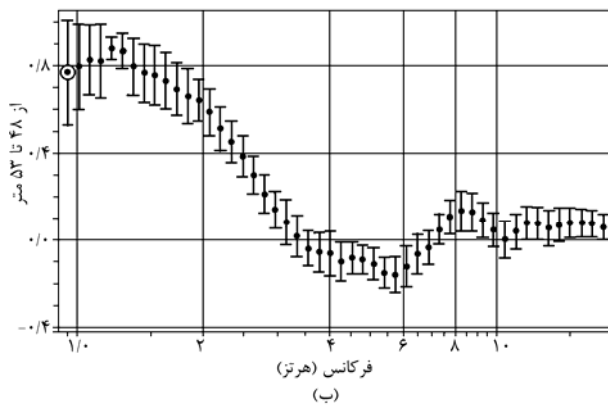
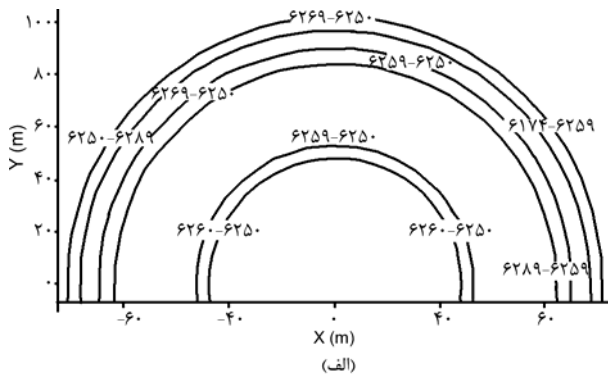
۴-۲-۲- آنالیز آرایه C با استفاده از روش ESPAC

برای انجام تحلیل آرایه C با استفاده از روش ESPAC، ابتدا حالت‌های مختلف جفت ایستگاههای آرایه C مطابق شکل (۶- الف) استخراج گردید. با توجه به حالات مختلف فاصله جفت ایستگاهها، حلقه‌های مختلفی برای انجام محاسبات ضریب خودهمبستگی مکانی در نظر گرفته شد که مشخصات حلقه‌های انتخابی برای این آرایه در جدول (۲) آورده شده است. در ادامه با استفاده از قسمت *Geosphy* نرم‌افزار مربوط، منحنی ضریب خودهمبستگی مکانی در محدوده فرکانسی ۰/۹۵-۱۸ هرتز برای آرایه C محاسبه گردید که در شکل (۶- ب) و (۶- ج) به صورت نمونه برای دو حلقه مختلف سبز و آبی آورده شده است. لازم به ذکر است در خارج از این محدوده فرکانسی، نرم‌افزار به دلیل ماهیت تصادفی و دامنه کوچک امواج میکروتورمور در محدوده فرکانسی مذکور در سایت، قادر به محاسبه ضریب SPAC نمی‌باشد.

جدول ۲: مشخصات حلقه‌های انتخاب شده برای آرایه C [۵].

ردیف	حداقل شعاع	حداکثر شعاع	رنگ	تعداد جفت ایستگاه محصور شده
۱	۴۸	۵۳	سبز	۱۲
۲	۸۴	۹۰	آبی	۶
۳	۹۷	۱۰۲	قرمز	۳

مرحله بعد از محاسبه منحنی‌های خودهمبستگی مکانی، انجام تحلیل برگشتی برای برآورد مقادیر سرعت موج برشی است. برای انجام تحلیل برگشتی و به منظور بررسی حساسیت منحنی ضریب خودهمبستگی مکانی به نحوه پارامتری کردن ساختار خاک، مشخصات لایه‌های زیرسطحی بر اساس فرضیات مختلف پارامتری شد. برای این منظور پنج مدل مختلف در دو حالت (مجموعاً ۸ پروفیل پیشنهادی) معرفی شد که مشخصات هر مدل در جدول (۳) آورده شده است. در حالت‌های مذکور سعی گردید مدل‌های متنوعی با در نظر گرفتن تعداد و عمق لایه‌ها و بر اساس محدوده‌های مختلف سرعت در نظر گرفته شود. از آنجایی که در شروع مطالعات، تشخیص تعداد لایه‌های ساختگاه و محدوده سرعت به طور معمول با ابهام همراه است، در گام اول مدلی با دو لایه و محدوده سرعتی گسترده در نظر گرفته شد. در گام بعد با توجه به نتایج تحلیل H/V که در بخش (۴-۱) به آن اشاره شد، مدلی از ساختگاه با سه لایه و محدوده‌های متفاوت از سرعت مد نظر قرار گرفت. از آنجایی که احتمال



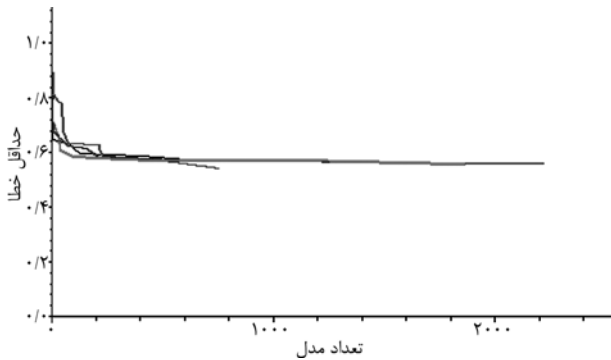
شکل ۶. الف) نمایش حلقه‌های انتخابی و نمایش حالات مختلف فاصله و زاویه بین تمام جفت ایستگاهها (ب) و (ج) منحنی ضریب SPAC برای آرایه C در محدوده فرکانسی ۰/۹۵-۱۸ هرتز و برای دو حلقه سبز و آبی مندرج در جدول (۲) [۵].

وجود لایه‌های دیگر نیز در سایت منتفی نیست، در مرحله سوم مدل‌هایی با تعداد لایه‌های بیشتر (مدلهای سوم، چهارم و پنجم) و با تغییرات متنوع‌تر سرعتی در نظر گرفته شد.

نتایج تحلیل انجام شده با مدل شماره ۴ در شکل‌های (۷) تا (۹) آورده شده است. شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تکرار محاسبات همگرایی قابل ملاحظه‌ای بین منحنی ضرایب SPAC مشاهده شده و مدل ورودی ایجاد می‌گردد و مقدار خطا کاسته می‌شود. در شکل (۸) محدوده تغییرات پارامترهای مجهول عمق و سرعت بر حسب مقدار خطا رسم شده است.

جدول ۳: مدل‌های ورودی در نظر گرفته شده به منظور انجام تحلیل برگشتی و برآورد سرعت موج برشی در محل مورد مطالعه.

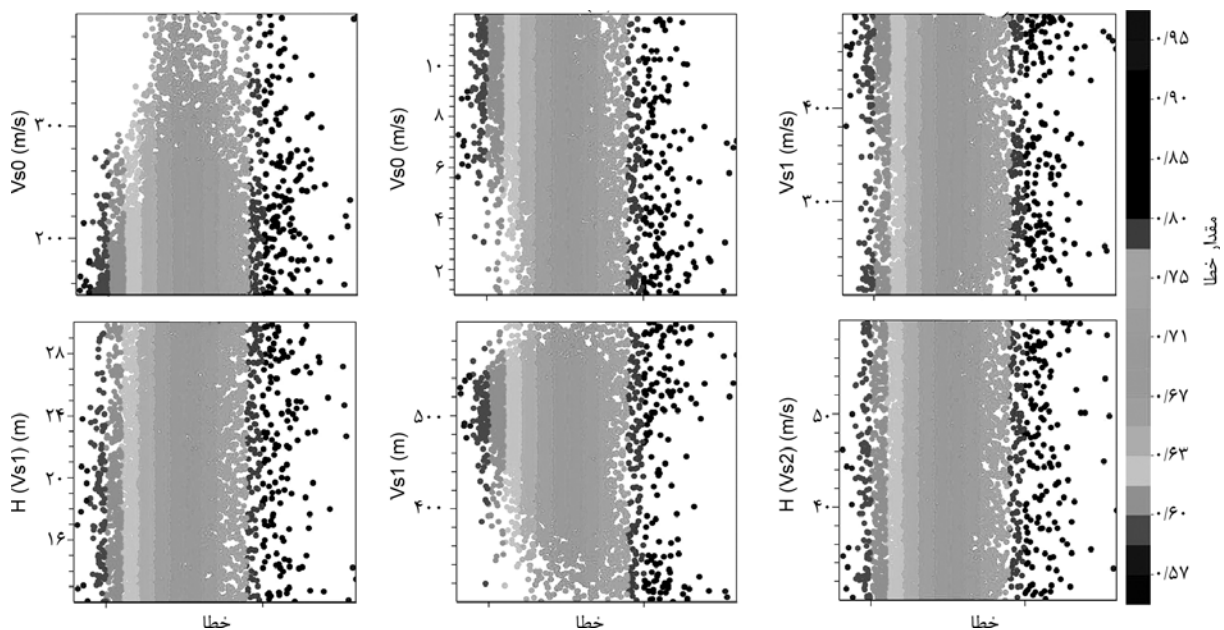
مدل پیشنهادی	تعداد لایه‌ها	عمق لایه‌ها (m)	سرعت موج برشی (m/s)	
			حالت ۱	حالت ۲
۱	۲	۱۰۰-۱	۸۰۰-۱۰۰	-
		بیش از ۱۰۰	۱۰۰۰-۴۵۰	-
۲	۳	۵۰-۱	۵۰۰-۱۰۰	۷۰۰-۱۰۰
		۱۰۰-۵۰	۶۰۰-۴۵۰	۹۰۰-۲۰۰
		بیش از ۱۰۰	۷۰۰-۵۰۰	۱۰۰۰-۳۰۰
۳	۴	۴۰-۱	۵۰۰-۱۰۰	۶۰۰-۱۰۰
		۸۰-۴۰	۶۰۰-۳۰۰	۸۰۰-۲۰۰
		۱۲۰-۸۰	۷۰۰-۴۰۰	۹۰۰-۲۵۰
		بیش از ۱۲۰	۹۰۰-۵۰۰	۱۰۰۰-۳۰۰
۴	۶	۱۲-۱	۴۰۰-۱۵۰	۵۰۰-۱۰۰
		۳۰-۱۲	۵۰۰-۲۰۰	۶۰۰-۱۵۰
		۶۰-۳۰	۶۰۰-۳۰۰	۷۰۰-۲۰۰
		۱۰۰-۶۰	۷۰۰-۴۰۰	۷۵۰-۲۵۰
		۱۶۰-۱۰۰	۷۰۰-۴۵۰	۸۰۰-۳۰۰
		بیش از ۱۶۰	۱۰۰۰-۷۰۰	۱۰۰۰-۳۵۰
۵	۳	۱۰-۱	۳۰۰-۱۵۰	-
		۴۰۰-۱۰	۷۰۰-۳۰۰	-
		بیش از ۴۰۰	۱۵۰۰-۵۰۰	-



شکل ۷. نحوه تغییرات حداقل خطا نسبت به مدل‌های ایجاد شده در طی انجام عملیات برگشتی [۵].

در نهایت پروفیل سرعت موج برشی استخراجی برای میزان خطای کمتر از ۰/۷۸ در شکل (۹) رسم شده است. در این شکل و بر اساس پروفیل پیشنهادی مربوط به کمترین مقادیر خطا، ۴ لایه با سرعت موج برشی ۱۶۰، ۳۸۰-۴۵۰، ۵۳۰ و ۷۲۰ متر بر ثانیه قابل تشخیص است. عمق متناظر با این لایه‌ها به ترتیب ۷، ۷ تا ۱۷، ۱۷ تا ۱۵۰ متر و بیش از ۱۵۰ متر برآورد گردیده است. با مقایسه مقادیر مذکور با نتایج مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای انجام شده در سایت مشخص می‌شود که بیشترین انطباق نتایج مطالعات در اعماق سطحی و عمیق (با اختلاف ۲۰ درصد) و حداکثر اختلاف در اعماق ۱۷-۷ متر (با اختلاف ۳۳ درصد) اتفاق می‌افتد.

در ادامه مطالعات، نتایج حاصل از تحلیل برگشتی کلیه مدل‌ها و حالات پیشنهاد شده در جدول (۳) برای آرایه C مورد بررسی قرار گرفت که پروفیل‌های استخراجی در مدل‌ها و حالات



شکل ۸. نحوه تغییرات برخی پارامترهای مختلف بر حسب خطا در آرایه C و در عملیات برگشتی [۵].

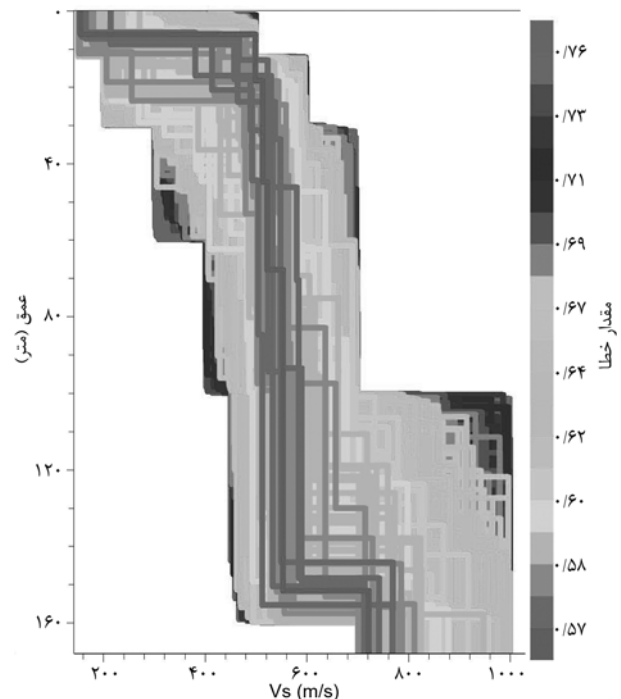
در مجموع می‌توان گفت در مدل‌های استخراجی در اعماق کم (تا ۱۰ متر) مقادیر برآورد شده سرعت موج برشی با مدل سایت منطبق می‌باشد و تشخیص این لایه رسوبی کم سرعت با کلیه مدل‌های پیشنهادی امکان‌پذیر می‌باشد. در اعماق بیشتر، مدل پیشنهادی چهارم مقادیر سرعت موج برشی مناسبتری را برآورد می‌کند. اگرچه در سایر مدل‌های پیشنهادی نیز در اعماق بیشتر از ۶۰ متر سرعت موج برشی محاسبه شده با روش آرایه‌ای، انطباق مناسبی با مطالعات گذشته در منطقه دارد. در مجموع به نظر می‌رسد در نظر گرفتن مدل‌های چند لایه‌ای نتایج مناسبتری از وضعیت ساختگاه ارائه می‌نماید. نتایج مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای انجام شده در سایت مشخص می‌شود که بیشترین انطباق نتایج مطالعات در اعماق سطحی و عمیق (با اختلاف ۲۰ درصد) و حداکثر اختلاف در اعماق ۷-۱۷ متر (با اختلاف ۳۳ درصد) اتفاق می‌افتد.

۴-۲-۳- آنالیز آرایه‌های دیگر در نظر گرفته شده با استفاده از روش ESPAC

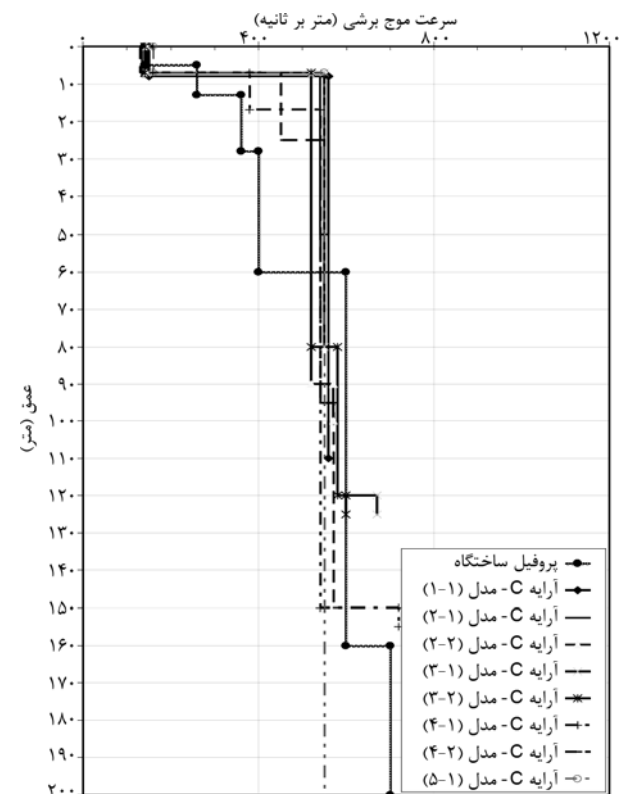
برای انجام تحلیل آرایه‌ای در آرایه‌های A، B و D مشابه آرایه C، از روش ESPAC استفاده شد. بدین منظور منحنی خود همبستگی مکانی با توجه به کلیه حالات مختلف فاصله و آزیموت هر جفت ایستگاه، استخراج گردید [۵]. در عملیات برگشتی برای استخراج مقادیر سرعت موج برشی از روی منحنی‌های خودهمبستگی مکانی، نظر به نتایج مناسبتر مدل‌های با تعداد لایه بیشتر، مدل پیشنهادی چهارم (حالت اول) جهت انجام تحلیل برگشتی آرایه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاصل از تحلیل در شکل (۱۱) جهت مقایسه آورده شده است. در شکل و جدول اخیر، جهت مطالعه دقت هر کدام از آرایه‌های مذکور، نتایج تحلیل چهار آرایه استفاده شده در آزمایش با پروفیل نماینده ساختگاه نیز مقایسه شده است.

مجموع مطالعات فوق نشان می‌دهد نتایج حاصل از تحلیل آرایه C انطباق بیشتری با مدل سایت دارد، ضمن اینکه در سه آرایه دیگر A، B و D نیز نتایج تحلیل به مدل سایت نزدیک می‌باشد. بر اساس نتایج برآورد پروفیل سرعت موج برشی در این مطالعه می‌توان اشاره داشت که بکارگیری تعداد بیشتر سنسور تا ۷ سنسور در افزایش دقت محاسبات تغییرات قابل توجهی ایجاد نمی‌کند.

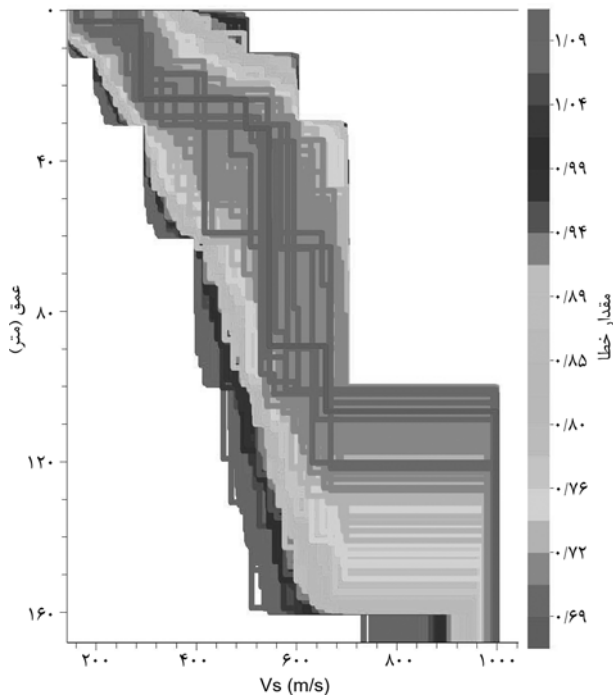
مذکور در شکل (۱۰) آورده شده است. در شکل مذکور، جهت مطالعه دقت هر کدام از مدل‌های پیشنهادی، نتایج تحلیل حالات مختلف با پروفیل نماینده ساختگاه نیز مقایسه شده است.



شکل ۹. پروفیل سرعت موج برشی و فشاری استخراجی برای آرایه C برای میزان خطای کمتر از ۰/۷۸ به ازای مدل پیشنهادی شماره ۴- حالت ۱ [۵].



شکل ۱۰. مقایسه نتایج تحلیل آرایه C در حالات مختلف معرفی شده در جدول (۳) با پروفیل نماینده ساختگاه [۵].

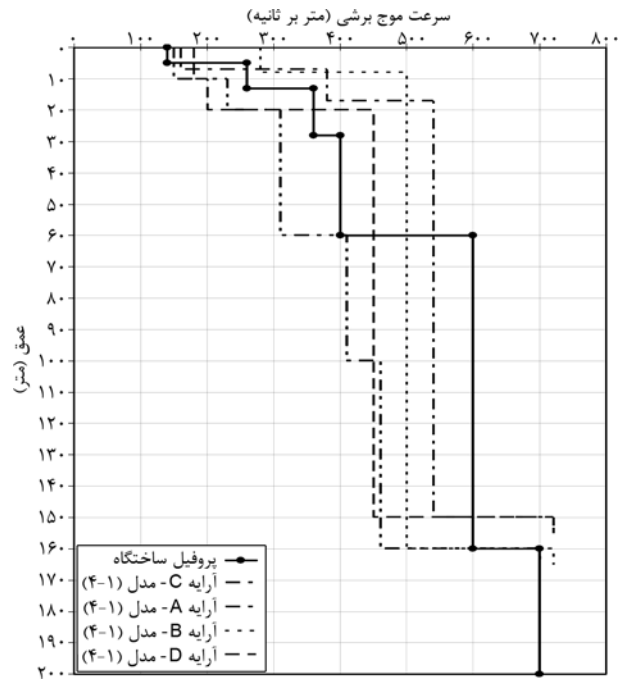


شکل ۱۳. سرعت موج برشی و فشاری استخراجی برای آرایه E برای میزان خطای کمتر از ۱/۱ [۵].

آورده شده است. مشاهده می‌شود علی‌رغم عدم دسترسی به قسمتی از منحنی پراکندگی در عملیات برگشتی، نتایج قابل توجهی حاصل گردیده است به طوری که پروفیل سرعت موج برشی تا عمق ۶ متری در حدود ۱۸۰ متر بر ثانیه، از عمق ۶ تا ۲۳ متری در حدود ۲۸۰ متر بر ثانیه، از عمق ۲۳ تا ۱۰۰ متری در حدود ۵۶۰ متر بر ثانیه و در اعماق بیشتر از ۱۰۰ متر در حدود ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برآورد گردید. ملاحظه می‌شود در اعماق بیش از ۱۰۰ متر مقادیر استخراجی بیشتر از پروفیل نماینده ساختگاه می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

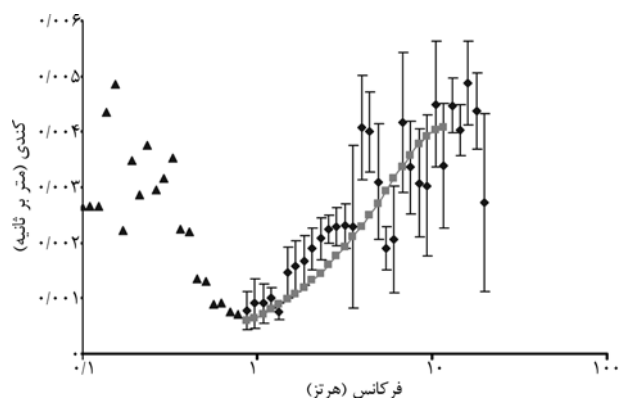
در این مطالعه کاربرد تحلیل آرایه‌ای ارتعاشات میکروترمور به منظور تعیین پروفیل سرعت موج برشی در یک سایت نمونه در جنوب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور داده‌های ثبت شده در آرایه‌های دایره‌ای و مثلثی شکل، متشکل از ۱۵ دستگاه لرزه‌نگار پردازش گردید. بر اساس ترکیب مختلف ایستگاهها، ۵ آرایه متفاوت در نظر گرفته شد که در مجموع به نظر می‌رسد آرایه دایره‌ای با شعاع ۵۰ متر (آرایه C) مناسبترین جواب را در محل مورد بررسی می‌دهد. بر اساس تحلیل این آرایه ۴ لایه با سرعتهای موج برشی ۱۶۰، ۳۸۰-۴۵۰، ۵۳۰ و ۷۲۰ متر بر ثانیه قابل تشخیص است. عمق متناظر با این لایه‌ها به ترتیب صفر تا ۷، ۷ تا ۱۷، ۱۷ تا ۱۵۰ متر و بیش از



شکل ۱۱. نتایج حاصل از تحلیل آرایه‌های مختلف با در نظر گرفتن مدل پیشنهادی چهارم (حالت اول) جهت انجام عملیات برگشتی [۵].

۴-۲-۴- آنالیز داده‌های آرایه E با استفاده از روش f-k

از روش $f-k$ جهت انجام تحلیل آرایه‌ی E که بر روی رؤس دو مثلث تو در تو قرار گرفته است، شکل (۳)، استفاده گردید و منحنی پراکندگی امواج رایلی محاسبه گردید. این منحنی در محدوده فرکانسی ۰/۸-۱۰ هرتز استخراج گردید که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. از آنجا که داده‌های مربوط به منحنی پراکندگی استخراج شده در محدوده ۱۰ هرتز به بالا و ۰/۸ هرتز به پایین انحراف معیار بالایی دارند، تنها محدوده فرکانسی ۰/۸-۱۰ هرتز جهت انجام تحلیل برگشتی مدنظر قرار گرفت. برای انجام تحلیل برگشتی منحنی پراکندگی، مدل پیشنهادی چهارم- حالت اول با ۶ لایه برای برآورد ساختار زیرسطحی پیشنهاد گردید که نتایج پروفیل استخراجی در شکل (۱۳)



شکل ۱۲. منحنی پراکندگی استخراجی برای آرایه E در محدوده فرکانسی ۰/۸-۱۰ هرتز [۵].

۱۵۰ متر برآورد گردیده است.

شناسایی لایه عمیق احتمالی که از روش H/V و در فرکانس $0/34$ هرتز به دست آمد نمی‌باشد که علت آن فاصله کم بین ایستگاهها در آرایه‌های مطالعاتی می‌باشد. لذا برای شناسایی لایه‌های عمیق لازم است تا آرایه‌های با ابعاد بزرگتر به کار گرفته شود. لازم به ذکر است که شناسایی لایه‌های تحت‌الارضی عمیقتر، به حداکثر فاصله بین سنسورها و شناسایی خصوصیات پراکندگی امواج رایلی در فرکانسهای کم (زیر ۱ هرتز) وابسته می‌باشد که در این تحقیق، برای محدوده فرکانسی کمتر از $0/8$ هرتز امکان‌پذیر نشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از همکاران دفتر طراحی و ساخت تجهیزات پژوهشگاه، آقایان مهندس حمیدرضا حیدری‌مقدر، مهدی پروازه، حمیدرضا محمدیوسف و سایر عزیزانی که در مراحل مختلف انجام آزمایش به خصوص مسوولین محترم شهرداری منطقه ۱۹ و پرسنل محترم پارک شقایق صمیمانه همکاری نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- Haghshenas, E. (2005). "Condition Géotechniques et Aléa Sismique Local à Téhéran", Ph.D Thesis of the Joseph Fourier University, Grenoble, France.
- Japan International Cooperation Agency (JICA) (2000). "The Study on Seismic Micro-zoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran, Final Report", Centre for Earthquake and Environmental Studies of Tehran.
- جعفری، محمدکاظم و اصغری، ابراهیم (۱۳۷۶). "ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای ژئوتکنیک لرزه‌ای جنوب تهران از دیدگاه تأثیرات ساختمانی"، جلد ۱، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک و لرزه‌نگاری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.
- جعفری، محمدکاظم (۱۳۸۱). "گزارش نهایی مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای جنوب تهران"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- میرجلیلی، مصطفی (۱۳۸۶). "کاربرد روش آرایه‌ای خردلرزه‌ها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی لایه‌های تحت‌الارضی در یک سایت نمونه در شهر تهران (پارک

از نتایج دیگر این بررسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. با انجام تحلیل H/V بر روی رکوردهای ثبت شده در کلیه ایستگاهها، فرکانس غالب ساختگاه در حدود $0/34$ هرتز برآورد گردید. مقدار مذکور می‌تواند مشخصات یک لایه ضخیم آبرفتی با ضخامت تقریبی 440 متر و سرعت موج برشی 600 متر بر ثانیه را نشان دهد. همچنین از آنجایی که در منحنی H/V پیکی در حدود 5 هرتز نیز مشاهده شد، وجود یک لایه ضعیف با عمق حدود 6 متر و با سرعت تقریبی $V_s = 120 \text{ m/s}$ حدس زده می‌شود. نتیجه مطالعات مذکور در ارائه مدل‌های اولیه از وضعیت لایه‌بندی ساختگاه در تحلیل‌های آرایه‌ای مدنظر قرار گرفت.

۲. مدل‌های ورودی مختلفی در تحلیل برگشتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل برگشتی با مدل‌های مختلف نشان داد که در نظر گرفتن مدل‌های ورودی با تعداد لایه‌های سرعتی برابر یا بیشتر از تعداد لایه‌های سرعتی واقعی ساختگاه، نتایج قابل‌قبولی در برآورد مدل واقعی می‌دهد. در نهایت مدلی متشکل از 6 لایه (مدل پیشنهادی چهارم - حالت اول) بیشترین انطباق را با نتایج مطالعات ژئوتکنیکی لرزه‌ای انجام شده در سایت نشان می‌دهد. لذا در انجام تحلیل آرایه‌های مختلف، این مدل جهت انجام تحلیل برگشتی مورد استفاده قرار گرفت.

۳. نتایج تحلیل به دست آمده از روش $f-k$ در آرایه E نشان می‌دهد که در شرایط حاکم بر اندازه‌گیری مطالعه حاضر (تعداد دستگاهها، وجود نویزهای گذرا و ...) این روش قادر به برآورد صحیح منحنی پراکندگی امواج سطحی در محدوده‌های فرکانسهای کمتر از $0/8$ و بالاتر از 10 هرتز نیست و از این رو تحلیل برگشتی انجام شده تنها تا عمق 100 متر انطباق مناسبی با نتایج مطالعات صورت گرفته قبلی دارد.

۴. تحلیل آرایه‌ها با تعداد ایستگاههای متفاوت با روش $ESPA$ و مقایسه آن با نتایج حاصل از آزمایشهای درون چاهی نشان داد که استفاده از آرایه‌های با تعداد ایستگاه بیشتر نتایج قابل قبول تری نسبت به آرایه‌های با تعداد ایستگاههای کمتر به دست می‌دهد. همچنین بر اساس مطالعات محققین دیگر در روش $f-k$ تعداد زیادتر ایستگاههای برداشت، دقت بیشتری را در طیف $f-k$ و برآورد ساختار زیرسطحی تأمین می‌نماید.

۵. تحلیل آرایه‌ای انجام شده در این بررسی، قادر به

10. Okada, H. (2004). "The Microtremor Survey Method", Geophysical Monographs Series No. 12, Published by Society of Exploration Geophysicists.
11. Ling, S. and Okada, H. (1993). "An Extended Use of the Spatial Autocorrelation Method for the Estimation of Geological Structure Using Microtremors", *Proc., 89th Conference SEGJ*, 44-48
12. Capon, J. (1969). "High-resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis", *Proc., IEEE 57*, 1408-1418.
13. Sambridge, M. (2001). "Finding Acceptable Models in Nonlinear Inverse Problems Using a Neighbourhood Algorithm", *Inverse Problems (Institute of Physics Publishing)*, **17**, 387-403.
14. Wathelet, M. (2005). "Array Recordings of Ambient Vibrations: Surface-Wave Inversion", A Thesis Submitted for Degree of Doctor of Applied Sciences.
15. Wathelet, M., Ohrnberger, M., and Cornou, C. (2005). "Sesarray Package Contents", <http://www.geophysy.org>.
- شقایق"، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.
6. Manuals of "CMG-6TD Sensor, Operator's Guide, Part MAN-T60-0002. Designed and Manufactured by Güralp Systems Limited 3 Midas House, Calleva Park Aldermaston RG7 8EA England, Issued 2005-06-02.
7. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration Measurements, *Processing and Interpretation*, (2004). SESAME European Research Project WP12 – Deliverable D23. 12.
8. Haghshenas, E., Bard, P.-Y., Jafari, M.K., and Hatzfeld, D. (2003). "Effets de Site et Risque Sismique à Téhéran: Premiers Résultats D'une Etude Expérimentale", *6^{ème} Colloque National AFPS*, Paris, France.
9. Engalenc, M. (1968). "Contribution à la Géologie, Géomorphologie, Hydrogéologie de la Région de Tehran (Iran) ", Thèse de Doctorat, Centre d'Etude et de Recherche Hydrogéologiques, Montpellier, France.