

کاربرد روش های پاسخ ضربه، لرزه نگاری سطح به عمق و بین گمانه ای در مطالعات ژئوتکنیک، مطالعه موردی: محل احداث مجتمع مسکونی کلارآباد

صادق مقدم^{۱*}، مزده آزادی^۲، اصغر آزادی^۲ و محمد جعفری شمس آبادی^۴

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

۳- استادیار، دانشگاه پیام نور واحد پرند، تهران

۴- شرکت زمین فیزیک پویا، تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۱

* نویسنده مسئول مکاتبات: sadegh.moghadam@ut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

امروزه روش های ژئوفیزیکی به عنوان روش هایی موفق در تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی و مشخصات لایه های زیرسطحی عمل کرده اند. هدف از این تحقیق، ارائه مدلی بسیار کاربردی و معمول از مهندسی ژئوفیزیک کاربردی در علوم عمرانی و ژئوتکنیک و نوآوری در ارائه اطلاعات اولیه و در عین حال حائز اهمیت در شکل گیری سازه های عظیم است. بررسی سلامت سازه های شمع های درجاریز، نوع رفتار آن ها از نظر یکپارچگی در زمان اجرا و پس از آن، از مهم ترین چالش های موجود در مطالعات ژئوتکنیک است؛ چراکه سازه شمع های درجاریز، همزمان با حفاری در داخل خاک شکل می گیرد و در نتیجه ابهامات بیشتری در ارتباط با کیفیت و ابعاد واقعی شمع به وجود می آید. در این تحقیق به منظور تکمیل مطالعات ژئوتکنیکی در کنترل یکپارچگی و استحکام شمع های اجرا شده و از طرفی بررسی پاسخ ساختمان مورد مطالعه به لرزه های با منابع مختلف، آزمایش های پاسخ ضربه PIT، روش های لرزه ای سطح به عمق (Down hole) و بین گمانه ای (Cross hole) در محدوده مطالعاتی انجام گرفته اند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش پاسخ ضربه، نمودار فراوانی سرعت و نقشه سرعت امواج لرزه ای سازه های بتنی به منظور به تصویر کشیدن استحکام سازه های زیرسطحی به دست آمده است. همچنین نمودار سرعت شمع های مورد آزمایش برحسب سیمان مصرفی در محدوده مورد مطالعه به دست آمده اند که رابطه خطی میزان سیمان مصرفی و استحکام سازه های مورد نظر با ضریب $R^2=0.67$ تقریب زده شده است. در ادامه با توجه به جنس و بافت خاک، سرعت متوسط موج برشی در ۱۲ متر اول ۲ گمانه به دست آمده است که بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ ایران در تیپ II در نظر گرفته شده اند؛ در نهایت با توجه به نتایج آزمایش بین گمانه ای در ۱۰ جفت گمانه، ضخامت سازه های شمع با تقریب قابل ملاحظه ای و با تفاوت قابل اغماض با نمونه مشاهده شده در بازرسی مستقیم، بین ۰/۵ تا ۰/۸ متر محاسبه شده اند. با توجه به نتایج این تحقیق و نظر به لرزه خیزی ناحیه توصیه می شود طراحی عملیات بارگذاری در شمع های L9-11 و L18-1 اجرا شود.

آزمایش پاسخ ضربه
روش لرزه نگاری سطح به عمق
روش لرزه نگاری بین گمانه ای
کلارآباد

۱- مقدمه

زندگی اجتماعی انسان و محیط‌های شهری همواره با مخاطرات متعدد طبیعی و مصنوعی، دست به گریبان است. علیرغم پیشرفت‌های فزاینده علوم و تکنولوژی، وقوع حوادث و رخداد‌های طبیعی مصنوعی هر ساله خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را به جوامع انسانی وارد می‌نماید. وقوع این رخداد‌های غیرمترقبه به عنوان بحران‌های جوامع انسانی مطرح شده‌اند. در سال‌های اخیر علم مدیریت بحران به عنوان دانشی برای پیشگیری، آمادگی و مقابله با بحران‌های متعددی که جوامع بشری را تهدید می‌کند، مطرح شده است. کشور ایران نیز در زمره کشورهای پرمخاطره‌ی جهان قرار گرفته است، مخاطراتی چون زلزله، سیل، نشست‌های زمین و رانش آن (تقوایی و همکاران، ۱۳۹۴). از آنجا که اقدامات جهت کاهش میزان خطرپذیری، انجام پژوهش و مطالعه در زمینه شناخت مخاطرات و نحوه جلوگیری از آن‌ها است، مطالعات ژئوفیزیک یکی از روش‌های شناسایی مخاطرات در زمینه نشست زمین و ساخت‌وساز است. هدف از این تحقیق تشریح ضرورت مطالعات روش‌های پاسخ ضربه، روش‌های لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین گمانه‌ای در ساخت‌وسازهای شهری است. با توجه به این‌که در روش‌های لرزه‌ای گمانه‌ای، امواج به صورت تقریباً مستقیم از چشمه به گیرنده می‌رسند، بنابراین از دقت بیشتری نسبت به روش‌های سطحی برخوردار هستند (William et al., 2003). تغییر در حرکت قوی زمین بر اثر تأثیر رسوب باعث گردیده است که بعضی از محققان در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله، شرایط خاک محل را در درجه اول اهمیت قرار دهند که نمونه بارز آن را نیز می‌توان در زلزله سال ۱۹۹۰ منجیل در ایران مشاهده نمود (Haeri and Kholafae, 1994).

سرعت موج برشی یکی از پارامترهای اساسی لازم جهت تعیین خصوصیات دینامیکی خاک است که در ارزیابی سفتی خاک، پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، پتانسیل روان‌گرایی، چگالی خاک و تعیین نوع زمین، تعیین لایه‌های زیرسطحی خاک و نشست پی، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Woods, 1994). روش فوق می‌تواند به وسیله تعدادی از روش‌های ژئوفیزیکی نظیر روش بین گمانه‌ای (Cross-Hole test)، سطح به عمق (Down-hole test)، آزمایش نفوذ مخروط لرزه‌ای (Seismic cone penetration test)، میکروترمور، آنالیز انتشار امواج با چندین دستگاه (Multi-station analysis of surface waves) و آنالیز طیفی امواج سطحی (Spectral analysis of surface waves) اندازه‌گیری شود. روش لرزه‌نگاری بین‌گمانه‌ای یکی دیگر از روش‌های معمول برای تعیین تغییرات سرعت موج برشی با عمق معرفی شده است. در این آزمایش موج تراکمی یا برشی در سطح یا انتهای گمانه توسط منبع موج لرزه‌ای در یک گمانه تولید شده و همزمان توسط گیرنده‌ای که در گمانه مقابل قرار دارد جاروب می‌شود. با توجه به فاصله دو گمانه از یکدیگر و زمان

رسید موج لرزه‌ای به گیرنده، سرعت موج لرزه‌ای و پارامترهای الاستیسیته قابل محاسبه می‌باشند (Woods, 1994). توموگرافی لرزه‌ای زمان سیر (Travel time tomography) یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده در علوم زمین و زمین‌شناسی مهندسی به کار می‌رود. این نوع توموگرافی بیشتر در مناطقی که دو چاه یا گالری هم‌جوار در دسترس باشد، برای تعیین ویژگی‌های مهندسی ساختگاه و کاربردهای ژئوتکنیکی (Angioni et al., 2003; Hyndman et al., 1996) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱ مسیر پرتوهای مستقیم امواج لرزه‌ای در آزمایش توموگرافی لرزه‌ای نشان داده شده است. چنانچه مقطع مورد نظر را به سلول‌های مختلف تقسیم کنیم، هر پرتو موج از بلوک‌های مختلفی عبور می‌کند و در هر بلوک مسافتی مشخصی را طی می‌کند. به طور مثال در شکل ۲ پرتو MN در نظر گرفته می‌شود. این پرتو از سلول‌های مختلف عبور می‌کند. در سلول ij مسافت طی شده S_{mnij} است.

$$T_{MN} = \sum \frac{S_{mnij}}{V_{ij}} \quad (1)$$

در حالت کلی مدت زمان رسید هر پرتو موج، از جمع زمان‌های طی شده در هر سلول به دست می‌آید که در آن TMN زمان طی شده پرتو MN و V_{ij} سرعت امواج لرزه‌ای در سلول ij است. برای حل این معادله چند مجهولی از روش شبیه‌سازی استفاده می‌کنند. در ابتدا مقدار متوسط سرعت برای همه سلول‌ها در نظر گرفته می‌شود و با تحلیل برگشتی و روش سعی و خطا سرعت سلول‌ها را تغییر می‌دهد تا به کمترین خطا RMS برسد. سپس با در نظر گرفتن سرعت در هر سلول منحنی‌های هم سرعت رسم می‌شود. یکی از مسائلی که در آزمایش توموگرافی بایستی در نظر گرفته شود و اهمیت زیادی در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی دارد، شرایط زمین‌شناسی است. شرایط زمین‌شناسی شامل وضعیت لایه‌بندی، ضخامت لایه‌ها، وضعیت شکستگی‌ها و سطح آب‌های زیرزمینی است. بنابراین برای تفسیر هر مقطع توموگرافی بایستی مدل را به گونه‌ای که دربرگیرنده اطلاعات زمین‌شناسی باشد طراحی نمود.

روش‌های درون گمانه‌ای دارای محدودیت‌های خاصی می‌باشند. استفاده از روش‌های فوق نیازمند حفر گمانه است و لذا ممکن است امکان انجام آن‌ها در تمامی موارد امکان‌پذیر نباشد، به خصوص در مواردی که رسوبات عمیق مدنظر بوده و یا منطقه وسیعی همانند مطالعات ریز پهنه‌بندی شهرها مورد مطالعه قرار گیرد.

به منظور کنترل یکپارچگی و سلامت سازه شمع‌های اجرا شده در پروژه‌های عمرانی، از آزمایش‌های کنترلی استفاده می‌شود که شامل آزمایش‌های دانسیته درجا و بارگذاری صفحه است. در فرایند

شده است و پاسخ این تنش ورودی توسط ژئوفون در سطح شمع دریافت می‌شود. با توجه به خواص الاستیک محدوده مورد آزمایش، می‌توان فشاری معادل ۱ تا ۱۱ مگا پاسکال را به وسیله چکش وارد کرد (Rausche et al., 1992). گیرنده‌های ژئوفون در این کار به گیرنده‌های شتاب‌نگار ترجیح داده می‌شوند؛ چرا که در فرکانس‌های پایین‌تر پایداری بیشتری داشته و در عمل کار آبی بهتری دارند. با این حال در محدوده مورد مطالعه از هر دو گیرنده به منظور افزایش دقت ثبت زمان رسید موج تراکمی استفاده شده است. شکل ۳ تصویری از این آزمون و همچنین گیرنده‌های موج تراکمی در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. امواج تنشی تولید شده به داخل سازه فرستاده می‌شوند و پس از برخورد با حفره‌ها یا مرزها به سمت بالا بازتاب می‌شوند و در سطح توسط گیرنده دریافت و ثبت می‌گردند. داده‌های ورودی این آزمون که باید در مراحل بعدی مورد پردازش و تفسیر قرار بگیرند، دو سری داده در حوزه زمان است که مقدار دامنه موج تراکمی حاصل از ژئوفون و شتاب‌نگار بر اثر اعمال ضربه در واحد زمان می‌باشند. کاربرد اصلی این روش، بررسی نقایص داخلی شمع‌های بتنی است؛ ولی برای بررسی سایر سازه‌های صفحه‌ای شکل بتنی مانند قطعات بتنی کف پل‌ها، دیواره‌ها و سازه‌های عظیم استوانه‌ای نیز به کار می‌رود. یکی دیگر از موارد کاربرد این روش، تعیین محل مناطقی در زیر یا پشت سازه‌های صفحه‌ای بتنی است که دارای تراکم کمتری از مواد پرکننده است (Hertlein, B. and Davis, A., 2006).

در این تحقیق، نتایج آزمایش‌های پاسخ ضربه انجام شده بر روی ۸۰ نمونه شمع درجاریز اجرا شده در محل احداث مجتمع مسکونی در شهر کلارآباد مورد بررسی قرار گرفته و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم در نرم‌افزار REFLEXW و تفسیر نتایج، نمودار فراوانی سرعت شمع‌های مورد آزمایش و رابطه میان سیمان مصرفی و سرعت موج تراکمی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور دستیابی به خصوصیات لرزه‌ای و اطلاعات مقدماتی لازم به منظور آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی سازه‌های محدوده مطالعاتی، مطالعات لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین‌گمانه‌ای در ۲۰ گمانه حفاری شده، اجرا گردیده و پس از پردازش‌های لازم در نرم‌افزار REFLEXW و RAS-24 و تفسیر نتایج، سرعت موج برشی متوسط لایه‌های خاک در ۱۲ متر اول و پارامترهای الاستیسیته محدوده محاسبه شده است. علاوه بر این با توجه به دقت بالای داده‌های برداشت شده و در اختیار داشتن پارامترهای مورد نیاز، ضخامت سازه‌های شمع محاسبه شده و با یکی از سازه‌های بتنی مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا صحت نتایج مشخص گردد. موقعیت محدوده مورد مطالعه و همچنین نقاط تعیین شده به منظور اجرای آزمایش‌های پاسخ ضربه، لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین‌گمانه‌ای در شکل ۴ در مختصات محلی نشان داده شده است.

اجرای پی‌هایی با عمق کم، امکان کنترل مستقیم سلامت شمع پس از اجرا وجود ندارد. البته کنترل‌های اولیه از قبیل نمونه‌برداری از بتن قبل از تخلیه در چاه یا ثبت حجم بتن ریخته شده برای شمع، در تمامی پروژه‌های شمع‌ریزی انجام می‌گیرد؛ اما ساختار نهایی به راحتی به منظور بازرسی مستقیم در دسترس نیست (Massoudi, N. and Teferra, W., 2004). از طرفی برخی مشکلات نظیر رانش یا ریزش دیواره چاه و ایجاد یک ناحیه باریک در مقطع شمع (Necking)، عدم دستیابی به طول نهایی حفاری در اثر اشتباه گروه اجرایی، عدم استفاده یا استفاده ناصحیح از لوله ترمی برای بتن‌ریزی، بروز اختلال یا توقف در حین عملیات حفاری و بتن‌ریزی ممکن است باعث بروز آسیب‌هایی در شمع شود (Klingmuller, O. and Krisch, F., 2004).

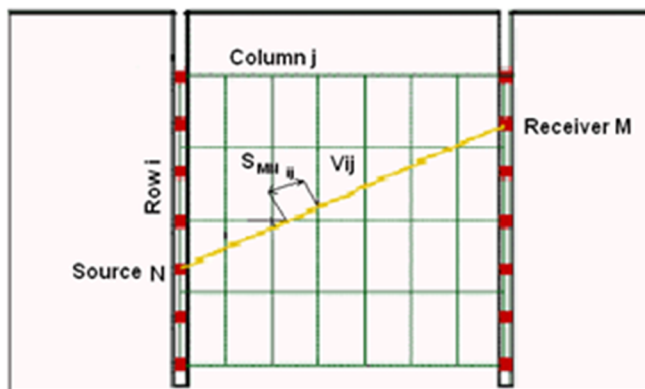
فلمینگ و همکاران (۱۹۹۲) فهرستی از عوامل متعدد در شمع‌ها را که باعث بروز آسیب می‌شوند ارائه داده‌اند که از آن جمله می‌توان استفاده از بتن خیلی سفت، نفوذ آب به داخل چاه شمع، ریزش لایه‌های نرم، ریزش خرده‌های حفاری از سطح و قفسه‌های آرماتور نام برد (Amir, 2009).

روش‌های تشخیص آسیب‌های شمع شامل روش‌های ژئوفیزیکی، مغزه‌گیری و حفاری طبقه‌بندی می‌شود. موج لرزه‌ای وسیله اساسی در آزمایش‌های ژئوفیزیکی برای تعیین خواص دینامیکی زمین محسوب می‌شود. متدهای لرزه‌ای بر پایه اصول فیزیکی حاکم بر مشخصات انتشار امواج است که می‌تواند شامل تولید، انتقال، جذب و استهلاک امواج در زمین و همچنین پدیده‌های انعکاس، انکسار و پراش امواج است. همچنین می‌توان ضرایب دینامیکی شامل مدول برشی، مدول بالک، ضریب یانگ و نسبت پواسون را به عنوان پارامترهای مهم ژئوتکنیکی به دست آورد (ASTM D7400, 2008).

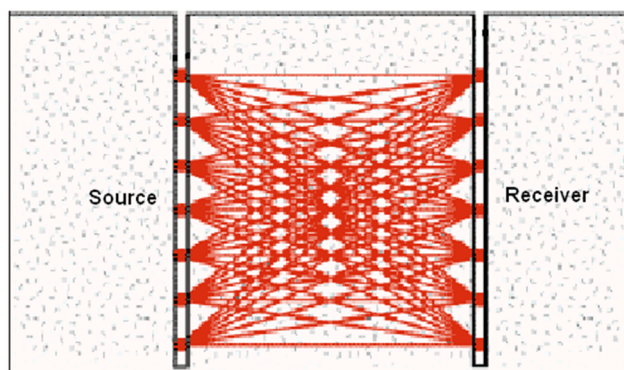
روش‌های ژئوفیزیکی آزمون پاسخ ضربه (PIT)، آزمایش لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین‌گمانه‌ای به عنوان روش‌های معمول در اجرای مطالعات ژئوتکنیکی شناخته شده‌اند. در روش غیرمخرب پاسخ ضربه، با استفاده از یک چکش کوچک و ایجاد موج تراکمی و انتشار آن در طول شمع، وجود آسیب‌های احتمالی و مکان آن در شمع بررسی می‌شود (Lehman, k. and Huang, Y., 2008).

این روش نخستین بار در سال ۱۹۵۳ با عنوان روش پویایی مکانیکی در فرانسه معرفی شد و بعدها از آن با نام آزمون ارتعاش یاد شد؛ در دهه ۱۹۷۰ با ساخته شدن رایانه‌های قابل حمل در محل سایت و اختصاص یافتن نرم‌افزار مخصوص، این روش اصلاح شد. روش نامبرده مبنایی لرزه‌ای دارد؛ به این مضمون که امواج تنشی توسط یک ضربه در سطح شمع بتنی تولید شده و به داخل المان تحت آزمایش فرستاده می‌شود؛ فرستنده در واقع یک چکش یک کیلوگرمی است که یک بارسنج (loadcell) در داخل آن جاسازی

مقدم و همکاران، کاربرد روش‌های پاسخ ضربه، لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین گمانه‌ای در مطالعات ژئوتکنیک، مطالعه موردی: محل احداث مجتمع ...، صفحات ۳۲۱-۳۰۵.



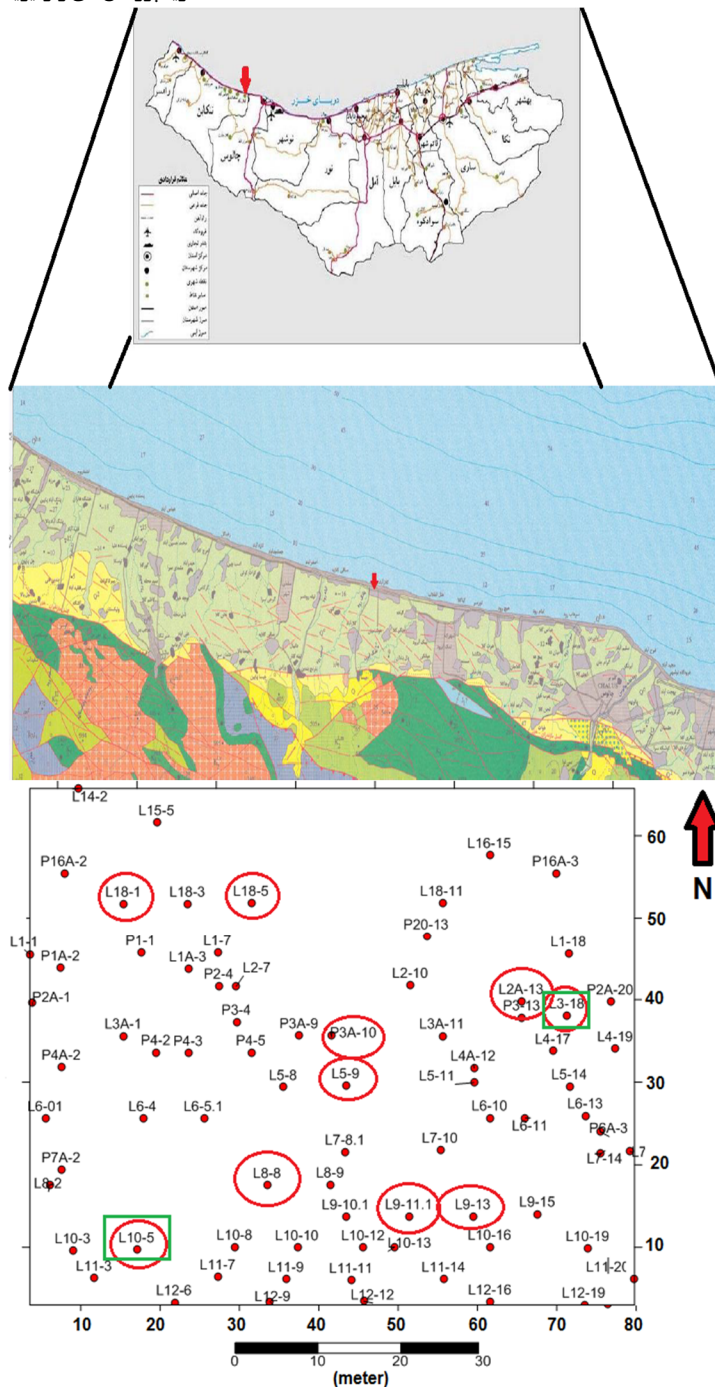
شکل ۱: مسیر پرتوهای امواج لرزه‌ای در آزمایش توموگرافی لرزه‌ای.



شکل ۲: تقسیم‌بندی سلول‌ها در آزمایش توموگرافی لرزه‌ای.



شکل ۳: آزمون پاسخ ضربه شامل یک شتاب‌نگار و سه ژئوفون به رنگ زرد (یکی از ژئوفون‌ها به عنوان تریگر و دوتای دیگر به عنوان گیرنده) و چکش با سری مخصوص پلاستیکی.



شکل ۴: موقعیت و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ و همچنین نقاط تعیین شده به منظور اجرای آزمایش‌های پاسخ ضربه، لرزه‌نگاری سطح به عمق (رنگ سبز) و بین‌گمانه‌ای (رنگ قرمز) در مختصات محلی.

گراول با جورشدگی خوب به همراه قطعات صدف دریایی با سن پالئوژن و کواترنری قرار دارد. این منطقه از دیدگاه تقسیمات زمین‌شناسی ایران در پهنه مرکزی (آق‌آبانی، ۱۳۸۳) و طبق نظر (افتخارنژاد، ۱۳۵۹). در رسوبات گودال خزر جنوبی قرار دارد. با توجه به نتایج ۴ گمانه حفاری و آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده، نمودار گمانه‌های حفاری شده و مقاطع مختلف خاک بین گمانه‌های مختلف تهیه شده است که در شکل ۵ نشان داده شده

۲- مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محدوده

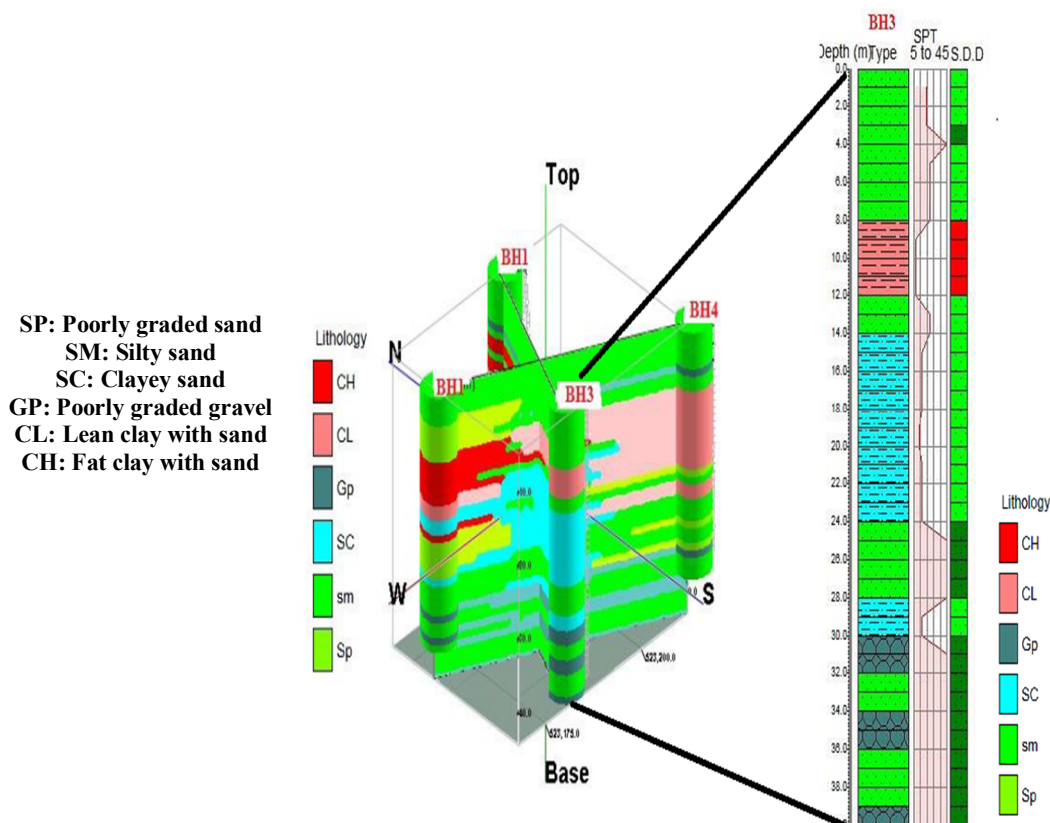
مورد مطالعه

ساخستگاه مورد مطالعه در شهر کلارآباد واقع در غرب استان مازندران قرار گرفته است. این شهر در حدود ۲۰۰ کیلومتری شمال شرقی تهران واقع گردیده است. از نظر موقعیت زمین‌شناسی این محدوده در برگیره زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چالوس واقع شده است.

مقدم و همکاران، کاربرد روش‌های پاسخ ضربه، لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین گمانه‌ای در مطالعات ژئوتکنیک، مطالعه موردی: محل احداث مجتمع ...، صفحات ۳۲۱-۳۰۵.

می‌کند. در این لایه عدسی‌های ماسه- شنی دیده می‌شود. لایه ماسه‌ای- شنی به عنوان لایه سوم، از تناوب لایه‌های ماسه‌ای شنی و در بعضی قسمت‌ها قلوه‌سنگی تشکیل شده است و تا عمق ۳۷ متر ادامه می‌یابد. میانگین عدد نفوذ استاندارد در این لایه بیشتر از ۳۵ است؛ در نهایت لایه شنی- قلوه‌سنگی به عنوان لایه آخر در اعماق پایین‌تر از ۳۸ متر دیده می‌شود. ذرات تشکیل دهنده این لایه عموماً گرد شده بوده و از عدد نفوذ استاندارد بالایی برخوردار است.

است. بر اساس مقاطع ترسیم شده، لایه ماسه‌ای - شنی فوقانی از سطح زمین شروع شده و حداکثر تا عمق ۱۰ متری ادامه می‌یابد. این لایه از ماسه و شن به صورت لایه‌های متناوب تشکیل شده و عمدتاً شن‌ها کاملاً گرد شده می‌باشند. میانگین عدد نفوذ استاندارد در این لایه ۳۰ است. لایه رسی-سیلتی در زیر لایه فوقانی بوده و حداکثر تا ۲۱ متر در گمانه‌های مختلف ادامه می‌یابد. جنس این لایه از رس با پلاستیسیته بالا تا سیلت با پلاستیسیته پایین در نقاط مختلف تغییر



شکل ۵: نمودار چینه نگاری گمانه حفاری شده BH-3 و مقطع سه بعدی لایه‌های زیرسطحی در محدوده مورد مطالعه.

کمک می‌کند تا با اعتماد به نفس بیشتری به تفسیر مقاطع بپردازد. دامنه پردازش‌های به کار رفته روی داده‌های روش پاسخ ضربه با افزایش نسبت سیگنال به نوفه تعیین می‌شود. در این پژوهش داده‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار REFLEXW به نمایش درآمده است. به منظور پردازش داده‌های به دست آمده از آزمایش پاسخ ضربه، لازم است قبل از اعمال هرگونه پردازش و صافی، دیدی صحیح از طیف دامنه نگاشت‌های مورد بررسی و تعیین زمان ثبت داده در دستگاه داده‌برداری وجود داشته باشد تا بتوان با تعیین فرکانس غالب، فیلترهای مناسبی برای حذف نوفه‌های با فرکانس مشخص به کار برد. به منظور پردازش داده‌های به دست آمده از آزمایش پاسخ ضربه، لازم است قبل از اعمال هرگونه پردازش و صافی، دیدی صحیح از طیف دامنه نگاشت‌های مورد بررسی و تعیین

۳- جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

۳-۱- داده‌های پاسخ ضربه

به منظور اجرای آزمایش پاسخ ضربه، ابتدا تعداد ۸۰ شمع و با توزیع تقریباً یکنواخت در محدوده ساختگاه انتخاب گردید. نحوه برداشت داده در این روش به این صورت است که ژئوفون‌ها و شتاب‌نگار مطابق شکل ۳ در بالای شمع متصل شده و آثار موج تراکمی بازگشتی از ضربه چکش مخصوص به سر شمع را دریافت و نتایج در پردازشگر ثبت می‌شود. در جدول ۱ مشخصات تجهیزات لازم به منظور برداشت داده‌های پاسخ ضربه آورده شده است. به طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیکی، دستیابی به تصویری واضح از اهداف زیرسطحی با حذف نوفه‌های ناخواسته و تقویت سیگنال‌ها (افزایش نسبت سیگنال به نوفه) است. پردازش مناسب به مفسر

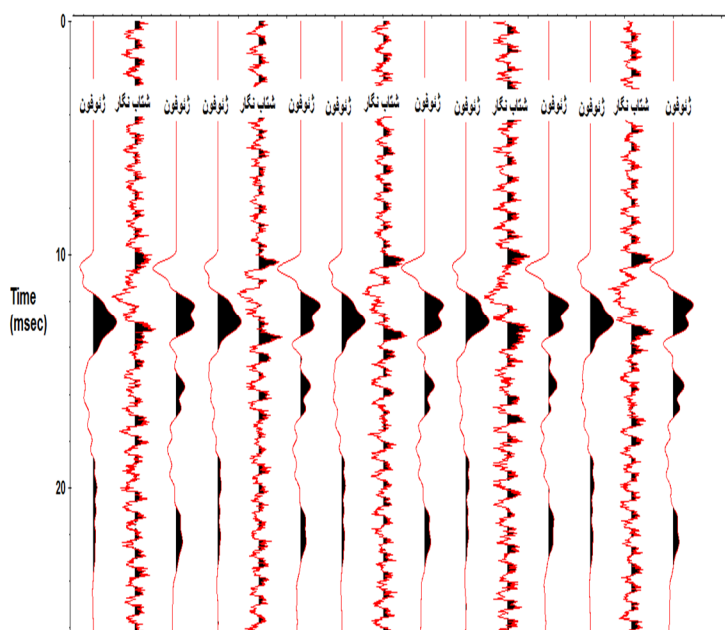
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

نرم‌افزارهای مورد نظر، پردازش‌های لازم شامل حذف داده‌های بی‌کیفیت (داده‌هایی که در اثر ضربه ضعیف تنفگ مخصوص، شامل اعوجاجات و پیک‌های غیرطبیعی می‌باشند)، اعمال فیلترهای باندگذر، انباشت داده‌ها به منظور قرائت صحیح زمان رسید موج ارسالی از شتاب‌نگار، اعمال دامنه بهره‌وری، اعمال فیلتر هموارسازی و استخراج زمان رسید اولین موج و موج بازتابی از نوک شمع صورت گرفت. شکل ۷، نمونه نگاشت‌های پردازش شده به منظور قرائت زمان رسیدهای ابتدا و انتهای شمع‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

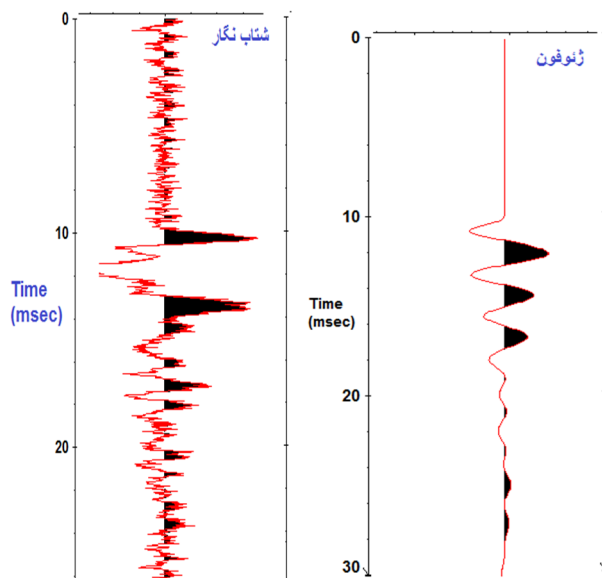
زمان ثبت داده در دستگاه داده‌برداری وجود داشته باشد تا بتوان با تعیین فرکانس غالب، فیلترهای مناسبی برای حذف نوفه‌های با فرکانس مشخص به کار برد. شکل ۶، نمونه نگاشت‌های خام حاصل از ژئوفون و شتاب‌نگار مربوط به یک شمع را با ۵ تکرار آزمایشی جهت افزایش دقت برداشت در نرم‌افزار نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، در هر یک از نگاشت‌های حاصل با رسیدن موج تراکمی به سطح مقطع شمع، دامنه سیگنال افزایش یافته و در طول شمع دچار تغییرات با دامنه بالا شده است. پس از فراخوانی داده‌ها در

جدول ۱: لیست تجهیزات مورد استفاده و اطلاعات برداشت آزمایش پاسخ ضربه.

مشخصات	تجهیزات و اطلاعات برداشت
40KHz	فرکانس نمونه‌برداری
0.1sec	مدت زمان نمونه‌برداری
40cm	فاصله تقریبی بین چشمه و گیرنده‌ها
22 kHz و ADXL001, 70 g	شتاب‌نگار مورد استفاده
100Hz	ژئوفون مورد استفاده
۱ کیلوپی با سر پلاستیکی سخت	چکش مورد استفاده
ABEM TERRALOK MK6	دستگاه داده‌برداری



شکل ۶: نمونه نگاشت‌های خام حاصل از گیرنده‌های شتاب‌نگار و ژئوفون با ۵ مرحله تکرار.



شکل ۷: نمونه نگاشت‌های پردازش شده حاصل از گیرنده‌های شتاب‌نگار و ژئوفون.

عمق‌های متناظر با آن تمام گمانه را از سطح تا عمق مورد نظر جاروب کرده است.

یکی از مهم‌ترین نکات لازم در مراحل پردازش روش‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای، انتخاب صحیح و مناسب فیلتر اعمالی به منظور قرائت زمان رسید اولیه امواج است. انتخاب صحیح کانال‌های دستگاه برداشت به منظور همپوشانی داده‌های موج برشی (چنانچه در شکل ۶-د مشاهده می‌شود) و استفاده از پیش‌پردازش‌های لازم به منظور افزایش دقت قرائت می‌تواند اطلاعات دقیق زیرسطحی را فراهم آورد. در پردازش داده‌های روش بین گمانه‌ای در محدوده مورد مطالعه، فیلتر میان‌گذر (band-pass butterworth) در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ به منظور حذف نوفه‌های محلی استفاده شده است. شکل ۸ تجهیزات آزمایش روش سطح به عمق، موقعیت شمع در راستای دو گمانه حفاری شده و همچنین نمونه نگاشت‌های پردازش شده در محدوده مورد مطالعه توسط نرم‌افزار REFLEX را نمایش می‌دهد.

مشخصات تجهیزات لازم به منظور برداشت داده‌های لرزه‌نگاری درون گمانه‌ای به شرح زیر است:

الف- دستگاه لرزه‌نگار Ras24

ب- ژئوفون‌های سه مؤلفه‌ای درون گمانه‌ای

ج- پتک، الوار و ورق برای تولید امواج تراکمی و برشی

د- چشمه موج تفنگی

ه- ژئوفون‌های تک مؤلفه‌ای

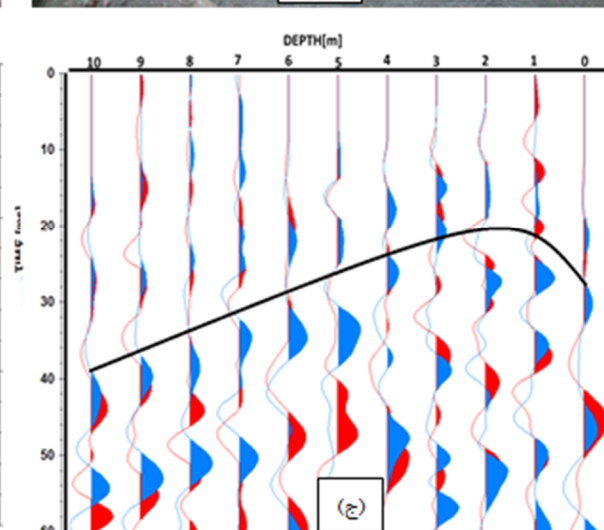
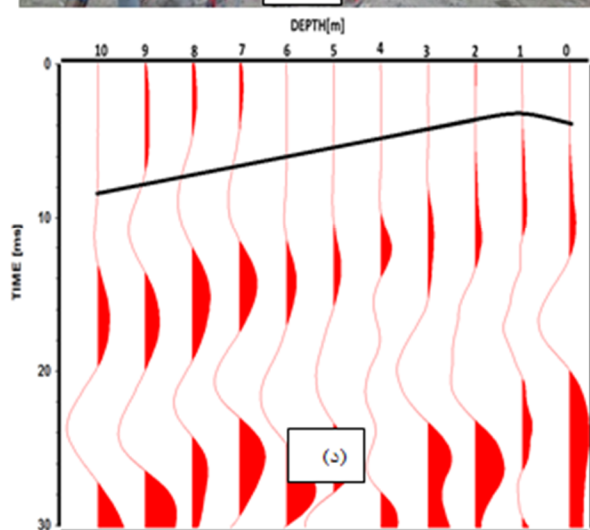
۳-۲- داده‌های لرزه‌نگاری درون گمانه‌ای

در برداشت‌های لرزه‌نگاری درون گمانه‌ای با قرار دادن یک گیرنده ۳ مؤلفه‌ای درون گمانه در عمق‌های مختلف، با تولید موج توسط منبع تولید موج مکانیکی، موج ایجاد شده به گیرنده رسیده و توسط دستگاه ثبت می‌گردد.

آزمایش‌های لرزه‌ای به روش سطح به عمق یا Down-Hole در دو گمانه L3-18 و L10-5 که در شکل ۴ با رنگ سبز نشان داده شده‌اند، انجام شده است.

برای تعیین سرعت امواج تراکمی، چشمه لرزه‌ای موج P (ضربه قائم پتک بر روی ورق مخصوص) در فاصله حدود ۲/۷۵ متری از دهانه گمانه‌ها قرار داده شد و گیرنده امواج (ژئوفون درون چاهی) تمام عمق مفید گمانه‌ها را از سطح تا عمق مورد نظر با فاصله ۱/۵ متر جاروب کرده است. برای تعیین سرعت امواج برشی، چشمه لرزه‌ای موج S (ضربه افقی پتک بر چوب) در فاصله حدود ۳ متری از دهانه گمانه‌ها قرار داده شد و گیرنده امواج، تمام عمق مفید گمانه‌ها را از سطح تا عمق مورد نظر با فاصله ۱/۵ متر جاروب کرده است.

آزمایش‌های لرزه‌ای به روش بین گمانه‌ای یا Cross-Hole با هدف تعیین ضخامت ستون شمع در ۱۰ زوج گمانه به منظور پوشش کل محدوده مطالعاتی و به عنوان اطلاعات اولیه جهت عملیات بارگذاری روی شمع انجام گردید. برای تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی از چشمه لرزه‌ای (تفنگ مخصوص) در یکی از گمانه‌ها از سطح به عمق حرکت کرده و گیرنده امواج (ژئوفون درون چاهی) در



شکل ۸: الف: تجهیزات آزمایش روش سطح به عمق شامل پتک، ورق آهنی مخصوص در فاصله حدود ۲/۷۵ متری از دهانه گمانه به منظور ایجاد موج تراکمی، الوار چوبی در فاصله حدود ۳ متری از دهانه گمانه به منظور ایجاد موج برشی و ژئوفون محرک (trigger) ب: موقعیت شمع در راستای دو گمانه حفاری شده ج: نمونه نگاشت پردازش شده موج برشی د: نمونه نگاشت پردازش شده موج تراکمی. (خطوط سیاه رنگ مسیر قرائت زمان‌های رسید موج‌های تراکمی و برشی در هر یک از نگاشت‌ها می‌باشند).

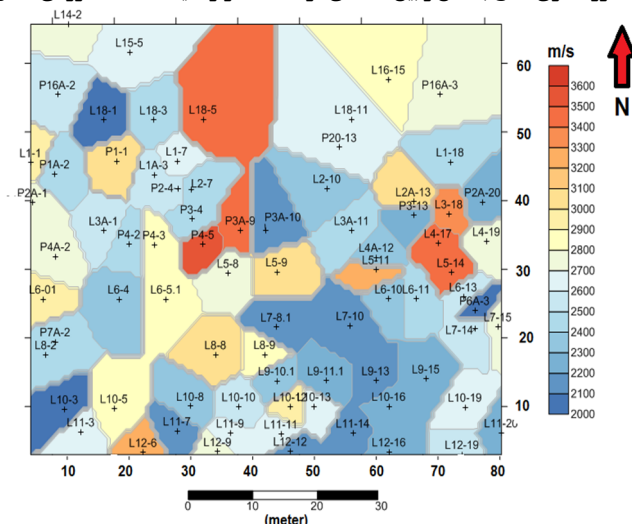
۴- بحث

۴-۱- نتایج حاصل از آزمایش پاسخ ضربه

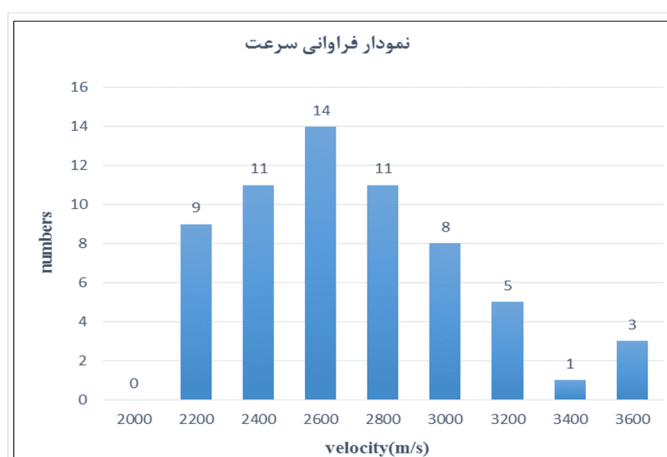
پس از استخراج زمان‌های رسید موج اولیه و بازتابی و با توجه به عمق شمع، سرعت موج برای هر شمع محاسبه شده و به صورت نقشه سرعت امواج لرزه‌ای، به تصویر کشیده شده است. سرعت هر یک از شمع‌ها با توجه به زمان‌های رسید موج در ابتدا و انتهای شمع و همچنین ارتفاع شمع در زمان تزریق بتن، به دست آمده‌اند. چنانچه در نقشه شکل ۹ مشاهده می‌شود، سرعت امواج لرزه‌ای در این نقشه برای شمع‌های مورد آزمایش، در بازه ۲۰۰۰ تا ۳۶۰۰ متر بر ثانیه قرار می‌گیرند. شمع‌هایی که در جنوب شرقی محدوده ساختگاه قرار دارند دارای سرعت کمتری نسبت به سایر نقاط هستند که احتمالاً به دلیل نقص در سیستم جت گروتینگ بوده که فشاری کمتر از ۴۰۰ بار در مرحله تزریق به محل شمع‌ها وارد کرده است. نقص در سیستم جت گروتینگ شامل عوامل متعددی است که می‌تواند شامل موارد یاد شده در بخش مقدمه است. همچنین به

منظور بررسی کیفیت سازه‌های بتنی ساختگاه مورد مطالعه، نمودار فراوانی سرعت امواج لرزه‌ای به دست آمده از آزمایش پاسخ ضربه و رابطه سرعت - سیمان مصرفی در ساختگاه مورد مطالعه به دست آمده‌اند. چنانچه در نمودار فراوانی شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، اغلب سازه‌های مورد آزمایش دارای سرعت ۲۶۰۰ (m/s) می‌باشند که دارای استحکام قابل قبولی می‌باشند. استحکام ذکر شده با رابطه خطی میان سرعت سازه‌های بتنی برحسب سیمان مصرفی در هر یک از شمع‌ها به صورت برجسته‌تر نمایان می‌شود. این رابطه در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. پارامتر ضریب رگرسیون R^2 با مقدار ۰/۶۷ نمایان شده است که نشانگر رابطه مستقیم میان دو پارامتر ذکر شده است. علاوه بر مقدار سیمان مصرفی، عوامل دیگری همچون بروز اختلال یا توقف در حین عملیات بتن‌ریزی، ریزش لایه‌های نرم و ریزش خرده‌های حفاری می‌تواند باعث انحراف بیش از حد بعضی از نقاط از مسیر انتخابی و کاهش ضریب R^2 در رابطه محاسبه شده در شکل ۱۱ شوند.

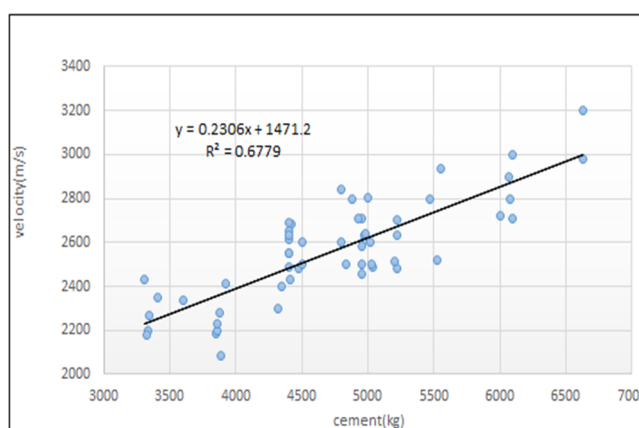
مقدم و همکاران، کاربرد روش‌های پاسخ ضربه، لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین گمانه‌ای در مطالعات ژئوتکنیک، مطالعه موردی: محل احداث مجتمع ...، صفحات ۳۲۱-۳۰۵.



شکل ۹: نقشه سرعت امواج تراکمی به دست آمده از ساختگاه مورد مطالعه.



شکل ۱۰: نمودار فراوانی سرعت امواج لرزه‌ای در شمع‌های مورد آزمایش در محدوده مورد مطالعه.



شکل ۱۱: نمودار سرعت شمع‌های مورد آزمایش برحسب سیمان مصرفی.

۲-۴- نتایج حاصل از لرزه‌نگاری سطح به عمق

از آنجا که طراحی و احداث فونداسیون‌های پایدار جهت پروژه‌های بلند مرتبه نقش بسزایی در مقاوم نمودن آن‌ها در برابر خطرات ناشی

از زلزله ایفا می‌کند، لذا تحلیل دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی و پاسخ لرزه‌ای لایه‌های خاک به منظور محاسبات دقیق مرتبط با عملیات اجرایی فونداسیون امری ضروری است. تقسیم‌بندی لایه‌های زمین با

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

دینامیکی به دست آمده از آزمایش لرزه‌ای در گمانه BH-L10-5 در جدول ۳ و شکل ۱۲ ارائه شده است. چگالی لایه‌های خاک از طریق آزمایش‌های ژئوتکنیک در زمان حفاری گمانه‌های مورد آزمایش به دست آمده‌اند. چنانچه در جدول ۲ و شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سرعت موج تراکمی از عمق ۴ متر افزایش یافته و با توجه به افزایش نه چندان چشمگیر موج برشی از این عمق، شاهد تغییرات ناگهانی در بعضی از مدول‌ها شامل مدول بالک هستیم. محاسبات سرعت متوسط موج برشی در گمانه موردنظر در جدول ۴ با توجه به معادله ۲ به صورت اختلاف عمق بخش بر اختلاف زمان رسید موج بین دو نگاشت متوالی در بازه برداشت ۱ متر ارائه شده است. در شکل ۱۳ نمودار سرعت متوسط موج برشی با عمق رسم شده است. سرعت متوسط موج برشی در این گمانه تا عمق ۳۰ متری حدود ۵۱۱ متر بر ثانیه برآورد شده است. با توجه به این‌که سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متر، بیشتر از ۳۷۵ و کمتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه است، لذا محدوده مورد مطالعه بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران در تیپ II در نظر گرفته می‌شود.

توجه به سرعت متوسط موج برشی صورت می‌گیرد. بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) سرعت متوسط موج برشی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_s(M) = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n \frac{T_i}{v_{si}}} \quad (2)$$

در این رابطه $(V_s(M))$ سرعت متوسط موج برشی تا عمق M

متری $\sum_{i=1}^n T_i = M$ ، ضخامت لایه، T_i سرعت امواج برشی لایه نام و n تعداد لایه است. جدول ۲، طبقه‌بندی زمین بر اساس این آیین‌نامه‌ها را ارائه داده است.

به دلیل وجود سطح ایستابی با عمق حدود ۴ متر و همچنین لیتولوژی خاص محدوده مورد مطالعه، حفاری گمانه‌های آزمایشی در محدوده مورد مطالعه تا عمق ۱۲ متر صورت گرفته و نتایج به دست آمده برای آزمایش لرزه‌نگاری سطح به عمق تا عمق ۳۰ متر تقریب زده شده است. سرعت امواج تراکمی و برشی و مشخصات پارامترهای

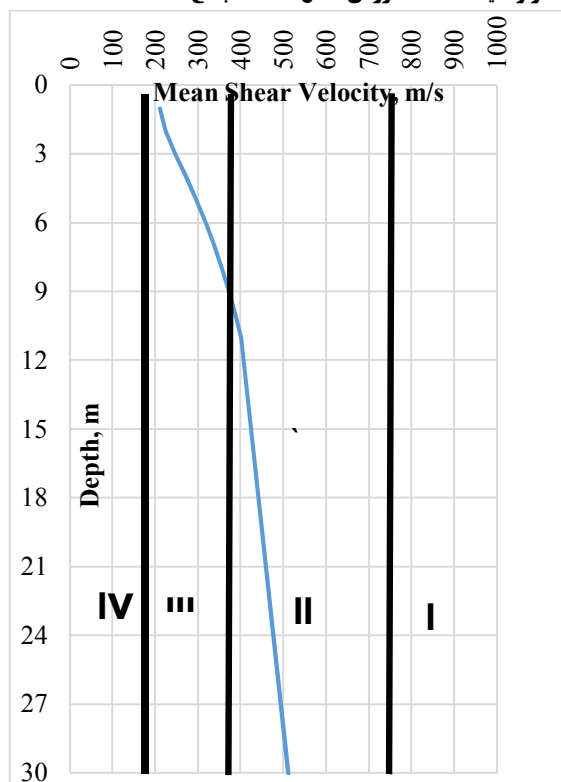
جدول ۲: تقسیم‌بندی نوع زمین از نظر لرزه‌ای بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰- ویرایش چهارم).

طبقه‌بندی	توصیف زمین	$\bar{V}_s (m/s)$
I	سنگ و شبه سنگ، شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاک 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 با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد.	$375-750$
III	سنگ‌های آذرین و رسوبی سست، مانند توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده.	$175-375$
IV	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر. خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک غیر چسبنده یا با کمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم.	<175

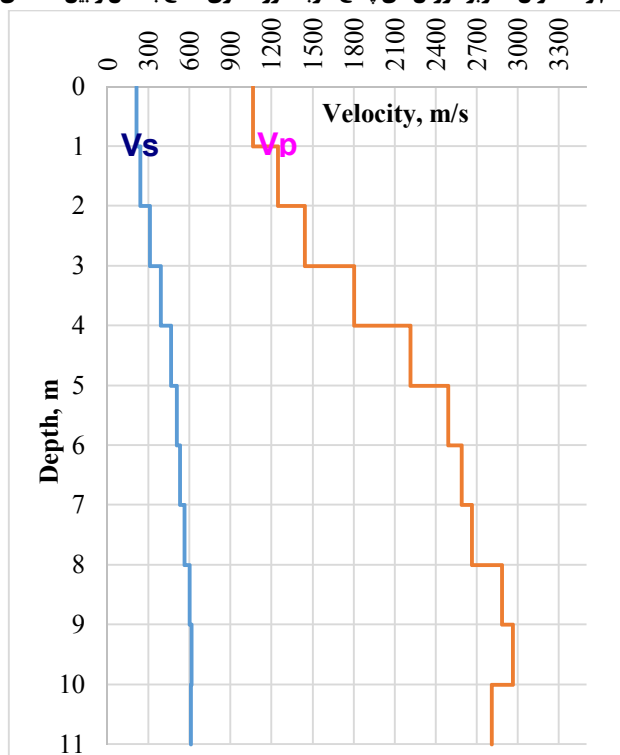
جدول ۳: سرعت امواج تراکمی و برشی و پارامترهای دینامیکی آزمایش‌های لرزه‌ای در گمانه BH-L10-5.

عمق m	چگالی gr/cm3	سرعت موج P m/sec	سرعت موج S m/sec	مدول یانگ Mpa	مدول برشی Mpa	مدول بالک Mpa	نسبت پواسون
۰-۱	۱٫۴	۱۰۶۴٫۶	۲۱۰٫۶	۱۸۴	۶۲	۱۵۰۴	۰٫۴۸
۱-۲	۱٫۴	۱۲۴۵	۲۴۰٫۴	۲۴۰	۸۱	۲۰۶۲	۰٫۴۸
۲-۳	۱٫۴۵	۱۴۴۱	۳۰۸٫۱	۴۰۶	۱۳۸	۲۸۲۹	۰٫۴۸
۳-۴	۱٫۴۵	۱۸۰۱٫۱	۳۸۹٫۳	۶۴۸	۲۲۰	۴۴۱۱	۰٫۴۸
۴-۵	۱٫۵	۲۲۱۲٫۷	۴۶۳	۹۵۰	۳۲۲	۶۹۱۵	۰٫۴۸
۵-۶	۱٫۵	۲۴۹۰٫۸	۵۰۷٫۸	۱۱۴۳	۳۸۷	۸۷۹۱	۰٫۴۸
۶-۷	۱٫۵	۲۵۸۷	۵۲۸٫۲	۱۲۳۷	۴۱۸	۹۴۸۱	۰٫۴۸
۷-۸	۱٫۵	۲۶۶۲٫۷	۵۶۰	۱۳۸۹	۴۷۰	۱۰۰۰۸	۰٫۴۸
۸-۹	۱٫۵	۲۸۸۴٫۷	۶۰۰٫۹	۱۶۰۰	۵۴۲	۱۱۷۵۶	۰٫۴۸
۹-۱۰	۱٫۵	۲۹۵۹٫۸	۶۱۳٫۵	۱۶۶۸	۵۶۵	۱۲۳۸۸	۰٫۴۸
۱۰-۱۱	۱٫۵	۲۸۰۵	۶۰۸٫۲	۱۶۳۷	۵۵۵	۱۱۰۶۲	۰٫۴۸
۱۱-۳۰			۶۰۸٫۲				

مقدم و همکاران، کاربرد روش‌های پاسخ ضربه، لرزه‌نگاری سطح به عمق و بین گمانه‌ای در مطالعات ژئوتکنیک، مطالعه موردی: محل احداث مجتمع ...، صفحات ۳۲۱-۳۰۵.



شکل ۱۳: منحنی تغییرات سرعت متوسط موج برشی با عمق در گمانه BH-L10-5، خطوط سیاه رنگ در شکل مربوط به محدوده سرعت موج برشی در طبقه‌بندی بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ است.



شکل ۱۴: منحنی تغییرات سرعت امواج تراکمی و برشی با عمق در گمانه BH-L10-5.

جدول ۴: محاسبه سرعت متوسط موج برشی گمانه BH-L10-5.

Depth m	Vs m/sec	Thickness m	Time sec	Σ time sec	Σ thickness m	Vs-mean m/sec
۰-۱	۲۱۰	۱	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۴۷	۱	۲۱۰
۱-۲	۲۴۰	۱	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۸۹	۲	۲۲۴
۲-۳	۳۰۸	۱	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۱۲	۳	۲۴۶
۳-۴	۳۸۹	۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۱۴	۴	۲۷۱
۴-۵	۴۶۳	۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۶	۵	۲۹۶
۵-۶	۵۰۷	۱	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۸	۶	۳۱۸
۶-۷	۵۲۸	۱	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۰	۷	۳۳۷
۷-۸	۵۶۰	۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۲	۸	۳۵۵
۸-۹	۶۰۰	۱	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۴	۹	۳۷۲
۹-۱۰	۶۱۳	۱	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۵	۱۰	۳۸۷
۱۰-۱۱	۶۰۸	۱	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۷	۱۱	۴۰۰
۱۱-۳۰	۶۰۸	۱۹	۰/۰۳۱۲	۰/۰۵۸	۳۰	۵۱۱

تغییر در قطر خواهد شد. به همین منظور، آزمایش روش لرزه‌نگاری بین گمانه‌ای با هدف محاسبه ضخامت شمع‌های ساختگاه مورد مطالعه اجرا شد. چنانچه در شکل (۸-ب) دیده می‌شود، گمانه‌های حفر شده در دو طرف شمع قرار گرفته و پس از انجام محاسبات، ضخامت شمع‌های مورد نظر طریق توموگرافی لرزه‌ای به دست آمده‌اند. سرعت به دست آمده از هریک از شمع‌ها از طریق آزمایش

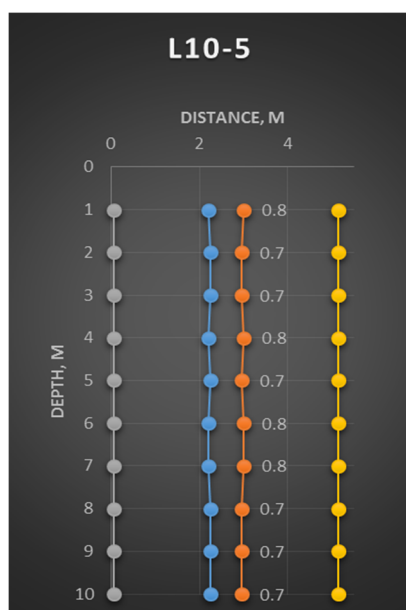
۳-۴- نتایج حاصل از لرزه‌نگاری بین گمانه‌ای

با توجه به اینکه نوع ستون‌های اجرا شده در این ساختار به روش جت گروتینگ بوده و با در نظر گرفتن این موضوع که ساختارهای زیرسطحی در ساختگاه مورد مطالعه در اعماق مختلف دارای تنوع لایه‌بندی است به‌طوری‌که جنس لایه‌ها از لای تا قلوه‌سنگ در تغییر است، بنابراین ستون اجرا شده در اعماق مختلف پس از اجرا دچار

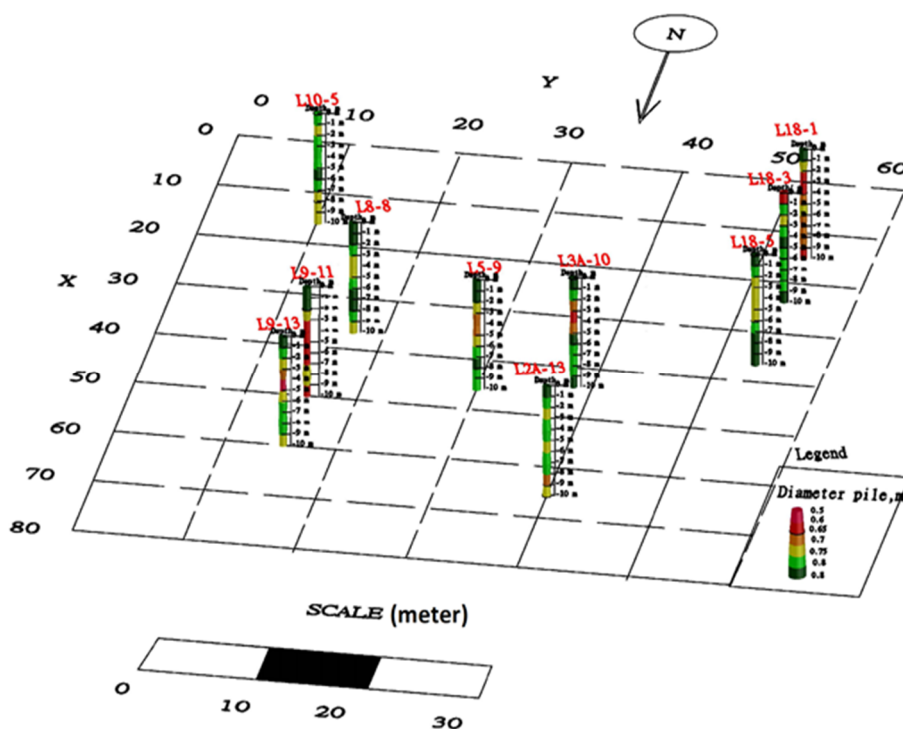
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

ضخامت شمع‌های مورد آزمایش را در محدوده نمایش می‌دهد. با مقایسه شکل ۱۵ و نقشه سرعت شمع‌ها حاصل از آزمایش پاسخ ضربه در شکل ۹، این نتیجه قابل استنتاج است که همان‌طوری که قابل انتظار بود، ستون شمع‌های موجود در قسمت جنوب شرقی از ضخامت کمتری نسبت به سایر نقاط برخوردار است که هم‌راستا با اجرای تزریق بتن در محل شمع‌های موردنظر با سیستم جت گروتینگ در محدوده مورد مطالعه است.

پاسخ ضربه به عنوان پارامتر مورد نیاز در محاسبه ضخامت مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱۴، فاصله بین دو گمانه در محل شمع L10-5 (فاصله چشمه فرستنده تا گیرنده امواج) $5/2$ m و فاصله چشمه فرستنده تا مرکز شمع $2/4$ m است. عمق گمانه فرستنده 10 m و عمق گمانه گیرنده 10 m است. نتیجه پردازش به صورت تغییرات ضخامت شمع برحسب عمق با ستون نارنجی رنگ در شکل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت ستون شمع بین $0/7$ تا $0/8$ متر محاسبه شده است. شکل ۱۵، تغییرات



شکل ۱۴: ضخامت محاسبه شده ستون شمع L10-5 توسط آزمایش لرزه‌نگاری بین گمانه‌ای در بازه ۱ متر. خطوط رنگی خاکستری و زرد رنگ به ترتیب مربوط به فرستنده و گیرنده در دو طرف شمع و خطوط آبی و نارنجی رنگ مربوط به ضخامت شمع می‌باشند.



شکل ۱۵: نمایشی سه‌بعدی از موقعیت و ضخامت ستون شمع‌های محاسبه شده توسط آزمایش لرزه‌نگاری بین گمانه‌ای در محدوده مورد مطالعه.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از ارائه این تحقیق، به تصویر کشیدن ابعاد مختلف مطالعات ژئوفیزیک در علوم مهندسی است. در این تحقیق به منظور تکمیل مطالعات ژئوتکنیکی، آزمایش‌های پاسخ ضربه PIT، روش‌های لرزه‌ای سطح به عمق (Down hole) و بین‌گمانه‌ای (Cross hole) در محدوده مطالعاتی انجام گرفته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش پاسخ ضربه، نمودار فراوانی سرعت و نقشه سرعت امواج لرزه‌ای سازه‌های بتنی به منظور به تصویر کشیدن استحکام سازه‌های زیرسطحی به دست آمده است. همچنین نمودار سرعت شمع‌های مورد آزمایش برحسب سیمان مصرفی در محدوده مورد مطالعه به دست آمده‌اند که رابطه خطی میزان سیمان مصرفی و استحکام سازه‌های مورد نظر با ضریب $R^2=0.67$ تقریب زده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش پاسخ ضربه بر روی شمع‌های انتخابی سرعت نمونه‌های بخش جنوب شرقی سایت مورد مطالعه از سرعت پایین‌تری برخوردار بودند که احتمالاً به دلیل نقص موجود در سیستم تزریق بتن و یا کمبود مقدار سیمان مصرفی در نمونه‌ها بوده است. همچنین نمودار فراوانی سرعت در شمع‌های انتخابی نشان‌دهنده سرعت 2600 m/s در نمونه‌های یاد شده است که از مقدار متوسط بازه اندازه‌گیری شده کمتر است. در ادامه با توجه به جنس و بافت خاک، سرعت متوسط موج برشی در ۱۲ متر اول ۲ گمانه به دست آمده است که بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران در جدول ۲، در تیپ II در نظر گرفته شده‌اند؛ تیپ به دست آمده با توجه به آیین‌نامه یاد شده مربوط به خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل شن و ماسه خیلی متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد، است. نتایج مربوط به ستون چینه‌شناسی گمانه‌های مربوط به آزمایش ژئوتکنیک نشان‌دهنده تطابق معقول بین نتایج سرعت متوسط موج برشی و لیتولوژی محدوده مورد مطالعه است. سرعت متوسط موج برشی در روش لرزه‌ای سطح به عمق، بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و طبق جدول ۲ طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به لیتولوژی و ستون چینه‌شناسی محدوده مورد مطالعه و همچنین توضیحات جدول ۲ و مقایسه نتایج دو گمانه که مشابه با یکدیگر بوده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که توسط آزمایش موردنظر، موج برشی با توجه به لیتولوژی محدوده تولید شده است.

در نهایت آزمایش‌های لرزه‌ای به روش بین‌گمانه‌ای با هدف تعیین ضخامت ستون‌های شمع در ده جفت گمانه به منظور پوشش محدوده مطالعاتی انجام گردید. برای تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی از چشمه لرزه‌ای (تفنگ مخصوص) در یکی از گمانه‌ها از سطح به عمق (۱ تا ۱۲ متر) حرکت کرده و گیرنده امواج (ژئوفون درون‌چاهی) در عمق‌های متناظر با آن، تمام گمانه‌ها را از سطح تا عمق مورد نظر جاروب کرد. پس از پیش‌پردازش‌های لازم در نرم‌افزار موجود و استفاده از روش توموگرافی لرزه‌ای، زمان رسید امواج

۶- منابع

افتخار نژاد، ج.، ۱۳۵۹، تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت، ۸۲، ۱۹-۲۸.

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

تقوایی، م.، حسینی خواه، ح. و علیزاده اصل، ج.، ۱۳۹۴، استراتژی توسعه شهری با تأکید بر توانمندسازی محالتهای شهری مطالعه موردی: محله اکبرآباد یزد، فصلنامه آمایش جغرافیایی فضا، شماره ۱۵.

سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، مهندسین مشاور عمران راهور، ۱۳۸۳، ضرورت، اهمیت، کنترل و انجام مطالعات ژئوتکنیکی شهر تهران.

Amir, J.M., 2009, Pile integrity testing (PIT).

Angioni, T., Rechten, R.D., Cardimono, S.J. and Luna, R., 2003, Crosshole seismic tomography and borehole logging for engineering site characterization in Sikeston, MO, USA, Tectonophysics, 368, 119-137.

ASTM D7400-08, Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, www.astm.org.

Baker, D.W. and Carter, N.L., 1972, Seismic velocity anisotropy calculated for ultramafic minerals and aggregates, in H.C. Heard, I.V. Borg, N.L. Carter, and C.B. Raleigh, eds., Flow and fracture of rocks, American Geophysical Union Geophysical Monographs, 16, 157-166.

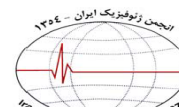
Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F. and Elson, W.K., 1992, Piling Engineering, Second edition, John Wiley & Sons.

Haeri, S.M. and Kholafae, M., 1994, Local site effects in the city of Rasht during Manjil earthquake of June 20 1990, Iran. Proc. Of 2nd Int. Conf. on Earthquake Resistance Construction and Design. pp. 109-116.

Hertlein, B. and Davis, A., 2006, Nondestructive testing of deep foundation, first edition, John Wiley & Sons, Ltd, London. pp. 113-136.

Hyndman, D.W. and Harris, J.M., 1996, Traveltime

- method proceeding, fifth international conference on case histories in geotechnical engineering, New York.
- Rausche, F., Likins, G. and Shen, R.K., 1992, Pile integrity testing and analysis, Application of Stress-Wave Theory to Piles, F. B. J. Barends (ed.) Balkema Rotterdam.
- William, R.A., Stephenson, W.J. and Odum, J.K., 2003, Comparison of P and S-wave velocity profiles obtained from surface seismic refraction/reflection and downhole data, Tectonophysics, 368, 71-88.
- Woods, R.D., 1994, Borehole Methods in Shallow Seismic Exploration: Geophysical Characterization of Sites, Volume prepared by ISSMFE, Technical Committee10, XIII ICSMFE, New Delhi, India, Richard Woods, Editor. pp. 91-100.
- inversion for the geometry of aquifer lithologie, Geophysics, 61 (6), 1728-1737.
- Klingmüller, O. and Kirsch, F., 2004, A quality and safety issue for cast-in-place piles 25 years of experience with low-strain integrity testing in Germany: From scientific peculiarity to day-to-day practice. Current Practice and Future Trends in Deep Foundations, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication. 125, 202-221.
- Lehman, K. and Huang, Y., 2008, Time frequency analyses of pile-integrity testing using wavelet transform, Computer and Geotechnics, 35, 600-607.
- Massoudi, N. and Teferra, W., 2004, Non-destructive testing of piles using the low strain integrity



Application of pile integrity testing, downhole and crosshole methods in geotechnical studies, case study: Residential construction site in Kellarabad

Sadegh Moghadam^{1*}, Mozhdeh Azadi², Asghar Azadi³ and Mohamad Jafari⁴

1- Ph.D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- B.Sc. student, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Payam Noor University of Parand, Tehran, Iran

4- Zamin Physic Pooya Company, Tehran, Iran

Received: 22 July 2017; Accepted: 22 November 2017

* Corresponding author: sadegh.moghadam@ut.ac.ir

Keywords

Pile Integrity Testing (PIT)

Downhole

Crosshole

Kellar-Abad

Extended Abstract

Summary

Recently, geophysical methods have been used successfully to determine geotechnical characteristics or parameters of subsurface layers. In this research, the integrity of vertical piles, the dynamic elastic parameters of soil and the thickness of the piles in a residential construction site in Kellarabad, located in west of Mazandaran, Iran, were delineated using pile integrity

testing (PIT), downhole and crosshole methods.

Introduction

A pile is a slender element cast in the ground or driven into it. In building piles, integrity determination of the product at the end is very difficult because it is not possible to evaluate the integrity directly. However, primary controls such as sampling of concrete before pouring in the well or record the volume of the poured concrete for the pile is carried out in all pile building projects. Despite this, there are always some problems like collapsing the wall of the well and making a thin region in the pile section or occurring a disorder or pausing in drilling or concrete pouring operation that makes further pile integrity tests necessary. One of these tests is impulse response non-destructive test. The purpose of integrity testing is to discover such flaws before they can cause any damage. This method covers the procedure for determination of the integrity of individual vertical piles by measuring and analyzing the velocity and force response of the pile induced by an impact device usually applied axially and perpendicularly to the pile head surface. The impactor is usually a 1-kg sledge hammer with a built-in load cell in the hammer head. Response to the input stress is normally measured using a geophone. This receiver, namely geophone, is preferred to accelerometers because of its stability at low frequencies and its robust performance in practice. By processing the obtained data and interpretation of them, some indexes are obtained that are useful to evaluate the integrity of the pile.

Furthermore, construction of foundation systems for civil structures often requires detailed information of the site soil properties. Bore logs provide soil samples for soil type classification and laboratory testing to determine the strength and consolidation parameters with respect to depth. Downhole and crosshole methods have been developed to measure shear wave velocity and consolidation parameters with regard to depth. The downhole seismic investigations require only one borehole to provide shear and compressional velocity wave profiles. This method uses a hammer source at the surface to impact a wood plank and generating shear and compressional waves. The energy from this impact is then received by a pair of matching three component geophone receivers, which have been lowered downhole and are spaced 3 m apart. Crosshole seismic investigations are performed to provide information on dynamic soil and rock properties for earthquake design analyses of structures, liquefaction potential studies, site development, and dynamic machine foundation design. These investigations determine shear and compressional wave depth versus velocity profiles. Other parameters, such as Poisson's ratios and moduli, can be determined from the measured shear and compressional wave velocities.

Methodology and Approaches

The evaluation of PIT surveys was carried out based on the information from 80 piles in the field site. In addition, crosshole seismic test was carried out in 20 boreholes drilled in the investigated site in order to evaluate the thicknesses of the piles. On the other hand, to measure the vertical changes in seismic velocity and geotechnical parameters, the

downhole test was also carried out in 2 boreholes.

Results and Conclusions

According to the results of the PIT, the frequency chart, velocity map of the concrete structures and the velocity graph of the tested piles in terms of consumable cement have been obtained to illustrate the strength of the pile structures. Using the velocities of P and S waves and geotechnical parameters from 2 boreholes, the dynamic elastic parameters of soil have been computed. After applying conventional pre-processing methods, travel time curves have been obtained. On the basis of seismic downhole surveys carried out in 2 boreholes, the ground has been classified as class II in terms of the Iranian code of practice (Standard No. 2800). Finally, according to the results of crosshole test, the thicknesses of the pile structures with an acceptable approximation of 0.5 to 0.8 m have been calculated.
