

## مهندسی پی و مقاومت مصالح طرح بهسازی لرزه‌ای پل مطهری واقع در تقاطع بزرگراه مدرس و خیابان مطهری



سید علیرضا آشفته، کارشناسی‌ارشد معدن، شرکت مهندسی مشاور پی‌جاب کاوش  
رضا حسنی روشن، کارشناسی‌ارشد مدیریت استراتژیک، شرکت مهندسی مشاور پی‌جاب کاوش  
اعظم حاجیان، کارشناسی‌ارشد تکتونیک، شرکت مهندسی مشاور پی‌جاب کاوش



### چکیده:

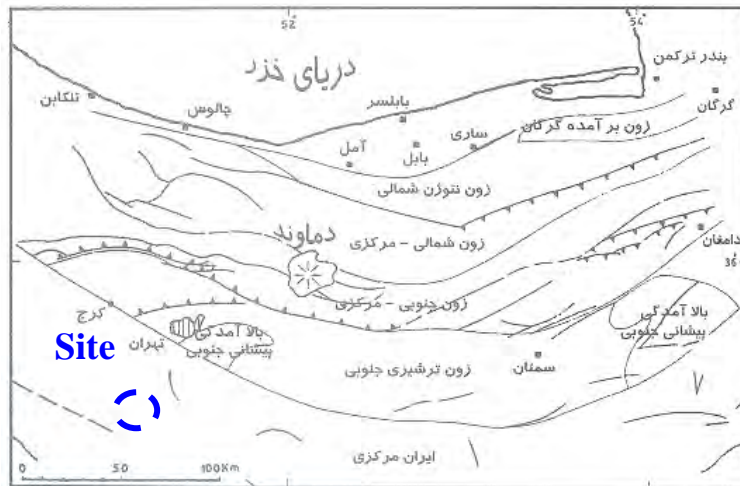
پل مطهری بر روی تقاطع بزرگراه مدرس و خیابان مطهری تهران واقع شده است. برای انجام مطالعات ژئوتکنیک این طرح، تعداد ۱ گمانه ۲۰ متری به روش دورانی حفاری گردید. در حین حفاری، آزمایش ضربه و نفوذ مخروط استاندارد (SPT) انجام شده است. همچنین این گمانه برای انجام آزمایش‌های لرزه‌ای آماده‌سازی شده و آزمایش لرزه‌ای به روش سطح به گمانه (Down hole) جهت تعیین پارامترهای دینامیکی لایه‌های زمین انجام گردیده است. بر روی نمونه‌های برداشت شده از گمانه آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تعیین GS، برش مستقیم، سه‌محوری و آزمایش‌های شیمیایی خاک انجام یافته است. در این مقاله به بررسی مهندسی پی و مقاومت مصالح طرح مذکور پرداخته شده است.

کلید واژه‌ها: زمین‌شناسی مهندسی، پل مطهری، مکانیک سنگ



### مقدمه:

صفحه ایران بر اساس فعالیت‌های تکتونیک، تحولات حوضه‌های رسوبی، سن واحدهای مختلف و نیز فعالیت‌های ماگمایی و دگرگونی به پهنه‌های متفاوتی تقسیم‌بندی شده است. بر اساس تقسیم‌بندی نبوی (۱۳۵۵) منطقه مورد مطالعه در زون البرز - آذربایجان واقع شده است. البرز بر خلاف توپوگرافی آن فاقد یک ریشه پوسته‌ای است که این امر در مطالعات ماکریس (۱۹۸۴)، سیبر و همکاران (۱۹۹۷) به اثبات رسیده است. تطابق سن‌های مطلق توده‌های نفوذی آکاپل در شمال‌غربی مرزن‌آباد نشان از بالا آمدن البرز به میزان ۷۰۰ متر در میلیون سال دارد. سر برآوردن البرز از ۴ تا ۶ میلیون سال پیش رخ داده که مستلزم ۱۰ کیلومتر بالا آمدگی البرز است. وابستگی توده‌های نفوذی به گسل‌های اصلی البرز تاریخچه حرارتی و نزدیکی آنها به حوضه بسیار عمیق کاسپین جنوبی به وجود آمدن توپوگرافی ساختاری به اندازه ۲۰ کیلومتر در سنوزونیک پسین در شمال ایران را روشن می‌سازد. فله‌های البرز به طور معمول بلندتر از ۳۰۰۰ متر بوده و ارتفاع به سوی شمال به تندی تا حدود ۲۸ متر در دریای خزر پایین می‌افتد. اشتوکلین، البرز را بر اساس ویژگی‌های ماگماتیسیم، پلوتونیسیم، ولکانیسیم، چینه‌شناسی و دگرگونی به هفت زون تقسیم کرده است که محدوده مورد مطالعه در حاشیه جنوبی‌ترین زون آن به نام زون ترشیر جنوبی واقع شده است.



شکل (۱) زیرپهنه‌های عمده ساختاری البرز با توجه به عملکرد گسل‌ها و راندگی‌های عمده (اشنوکلین ۱۹۷۴)



### وضعیت لرزه‌خیزی و زمین‌ساخت منطقه:

در منطقه مورد مطالعه چندین گسل لرزه‌زا وجود دارد که عبارتند از: راندگی نیاوران: این گسله به صورت تراستی عمل کرده و با راستای شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و با طول ۱۳ کیلومتر از سعادت‌آباد تا فرحزاد تا نیاوران و شمال اقدسیه امتداد می‌یابد. فاصله این گسل از محل مورد مطالعه حدود ۶ کیلومتر است.

راندگی شمال تهران: این گسله در مجموع بیش از ۷۵ کیلومتر طول دارد و باعث راندگی سازندهای انوسن بر روی آبرفت‌های سازنده هزاردره و آبرفت‌های سری B از تقسیمات رین گردیده است. این گسله دارای راستای شرقی - غربی بوده و شیب آن به سمت شمال است. در این قسمت آبرفت‌های سازنده هزاردره ساختمان تاق‌دیسسی به خود گرفته‌اند. فاصله این گسل از محل مورد مطالعه حدود ۸ کیلومتر است.

گسله امامزاده داوود: این گسل راستای شمال‌غرب - جنوب‌شرق دارد. گسل مذکور از نوع معکوس بوده و شیب آن ۷۱ درجه به سمت شمال شرق است. در حوالی ولنچک این گسله به گسله تراستی شمال تهران می‌پیوندد و فاصله آن از محل مورد مطالعه ۸/۳ کیلومتر است.

گسل شمال ری: در حوالی عظیم‌آباد کناره جنوبی بزرگراه ری - بهشت‌زهره قرار دارد و دیواره‌ای به ارتفاع ۲ متر را به وجود آورده است. امتداد آن شرقی - غربی و به طول ۱۶/۵ کیلومتر می‌باشد. فاصله این گسل از محل مورد مطالعه حدود ۱۱ کیلومتر است.

گسل جنوب ری: این گسل ۱ الی ۲ متر اختلاف ارتفاع در رسوبات آبرفتی ایجاد کرده است و ۱۸/۵ کیلومتر طول دارد و امتدادش شرقی - غربی است. فاصله این گسل از محل مورد مطالعه حدود ۱۵ کیلومتر است.

گسله کهریزک: این گسل از شمال سلطان‌آباد در غرب تا کهریزک و سپس شمال شمس‌آباد در شرق ادامه یافته و راستایش شرقی - غربی بوده و طول آن بیش از ۴۰ کیلومتر است. این گسله دیواره‌ای به ارتفاع ۱ الی ۱۰ متر را در آبرفت‌های جنوب تهران ایجاد کرده و بخش B از تقسیمات رین بر روی آبرفت‌های جوان D رانده شده است. فاصله این گسل از محل مورد مطالعه ۲۳/۳ کیلومتر است.



شکل (۲) نقشه گسل‌های منطقه (قسمتی از نقشه گسل‌های استان تهران، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور)

از گسله‌های فرعی می‌توان به گسل عباس‌آباد به فاصله ۴/۳ کیلومتر از محل مورد مطالعه، گسله داوودیه به فاصله ۶/۶ کیلومتر از محل مورد مطالعه، گسل نارمک به فاصله حدود ۷ کیلومتر از محل مورد مطالعه، گسل شیان به فاصله حدود ۸ کیلومتر از محل مورد مطالعه، گسل کوثر به فاصله حدود ۱۰ کیلومتر از محل مورد مطالعه، گسل قصر فیروزه به فاصله حدود ۱۰ کیلومتر از محل مورد مطالعه، گسل پارچین به فاصله ۱۶/۶ کیلومتر از محل مورد مطالعه و گسل بورکان به فاصله حدود ۱۷ کیلومتر از محل مورد مطالعه را نام برد. بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم) ایران به چهار پهنه با خطر نسبی بسیار بالا، بالا، متوسط و پایین تقسیم می‌شود. با توجه به این که منطقه مورد مطالعه در حد پهنه با خطر نسبی بسیار زیاد قرار گرفته است لذا شتاب مبنای طرح آن 35/0g خواهد بود.

جدول (۱) شتاب مبنای طرح برای پهنه‌های مختلف نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زلزله در

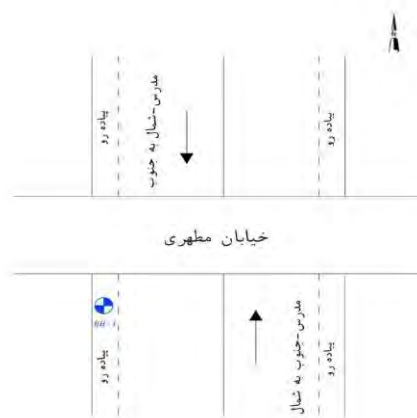
ایران (آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم)

پهنه	خطر نسبی زلزله	شتاب مبنای طرح (g)
۱	بسیار زیاد	۰/۳۵
۲	زیاد	۰/۳۰
۳	متوسط	۰/۲۵
۴	کم	۰/۲۰



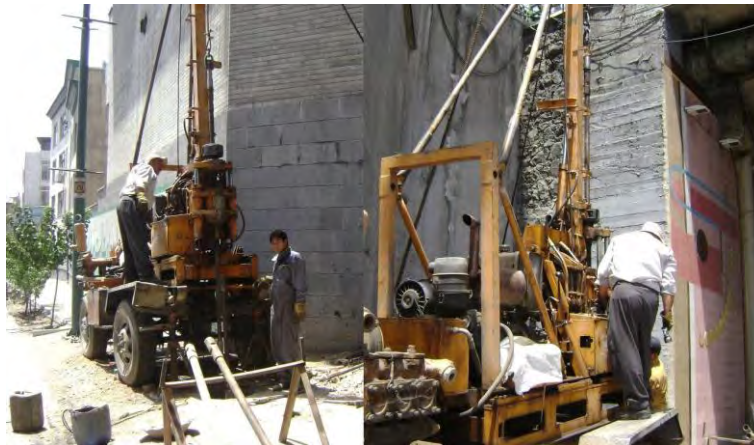
### عملیات حفاری:

برای بررسی وضعیت تحت‌الارضی محدوده مورد مطالعه انجام آزمایش‌های SPT و برداشت نمونه از لایه‌های مختلف زمین، یک گمانه ماشینی به عمق ۲۰ متر حفر شده است. موقعیت این گمانه در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین تصاویری از عملیات حفاری در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۳) موقعیت گمانه حفر شده

در این گمانه به منظور بررسی تراکم لایه‌ها و مقاومت زمین آزمایش‌های ضربه و نفوذ استاندارد (SPT) انجام شده است. بعد از اتمام عملیات حفاری در کل طول گمانه لوله PVC گذاشته شده و اطراف آن با ماسه پر گردیده و برای انجام آزمایش لرزه‌ای آماده شده است. در حین حفاری نمونه‌های مورد نظر اخذ شده و برای انجام آزمایش‌های مختلف فیزیکی، مکانیکی به آزمایشگاه منتقل شده‌اند.



شکل (۴) تصاویری از عملیات حفاری



### وضعیت زیرسطحی محدوده طرح:

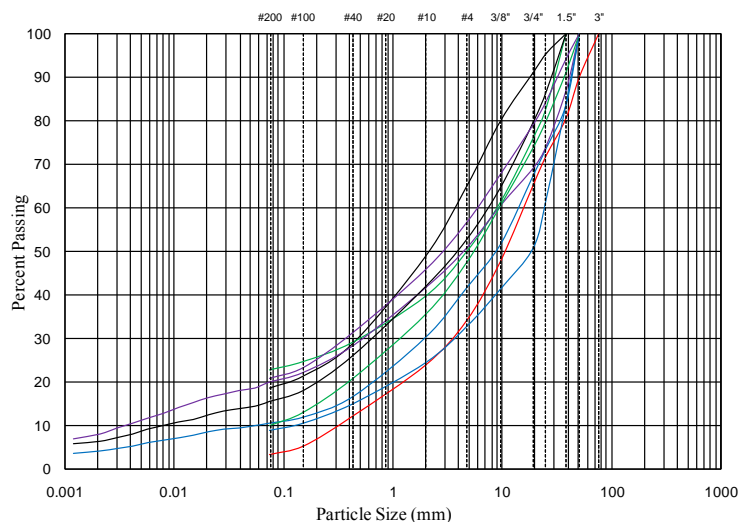
با توجه به لوگ گمانه حفاری شده مصالح زیرسطحی شامل لایه‌های آبرفتی درشت‌دانه از جنس شن و ماسه قلوه سنگ‌دار همراه با ریزدانه‌های رسی و سیلتی می‌باشد. به صورت کلی بر اساس نتایج آزمایشات دانه‌بندی، طبقه‌بندی این لایه‌ها بیشتر به صورت GM، GC یا SC می‌باشند. بر اساس شواهد موجود تا عمق حداکثر ۱ متری از آسفالت و خاک دستی تشکیل شده است. مواد ریزدانه خاک این لایه‌ها به طور متوسط در حدود ۱۵ درصد می‌باشد. در گمانه حفاری شده به آب زیرزمینی برخورد نشده است. بر اساس نقشه آبهای زیرزمینی تهران عمق آب زیرزمینی در این محدوده بیش از ۶۰ متر است.



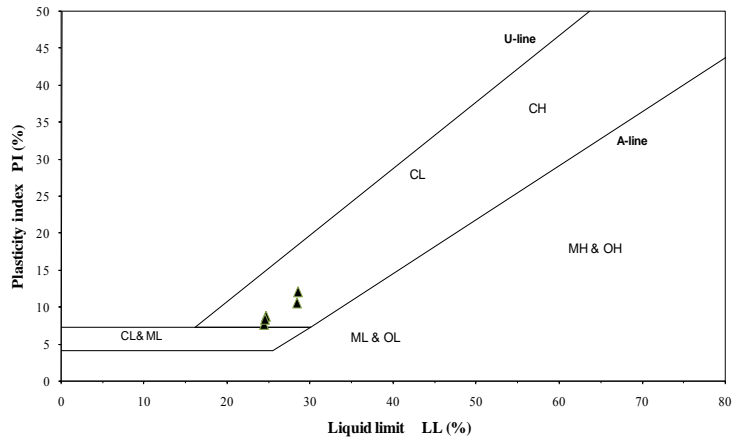
### نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی:

از رایج‌ترین آزمایش‌های درجا جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های زمین نتایج آزمایش‌های SPT است. مقادیر عدد SPT بسیار بالا بوده به نحوی که در همه موارد تعداد ضریات SPT قبل از رسیدن به نفوذ استاندارد از ۵۰ ضربه بیشتر شده است. اگر چه در خاک‌های شن‌دار آزمایش SPT چندان موفقیت‌آمیز نیست ولی بالا بودن همه نتایج حاکی از تراکم بالای رسوبات است. بر اساس تقسیم‌بندی ترازقی، لایه‌های موجود در وضعیت خیلی متراکم قرار دارند. آزمایش‌های شناسایی خاک

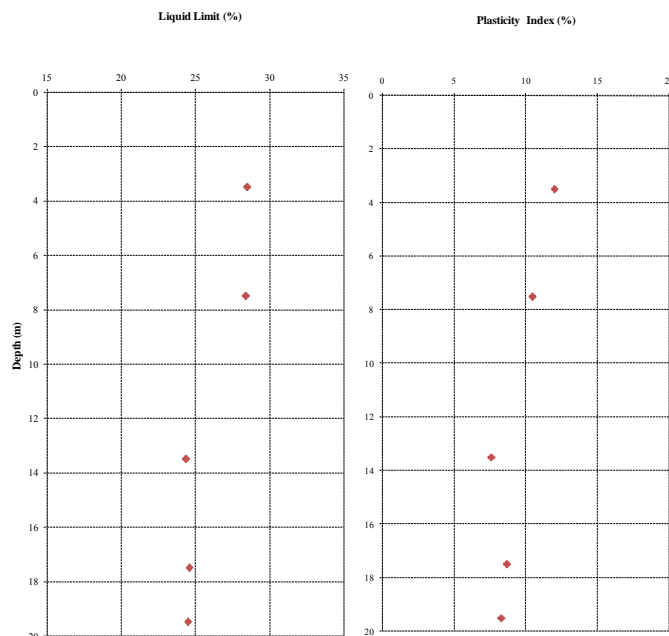
شامل آزمون‌های دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ برای طبقه‌بندی خاک می‌باشد. دامنه اندازه ذرات موجود در خاک و توزیع وزنی آنها بر حسب درصدی از وزن خشک کل خاک توسط آزمایش دانه‌بندی تعیین می‌گردد. دو روش برای تعیین منحنی دانه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو روش عبارتند از آزمایش دانه‌بندی برای ذراتی با قطر بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر و آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر. آزمایش دانه‌بندی بر مبنای استاندارد ASTM D-422 انجام گرفته و در آن نمونه خاک خشک شده بر روی یک سری الک استاندارد که اندازه‌های آن از بالا به پایین کاهش می‌یابد، لیزانده می‌شود. سپس وزن خاک‌هایی که روی هر یک از الک‌ها باقیمانده اندازه‌گیری می‌شود. نتایج آزمایش دانه‌بندی معمولاً بر حسب درصد وزنی عبوری از هر الک بر روی نمودار بیان می‌شود. در آزمایش هیدرومتری بر پایه اختلاف سرعت ته‌نشینی دانه‌های خاک در آب بر مبنای قانون استوکس، قطر ذرات معلق محاسبه می‌شود. در این آزمایش از چگالی‌سنج استاندارد ASTM 152H برای تعیین چگالی ذرات معلق استفاده می‌گردد. طبقه‌بندی خاک با استفاده از نتایج آزمایش دانه‌بندی و آزمایش حدود اتربرگ انجام می‌گیرد. میزان رطوبت و خواص کانی‌های ریزدانه خاک سبب ایجاد حالت جامد، نیمه‌جامد، خمیری و مایع می‌شود. میزان رطوبت در نقطه انتقال از وضعیت نیمه‌جامد به وضعیت خمیری، حد خمیری و از وضعیت خمیری به وضعیت مایع، حد مایع یا حد روانی نامیده می‌شود. اختلاف بین حد روانی و حد خمیری یک خاک، شاخص پلاستیسیته (PI) نامیده می‌شود که نشانگر میزان خاصیت پلاستیسیته یک خاک مشخص می‌باشد. برای تعیین حد روانی طبق استاندارد ASTM D-4318 خمیر خاک داخل دستگاه مخصوص که شامل یک فنجان برنجی و یک پایه از لاستیک سخت می‌باشد قرار داده می‌شود. با پیچاندن دسته فنجان از روی پایه به اندازه ۱۰ میلی‌متر بلند شده و به طور ناگهانی روی آن می‌افتد. در وسط خمیر خاک داخل فنجان مخصوص با استفاده از شیارزن استاندارد شیاری ایجاد می‌شود و رطوبتی که به ازای آن در اثر ۲۵ ضربه شیار بسته شود، حد روانی نامیده می‌شود. برای تعیین دقیق درصد رطوبت معادل ۲۵ ضربه، حداقل ۴ آزمایش که در آن تعداد ضربات بین ۱۵ تا ۳۵ باشد انجام گرفته و با استفاده از نمودار نیمه لگاریتمی تعداد ضربات بر حسب درصد رطوبت، حد روانی مشخص می‌گردد. حد خمیری طبق استاندارد ASTM D-4318 درصد رطوبتی است که اگر به ازای آن فتیله‌ای به قطر ۳/۲ میلی‌متر از خمیر نمونه خاک با روش غلتاندن ساخته شود، خرد گردد. آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ روی نمونه‌های مأخوذه از اعماق مختلف گمانه انجام گردیده است. طبقه‌بندی خاک محل در نظام متحد یونیفاید بیشتر به صورت GM، GC یا SC می‌باشند. حد روانی و شاخص پلاستیسیته مواد ریزدانه این لایه‌ها در نمودار کاساگرانده در شکل (۶) و تغییرات آنها با عمق در شکل (۷) نشان داده شده است. شاخص پلاستیسیته این لایه‌ها در محدوده ۷ تا ۱۲ درصد بوده که در ردیف خاک‌های با پلاستیسیته کم قرار می‌گیرد. همچنین حد روانی مواد ریزدانه خاک‌ها در محدوده ۲۴ تا ۲۹ درصد به دست آمده است.



شکل (۵) محدوده دانه‌بندی خاک‌های محدوده طرح



شکل (۶) خواص خمیری خاک منطقه در نمودار کاساگرانده



شکل (۷) تغییر حد روانی و نشانه خمیری بر حسب عمق

آزمایش‌های تعیین چگالی ویژه دانه‌های جامد خاک (Gs) بر روی نمونه‌های ماخوذه از گمانه انجام شده و مشاهده می‌شود که چگالی دانه‌های خاک در محدوده ۲/۶۱ تا ۲/۶۴ به دست آمده است. آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های بازسازی شده بر اساس وزن مخصوص طبیعی نمونه‌ها در شرایط اشباع با سرعت برش کند انجام شده است. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ۱۰\*۱۰ سانتیمتر انجام گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار چسبندگی (c) نمونه‌ها بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بوده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی (φ) در حدود ۲۸ درجه قرار دارد. آزمایش‌های سه‌محوری در دو حالت CU و UU بر روی نمونه‌های بازسازی شده بر اساس وزن مخصوص طبیعی نمونه‌ها در شرایط اشباع انجام گرفته است. از نتایج آزمایش‌های مذکور مشاهده می‌شود که در حالت CU مقدار چسبندگی (c) در محدوده ۰/۰۸ تا ۰/۱۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و مقدار زاویه اصطکاک داخلی (φ) تقریباً ۳۳ درجه به دست آمده است. در حالت UU نیز مقدار چسبندگی ۱۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و مقدار زاویه اصطکاک داخلی (φ) در حدود ۳۳ درجه به دست آمده است.

### آزمایش‌های شیمیایی خاک:

مواد شیمیایی مضر خاک می‌توانند بر روی سازه‌های بتنی مدفون در خاک اثرات مخربی داشته باشند که این اثرات می‌تواند در طی زمان طولانی مشکلاتی را برای آنها به وجود آورد. آزمایش‌های تجزیه

شیمیایی بر روی ۲ نمونه خاک انجام شده است. طبق آزمایش‌های انجام شده مقدار سولفات موجود در خاک ۰/۰۲ درصد و مقدار یون کلر نیز ۰/۰۲۲ تا ۰/۰۳۳ درصد به دست آمده است. همچنین مقدار PH نمونه‌های خاک مورد آزمایش ۸/۲ می‌باشد. با توجه به مقدار سولفات موجود در خاک، شرایط خاک در هر دو گمانه جزء شرایط ملایم می‌باشد. با مراجعه به جدول (۲) و با توجه به اینکه شالوده در تماس با آب زیرزمینی قرار نمی‌گیرد استفاده از سیمان معمولی (نوع ۱) بلامانع است.

جدول (۲) رده‌بندی سولفات‌ها در خاک و تدابیر توصیه شده برای بتن (آیین‌نامه بتن ایران)

شرایط محیطی	مقدار سولفات قابل حل ppm	تدابیر احتیاطی
ملایم	کمتر از ۳۰۰	الف- اگر کل شالوده بالاتر از سفره آب قرار گیرد، تدابیر احتیاطی ویژه‌ای لازم نیست. ب- اگر شالوده در تماس با سفره آب متغیر قرار گیرد، از سیمان نوع ۱ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵۵ تجاوز کند).
متوسط	۳۰۰ تا ۱۲۰۰	الف- اگر کل شالوده بالاتر از سفره آب قرار گیرد، از سیمان نوع ۱ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵ تجاوز کند). ب- اگر شالوده در تماس با سفره آب متغیر قرار گیرد، از سیمان نوع ۱ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵ تجاوز کند) یا از سیمان نوع ۵ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵ تجاوز کند).
شدید	۱۲۰۰ تا ۲۵۰۰	الف- اگر کل شالوده بالاتر از سفره آب قرار گیرد، از سیمان نوع ۱ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵ تجاوز کند) یا از سیمان نوع ۵ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵ تجاوز کند). ب- اگر شالوده در تماس با سفره آب متغیر قرار گیرد، از سیمان نوع ۵ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۵ تجاوز کند).
بسیار شدید	۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰	الف- اگر کل شالوده بالاتر از سفره آب قرار گیرد، از سیمان نوع ۱ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۴۵ تجاوز کند) یا از سیمان نوع ۵ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۴۵ تجاوز کند). ب- اگر شالوده در تماس با سفره آب متغیر قرار گیرد، تعیین کاتیونها ضروری است تا به این وسیله تصمیم لازم از نظر استفاده از سیمان نوع ۵ یا سیمان آمیخته مناسب یا روکش انتخاب شود.
فوق العاده شدید	بیشتر از ۵۰۰۰	الف- اگر کل شالوده بالاتر از سفره آب قرار گیرد، از سیمان نوع ۱ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۴ تجاوز کند) یا از سیمان نوع ۵ استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۴ تجاوز کند). ب- اگر شالوده در تماس با سفره آب متغیر قرار گیرد، از سیمان آمیخته مناسب استفاده شود (عیار سیمان نباید کمتر از ۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۴ تجاوز کند) و نیز با استفاده از آسفالت یا قیرگونی یا روکشهای پلاستیکی محافظتهای لازم به عمل آید.

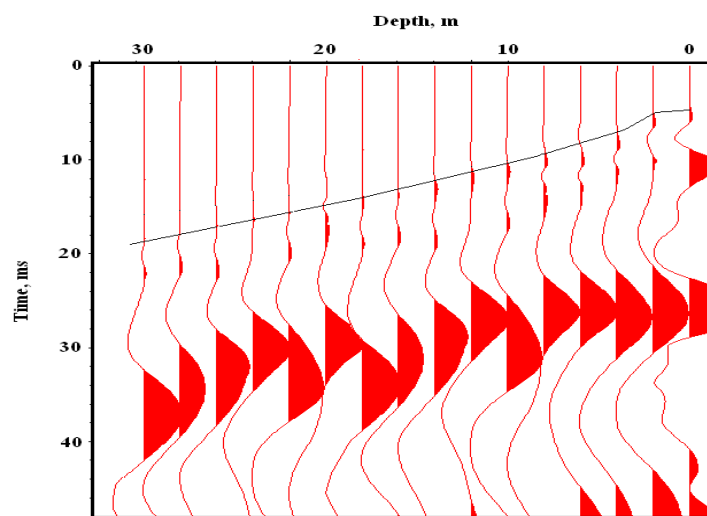
توضیح: 10000ppm حدود يك درصد است.



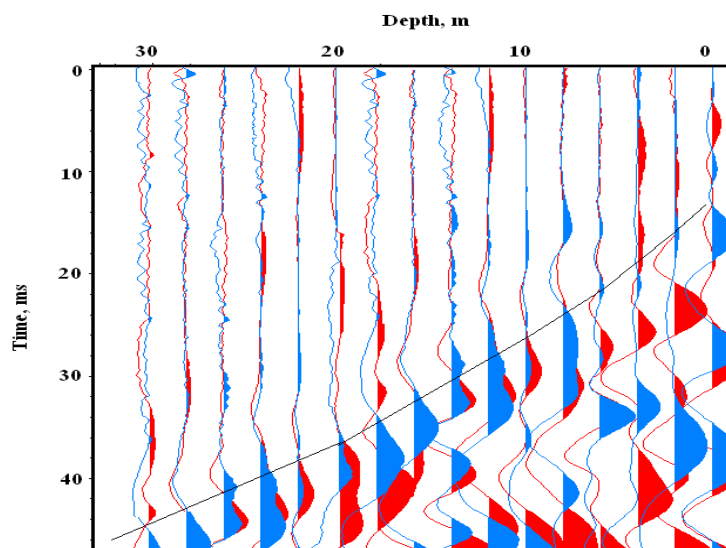
### نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای:

شناخت کامل وضعیت لایه‌های زیرسطحی و مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک از عوامل مهم در تحلیل دینامیکی يك سازه می‌باشد. به منظور تکمیل اطلاعات ژئوتکنیکی و لزوم ارزیابی پارامترهای دینامیکی لایه‌های زمین جهت تحلیل دینامیکی، آزمایش‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای با استفاده از امواج طولی و برشی انجام یافته است. روش‌های لرزه‌ای بر مبنای انتشار امواج مکانیکی در یک محیط الاستیک استوار هستند. موج تولید شده توسط چشمه لرزه‌ای نظیر ضربه چکش به گیرنده

امواج (ژئوفون) می‌رسد و سپس توسط دستگاه لرزه‌نگار تقویت و ثبت می‌شود. بر اساس جهت حرکت موج در داخل زمین دو نوع موج در پروژه‌های مهندسی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. امواج طولی (Longitudinal) که جهت حرکت ذره در جهت انتشار موج است. امواج برشی (Shear) که حرکت ذره عمود بر جهت انتشار موج است. با در دست داشتن سرعت امواج طولی و سرعت امواج برشی و همچنین چگالی محیط انتشار می‌توان مدول‌های دینامیکی لایه‌های خاک را محاسبه نمود. انرژی لازم برای تولید امواج طولی (P)، ضربه قائم چکش بر یک صفحه بوده است. برای تولید امواج برشی (S) از ضربه پتک به دو سر یک میز مخصوص تولید امواج برشی که عمود بر خط واصل بین وسط میز و مرکز دهانه گمانه قرار داده می‌شود، استفاده گردیده است. چون در روش‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای امواج به صورت تقریباً مستقیم از چشمه به گیرنده می‌رسند بنابراین از دقت بیشتری نسبت به روش‌های سطحی برخوردار هستند. در شکل‌های (۸) و (۹) نمونه‌هایی از نگاشت‌های امواج طولی و برشی ثبت شده در این مطالعات ارائه شده است. در شکل (۱۰) مشخصات سرعت امواج طولی و برشی به دست آمده از آزمایش لرزه‌ای در گمانه ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده چند لایه فیزیکی بر اساس تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای قابل تفکیک است. به طور کلی می‌توان گفت که دانسیته مصالح تشکیل‌دهنده با افزایش عمق افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت امواج لرزه‌ای افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که در سطح تا عمق ۱ متری از خاک دستی تشکیل شده است.

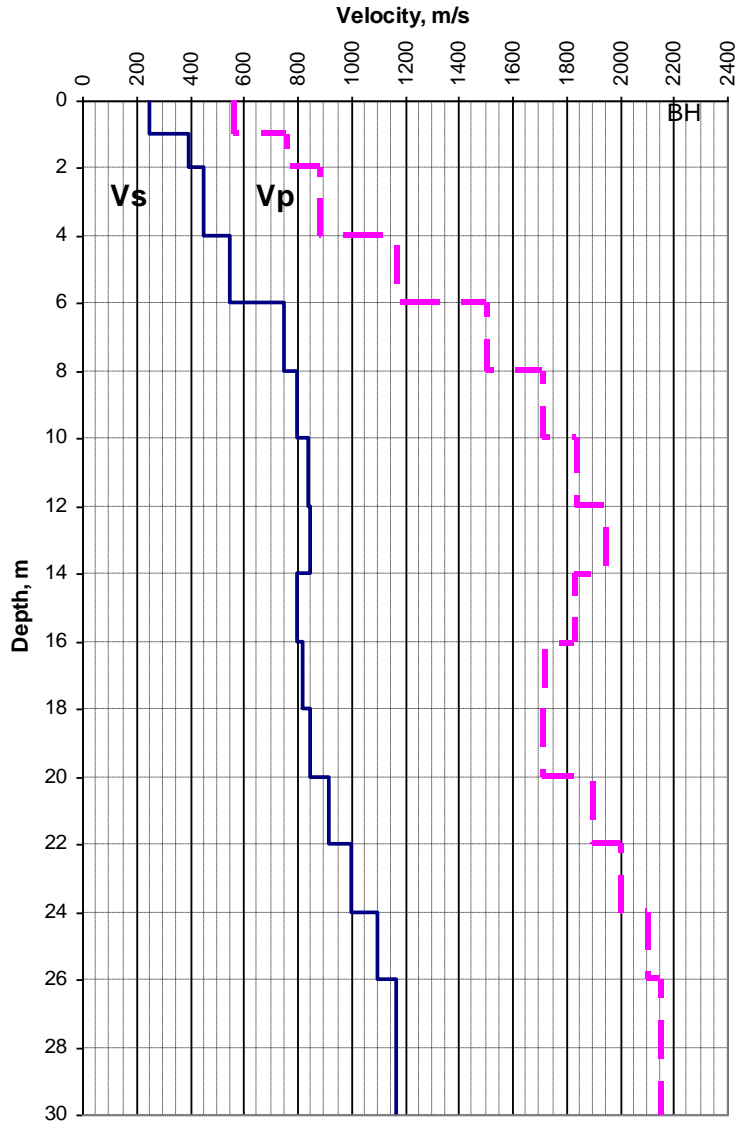


شکل (۸) نمونه‌ای از نگاشت حاصل از ثبت امواج طولی



شکل (۹) نمونه‌ای از نگاشت حاصل از ثبت امواج برشی





شکل (۱۰) منحنی تغییرات سرعت امواج طولی و برشی با عمق



### جمع‌بندی و پیشنهادات:

آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰ - ویرایش سوم) به تقسیم‌بندی لایه‌های زمین با توجه به متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری می‌پردازد. برای محاسبه متوسط سرعت موج

برشی تا عمق  $M = \sum_{i=1}^n T_i$  متری یعنی  $V_s(M)$  از رابطه زیر استفاده گردیده است:

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

که در آن  $T_i$  ضخامت لایه،  $v_{si}$  سرعت امواج برشی لایه  $i$  ام و  $n$  تعداد لایه می‌باشد. متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۲۰ متری ۴۶۸ متر بر ثانیه محاسبه شده است. با فرض ثابت بودن سرعت موج برشی از عمق ۲۰ تا ۳۰ متری متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری حدود ۷۱۵ متر بر ثانیه برآورد می‌گردد. بنابراین ساختگاه مورد مطالعه بر اساس آزمایش لرزه‌نگاری انجام شده در رده تیپ II قرار می‌گیرد.

جدول (۳) تقسیم‌بندی انواع ساختگاه‌ها از نظر نوع خاک و سنگ

بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰ - ویرایش سوم)

رده ساختگاه	$V_s(30)$ m/sec	مواد تشکیل دهنده ساختگاه
I	بیشتر از ۷۵۰	الف- سنگهای آذرین ( دارای بافت درشت و ریز دانه)، سنگهای رسوبی سخت و بسیار مقاوم و سنگهای دگرگونی توده ای ( گنایس - سنگهای متبلور سیلیکاته ) ب- خاکهای سخت ( شن و ماسه متراکم ، رس بسیار سخت ) با ضخامت کمتر از ۲۰ متر از روی بستر سنگی
II	۳۷۵-۷۵۰	الف- سنگهای آذرین سست ( مانند توف)، سنگهای سست رسوبی و سنگهای دگرگونی متورق و به طور کلی سنگهایی که بر اثر هوازدگی (تجزیه و تخریب ) سست شده اند. ب- خاکهای سخت ( شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت ) با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر از روی بستر سنگی
III	۱۷۵-۳۷۵	الف- سنگهای متلاشی شده بر اثر هوازدگی ب- خاکهای با تراکم متوسط، طبقات شن و ماسه با پیوند متوسط بین دانه ای و رس با سختی متوسط
IV	کمتر از ۱۷۵	الف- نهشته های نرم با رطوبت زیاد بر اثر بالا بودن سطح آب زیر زمینی ب- هر گونه پروفیل خاک که شامل حداقل ۶ متر خاک رس با اندیس خمیری بیشتر از ۲۰ و درصد رطوبت بیشتر از ۴۰ باشد.

با توجه به مقطع زیرسطحی و اطلاعات ارائه شده لایه‌های زیرسطحی را با توجه به اثر عمق می‌توان به چند لایه کلی تقسیم کرد: لایه‌های سطحی تا عمق حداکثر ۱ متری که به صورت خاک‌های دستی شناسایی شده‌اند. لایه‌های موجود در اعماق ۱ تا ۱۰ متری که عموماً به صورت لایه‌های شنی و ماسه‌ای فلوله سنگ‌دار همراه با ریزدانه‌های رسی و سیلنتی شناسایی شده‌اند. این لایه‌ها دارای اعداد SPT بیش از ۵۰ ضربه می‌باشند. مواد ریزدانه خاک‌های این لایه متغیر بوده و به طور متوسط ۱۸ درصد می‌باشد. لایه‌های موجود در اعماق ۱۰ تا ۲۰ متری که به صورت لایه‌های شنی همراه با ریزدانه‌های رسی و سیلنتی شناسایی شده‌اند. این لایه‌ها دارای اعداد SPT بیش از ۵۰ ضربه می‌باشند. مواد ریزدانه خاک‌های این لایه متغیر بوده و به طور متوسط ۱۲ درصد می‌باشد. در ادامه مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در دو لایه اصلی جداگانه تفکیک و در جدول (۴) ارائه شده‌اند. خاطرنشان می‌گردد که این مشخصات برای حالت بحرانی خاک و بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی و با استفاده از قضاوت مهندسی تعیین گردیده است. لازم به ذکر است در تحلیل‌های لرزه‌ای مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ۲ درجه کمتر از حالت استاتیکی (جدول پارامترها) در نظر گرفته شده است.

جدول (۴) مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های زمین

10 m - 20 m	0 - 10 m	لایه (عمق) به متر
CCU = 0.15 ~ 0.20	CCU = 0.10 ~ 0.15	چسبندگی
34 ~ 36	32 ~ 34	زاویه اصطکاک داخلی
1.80 ~ 1.90	1.75 ~ 1.80	وزن مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )
0.30	0.35	نسبت پواسون
400 ~ 550	300 ~ 400	مدول تغییر شکل ( Kg/cm <sup>2</sup> )

بر اساس آیین‌نامه UBC (آیین‌نامه زلزله آمریکا) و آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰ - ویرایش سوم) در صورتی که سرعت موج برشی لایه‌ها بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه باشد سنگ کف لرزه‌ای محسوب می‌شود. در این پروژه با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته عمق سنگ کف لرزه‌ای ۸ متر برآورد شده است. محدوده طرح از نظر مهندسی زلزله نوع II طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به نوع خاک و اعداد SPT به دست آمده احتمال وقوع پدیده‌هایی مانند فروریزش خاک، تورم یا روانگرایی منتفی می‌باشد.



### نتیجه‌گیری:

- ۱- ضخامت خاک دستی در محل حفاری شده ۱ متر می‌باشد و مصالح زیرسطحی شامل لایه‌های آبرفتی درشت‌دانه از جنس شن و ماسه فلوله سنگ‌دار همراه با ریزدانه‌های رسی و سیلتی می‌باشد. به صورت کلی بر اساس نتایج آزمایشات دانه‌بندی، طبقه‌بندی این لایه‌ها بیشتر به صورت GM، GC یا SC می‌باشند. مواد ریزدانه خاک این لایه‌ها به طور متوسط در حدود ۱۵ درصد می‌باشد.
- ۲- عمق آب زیرزمینی بیش از عمق حفاری شده (۲۰ متر) می‌باشد.
- ۳- اعداد SPT در اعماق مختلف گمانه حفاری شده بیش از ۵۰ ضربه به دست آمده است. لذا خاک محل دارای تراکم بسیار بالا می‌باشد.
- ۴- شاخص پلاستیسیته لایه‌های خاک محل در محدوده ۷ تا ۱۲ درصد بوده که در ردیف خاک‌های با پلاستیسیته کم قرار می‌گیرد. همچنین حد روانی مواد ریزدانه خاک‌ها در محدوده ۲۴ تا ۲۹ درصد به دست آمده است.
- ۵- ظرفیت باربری مجاز انواع پی‌ها (مربعی، مستطیلی و نواری) با اعماق استقرار ۱ و ۱/۵ متری با فرض نشست مجاز ۲/۵۴ سانتیمتر است.
- ۶- مقدار ضرایب فشار خاک در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی تعیین شده و بر اساس آزمایش‌های لرزه‌ای انجام شده عمق سنگ کف لرزه‌ای در عمق ۸ متری می‌باشد.
- ۷- با توجه به مقدار سولفات موجود در خاک، شرایط خاک جزء شرایط ملایم می‌باشد. از آنجا که شالوده در تماس با آب زیرزمینی قرار نمی‌گیرد لذا استفاده از سیمان معمولی بلامانع است.



### منابع:

- ۱- تحلیل خطر زمین‌لرزه و طیف طراحی مصلی امام خمینی (ره) تهران، سید علیرضا آشفته، احمد ادیب، مجید ملکی و غلامرضا طاهریان، همایش و نشست تخصصی مدیریت شهری و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر با همکاری شهرداری اسلامشهر، اردیبهشت ۱۳۹۲
- ۲- مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی سازه‌های جنبی مجتمع فولاد قائنات، سید علیرضا آشفته، احمد ادیب، مجید ملکی و نیکان شاکرمنتظری، همایش و نشست تخصصی مدیریت شهری و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر با همکاری شهرداری اسلامشهر، اردیبهشت ۱۳۹۲
- ۳- مطالعه ژئوتکنیک، ژئوفیزیک، پل رسالت واقع در تقاطع بزرگراه رسالت و بزرگراه مدرس، سید علیرضا آشفته، رضا حسنی روشن، اعظم حاجیان، اولین همایش ملی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد، اسفند ۱۳۹۲
- ۴- مطالعات مهندسی پی و مقاومت مصالح طرح بهسازی لرزه‌ای پل بهشتی، سید علیرضا آشفته، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی با همکاری انجمن ژئوتکنیک، مهر ۱۳۹۲
- ۵- مطالعات بستر طول محور قطار شهری تبریز، سید علیرضا آشفته، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی با همکاری انجمن ژئوتکنیک، مهر ۱۳۹۲
- ۶- زمین‌شناسی مهندسی احداث مجتمع تولید پلی‌اتیلن سنگین پتروشیمی دهدشت، سید علیرضا آشفته و قدرت‌الله محمدی، اولین کنفرانس ملی معماری و شهرسازی اسلامی، دانشگاه جامع علمی کاربردی با همکاری دانشگاه علمی کاربردی زاهدان (۲)، بهمن ۱۳۹۲

