



زمین‌شناسی مهندسی احداث مجتمع تولید پلی‌اتیلن سنگین پتروشیمی دهدشت

سید علیرضا آشفته^۱، قدرت‌الله محمدی^۲

۱ و ۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب گروه مهندسی معدن - اکتشاف

St_a_ashofteh@azad.ac.ir

چکیده

زمین طرح تولید پلی‌اتیلن سنگین پتروشیمی دهدشت در شمال شرقی شهرستان دهدشت (دشت کلاچو) واقع شده است. برای بررسی جامع شرایط زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف زمین در مجموع تعداد ۲۰ گمانه حفاری شده است. در مرحله نخست تعداد ۱۰ گمانه ۱۵ متری در محدوده طرح پتروشیمی دهدشت حفاری گردید و در مرحله بعد تعداد ۱۰ گمانه دیگر به اعماق ۲۰ تا ۳۰ متر در محدوده این طرح حفاری گردیده است. در این مقاله اطلاعات ۲۰ گمانه مذکور به همراه نتایج آزمایشات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل اطلاعات همراه با مطالعه و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک، دهدشت، پتروشیمی

۱- مقدمه

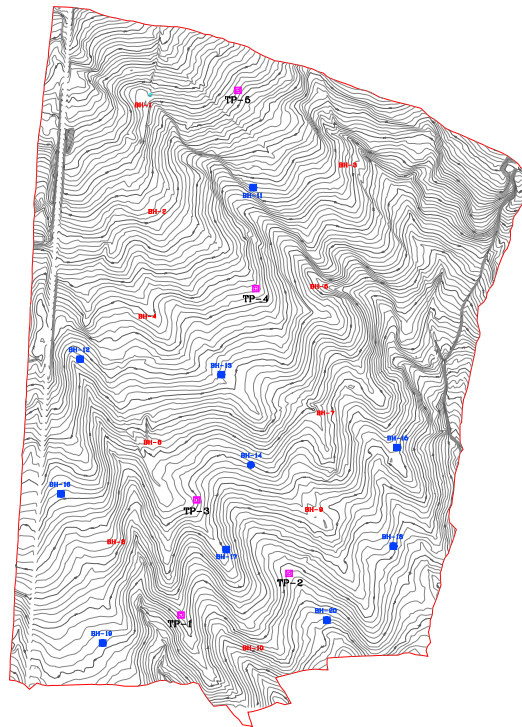
طرح تولید پلی‌اتیلن سنگین پتروشیمی دهدشت در شمال شرقی شهرستان دهدشت (دشت کلاچو) احداث می‌شود. وسعت محدوده کلی طرح حدود ۱۰۵ هکتار می‌باشد. در این محدوده ارتفاع زمین از سطح دریا کم بوده و بخش‌هایی از آن در مواقع بارندگی پوشیده از آب می‌شود. برای بررسی شرایط زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی و بررسی ظرفیت باربری مجاز پی در محدوده طرح پتروشیمی دهدشت، مطالعات ژئوتکنیک انجام گرفته است. اهداف عمده مطالعات حاضر به شرح زیر بوده است:

- بررسی وضعیت تحت‌الارضی و لایه‌بندی زمین
- تعیین عمق آب زیرزمینی
- تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زمین
- تعیین ظرفیت باربری و مقاومت مجاز پی‌های سطحی و عمیق
- برآورد نشست پی
- ارائه توصیه‌هایی در مورد پی‌سازی
- بررسی نوع زمین از نظر مهندسی زلزله
- بررسی وضعیت شیمیایی خاک زیرسطحی و تعیین نوع سیمان مصرفی



۲- عملیات حفاری شناسایی و نمونه برداری

برای بررسی شرایط زیرسطحی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف زمین ابتدا تعداد ۱۰ گمانه به اعماق ۱۵ متر در کل ناحیه اجرای طرح به طور پراکنده حفاری شده‌اند. در مرحله بعد برای انجام بررسی‌های بیشتر و شناسایی‌های بهتر محل پروژه تعداد ۱۰ گمانه ۲۰ تا ۲۵ متر در میان گمانه‌های قبلی حفاری شده‌اند. مشخصات گمانه‌های مذکور در جدول (۱) ارائه شده است. در شکل (۲) تصویری از محدوده طرح و خاک‌های سطحی موجود نشان داده شده است. همزمان با حفاری گمانه‌ها آزمایشات SPT انجام شده است. نمونه‌های موم‌اندود اخذ شده بلافاصله بعد از حفاری بسته‌بندی شده و برای انجام آزمایش‌های مکانیک خاک به آزمایشگاه منتقل شده است. همه مغزه‌های حفاری در جعبه‌های چوبی ویژه‌ای جمع‌آوری شده و لوگ حفاری گمانه‌ها تهیه گردیده است. در شکل (۳) تصویری از مغزه‌های حفاری نشان داده شده است.



شکل (۱): پلان موقعیت گمانه‌ها و محل مقاطع زمین‌شناسی

جدول (۱): مشخصات گمانه‌های حفر شده

گمانه یا چاهک	عمق گمانه یا چاهک (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
BH-1	15	461270	3417020	933.95
BH-2	15	461300	3416790	931.25
BH-3	15	461690	3416890	926.43
BH-4	15	461280	3416565	926.94
BH-5	15	461630	3416630	922.74
BH-6	15	461290	3416295	921.50
BH-7	15	461630	3416400	920.64
BH-8	15	461216	3416086	917.98
BH-9	15	461620	3416150	917.95
BH-10	15	461494	3415895	915.79
BH-11	20	461495	3416862	928.27
BH-12	20	461142	3416495	924.53
BH-13	20	461430	3416462	924.08
BH-14	20	461490	3416269	920.05

BH-15	20	461788	3416306	917.73
BH-16	25	461103	3416207	920.83
BH-17	20	461440	3416088	918.50
BH-18	23	461781	3416095	914.93
BH-19	20	461188	3415888	916.49
BH-20	20	461645	3415937	912.93
TP-1	6	461348	3415948	916.61
TP-2	6	461568	3416037	914.78
TP-3	6	461380	3416194	920.06
TP-4	3	461500	3416646	926.81
TP-5	3	461464	3417070	930.05



شکل (۲): تصویری از منطقه مورد مطالعه



شکل (۳): تصویری از مغزه‌های حفاری

۳- شرایط زیرسطحی محدوده مورد بررسی

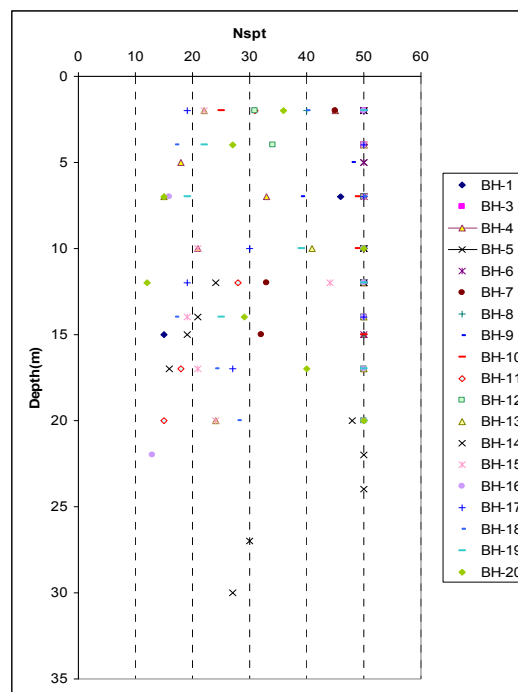
بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری‌ها و مطالعات زمین‌شناسی، چهار مقطع زمین‌شناسی تهیه شده است و مشاهده می‌شود که خاک منطقه عموماً شامل لایه‌های رسی با پلاستیسیته پایین و لایه‌های شنی تشکیل شده است که به شکل متناوب و با ضخامت‌های متفاوت بر روی هم قرار گرفته است. در قسمت‌های شمالی منطقه گسترش لایه شنی در سطح بیشتر بوده و در قسمت‌های جنوبی لایه‌های بالایی اکثراً رسی می‌باشد و همچنین در مناطق جنوب‌شرقی منطقه مورد نظر ضخامت لایه رس سطحی افزایش می‌یابد. در حفاری‌های انجام شده به هیچ فضای زیرزمینی برخورد نشده و آب زیرزمینی در حین حفاری گمانه‌ها مشاهده نشده است.



۴- آزمایش‌های صحرایی

۴-۱- آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (SPT)

آزمایش‌های ضربه و نفوذ استاندارد (SPT) به فواصل تقریبی ۲ متر در همه گمانه‌ها انجام گرفته و نتایج آن در لوگ گمانه‌ها ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های SPT لایه‌های زمین تا عمق حدود ۲۰ متری عمدتاً از رسوباتی با عدد SPT بالا تشکیل شده است. قابل ذکر است که مقادیر عدد SPT در لایه‌های رسی برخورد شده در اعماق مقادیری در حدود ۱۵-۲۰ قرار دارد و مقادیر بالای SPT در لایه‌های سطحی عمدتاً مربوط به خشک‌شدگی خاک‌های سطحی می‌باشد. نتایج آزمایش‌های SPT در لوگ گمانه‌ها نشان داده شده است. مطابق تقسیم‌بندی تریزاقی لایه‌های شنی دارای اعداد SPT بالا بوده و در رده خاک‌های متراکم و خیلی متراکم قرار می‌گیرد. لایه‌های رسی نیز طبق این تقسیم‌بندی در رده خاک‌های سخت و خیلی سخت قرار می‌گیرند. نمودار تغییرات عدد SPT با عمق در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار تغییرات عدد SPT با تراز در گمانه‌های مختلف

۴-۲- آزمایش‌های بارگذاری صفحه

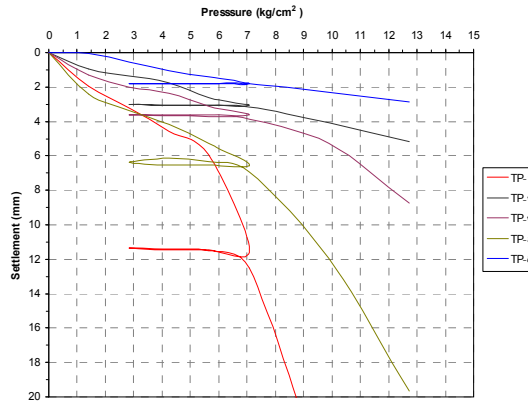
حداکثر آزمایش بارگذاری صفحه جهت تعیین مدول عکس‌العمل خاک (Ks) و تعیین ظرفیت باربری خاک استفاده می‌شود. مدول عکس‌العمل خاک (Ks) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_s = \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

در اینجا ΔP تغییرات فشار و ΔS نشست متناظر با ΔP است. در محدوده پروژه پتروشیمی دهمدشت پنج آزمایش بارگذاری صفحه در محل چاله‌های TP-1، TP-2، TP-3، TP-4 و TP-5 بر روی صفحه دایره‌ای شکل به قطر ۳۰ سانتیمتر در عمق ۳ متری انجام شده است. در شکل (۵) منحنی تمام آزمایش‌های بارگذاری صفحه انجام شده در یک نمودار نشان داده شده است. قابل ذکر است که بر اثر خیس‌شدگی خاک درون چاهک در آزمایش بارگذاری صفحه انجام شده در چاهک شماره ۱ به



علت بارندگی شب قبل از آن مقادیر نشست آن بیشتر شده و در نتیجه مقدار مدول الاستیسیته به دست آمده از نتیجه این آزمایش کمتر بوده و به مقادیر واقعی نزدیک تر می باشد.



شکل (۵): منحنی های فشار - نشست آزمایش های بارگذاری صفحه

مقدار K_s بر اساس قسمت خطی منحنی در محدوده فشارهای ۱ تا ۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع محاسبه شده است. شایان ذکر است که مدول واکنش بستر برای یک خاک مقدار ثابتی نبوده و بسته به سطح تنش تغییر می کند. بر اساس روابطی که به وسیله ترزاقی ارائه شده است می توان با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه مقدار K_s را برای ابعاد مختلف پی به دست آورد:

$$K_s = K_1 \left(\frac{B_1}{B} \right)$$

برای پی های مربعی

$$K_s = K_1 \left(\frac{\frac{L}{B} + 0.5}{1.5 \frac{L}{B}} \right) \left[\frac{B + B_1}{2B} \right]^2$$

برای پی های مستطیلی و نواری

K_1 : مدول واکنش بستر صفحه بارگذاری

B_1 : عرض صفحه بارگذاری

B : عرض پی

L : طول پی

پارامتر دیگری که بر اساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه و بر پایه تئوری الاستیسیته می توان به دست آورد مدول تغییر شکل خاک (E) است. این مدول به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta s} \cdot D \cdot (1 - \nu^2) \cdot I$$

در اینجا ΔP تغییرات فشار، D ابعاد صفحه بارگذاری، ν نسبت پواسون، I ضریب تاثیر که تابعی از صلبیت و شکل صفحه بارگذاری بوده و Δs میزان نشست الاستیک می باشد. برای صفحه دایروی و صلب در بارگذاری صفحه روی یک فضای



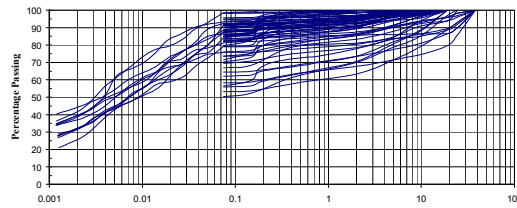
نیمه بی‌نهایت الاستیک و همگن مقدار I برابر ۰/۷۹ است. بر اساس رابطه مذکور و با فرض نسبت پواسون ۰/۳۲ مقدار مدول تغییر شکل خاک در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مدول تغییر شکل خاک

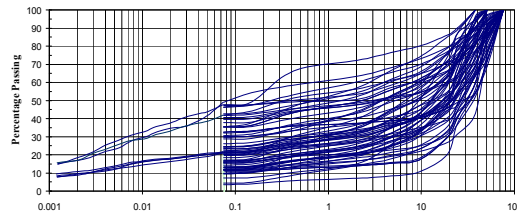
چاهک	X	Y	Ks(kg/cm3)	E(kg/cm2)
TP-1	۴۶۱۳۴۸	۳۴۱۵۹۴۸	۱۰/۸	۲۲۹
TP-2	۴۶۱۵۶۸	۳۴۱۶۰۳۷	۳۶/۲۸	۸۶۰
TP-3	۴۶۱۳۸۰	۳۴۱۶۱۹۴	۲۶/۴	۶۲۵
TP-4	۴۶۱۵۰۰	۳۴۱۶۶۴۶	۱۶/۱	۳۸۱
TP-5	۴۶۱۴۶۴	۳۴۱۷۰۷۰	۲۸/۶	۶۷۷

۵- آزمایش‌های دانه‌بندی و طبقه‌بندی خاک

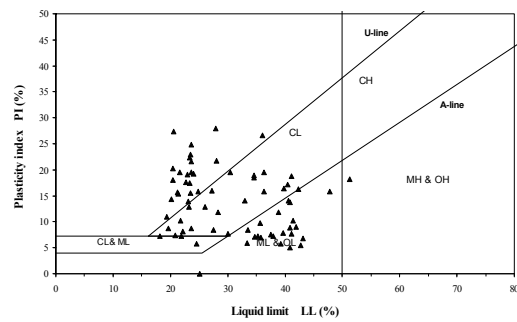
دامنه اندازه ذرات موجود در خاک و توزیع وزنی آنها بر حسب درصدی از وزن کل خشک خاک توسط آزمایش دانه‌بندی تعیین می‌گردد. دو آزمایش برای تعیین منحنی دانه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو آزمایش عبارتند از آزمایش دانه‌بندی برای ذراتی با قطر بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر و آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر 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، لرزانده می‌شود. سپس جرم خاک‌هایی که در 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 یک چگالی‌سنج استاندارد ASTM 152H برای تعیین چگالی ذرات معلق استفاده می‌گردد. آزمایش حدود اتربرگ نیز به منظور تعیین حدود خمیری و روانی انجام شده‌اند. در این آزمایش میزان رطوبت و کانی‌های ریزدانه موجود سبب ایجاد حالت جامد، نیمه‌جامد، خمیری و مایع می‌شود. میزان رطوبت در نقطه انتقال از نیمه‌جامد به خمیری، حدخمیری و از خمیری به مایع، حدمایع یا حدروانی نامیده می‌شود. برای تعیین حدروانی 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 شکل 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، حدروانی 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 نیمه‌لگاریتمی تعداد ضربات بر حسب درصد رطوبت حدروانی مشخص می‌گردد. حدخمیری طبق استاندارد ASTM D-4318 درصد رطوبتی است که اگر به ازای آن فتیل‌ای به قطر ۳/۲ میلیمتر از خمیر نمونه خاک که با روش غلتاندن ساخته می‌شود، خرد گردد. منحنی‌های دانه‌بندی برای کل نمونه‌های ریزدانه و درشت‌دانه اخذ شده از محل پروژه در یک نمودار در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است. حدروانی و شاخص پلاستیسیته این لایه‌ها در نمودار کاساگرانده در شکل (۸) و تغییرات آنها با عمق در شکل (۹) نشان داده شده است. حدخمیری نمونه‌های مورد آزمایش از ۲۶/۷ تا ۷۷/۱ درصد متغیر می‌باشد. حدود شاخص پلاستیسیته این لایه‌ها در محدوده تقریبی ۷/۸ تا ۴۹/۵ درصد بوده است که در محدوده خاک‌های با پلاستیسیته متوسط تا زیاد قرار می‌گیرد و تغییرات محسوسی با عمق نشان نمی‌دهد.



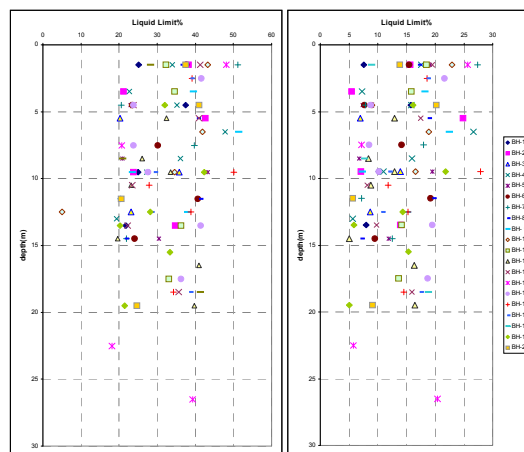
شکل (۶): نمودار منحنی‌های دانه‌بندی برای کل نمونه‌های ریزدانه اخذ شده از محل پروژه



شکل (۷): نمودار منحنی‌های دانه‌بندی برای کل نمونه‌های درشت‌دانه اخذ شده از محل پروژه



شکل (۸): حدروانی و شاخص پلاستیسیته در نمودار کاساگرانده



شکل (۹): تغییرات حدروانی و شاخص پلاستیسیته با عمق



۶- آزمایش‌های برش مستقیم

مقاومت برشی خاک پارامتر مهمی در مسائل مهندسی پی، نظیر ظرفیت باربری فونداسیون و شمع، پایداری شیب و فشار جانبی وارد بر دیوارهای حائل محسوب می‌گردد. اعمال تنش برشی حین حضور تنش نرمال موجب گسیختگی برشی نمونه می‌گردد. در آزمایش‌های برش مستقیم کند، نیروی برشی با نرخ آرام به نمونه خاک اعمال می‌گردد تا فرصت زهکشی کامل به نمونه داده شود، در این صورت فشار آب حفره‌ای اضافی برابر با صفر و تنش نرمال اعمالی برابر با تنش نرمال موثر خواهد بود. آزمایش برش مستقیم در شرایط اشباع مطابق با استاندارد ASTM D-3080 بر روی نمونه‌های دست‌نخورده به قطر ۵ سانتیمتر انجام گردیده است. بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته، مقدار چسبندگی (c) نمونه‌های رسی بین ۰/۴۰ تا ۰/۶۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بوده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) آنها بین ۱۴/۶ تا ۱۹/۶ درجه قرار دارد. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های شنی نیز بین ۳۳/۱ تا ۳۶/۳ درجه به دست آمده است.

۷- آزمایش سه‌محوری

آزمایش سه‌محوری قابل اعتمادترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی است. در آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده (UU)، نمونه آزمایش اجازه زهکشی در مرحله تحکیم و در مرحله برش را نخواهد یافت. در این آزمایش فشار همه‌جانبه به نمونه وارد می‌گردد و سپس تنش انحرافی محوری افزایش داده می‌شود تا نمونه به گسیختگی برسد. در آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده (CU) نمونه تحت فشار همه‌جانبه تحکیم می‌گردد. در این مرحله امکان زهکشی کامل برای نمونه فراهم خواهد بود. پس از تحلیل کامل فشار آب حفره‌ای اضافی که به واسطه اعمال فشار همه‌جانبه به وجود آمده بود (UC)، تنش انحرافی محوری افزایش داده می‌شود تا نمونه آزمایش به گسیختگی برسد. در مرحله بارگذاری محوری شیر زهکشی دستگاه بسته خواهد بود که در نتیجه فشار آب حفره‌ای به سبب بارگذاری محوری (UD) افزایش خواهد یافت. ۹ آزمایش سه‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D-3282 بر روی نمونه‌های دست‌نخورده انجام گرفته است که از میان آن ۸ آزمایش سه‌محوری به روش تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و یک آزمایش به روش تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده انجام گرفته است. بر مبنای نتایج به دست آمده مقدار چسبندگی زهکشی‌نشده نمونه‌های رسی تحت آزمایش بین ۰/۷۷ تا ۰/۹۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست آمده است. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های رسی در حالت زهکشی‌نشده به طور متوسط ۸ درجه به دست آمده است. مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های رسی (در حالت تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده) ۲۴ درجه و مقدار چسبندگی تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده آن کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست آمده است. در آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده بر روی دو نمونه سیلتی (ML) چسبندگی ۰/۵۸ و ۱/۰۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست آمده است.

۸- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی

بر مبنای آزمایش‌های انجام گرفته در محل پروژه و تجربیات موجود پارامترهای مقاومتی لایه رس سفت، سخت و لایه شنی متراکم تا بسیار متراکم در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): پارامترهای مقاومتی لایه شنی و رسی

پارامترهای مقاومتی لایه شنی	
$N_{SPT}(Average) = 31$	متوسط تعداد ضربات SPT
$c = 0.1 \text{ Kg/cm}^2$	چسبندگی تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده
$\phi = 32$	زاویه اصطکاک داخلی خاک
$\gamma_w = 1.7 \text{ gr/cm}^3$	وزن مخصوص طبیعی

$v = 0.3$	نسبت پواسون
$E = 400 \text{ kg/cm}^2$	مدول تغییر شکل
پارامترهای مقاومتی لایه رس سفت تا بسیار سخت	
$N_{SPT}(\text{Average}) = 19$	متوسط تعداد ضربات SPT
$c_{CD}(c') = 0.18 \text{ Kg/cm}^2$	چسبندگی تحکیم یافته زهکشی شده
$\phi_{CD}(\phi') = 32$	زاویه اصطکاک داخلی تحکیم یافته زهکشی شده
$\text{gr/cm}^3 = 1.98 \quad \gamma_w$	وزن مخصوص طبیعی
$v = 0.37$	نسبت پواسون
$E = 200 \text{ kg/cm}^2$	مدول تغییر شکل
$mv = 0.13 \text{ mpa}$	قابلیت تراکم پذیری حجمی
$ks = 10\sim 15 \text{ kg/cm}^3$	مدول عکس العمل قائم بستر

۹- ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی

ظرفیت باربری پی های سطحی با در نظر گرفتن مقاومت برشی خاک محاسبه شده و پس از لحاظ کردن مقدار نشست مجاز، ظرفیت باربری مجاز پی به دست آمده است.

ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی در منطقه I

این ناحیه در قسمت شمالی محدوده طرح قرار دارد و گمانه های ۱ و ۳ در آن حفاری شده اند. خاک منطقه به صورت لایه شنی به عمق حداقل ۴ متر در سطح و لایه های رس در اعماق کمتر از ۱۵-۱۰ متر شکل گرفته است. انتخاب عمق مدفون فونداسیون در پی های منفرد حائز اهمیت می باشد و در روابط ظرفیت باربری مقدار فشار خالص بستگی به عمق خاک بالای پی دارد.

ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی در منطقه II

این ناحیه در قسمت میانی محدوده طرح قرار دارد و گمانه های ۲، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ در آن حفاری شده اند. خاک منطقه به صورت لایه رسی به عمق حداکثر ۳ متر در سطح و لایه های رس و شن به شکلی کاملاً پراکنده در اعماق شکل گرفته است.

ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی در منطقه III

این ناحیه در قسمت جنوبی محدوده طرح قرار دارد و گمانه های ۸، ۹، ۱۰، ۱۷، ۱۸ و ۲۰ در آن حفاری شده اند. خاک منطقه به صورت لایه رسی به عمق حداکثر ۵ متر در سطح و لایه های رس و شن در اعماق شکل گرفته است. قابل ذکر است که ضخامت لایه های رسی در این ناحیه نسبت به ناحیه II بیشتر می باشد.

ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی در منطقه IV

این ناحیه در قسمت شمالی محدوده طرح قرار دارد. در این ناحیه گمانه های ۱۲، ۱۶ و ۱۹ حفاری شده اند. خاک این ناحیه به صورت لایه شنی به عمق حداقل ۳ متر در سطح و لایه های رس و شن در اعماق شکل گرفته است. محاسبه نشست پی گسترده نسبتاً پیچیده بوده و تا حدود زیادی نیاز به تجربه دارد. میزان نشست علاوه بر مشخصات خاک زیر پی به مقدار زیادی به مشخصات شالوده پی و روش اجرا دارد. فرض شالوده صلب یا انعطاف پذیر یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار است. در پی های گسترده نشست نسبی مهم تر از نشست کل می باشد.

۱۰- تعیین ظرفیت باربری شمع

ظرفیت باربری فشاری، کششی و جانبی شمع های منفرد با توجه به مشخصات بخش های مختلف محاسبه و ارائه شده است. ظرفیت باربری فشاری مجاز شمع منفرد با در نظر گرفتن ملاحظات نشست بررسی شده است. برای محاسبه ظرفیت باربری



شمع منفرد از مقاومت نوک (Qt) و اصطکاک جدار شمع (Qs) استفاده می‌شود. ظرفیت باربری نهایی و مجاز شمع با توجه به پارامترهای ژئوتکنیکی ارائه شده و در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲/۵ برای باربری جدار و ۳ برای باربری نوک برای هر ۴ ناحیه مذکور محاسبه شده و مقدار نشست نیز با توجه به روابط برای شمع منفرد محاسبه شده و مقدار آن به ۲/۵ سانتیمتر محدود شده است. با توجه به اینکه سهم عمده ظرفیت باربری شمع توسط جدار شمع تحمل می‌شود توصیه می‌شود در زمان حفاری شمع‌ها دقت و نظارت کافی انجام گرفته و از ریزش، سست‌شدگی و هوازدگی خاک پرهیز گردد (رعایت توصیه‌های فنی و ضوابط آیین‌نامه ACI-336.1).

۱۱- آزمایش‌های لرزه‌ای

به منظور تکمیل اطلاعات ژئوتکنیکی و لزوم ارزیابی پارامترهای دینامیکی لایه‌های زمین جهت تحلیل دینامیکی، آزمایشات لرزه‌ای درون گمانه‌ای با استفاده از امواج تراکمی و برشی به روش Downhole انجام یافته است. در این مطالعات ۳ پروفیل لرزه‌ای درون گمانه‌ای با استفاده از امواج تراکمی و برشی در گمانه‌های BH14، BH16 و BH18 برداشت شده 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. با در دست داشتن سرعت امواج تراکمی و سرعت امواج برشی و همچنین چگالی محیط انتشار می‌توان مدول‌های دینامیکی لایه‌های خاک را محاسبه نمود. بر اساس نتایج به دست آمده چند لایه فیزیکی با توجه به تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای قابل تفکیک است. به طور کلی می‌توان گفت که مصالح تشکیل‌دهنده عمدتاً شامل شن، ماسه به همراه میان لایه‌هایی از سیلت و رس می‌باشد. مدول الاستیک یانگ (E) و مدول برشی (Gs) خاک و نسبت پواسون لایه‌های مختلف محاسبه شده است. در شکل (۱۰) تصاویری از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های لرزه‌ای به کار رفته در محل پروژه نشان داده شده است.



شکل (۱۰): شمایی نزدیک از صفحه دستگاه لرزه‌نگار RAS 24

۱۲- بررسی پدیده روانگرایی

یکی از علل مهم خرابی‌ها در خلال زلزله‌ها گسیخته شدن زمین می‌باشد. گسیختگی زمین ممکن است به واسطه وجود ترک‌ها و شکاف‌ها، حرکات غیرطبیعی و یا نامساوی و یا از دست دادن مقاومت آن به وقوع پیوندد. از دست دادن مقاومت زمین ممکن است در زمین‌های ماسه‌ای اشباع با تراکم پایین به علت افزایش فشار آب حفره‌ای اتفاق افتد که این پدیده را سیلان یا روانگرایی خاک می‌نامند. افزایش فشار حفره‌ای به کم‌شدن یا حتی از بین رفتن کامل مقاومت برشی خاک می‌انجامد.



خاک‌هایی که مقاومت برشی خود را به طور کامل از دست می‌دهند مانند یک مایع غلیظ عمل کرده و در خلال زلزله به صورت سیلان و جوشش ماسه ظاهر می‌شوند. با توجه به وجود لایه‌های ماسه‌ای اشباع با ضخامت قابل توجه در اعماق مختلف و همچنین اعداد SPT امکان بروز پدیده روانگرایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل روانگرایی روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آنها روش سید و همکاران (۱۹۹۷) می‌باشد که بر اساس نتایج آزمایش SPT روانگرایی خاک را هنگام وقوع زلزله بررسی می‌کند.

در این روش برای محاسبه تنش برشی تناوبی، پارامتر نسبت تنش تناوبی (CSR) یا Cyclic Stress Ratio با استفاده از تحلیل پاسخ لایه‌های خاک تحت ارتعاش زلزله و یا به وسیله روش ساده ارائه شده توسط سید و ادیس (1997) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_0) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d$$

که در آن a_{max} شتاب افقی حداکثر ناشی از زلزله در سطح زمین، g شتاب ثقل، σ_v تنش کل عمودی، σ'_v تنش موثر عمودی و r_d ضریب کاهش تنش بر حسب عمق (Z) می‌باشد که در سطح زمین مقدار آن برابر با یک بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. مقاومت برشی تناوبی یا به عبارت دیگر تنش برشی لازم جهت افزایش فشار آب حفره‌ای و صفر شدن تنش موثر را می‌توان با استفاده از آزمایش‌های صحرائی نظیر آزمایش نفوذ استاندارد SPT محاسبه نمود. روابط متعددی برای محاسبه نسبت مقاومت برشی تناوبی با استفاده از عدد SPT اصلاح شده، درصد ریزدانه و بعضاً خواص خمیری خاک ارائه شده است. از جمله این روابط سید و همکاران (۱۹۹۷) جهت محاسبه نسبت مقاومت برشی تناوبی (τ_{av} / σ'_0) ارائه نموده‌اند. ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی به صورت حاصل تقسیم نسبت مقاومت برشی تناوبی بر نسبت تنش برشی تناوبی تعریف می‌شود و در صورتی که ضریب اطمینان کمتر از یک باشد پدیده روانگرایی اتفاق خواهد افتاد. تحلیل روانگرایی به روش مذکور با استفاده از نرم‌افزار LiquefyPro (از نسخه ۲/۴ سال ۲۰۰۲) بر روی پروفیل خاک در گمانه‌های مورد نظر انجام شده است. تحلیل‌ها با فرض وقوع یک زلزله به بزرگی ۶/۵ ریشتر و اعمال شتاب معادل با شتاب مبنای طرح بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ انجام شده است. مشاهده می‌شود در تعدادی از گمانه‌ها روانگرایی قابل توجهی رخ می‌دهد که باید تاثیر آن بر روی سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد.

عمق لایه روانگرا یکی از عوامل مهم در بروز آثار روانگرایی در سطح می‌باشد. به طور کلی اثر لایه روانگرا بر سازه‌های موجود در سطح زمین تابع عواملی مانند ضخامت لایه سطحی غیر روانگرا واقع بر روی لایه روانگرا شده، ویژگی‌های لایه روانگرا (ضخامت، ضریب اطمینان روانگرایی) می‌باشد. بنابراین ممکن است روانگرایی لایه‌ای با ضخامت محدود تا سطح زمین گسترش پیدا نکند؛ لذا خطری برای سازه‌های سطحی نخواهد داشت. در سال ۱۹۸۲ Iwasaki روشی را برای بررسی این پدیده ارائه کرده است که در ادامه آورده شده است. وی معادله زیر را برای این منظور ارائه کرده است:

$$I_L = \int_0^{20} F.W(Z).dz$$

$$F = 1-FL \quad FL \leq 1.0$$

$$F = 0.0 \quad FL \geq 1.0$$

$$W(z) = 10-0.5z$$

که FL ضریب اطمینان روانگرایی و Z عمق لایه روانگرا می‌باشد. بر طبق این معیار اگر مقدار I_L کمتر از ۵ باشد بروز در سطح نخواهیم داشت. اگر مقدار I_L بین ۵ تا ۱۵ باشد نیاز به انجام مطالعات بیشتری می‌باشد و در صورتیکه مقدار I_L بیشتر از ۱۵ باشد بروز در سطح به وقوع خواهد پیوست. در این پروژه در تمامی گمانه‌هایی که روانگرایی رخ داده است تاثیر آن روی سطح زمین بررسی شده است. در جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی بروز روانگرایی در سطح را با روش ذکر شده ارائه شده است. با توجه به ایجاد روانگرایی در محل بعضی از گمانه‌ها و بروز آثار آن در سطح استفاده از پی‌های سطحی در آن مناطق مجاز نبوده و استفاده از پی‌های عمیق و یا بهسازی خاک با استفاده از تراکم دینامیکی توصیه می‌شود.

جدول (۴): نتایج بررسی انجام شده در مورد گمانه‌های دارای پتانسیل روانگرایی

ردیف	گمانه	ضخامت لایه روانگرا	M= 6.5 (بررسی تاثیر روی سطح زمین) Iwasaki
۱	BH1	روانگرایی به وقوع نمی‌پیوندد	-
۲	BH2	۱۰/۰-۱۶/۲۰	عدم بروز روانگرایی در سطح (IL = 3.22)
۳	BH3	۸/۰-۲۴/۰	احتیاج به مطالعه بیشتر (IL = 6.21)
۴	BH4	۱۰/۴۰-۱۷/۰	احتیاج به مطالعه بیشتر (IL = 6.71)
۵	BH5	روانگرایی به وقوع نمی‌پیوندد	-
۶	BH6	۵/۸۰-۱۵/۸۰ ۱۶/۸۰-۱۹/۶۰	احتیاج به مطالعه بیشتر (IL = 7.3)
۷	BH14	۹/۲۰-۱۳/۶۰	عدم بروز روانگرایی در سطح (IL = 2.09)
۸	BH16	روانگرایی به وقوع نمی‌پیوندد	-
۹	BH20	۹/۴۰-۱۱/۲۰	عدم بروز روانگرایی در سطح (IL = 0.7)

۱۳- توصیه‌های پی‌سازی

عمق آب زیرزمینی در گمانه‌ها در طول حفاری حدود ۰/۵ تا ۱/۰ متر از سطح زمین طبیعی ثبت گردیده است. ظرفیت باربری انواع مختلف پی‌های مربعی، مستطیلی و نواری محاسبه شده و در بخش ظرفیت باربری ارائه شده‌اند بنابراین طراح خواهد توانست تا با مراجعه به گراف‌های مربوط به ظرفیت باربری انواع مختلف پی در اعماق مختلف را به دست آورده و در مورد نوع و عمق پی مورد نظر تصمیم‌گیری کند. در این محاسبات عمق استقرار نسبت به سطح تمام شده خاکریز ۴ متری فرض شده است. در مواردی که ظرفیت باربری پی‌های مفروض کمتر از بار سازه‌ای اعمال شده باشند یکی از راه‌های زیر انتخاب خواهند شد:

(الف) استفاده از ابعاد پی بزرگتر با سطح باربری بیشتر (مانند پی نواری و گسترده)

(ب) تغییر عمق مدفون پی به نحوی که ظرفیت باربری را بیشتر کند

(ج) استفاده از شمع

در صورت استفاده از پی‌های عمیق، با توجه به حساسیت سازه‌ها، پیچیدگی محاسبات مربوط به ظرفیت باربری شمع و گستردگی روابط و تئوری‌های موجود، اکیداً توصیه می‌شود که ظرفیت باربری شمع توسط روش‌های مستقیم مانند تست شمع آزمایش شود. در این روش با اعمال بار بر شمع نشست‌های آن را ثبت می‌کنند و در نهایت با توجه به مقدار دقیق ظرفیت باربری و بارهای سازه‌ای، تعداد شمع‌های مورد نیاز تعیین می‌شود. با توجه به اشباع بودن لایه‌های سیلتی و ماسه‌ای سطحی، احتمال رمبندگی خاک منتفی می‌باشد.

۱۴- نتیجه‌گیری

۱- در محدوده طرح خاک منطقه عمدتاً از نوع مصالح رسی با پلاستیسیته کم می‌باشد که در گمانه‌های مختلف ضخامت‌های قابل توجهی از خاک‌های سیلتی و خاک‌های ماسه‌ای با پتانسیل روانگرایی مشاهده شده است.

۲- عمق سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها به طور متوسط در عمق ۰/۵ متری از سطح زمین طبیعی قرار دارد.

۳- بر اساس نتایج آزمایشات SPT لایه‌های زمین تا عمق حدود ۲۰ متری از مصالح سست تا تراکم کم و از تراکم کم تا متوسط (SPT کمتر از ۲۰ ضربه) تشکیل شده است و بعد از آن به تدریج تراکم لایه‌ها افزایش یافته است.

۴- درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها بین ۹/۵ تا ۲۹/۳ درصد و وزن مخصوص خشک نمونه‌های رسی و سیلتی بین ۱/۶۰ تا ۱/۸۰ گرم بر سانتیمتر مکعب به دست آمده است.

۵- مقاومت تک محوری نمونه‌های اخذ شده بین ۰/۴۳ تا بیش از ۲/۵۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست آمده است.



- ۶- بر اساس توصیه آیین‌نامه بتن ایران (آبا) با توجه به بالا بودن مقدار سولفات و کلر استفاده از سیمان نوع دو مناسب بوده ضمن اینکه رعایت توصیه‌های خاص در کارهای بتن‌آرمه در شرایط محیطی خیلی شدید باید رعایت شود.
- ۷- ظرفیت باربری پی‌های سطحی برای ابعاد و عمق‌های مدفون متفاوت محاسبه شده است. در محاسبات انجام گرفته عمق مدفون فونداسیون نسبت به سطح تمام شده خاکریز اجرا شده در نظر گرفته شده است. با توجه به تاثیر بسیار زیاد لایه خاکریز در ظرفیت باربری پی‌هایی با ابعاد کوچکتر از سه متر اعتبار این نمودارها منوط به اطمینان کامل از مشخصات فنی لایه خاکریز متراکم شده می‌باشد.
- ۸- در صورت خاکریزی بر روی لایه‌های ریزدانه اشباع حدود ۲۵ سانتیمتر نشست در زمان ۵۰ سال به وقوع خواهد پیوست که لازم است در طراحی پروژه به این مهم توجه شود.
- ۹- ظرفیت باربری پی‌های عمیق برای دو محدوده متفاوت محاسبه و ارائه شده است. روانگرایی و تاثیر آن بر روی سطح زمین در ۹ گمانه که کمترین عدد SPT و بالاترین ضخامت لایه ماسه را داشتند مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که در سه گمانه استفاده از پی‌های عمیق با حفاری گمانه‌هایی با عمق مناسب طراحی برای هر سازه به صورت مجزا انجام گردد.
- ۱۰- خطر روانگرایی رخ نمی‌دهد در حالی که در ۶ گمانه دیگر روانگرایی رخ خواهد داد و امکان گسترش آثار روانگرایی تا روی سطح زمین وجود دارد. این امر نشانگر نیاز به انجام مطالعات بیشتر در این زمینه می‌باشد.
- ۱۱- در بخش‌هایی که احتمال روانگرایی خاک زیر پی وجود دارد استفاده از پی‌های سطحی بدون انجام بهسازی خاک مجاز نخواهد بود.
- ۱۲- با توجه به آیین‌نامه ۲۸۰۰ رده زمین زیر پی از نظر زلزله نوع IV طبقه‌بندی می‌شود. به منظور اندازه‌گیری سرعت موج برشی در خاک و تعیین دقیق نوع زمین در محدوده طرح استفاده از آزمایش لرزه‌ای Downhole پیشنهاد می‌شود.
- ۱۳- بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰) شتاب مبنای طرح محل طرح ۲۰g است.
- ۱۴- در زمان اجرای پی استحکام خاک زیر پی باید توسط مهندس ناظر ذیصلاح مورد تایید قرار گیرد.
- ۱۵- با توجه به شرایط لایه‌های زمین توصیه می‌شود که در محل سازه‌های مهم گمانه‌های ویژه حفاری شده و شرایط محل به طور خاص بررسی شود.

مراجع

- ۱- مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی سازه‌های جنبی مجتمع فولاد قائنات، سید علیرضا آشفته، احمد ادیب، مجید ملکی و نیکنام شاکرمنتظری، همایش و نشست تخصصی مدیریت شهری و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر با همکاری شهرداری اسلامشهر، اردیبهشت ۱۳۹۲
- ۲- 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
- ۳- 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