Archive of SID

نویسندگان
بهنام ابره[1]*
نرگس سلیمان‌آباد اصفهانی[2]
*behnamAbrah@gmail.com

تعیین مدول الاستیسیته با تکیه بر نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای – مطالعه موردی

چکیده

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای یکی از آزمایش‌های بسیار کاربردی در انجام مطالعات ژئوتکنیک است. کاربرد نتایج این آزمایش با توجه به ماهیت آن، در طراحی فونداسیون سازه‌ها و تخمین نشست‌های پس از احداث سازه بسیار حائز اهمیت است. در این آزمایش تلاش می‌شود تا مقاومت و سختی زمین با توجه به جنس ساختگاه پروژه تعیین شود. هدف از این آزمایش، کمک به تعیین عوامل مهم ژئوتکنیکی خاک از جمله مدول الاستیسیته است. به طور کلی، عامل مدول الاستیسیته با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، آزمایش‌های صحرایی و روابط تجربی و همبستگی‌های موجود محاسبه می‌شود.آزمون‌های صحرایی به دلیل دست‌خوردگی کمتر خاک محل از نمونه آزمایشگاهی بسیار مطمئن‌تر است. در این مقاله، مسیر متروی خط ۲ اصفهان به طول ۲۴ کیلومتر به ناحیه‌های مختلف تقسیم‌بندی شده و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای[3] در ناحیه‌های مذکور انجام گرفته است. براساس این مطالعات، میزان مدول الاستیسیته خاک با افزایش عمق به دلیل افزایش تراکم لایه‌های خاک افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

آزمایش صحرایی، مدول الاستیسیته، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (PLT).

مقدمه

امروزه مطالعات ژئوتکنیک جزء جدائی‌ناپذیر در هر پروژه عمرانی است. شناخت عوامل مقاومتی خاک در علم مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت بالایی برخوردار است به‌گونه‌ای که با آگاهی از نوع خاک منطقه و اعمال مقادیر مناسب عوامل مقاومتی خاک، به راحتی می‌توان تواان باربری خاک، قابلیت نشست پذیری و ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی را محاسبه نمود. آزمایش‌های برجا در مطالعات ژئوتکنیک و مکانیک خاک از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند و به‌منظور تکمیل آزمون‌های آزمایشگاهی برای کسب عوامل اساسی نظیر مقاومت، تنش‌های افقی برجا، مدول‌های تغییر شکل‌پذیری و نفوذپذیری، اهمیت روزافزونی پیدا کرده‌اند. دلیل این امر نیز دست نخورده بودن خاک و سنگ در حالت برجا بوده که دستیابی به نتایج دقیق‌تری را به دنبال خواهد داشت. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (PLT) از جمله آزمایش‌های برجا بوده که روی خاک و سنگ نرم قابل انجام است. این آزمایش با آرایش و چیدمان‌های مختلف و همچنین روش‌های بارگذاری متفاوتی انجام می‌شود که برای تفسیر آنها باید محدودیت‌های آزمایش مورد توجه قرار گیرد. هدف از این آزمایش، کمک به تعیین عوامل مهمی مانند مدول یانگ، ضریب عکس‌العمل بستر و مقاومت مجاز مصالح آزمایش شده و در نهایت، تعیین مقاومت زمین هنگام ساخت پی است.

www.SID.ir

فصلنامه دانش آزمایشگاهی ایران سال دهم ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱ ■ شماره پیاپی ۳۸

Archive of SID

معرفی پروژه متروی خط ۲ اصفهان

مسیر خط ۲ قطار شهری اصفهان از میدان امام خمینی شروع و با عبور از کهندژ و بلوار مدرس نجفی به دروازه دولت رسیده و با عبور از خیابان باغ گلدسته و آمادگاه وارد خیابان نشاط شده و بعد از عبور از چهارراه حافظ و خیابان هاتف با عبور از زیر گذر میدان لاله وارد خیابان زینبیه شده و در شهرک امام حسین پایان می‌یابد؛ طول مسیر در حدود بیست و چهار کیلومتر و شامل ۲۳ ایستگاه است. استفاده از گزینه کانال باز[۴] در محدوده میدان شهدای خمینی‌شهر تا بلوار مدرس نجفی و گزینه زیرزمینی (TBM[۵]) از بلوار مدرس نجفی تا شهرک امام حسین در نظر گرفته شده‌است [۱]. در شکل (۱) نقشه شهری و ایستگاه خط ۲ متروی اصفهان آورده شده‌است.

شکل (۱): نقشه شهری و ایستگاه خط ۲ مترو اصفهان [۲].

زمین‌شناسی عمومی و ناحیه‌بندی مسیر

قدیمی‌ترین سنگ‌هایی که می‌توان در اصفهان یافت، شامل شیل و ماسه‌سنگ است. محدوده مورد مطالعه در شمال رودخانه زاینده‌رود و در رسوبات دشت سیلابی واقع شده‌است. به‌طور کلی، بعد از خاک دستی این رسوبات به سه لایه زیر قابل تفکیک است [۱]:

رسوبات ریزدانه فوقانی

بافت غالب این رسوبات رس و لای بوده که سطح شهر اصفهان را در بسیاری از قسمت‌ها پوشانده است. این لایه با ضخامتی متغیر از جنوب رودخانه زاینده‌رود شروع شده و با حرکت به سمت شمال و غرب اصفهان بر ضخامت آن افزوده می‌شود.

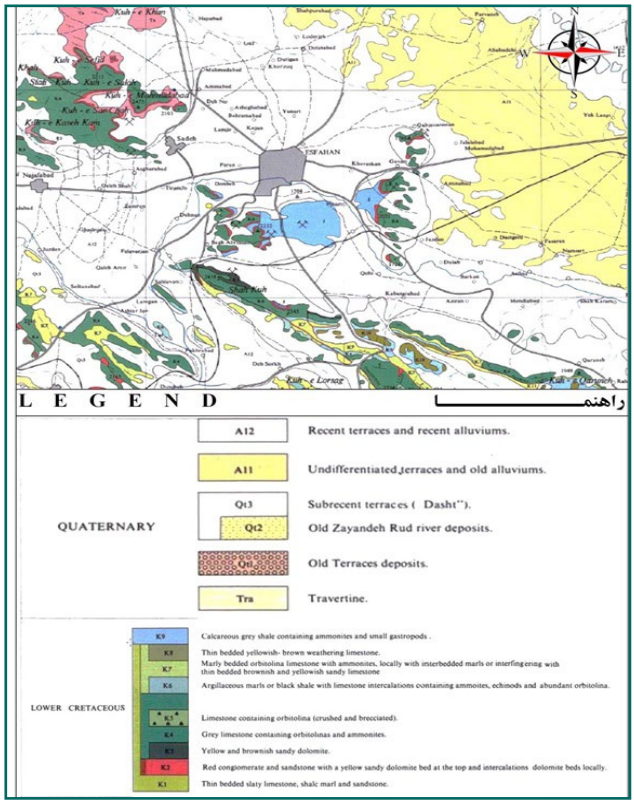
رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای

رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای شامل شن و ماسه و در بعضی موارد، همراه با رس و سیلت است که در زیر رسوبات ریزدانه فوقانی قرار دارد. این لایه در بخش‌هایی از مسیر خط ۲ قطار شهری اصفهان که در فاصله نزدیک‌تری با رودخانه زاینده‌رود واقع می‌شود، دارای ضخامت بیشتری است. از مشخصه‌های این رسوبات، نفوذپذیری و آبگذری بالای آنها است به طوری که لایه آبدار منطقه را تشکیل داده است.

رسوبات ریزدانه زیرین

این لایه شامل رس و لای همراه با اندکی درشت‌دانه و در بعضی موارد با پلاستیسیته بالا است که در بخش‌هایی با رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای در هم فرو رفته‌اند. این لایه در قسمت‌هایی از شهر اصفهان (غرب و شمال‌غرب) با رسوبات ریزدانه فوقانی یکی شده به طوری که تفکیک آنها از یکدیگر مشکل می‌شود.

با توجه به حفاری‌های صورت گرفته زمین‌شناسی، مسیر خط ۲ را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی کرد. بخش اول شامل ۱۰ کیلومتر ابتدایی از سمت میدان شهدای خمینی‌شهر که گزینه کانال باز مدنظر است. با توجه به پروفیل ژئوتکنیکی و خط پروژه می‌توان بیان نمود ۷ کیلومتر ابتدایی در لایه‌های ریزدانه رس و لای و ۳ کیلومتر باقی‌مانده این بخش در نهشته‌های ریزدانه و درشت‌دانه رودخانه‌ای احداث خواهد شد. بخش دوم از کیلومتراژ ۱۰ تا انتهای طرح در شهرک امام حسین، تونل به‌طور غالب در رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای حفاری خواهد شد. در شکل (۲) نقشه زمین‌شناسی شهر اصفهان آورده شده‌است.



شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی شهر اصفهان [۲].

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

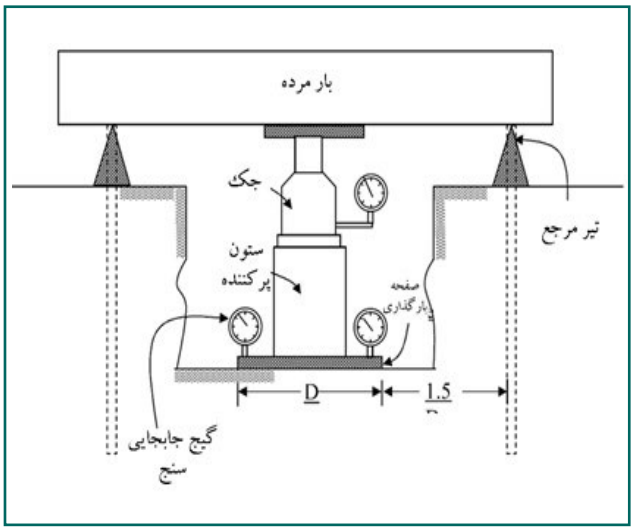
آزمون‌های برجا به دلیل آن که در شرایط طبیعی و واقعی زمین هم از نظر اندازه، جهت و چگونگی توزیع تنش‌های موجود و هم از نظر ناهمگنی‌های ساختی و بافتی خاک‌ها و سنگ‌ها انجام می‌شوند، ارزیابی دقیق‌تری از شرایط زمین را انجام می‌دهند.

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی خاک و سنگ نرم قابل انجام است. این آزمایش با آرایش و چیدمان‌های مختلف و همچنین روش‌های بارگذاری متفاوتی انجام می‌شود که برای تفسیر آنها باید محدودیت‌های آزمایش مورد توجه قرار گیرد [۳].

هدف از این آزمایش، کمک به تعیین عوامل مهمی مانند مدول یانگ، ضریب عکس‌العمل بستر و مقاومت مجاز مصالح آزمایش شده و در نهایت، تعیین مقاومت زمین هنگام ساخت پی است.

آزمایش بارگذاری روی خاک و سنگ نرم

برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی خاک، روش‌ها و استانداردهای متفاوتی وجود دارد. این آزمایش براساس استاندارد ASTM D-1194 و AAAHTO T221-78 و نشریه (۲۳۱-الف) وزارت نیرو قابل انجام است. در این روش‌ها، یک صفحه با قطر ۳۰، ۴۵ یا ۶۰ سانتی‌متر وجود دارد که تأمین بار برای آن به روش‌های مختلفی از جمله استفاده از خرک، استفاده از ترانشه و روباره آن به روش تیر و یا استفاده از گالری و تامین بار با استفاده از روباره صورت می‌گیرد. در شکل (۳) نمایی از تجهیزات مورد نیاز برای آزمایش بارگذاری صفحه را نشان داده شده‌است که شامل حسگر اندازه‌گیری جابه‌جایی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر، جک با ظرفیت ۵۰ تن، صفحه بارگذاری با قطر ۳۰،۴۵ یا ۶۰ سانتی‌متر، بار روباره به‌منظور تأمین فشار روی جک و سایر اتصالات و تجهیزات فرعی است [۴].



شکل (۳): نمایی از تجهیزات مورد نیاز آزمایش بارگذاری صفحه‌ای [۴].

شکل (۴): آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در موقعیت چاهک دستی ایستگاه مترو خط ۲ اصفهان.

محاسبات مدول الاستیسیته

برای محاسبه مدول الاستیسیته خاک می‌توان از رابطه (۱) استفاده کرد:

$$E_i = (1-\nu^2)\eta.d \times (\Delta P/\Delta S) \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

(Ei): مدول الاستیسیته کل (Kg/cm^2)؛ (ν): ضریب دگرشکلی جانبی نسبی؛ (d): قطر صفحه بارگذاری (cm)؛ (η): مقداری بر حسب جنس صفحه برابر ۰/۷۸۵؛ (ΔP): اختلاف بار بین دو نقطه از منحنی بار – نشست که این منحنی در این نقاط رفتار خطی دارد (Kg/cm^2)؛ (ΔS): اختلاف نشست بین دو نقطه ذکر شده بر حسب سانتی‌متر است.

برای تبدیل مقادیر آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به مقادیر واقعی عرض پی، رابطه‌های مختلفی وجود دارد. رابطه (۲) یکی از رابطه‌های پرکاربرد بوده که در ادامه آورده شده‌است. البته باید به این نکته توجه داشت که استفاده از این رابطه پیشنهاد نمی‌شود مگر اینکه نسبت عرض پی به عرض صفحه از حدود (۳) خیلی بیشتر نباشد [۶ و ۷]:

$$q_{ult} = q_{PLT}\left(\frac{B_F}{B_P}\right) \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:

(q_{ult}): مقاومت نهایی پی؛ (q_{PLT}): مقاومت نهایی بارگذاری صفحه‌ای؛ (B_F): عرض پی؛ (B_P): عرض صفحه بارگذاری است.

www.SID.ir

Archive of SID

در جدول (۱) مدول الاستیسیته خاک‌های مختلف و نسبت پواسن آنها به‌صورت بازه‌ای تقریبی آورده شده‌است.

جدول (۱): مدول الاستیسیته خاک‌های مختلف [۵].

خاک	مدول الاستیسیته Es (Mpa)	نسبت پواسون، υ
رس: ● رس حساس؛ ● رس با سفتی متوسط تا سفت؛ ● خیلی سفت.	۲ - ۱۵ ۱۵ - ۵۰ ۵۰ - ۱۰۰	۰/۴ - ۰/۵ (زهکشی نشده)
لس	۱۵ - ۶۰	۰/۱ - ۰/۳
سیلت	۲ - ۲۰	۰/۳ - ۰/۳۵
ماسه ریز: ● شل؛ ● متوسط؛ ● متراکم.	۸ - ۱۲ ۱۲ - ۲۰ ۲۰ - ۳۰	۰/۲ - ۰/۳۵ ۰/۳ - ۰/۴
شن: ● شل؛ ● متوسط؛ ● متراکم.	۳۰ - ۸۰ ۸۰ - ۱۰۰ ۱۰۰ - ۲۰۰	۰/۲ - ۰/۳۵ ۰/۳ - ۰/۴

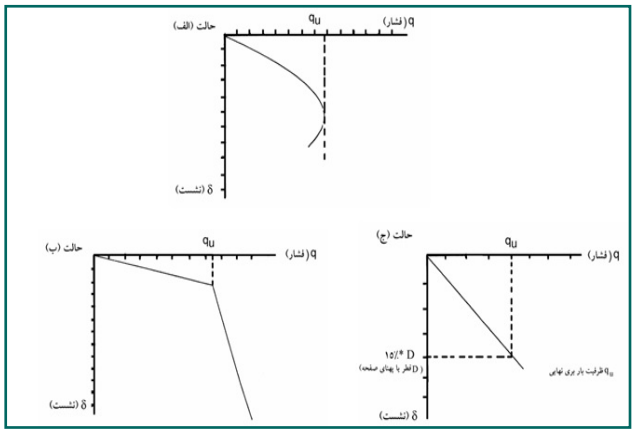
نتیجه آزمایش به‌صورت نموداری که نشان دهنده فشار وارد بر صفحه و نشست متناظر آن است، تهیه می‌شود. در این نمودار، یکی از حالت‌های (الف)، (ب) و یا (ج) در شکل (۵) دیده می‌شود. مقادیر نشست برای رسم منحنی‌ها، میانگین اندازه‌گیری‌های دست کم دو یا سه سنجشگر است.

حالت (الف): در این حالت، ظرفیت باربری نهایی، با بالاترین فشار ممکن، اندازه‌گیری شده‌است. نشست متناظر برای همین فشار، نشست نهایی صفحه است.

حالت (ب): در این حالت، تغییر شکل در پله‌ای از فشار نسبت به تغییر شکل در پله قبلی، آشکارا افزایش می‌یابد که نقطه شروع این تغییر چشمگیر، ظرفیت باربری نهایی به شمار می‌آید.

حالت (ج): در این حالت، نشست به‌طور مرتب رو به افزایش است، اما هیچ کدام از دو حالت (الف) یا (ب) پیش نمی‌آید. در این صورت، ظرفیت باربری نهایی، معادل مقدار متناظر با نشست صفحه، به میزان ۱۵ درصد قطر یا پهنای صفحه منظور می‌شود.

تبصره (۱): گاهی با رسم نمودار لگاریتمی، می‌توان نقطه را به آسانی و تمایز بیشتری شناسایی کرد.



شکل (۵): نمودار فشار – نشست [۴].

نتیجه‌گیری

با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای می‌توان به‌گونه‌ای موثر، ظرفیت باربری نهایی، ظرفیت باربری مجاز بر مبنای ملاحظات نشست و عامل مدول الاستیسیته را تعیین نمود. با توجه به این موضوع که عامل مدول الاستیسیته یکی از مهم‌ترین عوامل خاکی در بیان ویژگی‌های مهندسی خاک است، در مقاله حاضر نتایج بیش از ۱۲ مورد آزمایش بارگذاری در محدوده مورد مطالعه در جدول (۲) برای جنس ریزدانه و جدول (۳) برای جنس درشت‌دانه ارائه شده‌است. همان‌طور که در نمودار شکل (۶) نشان داده شده‌است، با افزایش عمق به دلیل افزایش تراکم لایه‌های خاک، میزان مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد و همچنین با تفکیک لایه‌بندی خاک محدوده مورد مطالعه، میزان مدول الاستیسیته برای جنس ریزدانه بالایی برابر با $92kg/cm^2$ و برای جنس درشت‌دانه میانی برابر با $541kg/cm^2$ برآورد می‌شود.

شکل (۷) نمودار بار – نشست حاصل از تحلیل نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در موقعیت مترو خط ۲ اصفهان – ایستگاه امام علی و چاهک TPII-N2 در جنس خاک ریزدانه را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

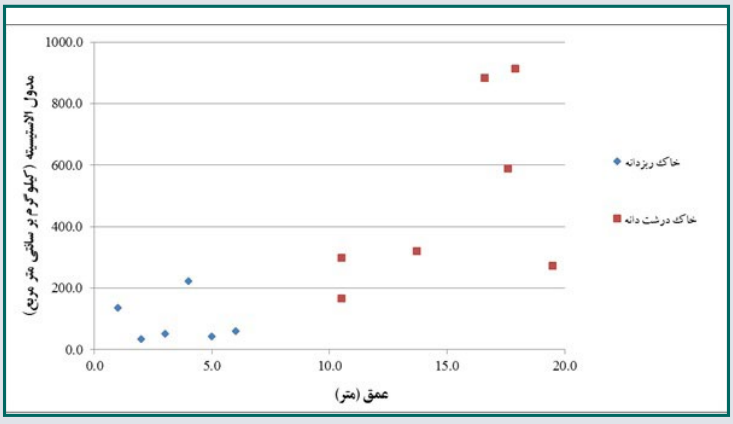
Archive of SID

جدول (۲): نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری انجام شده در جنس ریزدانه.

ردیف	جنس خاک	عمق (متر)	مدول الاستیسیته Es, kg/cm²
۱	ریزدانه	۶/۰	۱۳۶
۲		۶/۵	۳۵
۳		۶/۵	۵۲
۴		۷/۵	۲۲۳
۵		۹/۰	۴۳
۶		۹/۵	۶۰
میانگین مدول الاستیسیته (kg/cm²)			۹۲

جدول (۳): نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری در جنس درشت‌دانه.

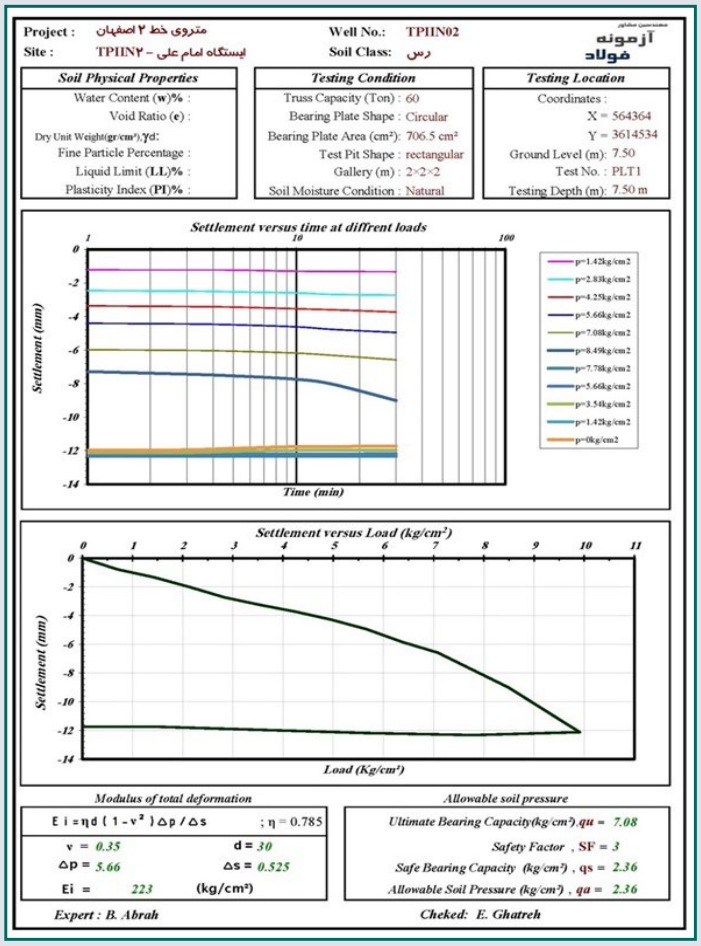
ردیف	جنس خاک	عمق (متر)	مدول الاستیسیته Es, kg/cm²
۱	درشت‌دانه	۱۰/۵	۱۶۷
۲		۱۰/۵	۲۹۸
۳		۱۳/۷	۳۲۰
۴		۱۶/۶	۸۸۳
۵		۱۶/۶	۸۸۳
۶		۱۷/۶	۵۸۹
۷		۱۷/۹	۹۱۴
۸		۱۹/۵	۲۷۳
میانگین مدول الاستیسیته (kg/cm²)			۵۴۱



شکل (۶): نمودار مدول الاستیسیته بر حسب عمق مسیر مترو خط ۲ اصفهان.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۷): نمودار بارگذاری – نشست در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در عمق ۷/۵ متر چاهک TPII-N02.

پی‌نوشت

۱. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان، مهندسین مشاور آزمونه فولاد

۲. کارشناس ارشد ژئوتکنیک، مهندسین مشاور آزمونه فولاد

3. Page load test (PLT)

4. Opencut

5. Tunnel boring machine

مراجع

[۱] ابره، ب، قارونی‌نیک، م، قطره سامانی، ع، تعیین عوامل ژئوتکنیکی مسیر متروی خط ۲ اصفهان با تکیه بر نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، پنجمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، آبان ماه ۱۳۹۵.

[۲] سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۹۵.

[۳] پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ اصفهان.

[۴] وزارت نیرو، معاونت پژوهش و مطالعات پایه، «آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی خاک و سنگ نرم، کاربرد، روش و تفسیر»، نشریه ۲۳۱-الف، خرداد ۱۳۸۴.

[5] AASHTO (1995), Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA

[۶] نشریه شماره ۲۲۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در مطالعات ژئوتکنیک، ۱۳۸۰.

[7] Chopra, M., Luis, G., Marin, S., Mercado, J., Comparsion of standard peneteration test (SPT) N-value with alternative field test methods in determining modulus for settlement prediction, Depot of Civil, Environmental and Construction Engineering, Univ. Orlando, FL.

www.SID.ir