

تخمین خواص ژئوتکنیکی خاک رس با استفاده از آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی (DCP)

بهروز صمدیان^{۱*}

علی فاخر^۲

چکیده

آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی (DCP)، بیشتر برای کنترل عملیات خاکی در راهسازی مورد استفاده قرار گرفته و کمتر این آزمایش برای شناسایی ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی و هسته سدها بکار رفته است. در این تحقیق، قابلیت آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس بررسی شده است. بدین منظور در نقاط مختلف شهر سنندج که دارای خاک رس هستند، ۶ چاه تا عمق حداکثر ۱۵ متر به روش دستی حفاری و در هر یک متر درون چاه‌ها، ۳ سری آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی انجام و تکرار گردید. جهت تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رس، در ترازهای ۱ متری، نمونه‌برداری و سپس بر روی نمونه‌ها، آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل رطوبت، دانه‌بندی، وزن مخصوص، خواص خمیری و سه-محوری انجام شدند. بر اساس تحقیق حاضر، آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی در خاک رس سنندج، تکرارپذیری قابل قبول دارد ($CoV < 30\%$). همچنین نشان داده شد که توزیع اندازه دانه‌ها و رطوبت خاک رس بر روی نتایج آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی تأثیرگذار بوده و با توجه به ضریب تعیین بدست آمده ($R^2 \geq 0.84$) همبستگی نسبتاً خوبی میان نشانه روانی، وزن مخصوص خشک و چسبندگی خاک رس با آزمایش DCP وجود دارد.

واژه‌های کلیدی

خاک رس، نفوذ مخروط دینامیکی (DCP)، خواص ژئوتکنیکی، آزمایش‌های آزمایشگاهی

^۱ استادیار گروه عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران b_samadian@yahoo.com

^۲ استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مقدمه

شناسایی لایه‌های زیرسطحی به واسطه آزمایش‌های آزمایشگاهی مستلزم حفاری و تهیه نمونه مناسب است در حالیکه در آزمایش‌های برجا نیازی به نمونه‌برداری نیست و نمونه در شرایط واقعی تر آزمایش می‌شود. آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی (DCP^1) یکی از آزمایش‌های برجای سبک، استاندارد، ارزان قیمت، غیرمخرب، سریع و قابل حمل است که به طور گسترده جهت شناسایی لایه‌های روسازی راه استفاده شده است. در سال‌های اخیر محققین مطالعات زیادی با این ابزار جهت تعیین خواص مهندسی خاک‌ها و کنترل تراکم عملیات خاکی انجام داده و نشان دادند روابط تجربی خوبی بین نتایج این آزمایش با نسبت باربری کالیفرنیا (CBR^2) آزمایشگاهی و برجا، مدول الاستیسیته، وزن مخصوص خشک، خواص خمیری و مقاومت برشی خاک‌ها وجود دارد. کلین و ساواج^۳ در سال ۱۹۸۲ ابزار DCP را جهت استفاده در طراحی روسازی راه گسترش داده و روابطی تجربی میان نتایج این آزمایش و CBR برجا ارائه کردند. هریسون^۴ در سال ۱۹۸۷ ابزار DCP را جهت تعیین مقدار CBR آزمایشگاهی لایه‌های روسازی راه بکار برده و روابطی بین CBR و مقدار نفوذ ابزار DCP ارائه کرد. ساوانگسوریا و ادیل^۵ در سال ۲۰۰۵ از ابزار DCP جهت تعیین مقاومت خاک‌های ماسه رس‌دار و شن رس‌دار و همچنین خاک‌های بسیار سست قبل و بعد از تثبیت با آهک استفاده کردند. آبرز^۶ و همکاران، (۱۹۸۹) و محمدی و همکاران، (۲۰۰۸) ابزار DCP را جهت تعیین مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای شامل خاک‌های ماسه‌ای و ماسه شن‌دار بکار بردند. آنها نشان دادند می‌توان با انجام آزمایش DCP ، مقاومت برشی برجای خاک‌های دانه‌ای را بدست آورد. سالگادو و یون^۷ ۲۰۰۲ تحقیقاتی را جهت ارزیابی ابزار DCP به منظور تعیین مشخصه‌های مصالح دانه‌ای سابگرید شامل وزن مخصوص خشک و رطوبت انجام داده و همبستگی میان مشخصه‌های خاک دانه‌ای و مقدار نفوذ نوک ابزار DCP ارائه کردند. همچنین ابوفرسخ^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۵ تحقیقات

گسترده‌ای برای کنترل لایه‌های روسازی راه در مقاطعی از بزرگراهها انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که بین نتایج آزمایش‌های DCP و CBR و همچنین بین آزمایش‌های DCP و بارگذاری صفحه‌ای (PLT^9) همبستگی خوبی وجود دارد. همچنین آنها نشان دادند با ابزار DCP می‌توان افزایش سختی و مقاومت را به دلیل تراکم لایه‌های خاکریزی تشخیص داد. لی^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۴ از ابزار ساده و غیرمخرب DCP برای شناخت خواص مهندسی خاک‌های ماسه‌ای استفاده کردند. آنها با متراکم نمودن خاک‌های ماسه‌ای در آزمایشگاه و تحت انرژی‌های مختلف، سختی و مقاومت خاک را با ابزار DCP تخمین زدند. یانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵) مشخصات مهندسی لایه سابگرید در روسازی راه را با آزمایش DCP و آزمایش CBR ارزیابی نمودند. در آن تحقیق ابزار DCP در میدان و مدلسازی آزمایشگاهی بکار برده شد و بر اساس میزان نفوذ DCP مقدار CBR تخمین زده شد. هاشمی و نیکودل در سال ۲۰۱۶ در ۶ سایت از ابزار DCP بجای آزمایش نفوذ استاندارد (SPT^{12}) جهت ارزیابی روانگرایی خاک‌های دانه‌ای ریز استفاده کردند. از آنجاییکه آزمایش SPT در بسیاری از کشورها جهت طراحی پی استفاده می‌شود، بدین منظور برخی از محققین در صدد یافتن ارتباط بین دو آزمایش SPT و DCP شدند. آمپادو^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۱۸ روابطی را بین آزمایش‌های DCP و SPT برای دو گروه خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه که بالاتر و پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی قرار داشتند ارائه کردند. همچنین غلامی و همکاران در سال ۲۰۲۲ همبستگی آزمایش‌های DCP و SPT را در خاک‌های دانه‌ای ریز بدون چسبندگی، با ملاحظه اثر اصطکاک میله DCP بر روی مقدار نفوذ ابزار DCP ، بررسی و روابطی ارائه کردند.

با توجه به آنچه گفته شد اغلب تحقیقات انجام گرفته با ابزار DCP ، بر روی خاک‌های دانه‌ای و به منظور کنترل لایه‌های سابگرید، زیراساس و اساس روسازی راه و همچنین ارزیابی روانگرایی خاک‌های دانه‌ای ریز بوده و مطالعه کمی در خصوص شناسایی خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی جهت طراحی

Abu-Farsakh#
Plate Load Test#
Lee #TM
Yang #^۳
Standard Penetration Test#^{۱۲}
Ampadu#^{۱۳}

Dynamic Cone Penetration#
California Bearing Ratio#
Kleyn & Savage#
Harison#^۴
Sawangsurriya & Edil#
Ayers #
Salgado & Yoon#

فرسایش و تشکیل رسوبات آبرفتی کواترنری شده است. حداکثر ضخامت لایه‌های آبرفتی سنندج در مرکز شهر به ۴۰m می‌رسد و هر چه از مرکز شهر سنندج دورتر می‌شویم ضخامت رسوبات آبرفتی کمتر می‌گردد (صمدیان و فاخر، ۲۰۱۶).

حفاری و نمونه برداری

به منظور انجام آزمایش میدانی DCP به همراه آزمایش‌های آزمایشگاهی، ۶ چاه به شماره‌های T₁ تا T₆ در مناطق مختلف سنندج که عمدتاً دارای خاک رس هستند، به روش دستی حفاری شدند. شکل (۲) محل چاه‌ها را بر روی نقشه معابر سنندج نشان می‌دهد. مقطع چاه‌ها، دایره‌ای شکل با قطر ۱/۲m و حداکثر عمق آنها ۱۵m است. در جدول (۱) عمق چاه‌ها نشان داده شده است. چاه‌ها به صورت مقطعی تا عمق ۱m حفاری و سپس نمونه‌های دست خورده و دست نخورده با مغزه‌گیر مطابق استاندارد (ASTM D2937³) تهیه گردیدند. پس از نمونه‌برداری از خاک رسی، مجدداً حفاری تا ۱ متر انجام و نمونه‌برداری تکرار شد. بدین ترتیب حفاری و نمونه‌برداری به همین روش تا عمق مد نظر (مثلاً ۱۵m) ادامه یافت. شکل (۳) نمونه‌برداری در چاه T₂ را در عمق ۸ متری نشان می‌دهد.

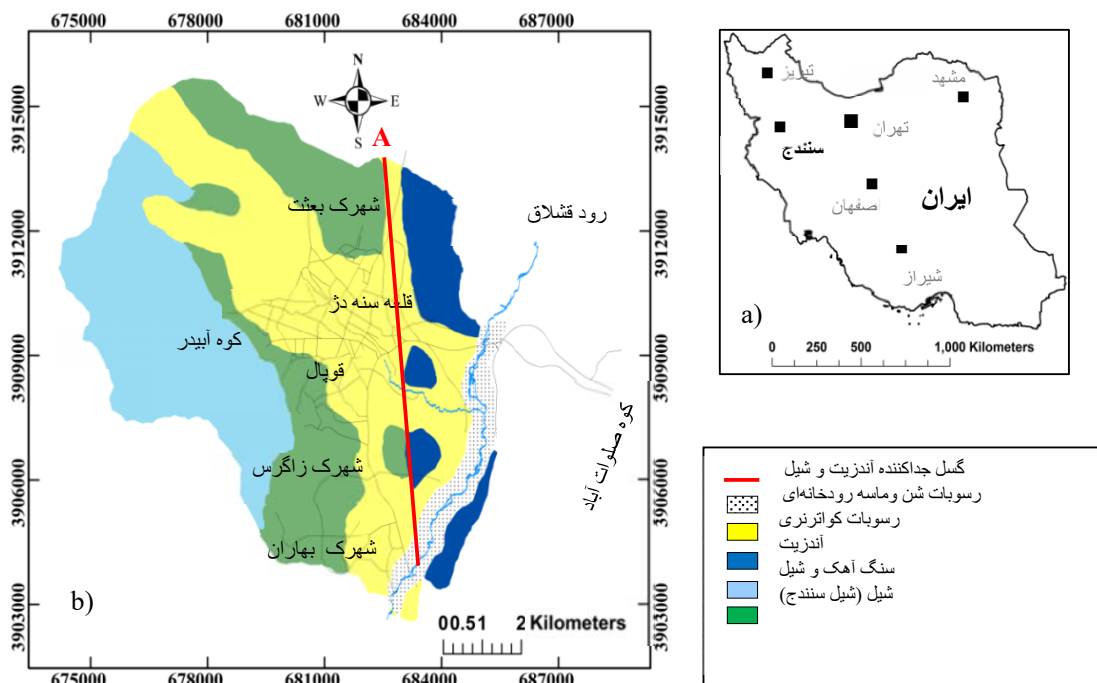
ابزار آزمایش DCP

آزمایش میدانی DCP، یک آزمایش نفوذ برجای سبک و قابل حمل جهت تعیین پارامترهای خاک است که توسط اسکاللا^۴ در سال ۱۹۵۶ در استرالیا توسعه یافت. مکانیسم این ابزار ترکیبی از دو آزمایش برجای SPT و CPT^۵ است (سالگادو و یون، ۲۰۰۲). جزییات و نحوه استفاده ابزار آزمایش DCP در استاندارد (ASTM D6951) تشریح شده است. این ابزار از دو قسمت تشکیل شده و قسمت بالایی آن شامل دسته جهت نگهداری ابزار، میله‌ای با قطر ۱۶mm، یک چکش به وزن ۷۸/۵N و با ارتفاع

عملیات خاکی و طراحی پی انجام شده است. هدف از انجام تحقیق حاضر امکان سنجی بکارگیری ابزار سبک و ارزان DCP در داخل چاه به منظور شناخت لایه‌های خاک رس و همچنین امکان استخراج روابط تجربی و درجه همبستگی میان خصوصیات مقاومتی خاک رس با نتایج آزمایش DCP است. از آنجاییکه قسمتی از خاک‌های آبرفتی سنندج رسی می‌باشد و ابنیه بر روی آن ساخته می‌شود لذا شناخت خصوصیات این خاک با ابزار DCP مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور در سایت‌های مختلف شهر سنندج و با حفر چاه‌ها، آزمایش DCP انجام و پس از بررسی تکرارپذیری آنها، یکسری آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل رطوبت، دانه‌بندی، خواص خمیری، وزن مخصوص و سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده، جهت مقایسه با نتایج آزمایش DCP انجام گردید. با توجه به آنکه شناخت خواص مهندسی خاک رس، جهت طراحی و ساخت عملیات خاکی و همچنین طراحی پی ضروری می‌باشد، لذا شناسایی مشخصه‌های خاک رس با آزمایش DCP علاوه بر سهولت و سریع بودن، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی عمومی منطقه و موقعیت شهر سنندج
زمین‌شناسی، نقش مهمی در تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها دارد (فاخر و همکاران، ۲۰۰۷). ناحیه سنندج از واحدهای سنگی شیل، سنگ آهک و سنگ‌های آتشفشانی که همگی متعلق به کرتاسه پسین هستند و همچنین رسوبات آبرفتی کواترنری تشکیل شده است (زاهدی، ۱۳۶۹). صمدیان و فاخر در سال ۲۰۱۶ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را ارائه کردند. در این نقشه که در شکل (۱) نشان داده شده است قسمت عمده شهر سنندج بر روی رسوب‌های آبرفتی قرار دارد. خاک آبرفتی سنندج عمدتاً رسی و مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS^۱)، رس با خاصیت خمیری کم (CL^۲) می‌باشد. رفتار خاک‌های آبرفتی رسی متأثر از مراحل رسوبگذاری، فرسایش، تحکیم و شرایط آب زیرزمینی است. وجود گسل‌ها، رودها (همانند قشلاق و دره بیان) و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، باعث تسریع

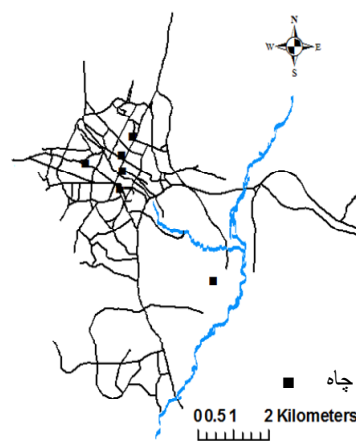


شکل (۱): (a) نقشه ایران (b) نقشه زمین شناسی سنندج (صمدیان و فاخر، ۲۰۱۶)



شکل (۲): نمونه برداری در چاه T2 در عمق ۸m

سقوط ۵۷۵mm و یک سندان ۱۰۰۰mm با قطر mm ۱۶، یک نوک مخروطی شکل به قطر ۲۰mm و با زاویه ۶۰ درجه، و یک خط کش جهت اندازه گیری میزان نفوذ است.



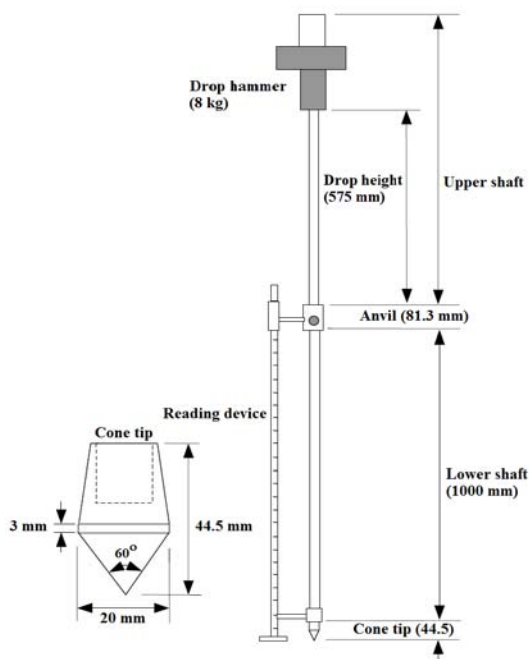
شکل (۳) چاه های حفاری شده

در شکل (۴) جزئیات ابزار نشان داده شده است. نحوه استفاده از ابزار بدین شکل است که پس از استقرار ابزار به صورت قائم در محل مورد نظر، چکش تا ارتفاع ۵۷۵mm بالا برده و رها می شود. در اثر ضربه چکش به سندان، نوک مخروطی شکل در داخل خاک نفوذ کرده و مقدار نفوذ اندازه گیری و ثبت می شود. به همین ترتیب این عمل تا عمق مورد نظر تکرار می گردد. شیب تعداد ضربات نسبت به عمق نفوذ به عنوان شاخص نفوذ مخروط

در خاک رسی بکار گرفته شده است، از اثر اصطکاک و محدود کننده‌های قائم بر نتایج آزمایش DCP صرف نظر شد.

آزمایش های آزمایشگاهی

جهت تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رس سنج، یکسری آزمایش‌های آزمایشگاهی مطابق استاندارد ASTM برنامه‌ریزی گردید. این آزمایش‌ها شامل رطوبت، دانه‌بندی، خواص خمیری، وزن مخصوص و همچنین آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته زهکشی- نشده بود. تعداد آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۴): ابزار DCP

دینامیکی یعنی DPI^۱ محاسبه می‌شود. در رابطه (۱) نحوه محاسبه DPI نشان داده شده است.

$$DPI = \frac{P_{i+1} - P_i}{B_{i+1} - B_i} \quad (1)$$

در این رابطه، DPI شاخص نفوذ مخروط دینامیکی بر حسب میلی‌متر بر ضربه (mm/blow)، مقدار نفوذ در i یا $i+1$ ضربه چکش بر حسب میلی‌متر و B تعداد ضربات در i یا $i+1$ ام چکش است. برای برقراری رابطه میان نتایج آزمایش DCP با خواص مهندسی خاک، مقدار DPI برای یک طول نفوذ مشخص به دو روش الف) میانگین حسابی و یا ب) میانگین وزنی محاسبه می‌شود (ادیل و بنسون^۲، ۲۰۰۵). در این مطالعه از میانگین حسابی برای طول ۳۰۰ mm استفاده شده است.

انجام آزمایش DCP

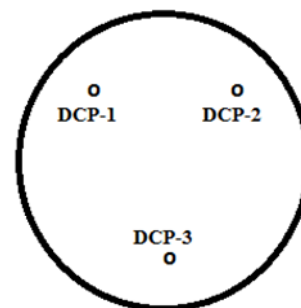
از آنجائیکه ابزار آزمایش DCP برای شناسایی تا عمق ۱ متری لایه‌های خاک (لایه‌های روسازی) بکار گرفته شده در این تحقیق نیز، این آزمایش تا عمق ۱ متری در درون چاه حفاری شده، انجام و نتایج آن شامل تعداد ضربات و عمق نفوذ ثبت گردید. پس از آن، تا ۱ متر دیگر حفاری چاه ادامه داشته و سپس آزمایش DCP انجام و به همین ترتیب این عمل به صورت مقطعی تا عمق مورد نظر تکرار شده است. جدول (۱) تعداد آزمایش‌های DCP انجام گرفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه اینکه هنگام نفوذ میله DCP در خاک، امکان قائم ماندن کامل میله از بین رفته و در نتیجه اصطکاک بین میله ابزار و خاک بوجود می‌آید. به طور معمول اثر اصطکاک در خاک‌های دانه‌ای با اعمال ضربی در تعداد ضربات DCP اصلاح می‌شود اما در خاک‌های چسبنده اثر اصطکاک اندک و قابل چشم پوشی است (لیونه^۳، ۲۰۰۰). همچنین تحقیقات زیادی در مورد اثر محدود کننده‌های قائم بر نتایج DCP در انواع خاک‌ها انجام شده است. بر اساس این تحقیقات، در خاک چسبنده محدود کننده‌های قائم، بر نتایج DCP تاثیر ندارد (لیونه و ایشای^۴، ۱۹۹۵). بنابر آنچه گفته شد بدلیل آنکه در تحقیق حاضر، ابزار DCP

جدول (۱): تعداد آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق

چاه	عمق (m)	آزمایش DCP	وزن مخصوص	رطوبت	دانه‌بندی	خواص خمیری	سه محوری uu
T ₁	۱۰	۳×۹	۹	۹	۹	۹	۳
T ₂	۱۰	۳×۸	۸	۸	۸	۸	۳
T ₃	۱۰	۳×۹	۹	۹	۹	۹	۳
T ₄	۱۵	۳×۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۳
T ₅	۱۵	۳×۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۳
T ₆	۸	۳×۷	۷	۷	۷	۷	۳

شده است. لازم به ذکر است در چاه T₂ تا عمق ۲m و در سایر چاه‌ها تا عمق ۱m خاک دستی وجود داشته و هیچ آزمایشی در خاک دستی انجام نگردید.

ضریب تغییرات برای آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) که یک آزمایش نفوذ دینامیکی فوق سنگین است بین ۲۷ الی ۸۵ درصد گزارش شده است گرچه ضریب تغییرات کمتر از ۳۰ درصد برای این آزمایش توصیه شده است (لی^۲ و همکاران، ۱۹۸۳). برای آزمایش DCP در صورتیکه ضریب تغییرات کمتر از ۳۰ درصد باشد، نتایج آزمایش تکرارپذیری قابل قبولی دارند (محمدی و همکاران، ۲۰۰۸). جدول (۲) نتایج ضریب تغییرات ۳ سری آزمایش DCP انجام گرفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. همانطوریکه از جدول (۲) مشخص است متوسط ضریب تغییرات در تمامی سایت‌ها از ۳۰ درصد کمتر است. در چاه T₁ مقدار تجاوز ضریب تغییرات از ۳۰ درصد به مقدار ۲۱/۱۱ درصد است. شایان ذکر است که در بررسی همبستگی بین آزمایش DCP و خواص ژئوتکنیکی خاک رس، از نتایج آزمایش DCP در چاه T₁ چشم پوشی گردید. در چاه T₃ مقدار ضریب تغییرات به میزان ۱/۱۱ درصد از ۳۰ درصد تجاوز نموده که به دلیل ناچیز بودن، از نتایج آزمایش در این چاه جهت ارائه روابط استفاده شد. مطابق نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، در چاه T₁ خاک رس از لحاظ قوام، نرم و در سایر چاه‌ها دارای سفتی متوسط تا زیاد بود. در چاه T₁، نرم بودن خاک رسی می‌تواند دلیل پراکندگی و افزایش ضریب تغییرات از حد مجاز و کم شدن دقت نتایج باشد.



شکل (۵): موقعیت انجام آزمایش DCP در چاه

نتایج آزمایشات و بحث

در این بخش ابتدا نتایج آزمایش‌های DCP و آزمایشگاهی ارائه و سپس تاثیر برخی از خواص مهندسی خاک رس بر نتایج آزمایش DCP ارزبایی و نهایتاً همبستگی‌های آزمایش DCP با برخی از خصوصیات مهندسی خاک رس ارائه گردید.

نتایج آزمایش DCP و تکرارپذیری آن

در این تحقیق، تکرارپذیری نتایج آزمایشات DCP در خاک رس مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ۳ سری آزمایش DCP در چاه‌ها انجام و کنترل تکرارپذیری نتایج با استفاده از ضریب تغییرات (CoV¹) انجام شد. شکل (۵) موقعیت ۳ سری آزمایش را درون چاه‌ها نشان می‌دهد. در شکل (۶) نیز نمودار تعداد ضربات چکش DCP در مقابل عمق نشان داده

میان مقدار ریزدانه (عبوری از الک نمره ۲۰۰)، ماسه و شن در رس با DPI به ترتیب برابر با $R^2=0/29$ ، $R^2=0/22$ و $R^2=0/15$ بود که نشان دهنده همبستگی ضعیف میان آنهاست و نتایج پراکندگی زیادی را نشان داده است. البته مطابق نتایج بدست آمده، افزایش مقدار ریزدانه در خاک رس، کاهش مقاومت خاک رس در مقابل نفوذ مخروط دینامیکی و افزایش درشت‌دانه در خاک رس، افزایش مقاومت رس را در مقابل نفوذ مخروط به همراه داشته که مشابه این تحقیق نیز به اثبات رسیده است (جورج^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). در آن تحقیق نشان داده شد هر چه مقدار ریزدانه در خاک متراکم شده بیشتر باشد مقاومت در مقابل نفوذ ابزار DCP کاهش و هر چه مقدار ماسه و شن بیشتر باشد مقاومت در مقابل نفوذ DCP افزایش می‌یابد.

تأثیر خواص خمیری خاک بر DPI

بر اساس تحقیقات کلین و ساواج در سال ۱۹۸۲ و همچنین حسان^۳ در سال ۱۹۹۶، از عوامل موثر بر نتایج آزمایش DCP می‌توان به رطوبت، دانه‌بندی، دانسیته و خواص خمیری خاک اشاره کرد. در این تحقیق همبستگی میان حدروانی (LL) و شاخص خمیری (PI) خاک رس با شاخص نفوذ مخروط دینامیکی (DPI) بررسی گردید. طبق آنالیز رگرسیونی، ضریب تعیین بدست آمده میان خواص خمیری و DPI، کمتر از ۰/۱ بود که بیانگر همبستگی ضعیف میان آنهاست. همچنین اثر رطوبت خاک رس بر DPI نیز بررسی شد که نتایج آن در شکل (۷) مشخص شده است. طبق معادله (۲) ارتباط میان رطوبت خاک رس و DPI دارای ضریب تعیین برابر با $R^2=0/50$ بود. همچنین این رابطه نشان می‌دهد افزایش رطوبت باعث افزایش DPI و یا کاهش مقاومت خاک در مقابل نفوذ مخروط دینامیکی می‌گردد.

$$y=1.3761x-10.98 \quad R^2=0.50 \quad (2)$$

جدول (۲): ضریب تغییرات آزمایش DCP در چاه های T₁ تا T₆

چاه	متوسط CoV %	CoV>۳۰ %
T ₁	۲۱/۷۱	۲۱/۱۱
T ₂	۱۰/۴۵	۰
T ₃	۱۲/۱۳	۱/۱۱
T ₄	۹/۵۸	۰
T ₅	۸/۰۴	۰
T ₆	۹/۳۱	۰

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی

همانطوریکه قبلاً اشاره شد برخی از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های تهیه شده از درون چاه‌ها، انجام گردید. در این بخش جهت اختصار فقط نتایج آزمایش‌ها در چاه T₁ در جدول (۳) نشان داده شده و از ارائه نتایج در سایر چاه‌ها خودداری شده است.

در این جدول LL حدروانی، PI نشانه پلاستیک، z رطوبت، γ_d وزن مخصوص خشک و c_u چسبندگی زهکشی-نشده خاک رس می‌باشد.

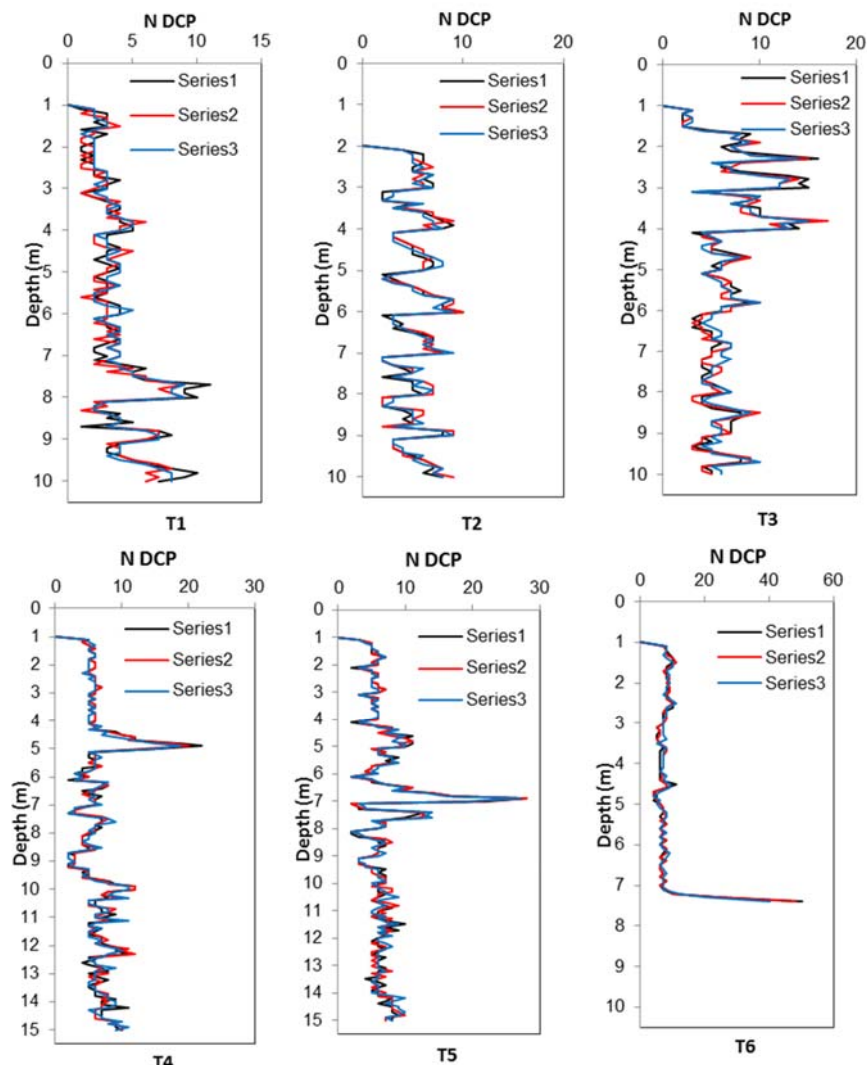
همبستگی آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی DCP با

خواص مهندسی خاک رس سنندج

در این تحقیق همبستگی میان آزمایش DCP و متغیرهای مهندسی خاک رس CL بررسی گردید. بدین منظور، رگرسیون‌های (i) نمایی، (ii) خطی، (iii) لگاریتمی (iv) چند جمله‌ای و (v) توانی کنترل شد و معادله‌ای که دارای ضریب تعیین (R^2) بیشتری بود به عنوان بهترین همبستگی ارائه گردید.

تأثیر مقدار ریزدانه، ماسه و شن در خاک رس بر DPI

سختی و مقاومت خاک علاوه بر چگالی نسبی، به توزیع اندازه دانه‌ها و مقدار ریزدانه نیز بستگی دارد (میشل و سوگا^۱، ۲۰۰۵). بنابراین تأثیر مقدار ریزدانه، ماسه و شن در خاک رس سنندج در مقابل شاخص نفوذ مخروط دینامیکی (DPI) بررسی شد. مطابق نتایج بدست آمده ضریب تعیین



شکل (۶): تعداد ضربات DCP در مقابل عمق برای جاه‌های T1 تا T6

در رابطه (۳) شاخص روانی، z رطوبت، LL حد روانی و PI نشانه خمیری است. در تحقیق حاضر، همبستگی میان شاخص روانی و DPI بررسی و در شکل (۸) ارائه گردید. با توجه به ضریب تعیین در معادله (۴)، می‌توان گفت که همبستگی خوبی میان دو پارامتر وجود دارد.

$$LI = 46.868(DPI) + 6.312 \quad R^2 = 0.84 \quad (4)$$

مطابق این رابطه هرچه DPI بیشتر و یا به عبارت دیگر مقاومت خاک رس در مقابل نفوذ مخروط دینامیکی کمتر باشد مقدار شاخص روانی بیشتر است.

بنابر آنچه گفته شد همبستگی خوبی میان خواص خمیری و رطوبت خاک رس با نتایج آزمایش DCP وجود ندارد و به منظور ایجاد همبستگی بهتر، ترکیب پارامترهای خواص خمیری و رطوبت مورد توجه قرار گرفت. یکی از معیارهای قوام خاک‌های ریزدانه شاخص روانی (LI) است (داس، ۲۰۰۸). شاخص روانی ترکیبی از خواص خمیری و رطوبت است که در رابطه (۳) ارائه شده است.

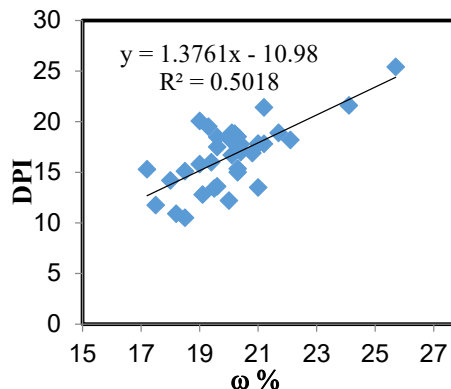
$$LI = \frac{z - LL}{PI} \quad (3)$$

جدول (۳): نتایج آزمایش های آزمایشگاهی در چاه T₁

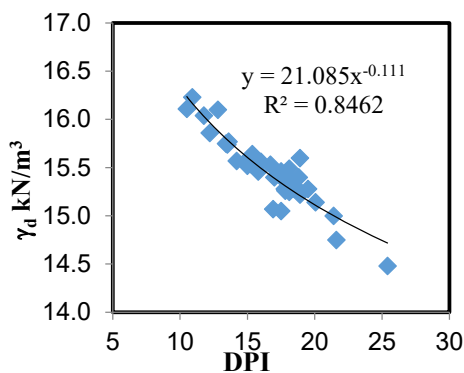
عمق (m)	نوع خاک USCS	Fine %	Sand %	Gravel %	LL %	PI %	z %	z _d (kN/m ³)	c _u kN/m ²
۱/۵	CL	۶۵/۳	۳۲/۱	۲/۶	۴۲	۲۶	۲۰/۱	۱۳/۸۱	-
۲/۵	CL	۵۳/۶	۴۶/۴	۰/۵	۴۳	۲۸	۱۹/۶	۱۳/۸۰	۴۴
۳/۵	CL	۷۸/۷	۲۰/۸	۰/۶	۴۲	۲۳	۲۳/۱	۱۴/۲۶	-
۴/۵	CL	۷۹/۸	۱۹/۹	۰/۳	۳۵	۱۷	۲۰/۹	۱۴/۲۴	-
۵/۵	CL	۶۰/۶	۳۸/۴	۱/۰	۳۳	۱۲	۲۳/۳	۱۳/۰۷	۵۰
۶/۵	CL	۶۶/۶	۲۷/۲	۶/۲	۴۰	۱۹	۲۵/۳	۱۳/۶۶	-
۷/۵	CL	۵۵/۰	۳۲/۰	۱۳/۰	۳۴	۱۶	۲۲/۵	۱۳/۹۲	-
۸/۵	CL	۷۱/۸	۲۴/۵	۳/۷	۳۹	۱۸	۲۵/۴	۱۳/۷۸	۵۷
۹/۵	SC	۴۹/۱	۲۹/۹	۲۱/۰	۲۹	۱۴	۱۹/۴	۱۴/۷۳	-

تاثیر وزن مخصوص خشک (γ_d) بر DPI

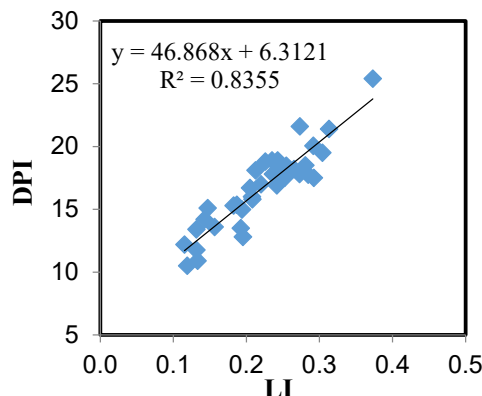
مطابق نتایج آزمایش DCP در خاک رس سنج می توان تاثیر وزن مخصوص خشک بر DPI را در شکل (۹) برای خاک رس (CL) نشان داد. مطابق این شکل افزایش وزن مخصوص خشک باعث افزایش مقاومت خاک رس در مقابل نفوذ مخروط می گردد و بنابراین DPI کاهش می یابد. معادله (۵) رابطه بین دو پارامتر DPI و وزن مخصوص خشک را نشان می دهد. ضریب تعیین در این رابطه برابر $R^2=0.84$ می باشد که نشان دهنده رابطه خوب میان دو پارامتر است.



شکل (۷): تغییرات رطوبت در مقابل DPI



شکل (۹): نمودار وزن مخصوص خشک در مقابل DPI



شکل (۸): تغییرات نشانه روانی (LI) در مقابل DPI

$$z_d \text{ (kN/m}^3\text{)} = 21.085 \cdot \text{DPI}^{-0.11} \quad R^2 = 0.84 \quad (۵)$$

مطابق تحقیقات قبلی انجام شده مقدار DPI تابعی از رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک است (ابوفرسخ و همکاران،

۲۰۰۵). همچنین سالگادو و یون در سال ۲۰۰۲ ارتباط بین DPI و وزن مخصوص خشک خاک ماسه رس دار را به وسیله رابطه (۶) ارائه کردند. در معادله (۶) از پارامترهای بدون بعد وزن مخصوص آب γ_w و تنش موثر σ'_v استفاده شده است.

$$\sigma'_v = (10^{1.5} \times DPI^{-0.14} \times \sqrt{\frac{\sigma'_v}{P_A}})^{0.5} \times \gamma_w \quad (6)$$

در رابطه (۶) تنش موثر در عمق مد نظر، P_A تنش مرجع (100 kPa)، DPI شاخص نفوذ بر حسب mm/blow و γ_w وزن مخصوص آب است.

تاثیر چسبندگی (c_u) بر DPI

تاثیر مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای بر نتایج DCP قبلاً توسط محققین بررسی و روابطی ارائه شده است. علاوه بر رابطه بین مقاومت برشی و DCP برای خاک دانه‌ای، ارتباط میان آزمایش DCP و مقاومت فشاری تک محوری خاک چسبنده، توسط سالگادو و یون در سال ۲۰۰۲ و همچنین لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است.

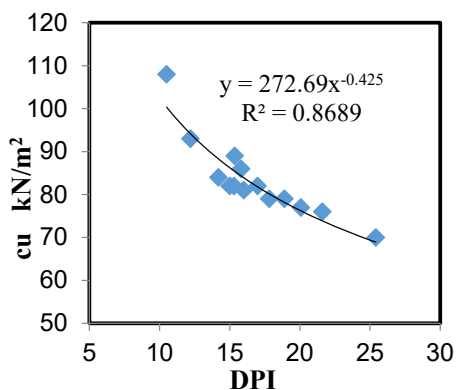
در این مطالعه نیز همبستگی میان چسبندگی زهکشی نشده (c_u) خاک رس (CL) و آزمایش DCP بررسی و ارتباط آنها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مطابق این شکل وقتی که چسبندگی خاک افزایش می‌یابد شاخص نفوذ دینامیکی کاهش را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در معادله (۷) ضریب تعیین برابر با $R^2=0.87$ می‌باشد بنابراین همبستگی خوبی میان دو پارامتر برقرار بوده و از نتایج آزمایش DCP می‌توان برای تخمین c_u استفاده کرد.

خلاصه و نتیجه‌گیری

آزمایش DCP یک آزمایش صحرایی سریع و ارزان قیمت است که می‌تواند برای شناسایی لایه‌های خاک رس در داخل چاه‌ها بکار گرفته شود. در این مطالعه، یکسری آزمایش‌های میدانی DCP در داخل ۶ چاه به همراه آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل دانه‌بندی، رطوبت، وزن مخصوص، خواص خمیری و سه‌محوری بر روی خاک رس (CL) سنج انجام شد. نتایج آزمایش‌های DCP انجام گرفته بر روی این خاک نشان داد که این آزمایش بجز خاک رسی نرم، دارای تکرار پذیری قابل قبول می‌باشد به طوریکه ضریب تغییرات از ۳۰ درصد کمتر است. اما برای خاک رسی نرم ضریب تغییرات به مقدار ۲۱/۱۱ درصد از ۳۰ درصد تجاوز کرده است. بر اساس نتایج این تحقیق، تاثیر توزیع اندازه دانه‌ها در خاک رس شامل مقدار ریزدانه، شن و ماسه و همچنین رطوبت خاک رس، بر روی مقاومت نفوذ مخروط دینامیکی دارای پراکندگی زیاد بوده به طوریکه بر مبنای آنالیز رگرسیون، ضریب تعیین کمتر از ۰/۵۰ بدست آمد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد همبستگی میان نتایج آزمایش DCP با شاخص روانی، وزن مخصوص خشک و چسبندگی زهکشی‌نشده وجود دارد. در جدول (۴) روابط بدست آمده در این مطالعه جهت تخمین پارامترهای LI، σ'_v و c_u با استفاده از نتایج آزمایش DCP نشان داده شده است. ضریب تعیین در این معادلات نشان دهنده همبستگی خوب میان پارامترهای ذکر شده با نتایج آزمایش DCP است.

جدول (۴): روابط استخراج شده در این تحقیق

پارامتر	روابط	ضریب تعیین	نوع همبستگی
LI	$LI=46.868(DPI)+6.312$	$R^2=0.84$	خطی
σ'_v	$\sigma'_v=21.085 \cdot DPI^{-0.11}$	$R^2=0.84$	توانی
c_u	$c_u=272.69(DPI)^{-0.425}$	$R^2=0.87$	توانی



شکل (۱۰): نمودار چسبندگی در مقابل DPI

$$c_u \text{ (kN/m}^2\text{)} = 272.69(DPI)^{-0.425} \quad R^2=0.87 \quad (7)$$

19- Kleyn, E. G., & Savage, P.E. (1982). "The Application of the Pavement DCP to Determine the Bearing Properties and Performance of the Road Pavements". International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trodheim, Norway.

20- Livneh, M. (2000). "Friction Correction Equation for the Dynamic Cone Penetrometer in Subsoil Strength Testing". Journal of the Transportation Research Board, 1714(1), 89-97.

21- Livneh, M., Ishai, I., & Livneh, N.A. (1995). "Effect of vertical confinement on dynamic cone penetrometer strength values in pavement and subgrade evaluations". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1473, 1-8 .

22- Lee, I.K., White, W., Ingles, O.G. (1983). "Geotechnical Engineering". Copp Clark Pitman, Inc, 57-89.

23- Lee, C., Kim, K.S., Woo, W., & Lee, W. (2014). "Soil Stiffness Gauge (SSG) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) tests for estimating engineering properties of weathered sandy soils in Korea". Eng. Geol, 169 , 91-99.

24- Mohammadi, M.R., Nikoudel, H., & Rahimi, M. (2008). "Application of the dynamic cone penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils". Eng. Geol, 101, 195-203.

25- Mitchell, J.K., & Soga, K. (2005). "Fundamentals of Soil Behavior". 3rd ed. John Wiley & Sons, New Jersey.

26- Scala, A.J. (1956). "Simple methods of flexible pavement design using cone penetrometers". N.Z.Eng, 11(2), 73-83.

27- Sawangsurriya, A., & Edil, T.B. (2005). "Evaluating stiffness and strength of pavement materials", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 158(4), 217-230.

28- Samadian. B., & Fakher. A. (2016). "Proposing a framework to combine geological and geotechnical information for city planning in Sanandaj (Iran) ". Eng. Geol, 209 , 1-11.

29- Salgado, R., & Yoon, S. (2002). "Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for Subgrade Assessment". Report No. FHWA/IN/JTRP-2002/30, SPR-2362.

30- Yang, B., Zhang, R., Zha, X., Liu, C., & Pan, Q. (2015). "Improved testing method of dynamic cone penetrometer in laboratory for evaluating compaction properties of soil subgrade". Road Materials and Pavement Design, 17(2), 487-498.

31- Zahedi, M. (1990). Description sanandaj quadrangle geological map with scale of 1:250000. Iran Geological Survey and Mineral Exploration Organization (In Persian).

مراجع

1- Abu-Farsakh, M., Nazzal, M.D., Alshibli, K., & Seyman, E. (2005). "Application of dynamic cone penetrometer in pavement construction control". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1913, 53-61.

2- Ampadu, S.I.K., Ayeh, F.F.J. & Boadu, F. (2018). "Deriving SPT N-Values from DCP Test Results: The Case of Foundation Design in a Tropical Environment". Geotech Geol Eng 36, 2517-2531. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0480-4>.

3- Ayers, M.E., Thompson, M.R., & Uzarski D.R. (1989). "Rapid shear strength evaluation of in situ granular materials". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1227, 134-146.

4- ASTM D2937-00. (2000). "Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Drive-Cylinder Method".

5- ASTM D6951. (2009). "Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications".

6- ASTM D422-63. (2002). "Standard test method for particle-size analysis of soils" .

7- ASTM D2216. (2002). "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass".

8- ASTM D2487-00. (2000). "Standard practice for classification of soils for engineering purposes".

9- ASTM D2850 -03a. (2003). "Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils".

10- ASTM D4318-00. (2000). "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils".

11- Das, B.M. (2008). "Advanced Soil Mechanics". 3th edition, Taylor & Francis. New York, NY 10016, USA.

12- Edil, T.B., & Benson, C.H. (2005). "Investigation of the DCP and SSG as alternative methods to determine subgrade stability". SPR#0092-01-05. Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison (WHRP 05-14).

13- Fakher, A., Cheshomi, A., & Khamechian, M. (2007). "The addition of geotechnical properties to a geological classification of coarse grain alluvium a pediment zone". Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol, 40 , 163-174.

14- George, V., Nageshwar Rao, Ch., & Shivashankar, R. (2009). "Effect of Soil Parameters on Dynamic Cone Penetration Indices of Laterite Sub-grade Soils from India". Geotech Geol Eng, 27, 585-593.

15- Gholami, A., Palassi, M. & Fakher, A. (2022). "Estimation of SPT N Values from the Results of DCPT Counts After Elimination of the Soil Friction Effect". Indian Geotech J. <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00604-4>

16- Harison, A. (1987). "Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils". Proc. Instn Civ. Engrg, 2, 832-844.

17- Hashemi M, Nikudel M.R. (2016). "Application of dynamic cone penetrometer test for assessment of liquefaction potential". Eng Geol 208:51-62. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.013>

18- Hassan, A. (1996). "The Effect of Material Parameters on Dynamic Cone Penetrometer Results for Fine-Grained Soils and Granular Materials". Ph.D. Dissertation. Oklahoma State University. Stillwater. Oklahoma .

Estimating of geotechnical properties of clay soil with dynamic cone penetration (DCP) test

Behrooz Samadian*¹
Ali Fakher²

Dynamic cone penetration (DCP) test is used more in pavement design and construction, and less for subsurface geotechnical investigation and clay core dam. In the present article, evaluating geotechnical parameters of Sanandaj's clay in the western region of Iran using the DCP test was taken into account. Accordingly, 6 trial pits with maximum depths of 15 m were excavated manually in various sites of Sanandaj on clay soils (CL). During the excavation process, 3 series of DCP tests were carried out and repeated in the pits after excavating every one meter. The soil samples for the selected sites were also obtained for the laboratory tests including water content, grain size, Atterberg limits, and triaxial compression tests. Based on the results of the experiments, the DCP test was repeatable ($CoV < 30\%$). The relationships between Dynamic Penetration Index (DPI), liquid index (LI), undrained shear strength (C_u) and dry density (ρ_d) of the clay soil were also obtained with a high coefficient of determination ($R^2 > 83\%$). Using the DCP test, geotechnical properties of the clay (CL) can be investigated rapidly and inexpensively

Keywords

Clay soil, Dynamic Cone Penetration (DCP), Geotechnical Properties, Laboratory Tests

¹*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. b_samadian@yahoo.com

² Professor, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. afakher@ut.ac.ir