مقایسه نتایج آزمایشهایCPTuو آزمایشهای آزمایشگاهی در تعیین مقاومت برشی رسوبات نرم پل دریاچه ارومیه

نوشته: محمدرضا باغبان گل‌پسند[*] ، دکتر محمدرضا نیکودل[*] ،دکتر ابراهیم اصغری [**] ، و دکتر سیدشهاب‌الدین یثربی [***]

Comparison of CPTu Test and Laboratory Test Results in Determination of Shear Strength of Uromieh Lake Bridge Site Soils

By: M. B. Golpasand[*], Dr. M. Nikoudel, Dr. E. Asghari [**] & Dr. S. S. Yasrebi [***]

چکیده

در مطالعه حاضر، مقاومت برشی زهکشی نشده رسوبات نرم ساختگاه پل میانگذر دریاچه ارومیه با آزمایش CPTu اندازه‌گیری شده و مقادیر به دست آمده با نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده مقایسه شده است. آزمایشهای CPTu در ۸ گمانه تا عمق ۱۰۰ متری انجام شده است.

آزمایشهای تک محوری فشاری انجام شده بر روی نمونه‌های دست‌نخورده ماخوذه از اعماق ۲۰ تا ۳۰ متری، مقاومت برشی زهکشی نشده را بین ۰/۳ تا ۰/٤ کیلوگرم بر سانتی متر مربع را نشان داده در حالی که مقاومت برشی زهکشی نشده بدست آمده از CPTu برای این اعماق بین ۰/٤ تا ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. با وجود این که نمونه‌های دست نخورده با نمونه‌گیر جدار نازک (شلبی) اخذ شده بود ولی باز هم مقداری کاهش مقاومت به دلیل دستخوردگی دیده می‌شود. مقدار این کاهش بین ۳۰ تا ۷۰ درصد ارزیابی شده است. نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه‌های بازسازی شده نیز مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌ها را بین ۰/۱ تا ۰/۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داده است که اختلاف آن با مقاومت نمونه‌های دست‌نخورده حدود ٤ برابر و با مقدار مقاومت بدست آمده از آزمایشهای CPTu حدود ٥ برابر است. بنابر این رسوبات نرم دریاچه ارومیه حساسیت بالایی داشته و استفاده از آزمایشهای درجا مثل CPTu برای تعیین ویژگیهای مهندسی آنها مناسب است.

کلید واژه‌ها: آزمایش CPTu ، رسوبات نرم، دریاچه ارومیه، دستخوردگی نمونه،مقاومت برشی.

Abstract

In this study the undrained shear strength of soft soils of Uromieh Lake Bridge site is measured by CPTu and compared with the results of laboratory tests conducted on undisturbed and remolded samples. The CPTu tests conducted in 8 boreholes up to 100m.

Unconfined compression test conducted on the undisturbed samples from the depth 20 to 30 m showed 0.3 to 0.4 kg/cm^2 for undrained shear strength, meanwhile they are resulted 0.4 to 0.7 kg/cm^2 from CPTu tests for the same depths. In spite of the undisturbed samples are obtained by thin wall tubes, but a reduction in strength due to sample disturbance are appeared. This reduction is about 30 to 70 percent. The results of remolded samples showed about 0.1 to 0.12 kg/cm^2 for undrained shear strength. The difference between these values and the values resulted from undisturbed samples is about 4 times and the value of CPTu tests is about 5 times. Therefore the soft soils of Uromieh Lake are sensitive and in situ tests like CPTu is suitable and reliable for testing of them.

Keywords: CPTu test, Soft soil, Uromieh Lake, Sample disturbance , Shear Strength.

مقدمه

خاکهای ریزدانه گروه وسیعی از خاکها را تشکیل می‌دهند. این خاکها که معمولا به خاکهای چسبنده نیز موسوم است از نظر مهندسی ویژگیهای خاصی دارند که شناسایی آنها در اجرای طرحهای عمرانی در رو یا درون این گروه از خاکها بسیار مهم و تعیین‌کننده است. این گروه از خاکها از نظر

رسوب‌شناسی در محیطهای خاص و در شرایط ویژه‌ای تشکیل می‌شوند که نحوه تشکیل این رسوبات، یکی از عوامل تعیین کننده پارامترهای مهندسی آنها به شمار می‌رود. یکی از محیطهای رسوبی که رسوبات ریزدانه در آنها نهشته می‌شوند، محیطهای دریاچه‌ای است.

در این مقاله پارامترهای مهندسی رسوبات نرم دریاچه ارومیه با استفاده از آزمایش CPTu که در راستای مطالعات پل میانگذر دریاچه ارومیه انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج آن با نتایج بدست آمده از آزمایشهای آزمایشگاهی مقایسه شده است.

کلیاتی در مورد دریاچه ارومیه

دریاچه ارومیه در شمال باختری ایران و بین استانهای آذربایجان خاوری و باختری واقع شده است. این دریاچه در محدوده طول جغرافیایی ´۵ و°۴۵ تا °۴۶ خاوری و عرض جغرافیایی ´۵ و° ۳۷ تا ´۱۵و °۳۸ پهنای شمالی واقع شده و وسعتی معادل ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومتر مربع دارد. ارتفاع سطح آب دریاچه از دریاهای آزاد حدود ۱۲۹۰ متر است. طول آن حدود ۱۴۰ کیلومتر و پهنای آن متغیر بوده و در باریک‌ترین محل که حدود ۱۵ کیلومتر است، میانگذر دریاچه ارومیه ساخته شده است. در شکل ۱ موقعیت میانگذر دریاچه ارومیه بر روی عکس ماهواره‌ای منطقه نشان داده شده است. این میانگذر شامل ۱۳/۵ کیلومتر خاکریزی و حدود ۱۴۰۰ متر پل است. این پل که دو بخش خاکریزی شده دریاچه را به یکدیگر متصل می‌کند، حدود ۱۱ کیلومتر از ساحل باختری (کوه زنبیل) و ۳ کیلومتر از ساحل خاوری (جزیره اسلامی) فاصله دارد.

بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، مجموعه‌ای از انواع مختلف سنگهای آذرین، دگرگونی و رسوبی با سن پرکامبرین تا عهد حاضر در گستره دریاچه ارومیه برونزد دارند. صرفنظر از برخی تفاوتهایی بین بخش خاوری و باختری دریاچه، توالی نسبتاً کاملی (به استثنای چند نبود چینه‌ای) از نهشته‌های مختلف زمین‌شناسی در اطراف دریاچه دیده می‌شود که بیشتر آنها با سازندهای موجود در کوههای البرز قابل مقایسه‌اند (شهرابی، ۱۳۷۳). در مورد پی‌سنگ دریاچه و ژرف رسوبات آن، نظریه‌های مختلفی ارائه شده است. در نوشته‌ها و گزارشهای پیشین، ضخامت رسوبات دریاچه حدود ۴۰ تا ۴۵ متر تعیین شده است. در مطالعاتی ژئوفیزیکی، که اخیراً در مطالعات پل دریاچه ارومیه انجام شده است (شرکت فوگرو ۲۰۰۳)، ضخامت رسوبات در ناحیه پل میانگذر، حدود ۱۹۰ متر تعیین شده است. جنس سنگ پی هم در این بخش از نوع برشهای آتشفشانی و سایر سنگهای آذر آواری دانسته شده است.

مارن و ماسه‌سنگ قرمز بالایی در شمال دریاچه گسترش نسبتاً زیادی دارد. وجود لایه‌ها و عدسیهای حاوی گچ و نمک فراوان در این سازند موجب زیاد بودن شوری رودخانه‌هایی می‌شود که از میان این سازند عبور می‌کنند و در نهایت باعث شوری بیش از حد آب دریاچه می‌شوند (Kelts and Shahrabi, 1986). آب این دریاچه از دیدگاه تقسیم‌بندی آبها در رده بسیار شور به‌شمار می‌آید. در دوران خشکسالی این غلظت به ۳۳۰ تا ۳۴۰ گرم و در دوران ترسالی به ۱۴۰ تا ۱۶۰ گرم در لیتر می‌رسد. نمکهای موجود به ترتیب فراوانی شامل کلرور سدیم، کلرور منیزیم و سولفات سدیم است. با توجه به میزان املاح موجود در آب دریاچه، وزن مخصوص آن نیز از وزن مخصوص آب دریاهای آزاد بیشتر بوده و در شرایط متعارف دارای رابطه زیر است (نیکودل و همکاران، ۱۳۷۹):

$$\gamma_w = 0.0006\,CO + 1.0068 \qquad (1)$$

در این رابطه، γ_w برحسب گرم بر سانتی متر مکعب و CO غلظت املاح برحسب گرم در لیتر است. در حالت عادی که غلظت آن ۲۴۰ گرم در لیتر است، مقدار وزن مخصوص آب حدود ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. حدود ۴۰ الی ۵۰ درصد رسوبات دریاچه ارومیه را رسوبات آواری و بقیه را انواع دیگر مانند رسوبات شیمیایی و بیوشیمیایی درجازا تشکیل شده‌اند. یکی از مسائل مهمی که در رابطه با سنگهای گستره دریاچه ارومیه از نظر شناخت ویژگیهای زمین‌شناسی مهندسی حائز اهمیت است، فرسایش پذیری و مقدار رسوبی است که تولید و به دریاچه ارومیه سرازیر می‌کنند. براساس بررسیهای انجام شده مشخص شده است که فرسایش پذیرترین سنگها، در حوضه آجی چای قرار داشته و به همین علت بیشترین رسوب‌زایی نیز از ناحیه این حوضه می‌باشد (باغبان گل‌پسند و همکاران، ۱۳۸۲). از مقدار رسوبی که هر سال وارد دریاچه می‌شود، سهم آجی‌چای ۴۳٪ کل این مقدار است و این در حالی است که آب وارده توسط آجی‌چای فقط ۸/۴ درصد آورد سالانه دریاچه است. بررسی رسوب انتقال داده شده به وسیله رودخانه‌های مختلف نشان می‌دهد که حدود ۸٪ رسوبات وارد شده به دریاچه از قسمت شمالی و ۹۲٪ درصد آن از قسمت جنوبی دریاچه تامین می‌شود. بررسی مقدار رسوبات وارد شده به دریاچه و مکانهای ورود رسوبات به دریاچه به لحاظ تاثیری است که احداث میانگذر ماهیت این رسوبات می‌گذارد، حائز اهمیت است. به عبارت دیگر احداث بزرگراه بر روی دریاچه می‌تواند بر روی روند توزیع رسوب در دریاچه در دراز مدت تاثیر گذاشته و تعادل آن را برهم زند. بر اساس نتایج تحقیقاتی که انجام یافته، هم اکنون تعادل توزیع رسوب مواد معلق در دریاچه در محل اتصال میانگذر به خشکی در هر دو سمت خاوری و باختری به هم خورده و تجمع رسوب ریزدانه در قسمت جنوبی سمت باختر میانگذر افزایش یافته است. این رسوبگذاری ناخواسته به تدریج شرایط زیست محیطی را تغییر خواهد داد.

مواد تشکیل دهنده رسوبات دریاچه از نظر جنس شامل گل کربناتی، پلتهای دفعی، قشرهای کربناتی، دانه‌های پوشش‌دار، ژیپس و کانیهای تبخیری دیگر، اجزای رسوبی آواری، کوارتز و شیشه آتشفشانی، فلدسپار، میکا، کلسیت، کانیهای سنگین (مانند مگنتیت)، دولومیت، کانیهای رسی، مواد آلی و سولفید آهن هستند. مغزه‌های حفاری در محل پل دریاچه ارومیه، ریزدانه بودن رسوبات موجود در این بخش را تا اعماق حدود۱۰۰ متری تأیید می‌کند. در شکل ۲ مقطع برش خورده مغزه به‌دست آمده از ژرفای حدود ۲۵ متری نشان داده شده است. لایه‌های ظریفی در داخل آن مشاهده می‌شود. بر اساس حفاریهای اکتشافی انجام شده مقطع زمین‌شناسی محدوده پل میانگذر تا عمق ۱۰۰ متری در شکل ۳ نشان داده شده است.

آزمایش CPTu

آزمایش CPTu یا پیزوکن نوعی آزمایش CPT است که همزمان با نفوذ مخروط در داخل لایه‌ها، تغییرات فشار منفذی نیز سنجیده می‌شود. این آزمایش یکی از آزمایشهای درجا متداول بوده و بویژه در زمینهایی که رسوبات رسی یا ماسه‌ای وجود داشته باشند، نتایج بسیار مفیدی را به‌دست می‌دهد. آزمایش CPT یک آزمایش نفوذسنج بوده و در اصل برای سنجش مقاومت خاک ابداع گردیده است ولی به مرور زمان ساختمان آن کامل‌تر شده و بسیاری از پارامترهای مهندسی خاک از راه انجام این آزمایش قابل دستیابی شده است. با توجه به ابداع CPT در هلند، این آزمایش با نام نفوذ مخروط هلندی نامیده می‌شود. شمایی از دستگاه نفوذ مخروط الکتریکی که از سال ۱۹۴۸ در هلند مورد استفاده بود در شکل ۴ نشان داده شده است. وسیله مورد استفاده در این آزمایش استوانه‌ای است به طول تقریباً ۵۰ سانتی‌متر و قطر حدود ۴ سانتی‌متر که به انتهای آن، مخروطی متصل می‌باشد. این مخروط اولین قسمت دستگاه است که در داخل خاک نفوذ می‌کند. زاویه نوک مخروط ۶۰ درجه و سطح مقطع آن معمولاً ۱۰ سانتی متر مکعب است.

در شکل ۵ قسمت اصلی سیستم مورد استفاده در مطالعات ساختگاه پل دریاچه ارومیه نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل نیز مشخص است، قسمت اندازه‌گیری فشار آب منفذی بلافاصله بعد از مخروط (در موقعیت u2) قرار دارد. آزمایشهای CPTu براساس استاندارد ASTM D5778انجام شده است. مطابق شکل ۶ در محدوده پل میانگذر دریاچه ارومیه ۸ گمانه CPTu و ۴ گمانه مغزه‌گیری انجام شده است.

پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش CPTu

چند داده مهم از آزمایش CPTu به دست می‌آید که عبارتند از:

مقاومت نوک مخروط (q_c) : مقاومتی است که توسط نوک مخروطی در مقابل نفوذ به درون خاک ایجاد می‌شود و با یکی از واحدهای تنش(مانند MPa) بیان می‌شود.

مقاومت اصطکاکی یا اصطکاک جانبی (f_s) : مقاومتی است که در حین نفوذ بین خاک و غلاف اصطکاکی ایجاد می‌شود. این پارامتر نیز با واحد تنش بیان می‌شود.

نسبت اصطکاکی (R_f): نسبت اصطکاک جانبی به مقاومت نوک مخروط است. این پارامتر بر حسب درصد بیان می‌شود:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100 \qquad (۲)$$

فشار آب منفذی (u): منظور فشار آب منفذی موجود در اطراف مخروط است. این پارامتر نیز از نوع تنش می‌باشد.

باید توجه داشت دستگاه مورد استفاده در این مطالعه قابلیت ثبت مقادیر انحراف از قائم یا کجی وسرعت نفوذ و همچنین عمق نفوذ را نیز دارا بود. تغییرات هرکدام از این پارامترها نسبت به عمق به صورت نموداری رسم می‌شوند و این نمودارها به صورت لحظه‌ای و همزمان با نفوذ مخروط، درصفحه نمایشگررایانه متصل به مخروط نفوذ، قابل مشاهده و ذخیره است. داده‌هایی که به این ترتیب به دست می‌آیند داده‌های خام تلقی می‌شوند، بنابراین باید تصحیحاتی روی آنها انجام شود تا پارامتر های مهندسی خاک استخراج شود. یکی از این تصحیحات، تصحیح داده‌ها نسبت به فشار آب منفذی است.

مقاومت نوک تصحیح شده(q_t) : این تصحیح براساس رابطه زیر انجام می‌شود:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \qquad (۳)$$

q_t : مقاومت نوک تصحیح شده (واقعی)

q_c : مقاومت نوک اولیه (ظاهری)

u_2: فشار آب منفذی

$$a = \frac{A_N}{A_T} \qquad (٤)$$

a : نسبت سطح خالص است. این نسبت تابعی از شکل، اندازه و محل قرار گرفتن فیلتر فشار منفذی بوده و عبارت است از نسبت دو مساحت مختلف. این پارامتر در حقیقت عاملی است که نشان دهنده تاثیر فشار آب منفذی بر سطوح مقطع ابتدایی و انتهایی غلاف اصطکاکی و تاثیر آن بر پارامترهای اندازه گیری شده می‌باشد. در این رابطه داریم:

A_N سطح مقطع دستگاه پیزوکن (یا مساحت قاعده مخروط) منهای مساحت فیلتر متخلخل

A_T سطح مقطع دستگاه پیزوکن (یا مساحت قاعده مخروط)

پارامتر دیگری با عنوان مقاومت نوک بهنجار شده (Q_t) معرفی شده

(Wroth 1984)که کاربردهای زیادی در محاسبه پارامترهای مهندسی خاک دارد:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \qquad (۵)$$

$$\sigma_v = \sum h_i \cdot \gamma_i \qquad (۶)$$

σ_v : تنش روباره (عمودی) کل

h_i: ضخامت لایه

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 \qquad (۷)$$

γ_i : وزن مخصوص خاک

σ'_{v0}: تنش عمودی مؤثر

حساسیت خاک (St): حساسیت خاک را به عنوان نسبت بین مقاومت برشی زهکشی نشده خاک در حالت دست نخورده به مقاومت همان خاک در حالت دست‌خورده تعریف کرده‌اند. این پارامتر را به وسیله رابطه زیر می‌توان از نتایج CPTu به‌دست آورد:

$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \qquad (۸)$$

Ns یک ثابت عددی است که به صورت تجربی تعیین می‌شود. مقدار متوسط آن ۷/۵ است.

تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده با CPTu

مقاومت برشی زهکشی نشده (S_u) یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که با آزمایش CPTu قابل دستیابی می‌باشد. روشهای پیشنهادی برای تعیین Su از روی نتایج این آزمایش دو دسته می‌باشند:

- روشهای نظری و محاسباتی
- روشهای تجربی

در روشهای نظری فرضهای زیادی در نظر گرفته می‌شود که تعداد زیادی ازآنها ممکن است صادق نباشد. لذا این روشها چندان مورد استفاده نبوده و روشهای تجربی کاربرد بیشتری دارند. روشهای تجربی خود انواع مختلفی دارند که بسته به شرایط موجود و نوع مصالح، به کار گرفته می‌شوند. یکی از این روشها که بیشتر در رسهای نرم کاربرد دارد، تعیین Su با استفاده از مقدار فشار منفذی اضافی است. با استفاده از دستگاه CPTu می‌توان پارامتر S_u را به دقت تعیین کرد (Lune et al., 1997). رابطه‌ای که برای این منظور پیشنهاد شده است، به شکل رابطه زیر است:

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \qquad (\Delta u = u_2 - u_0) \qquad (۹)$$

در این رابطه $N_{\Delta u}$ پارامتری است که تابع متغیرهای نسبت پیش تحکیمی، حساسیت خاک و برخی پارامترهای دیگر می‌باشد. مقادیر مختلفی را برای $N_{\Delta u}$ پیشنهاد کرده‌اند. Lunne et al.(1985) مقدار $N_{\Delta u}$ را بین ۴ تا ۱۰ پیشنهاد کرده است. Kurlsrud et al. (1996) با استفاده از آزمایشهای سه محوری متعددی که انجام داده این مقدار را ۶ تا ۸ تعیین کرده‌اند. در این مطالعات از روش اخیر استفاده شده است.

آزمایشهای CPTu در ساختگاه پل میانگذر دریاچه ارومیه در درون ۸ گمانه تا عمق ۱۰۰ متری انجام گرفته است. گمانه‌های آزمایشهای CPTu با پیشوند DC از شماره ۱ تا ۸ نامگذاری شده‌اند. موقعیت گمانه مذکور در شکل ۶ نشان داده شده است. شایان ذکر است که قبل از آزمایشهای CPTu تعداد ۴ گمانه برای مغزه گیری تا ژرفای ۱۰۰ متر در کنار برخی از گمانه‌های CPTu حفر شده بود. برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده از نتایج آزمایش CPTu، نخست باید پارامترهای مقاومت نوک، مقاومت نوک تصحیح شده و مقاومت نوک بهنجارشده محاسبه گردیده و سپس براساس رابطه ۹ مقاومت برشی زهکشی نشده را تعیین کرد. نمودار تغییرات پارامترهای مذکور در شکل ۷ برای ۴ گمانه تا عمق ۳۰ متری ارائه شده است. مشاهده می‌شود مقاومت نوک از حدود ۰/۱ مگاپاسکال در عمق ۲ متری به بیش از ۱/۲ مگاپاسکال در عمق ۳۰ متری می‌رسد. شایان ذکر است که رسوبات بستر دریاچه تا ژرفای ۶ متری کاملاً شل بوده و امکان نمونه‌گیری نیز وجود نداشته است.

فشار آب منفذی اضافی از حدود صفر در بستر دریاچه به حدود ۰/۹ در عمق ۳۰ متری رسیده است. مقاومت نوک تصحیح شده از حدود صفر در بستر دریاچه به حدود ۱/۶ مگاپاسکال در ژرفای ۳۰ متری رسیده است. حساسیت خاک تا ژرفای مذکور بین ۲ تا ۶ به‌دست آمده است.مقاومت برشی زهکشی نشده محاسبه شده از سطح بستر تا ژرفای متری ناچیز بوده و بعد از آن تا ژرفای ۳۰ متری بین ۰/۲ تا ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تغییر می‌کند.

تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده به روش آزمایشگاهی

آزمایشهای آزمایشگاهی زیادی برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده رسوبات نرم دریاچه ارومیه انجام گرفته است. این آزمایشها درآزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس و بر روی نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده انجام گرفته است. با توجه به در دسترس نبودن نمونه‌های دست نخورده کافی، از نمونه‌های بازسازی شده در شرایطی مشابه شرایط محیطی و پس از گذشت مدت زمان معین و تحت سربار مشخص (معادل وزن سربار موجود در شرایط طبیعی)، نیز در انجام آزمایشهای استفاده شده است. البته با بازسازی و عمل آوری نمونه‌ها شرایط کاملاً طبیعی ایجاد نمی‌شود. به طور مثال پدیده بندش و سیمانی شدن به طور کامل اتفاق نمی‌افتد. دراین حالت با دانستن مقدار حساسیت خاک می‌توان با اطمینان قابل قبولی به مقاومت برشی زهکشی نشده خاک پی برد (نیکودل، ۱۳۷۹).

در شکل ۸ نتایج آزمایشهای تک محوری انجام شده بر روی نمونه‌های دست‌نخورده ماخوذه از اعماق ۲۰ تا ۳۰ متری ارائه شده است. مقاومت تک محوری نهایی این نمونه‌ها بین ۰/۶ تا ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به‌دست آمده است. با توجه به سرعت نسبتاً زیاد بارگذاری تک محوری و نفوذپذیری خیلی کم نمونه‌های ریز دانه، در صورتی که نمونه‌های دارای شرایط اشباع باشند، می‌توان مقدار مقاومت زهکشی نشده (Su) را از مقاومت نهایی (q_u) محاسبه کرد:

$$S_u = \frac{q_u}{2} \qquad (۱۰)$$

پس به وسیله این آزمایش مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده بین ۰/۳ تا ۰/٤ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بدست می‌آید.

آزمایشهایی که برای روی نمونه‌های بازسازی شده انجام شده است، به شرح زیر است:

الف) آزمایشهای تک محوری فشاری: نتایج آزمایشهای تک محوری در جدول ۱ و نمودار تنش- کرنش آنها در شکل ۹ ارائه شده است. مقدار مقاومت تک محوری نهایی این نمونه‌ها بین ۰/۲ تا ۰/۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده نیز بین ۰/۱ تا ۰/۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به‌دست آمده است. این مقدار نصف تا یک سوم مقاومت نمونه‌های دست‌نخورده می‌باشد.

ب) آزمایش برش مستقیم: این آزمایش به صورت تحکیم شده و زهکشی نشده (CU) مطابق استاندارد ASTM D 3080 بر روی نمونه‌های بازسازی شده انجام شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایشها در جدول ۲ و پوش مور- کولمب آنها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میزان چسبندگی نمونه‌ها به طور متوسط ۰/۱ کیلوگرم برسانتی‌متر مربع و مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۹ درجه به‌دست آمده است.

ج) آزمایش برش پره آزمایشگاهی: این آزمایش یکی از آزمایشهای متداول در تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده خاکهای ریز دانه است و بویژه در رسهای نرم و بسیار نرم نتایج مطمئنی را ارائه می‌کند. نتایج این آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده نیز بر اساس این آزمایشهای بین ۰/۱تا۰/۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بدست آمده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مقاومت برشی زهکشی نشده رسوبات نرم دریاچه ارومیه با استفاده از دو روش صحرایی (CPTu) و آزمایشگاهی تعیین شده است. آزمایشهای CPTu تا عمق ۱۰۰ متری انجام شده ولی در این مقاله از نتایج CPTu تا عمق ۳۰ متری که از خاکهای نرم تشکیل شده است، استفاده شده است. از بستر دریا تا عمق ۶ متری رسوبات مذکور بسیار نرم بوده و مخروط CPTu بدون مقاومت چندانی فرو می‌رود. بعد از آن مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده رسوبات بر اساس نتایج CPTu از حدود ۰/۲ به ۰/۷ کیلوگرم برسانتی‌متر مربع در عمق ۳۰ متری می‌رسد. حساسیت این رسوبات بر اساس نتایج CPTu بین ۲ تا ۶ ارزیابی شده است.

نتایج آزمایشهای تک محوری انجام شده بر روی نمونه‌های دست نخورده ماخوذه از اعماق ۲۰ تا ۳۰ متری، مقاومت برشی زهکشی نشده را بین ۰/۳ تا ۰/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را نشان داده در حالی که مقاومت برشی زهکشی نشده به‌دست آمده از CPTu برای این اعماق بین ۰/۴ تا ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. بنابر این با وجود این که نمونه‌های دست‌نخورده با نمونه‌گیر جدار نازک (شلبی) اخذ شده بود ولی باز هم مقداری کاهش مقاومت به دلیل دستخوردگی دیده می‌شود. مقدار این کاهش بین ۳۰ تا ۷۰ درصد ارزیابی شده است.

نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه‌های بازسازی شده نیز مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌ها را بین ۰/۱ تا ۰/۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داده است که اختلاف آن با مقاومت نمونه‌های دست‌نخورده حدود ۴ برابر و با مقدار مقاومت بدست آمده از آزمایشهای CPTu حدود ۵ برابر است.

در صورتی که میزان حساسیت رسوبات یک ناحیه مشخص باشد، می‌توان با انجام آزمایشهای آزمایشگاهی به مقاومت برشی واقعی دست پیدا کرد. با توجه به این که حساسیت رسوبات نرم دریاچه ارومیه حدود ۴ است، پس با انجام آزمایشهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بازسازی شده می‌توان مقاومت واقعی را برآورد کرد.

با توجه به این که آزمایش CPTu در شرایط کاملا طبیعی و دستنخورده خاک انجام می‌شود، بنابراین مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده بدست آمده از طریق آن دقیق‌تر است.

سپاسگزاری

مساعدتهای شرکتهای صنعتی دریایی ایران(صدرا) به عنوان مجری طرح میانگذر، مهندسین مشاور ماندرو (مشاور ژئوتکنیک)، مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار (ناظر ژئوتکنیک) و آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت‌مدرس شایسته تشکر و قدردانی است.

جدول۱- نتایج آزمایشهای مقاومت تک محوری بر روی نمونه‌های بازسازی شده

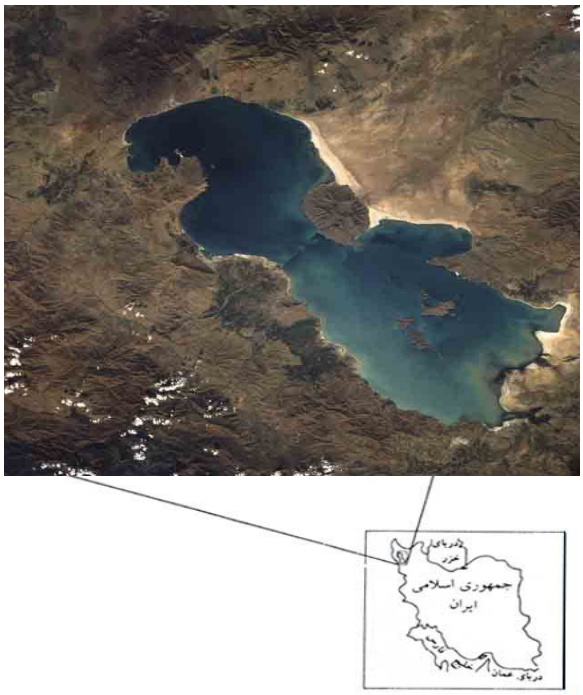
شماره نمونه	درصد رطوبت	وزن مخصوص تر (g/cm^3)	مقاومت تک محوری (kg/cm^2)
S1	۴۰	۱/۷۵	۰/۲۰
S2	۴۱	۱/۷۵	۰/۲۴
S3	۳۸	۱/۷۶	۰/۲۵
S4	۳۷	۱/۷۴	۰/۲۰
S5	۳۹	۱/۷۵	۰/۱۹

جدول ۲ - نتایج آزمایشهای برش مستقیم انجام شده به روش CU

شماره نمونه	چسبندگی kg/cm^2	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ^o)
S1	۰/۰۹	۹/۵
S2	۰/۱۰	۹/۵
S3	۰/۰۹	۱۰
S4	۰/۱۲	۸
S5	۰/۱۰	۹

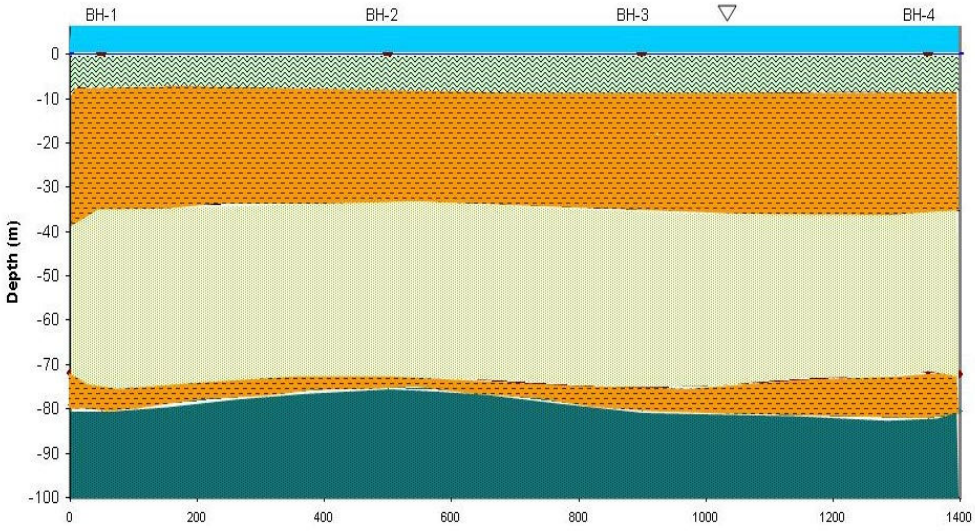
جدول۳- نتایج آزمایشهای برش پره آزمایشگاهی

شماره نمونه	مقاومت برشی زهکشی نشده (kg/cm^2)
S1	۰/۱۱
S2	۰/۱۲
S3	۰/۱۰
S4	۰/۱۲



شکل۱- موقعیت میانگذر دریاچه ارومیه

شکل۲ - لایه بندی ظریف رسوبات دریاچه ارومیه



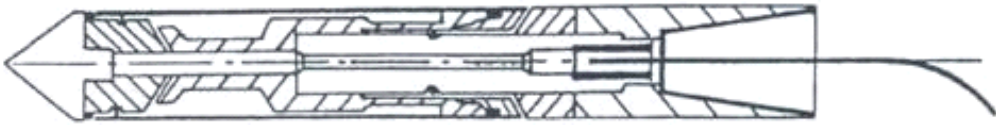
شکل ۳- مقطع زمین‌شناسی محدوده پل میانگذر دریاچه ارومیه

A: لجن رسی خیلی نرم سبز رنگ با مواد آلی زیاد با کمی بلورهای ژیپس

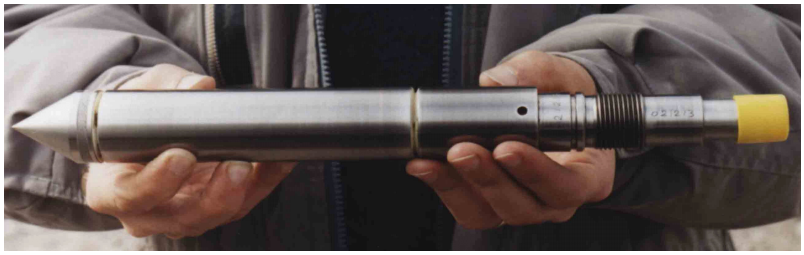
B: تناوبی از لایه‌های رسی و سیلتی نرم خاکستری تا قهوه‌ای خیلی چسبنده

C: رس و سیلت سبز روشن با میان لایه‌های ماسه ریز همراه با بلورهای ژیپس

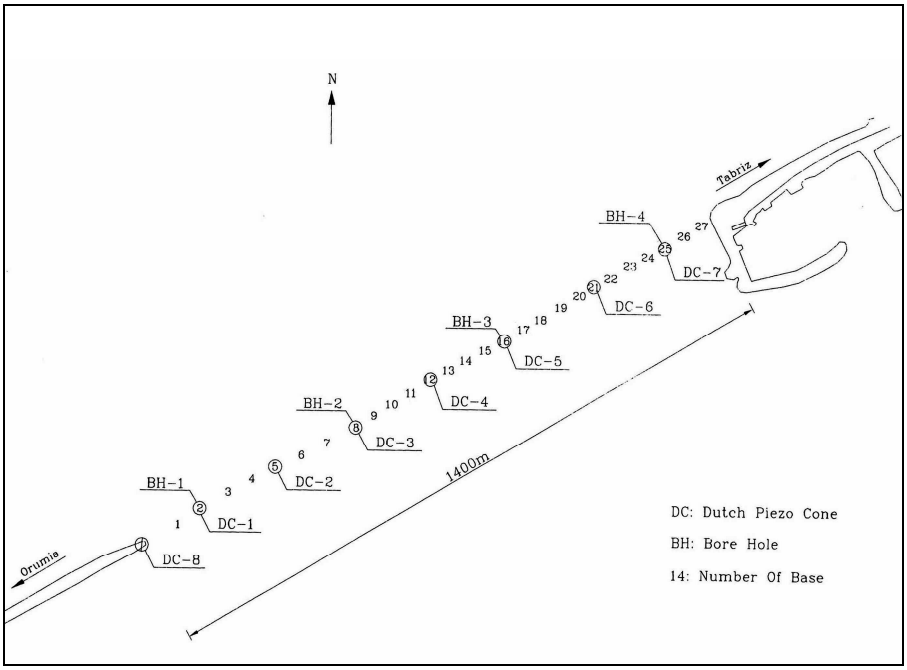
D: رس و سیلت سبز تیره تا خاکستری با پلاستیسته متوسط با میان لایه‌های ماسه‌ای



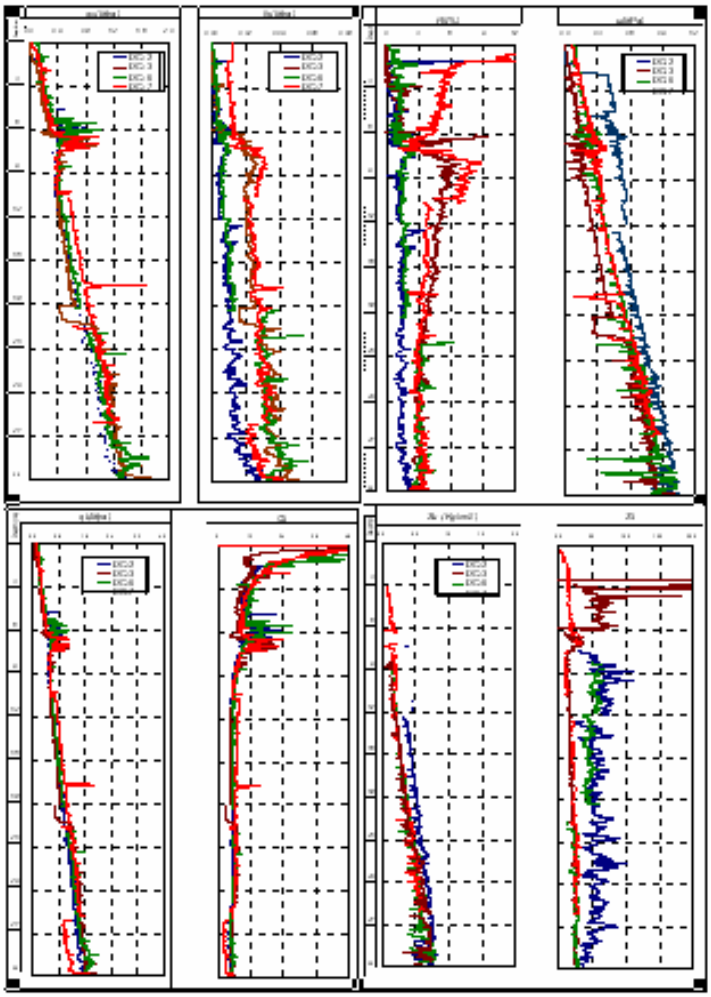
شکل ٤- شمای کلی دستگاه نفوذ مخروطی الکتریکی که در سال ۱۹٤۸ در کشور هلند مورد استفاده قرار گرفته است.



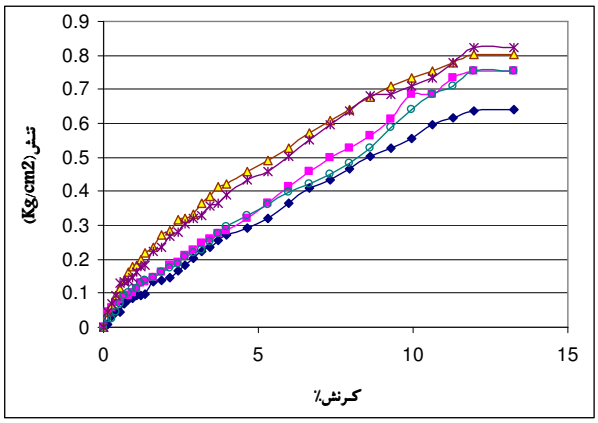
شکل ٥- تصویری از مخروط دستگاه CPTu مورد استفاده درمطالعات پل میانگذر دریاچه ارومیه



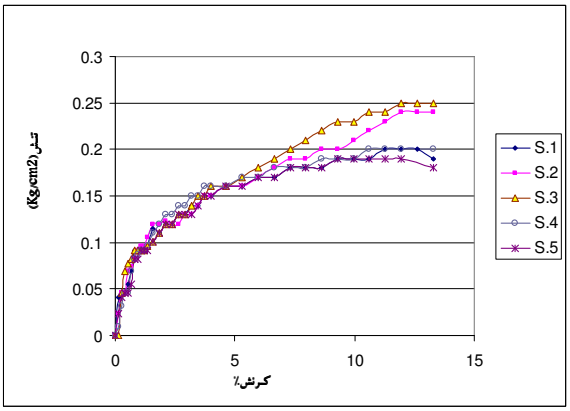
شکل ٦- موقعیت گمانه‌های CPTu و گمانه‌های مغزه‌گیری در ساختگاه پل دریاچه ارومیه



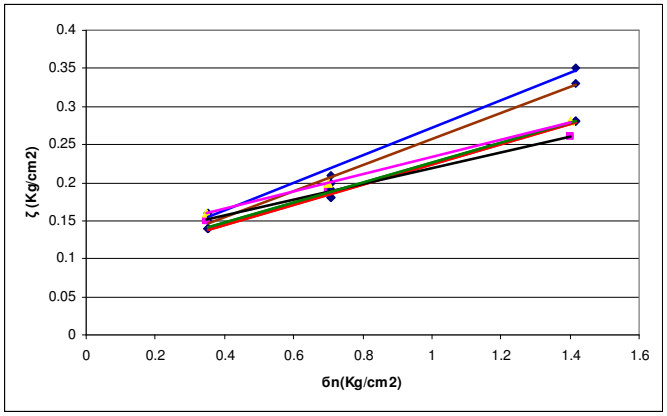
شکل۷- نمودار تغییرات پارامترهای q_c، f_s، u، R_f، q_t، Q_t، S_t و S_u بر حسب عمق در ٤ گمانه CPTu



شکل۸- نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده بر روی نمونه‌های دست‌خورده



شکل۹- نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده بر روی نمونه‌های بازسازی شده



شکل ۱۰- نمودار مور- کولمب آزمایشهای برش مستقیم Cu انجام شده بر روی نمونه‌های بازسازی شده

کتابنگاری

باغبان گل‌پسند، م. ر.، ۱۳۸۳- "بررسی پارامترهای مهندسی خاکهای سست دریاچه ارومیه و مقایسه آنها با نتایج حاصل از آزمایش CPTu " پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

باغبان گل‌پسند، م. ر.، نیکودل، م. ر.، یثربی، س. ش.، ۱۳۸۲ – ارزیابی خصوصیات زمین شناسی مهندسی ساختگاه میانگذر دریاچه ارومیه بر اساس نتایج آزمونهای آزمایشگاهی" بیست و دومین گردهمائی علوم زمین، تهران.

باغبان گل‌پسند، م. ر.، نیکودل، م. ر.، یثربی، س. ش.، و اصغری، ا.، ۱۳۸۳- "بررسی حساسیت در رسوبات نرم ساختگاه میانگذر دریاچه ارومیه"، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شاهرود.

شهرابی، م.، ۱۳۷۳- "شرح نقشه زمین شناسی چهارگوش ارومیه"، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی.

شهرابی، م.، ۱۳۷۳- "دریاها و دریاچه‌های ایران"، طرح تدوین کتاب زمین شناسی ایران .

نیکودل، م. ر.، ۱۳۷۹-" بررسی اثر بندش (تیکسوتروپی) و سیمانی شدن رسوبات ریزدانه آب شور در رفتار مکانیکی آنها با نگرشی ویژه بر دریاچه ارومیه"، رساله دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

نیکودل، م. ر.، جلالی، ح.، و نبوی، م. ح .، ۱۳۷۹-" ویژگیهای زمین شناسی مهندسی نهشته های نرم دریاچه ارومیه"، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی، شماره ۳۵-۳۶ ، صفحات ۲۸ تا ۴۳.

References

FUGRO. OCEANSISMICA S.p.A., 2003- "Design & Construction Of the Oromieh Lake Causeway- Geophysical Investigation Report".

Karlsrud, K. Lunne, T. and Brattlieu, K., 1996-"Improved CPTu correlation based on block samples", Nordisk GeoteknikermØte Reykjavik.

Kelts, K. and Shahrabi, M., 1986-"Holocene sedimentology of hypersaline Lake Urmia northwestern Iran", palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 54,105-130 .

Lune, T., Christofersen, H. P. and Tjelta, T. I., 1985-"Engineering use of piezocone data in North sea clays", Proceeding of the 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, Balkema Pub., Rotterdam, 2, 907-12.

Lune T., Robertson, P. K. and Powell J. M., 1997-"Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice" first edition, Blackie & Professional London, UK.

Mandro Consulting Engineers, 2003-"Site Investigation and Geotchnical Survey for Urmia Lake Bridge", Final Report.

Storer, R. A., 1999- "Anoual book of ASTM Standard".

Wroth, C. P., 1984-" The interpretation of in situ soil test", 24th Rankine Lecture, Geotechnique, 34(4), 449-8.

* گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

** گروه عمران دانشگاه تربیت مدرس

*** گروه زمین شناسی دانشگاه تبریز

* Engineering geology department, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

** Civil department, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

*** Geology department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.