

مطالعات ژئوتکنیکی رسوبات کف دریاچه ارومیه

اسماعیل افلاکی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

از نظر ژئوتکنیکی پژوهش‌های زیادی روی رسوبات بستر دریاچه‌های شور دنیا، مثل دریاچه‌ی نمک آمریکا و بحرالمت در شمال افریقا، انجام شده است. دریاچه‌ی ارومیه نیز که در شمال شرقی ایران قرار گرفته یکی از پهناهای آبی شور است که تاکنون مطالعات کاملی روی رسوبات بستر آن انجام نشده است. در این نوشتار رسوبات بسیار نرم کف دریاچه، مسیر بزرگراه تبریز - ارومیه، مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات ژئوتکنیکی شامل حفر گمانه‌های اکتشافی، تهیه‌ی برش‌های زمین‌شناسی همراه با آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی است. برای شناخت کامل ویژگی‌های رسوبات بستر دریاچه تا اعماق مؤثر خصوصیات فیزیکی لایه‌بندی خاک، مقاومت فشاری، مقاومت برشی، تحکیم‌پذیری و حساسیت رسوبات مورد بررسی قرار گرفته، و در نهایت همبستگی بین پارامترهای فوق، خاک بستر دریاچه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده با اطمینان می‌توان خصوصیات تغییر شکل‌پذیری رسوبات نرم و تحکیم نیافته کف دریاچه را برای دستیابی به شاخص‌های طراحی برآورد کرد.

مقدمه

رسوب‌گذاری دارد. در این مطالعه، مسائل ژئوتکنیکی با حفر مجموعاً ۲۰ گمانه‌ی اکتشافی بر روی مسیر بزرگراه موجود و ۲ گمانه در قسمت میانی ساخته نشده‌ی کف دریاچه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در تحقیقات صحرایی، به دلیل حساس بودن لایه‌های رسوبی و بسیار نرم بودن آنها به‌خصوص در ۱۰ متر اول، استفاده از دستگاه حفاری به‌منظور نمونه‌برداری دست‌نخورده امکان‌پذیر نبوده است. بنابراین از دستگاه‌های نفوذ استاندارد و برش پرسی برای انجام آزمایش‌های درجا استفاده شده است. از طرف دیگر آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های گرفته شده از اعماق پائین‌تر، منجر به برآورد مقاومت برشی به مقدار کمتر از مقاومت برشی واقعی لایه‌های رسوبی در مقایسه با نتایج آزمایش‌های درجا بوده است. از این روی یک بررسی جامع و مقایسه‌ی از نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و آزمایش‌های درجا برای دستیابی به شاخص‌های طراحی مناسب ضرورت دارد.

دریاچه‌ی ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه‌ی داخلی ایران است که به‌صورت یک حوضه‌ی بسته در شمال باختری کشور قرار دارد. میانگین مساحت این دریاچه حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع است. تاکنون مطالعات زمین‌شناسی، هیدرولیکی و ژئوتکنیکی وسیعی برای ساختن بزرگراهی که دو ساحل شرقی و غربی دریاچه‌ی ارومیه را در کم‌ترین پهنای آن - حدود ۱۵ کیلومتر (برای اتصال بندر سفید گنبد به کرانه‌ی دیگر دریاچه در خاور کوه زنبیل) - به یکدیگر می‌پیوندد، انجام شده است.

هدف از احداث این بزرگراه ارتباط دو شهر بزرگ تبریز و ارومیه در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی است که یکی از پروژه‌های بزرگ و با اهمیت بوده و از دیدگاه مهندسی موضوع‌های زیادی را دربر می‌گیرد که باید به آن پرداخته شود.

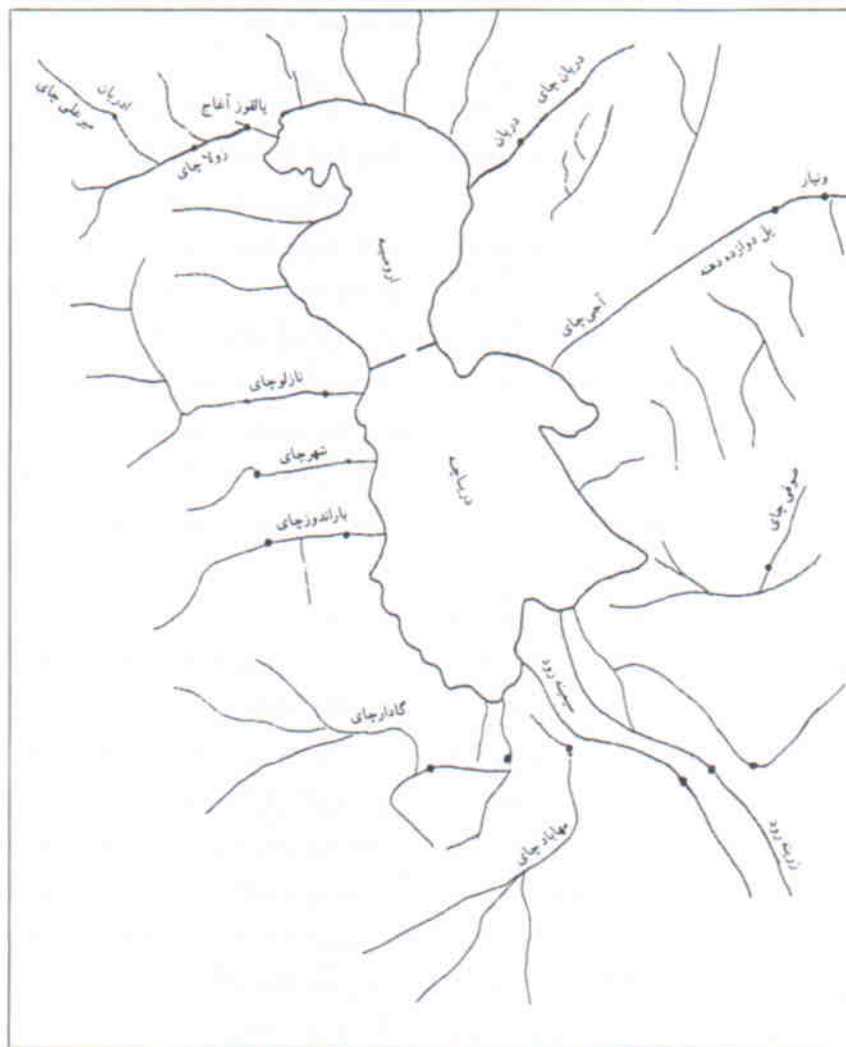
بر مبنای اطلاعات موجود، طرح عملی احداث بزرگراه در سال ۱۳۵۸، و با ریختن مستقیم سنگریزه در دریاچه، از دو سمت ساحل ارومیه و تبریز شروع شد. در حال حاضر بدنه‌ی بزرگراه دریاچه بر روی بستری از مواد ریزدانه‌ی رسوبات دریاچه‌ی شور قرار گرفته است. حدود ۱۰۸۶۰ متر طول بزرگراه از سمت ارومیه و ۳۱۲۰ متر از سمت تبریز ساخته شده است. فاصله‌ی باز میانی آن ۱۴۲۰ متر است که باید با توجه به شرایط چرخشی آب دریاچه و جنبه‌های زیست‌محیطی آن، به‌وسیله‌ی پلی به‌هم مربوط شوند.

ساختن راه و پل بر روی رسوبات نرم و فراشور کف دریاچه نیازمند پژوهش‌های ژئوتکنیکی و شناخت دقیق شاخص‌های طراحی است که این شاخص‌ها خود بستگی به نوع و نحوه‌ی

خلاصه‌ی از زمین‌شناسی دریاچه‌ی ارومیه

دریاچه‌ی ارومیه بزرگ‌ترین پهناهای آبی داخل ایران است که در شمال باختری و در یک منطقه‌ی کوهستانی (میان‌کوه‌ساری) قرار دارد، (شکل ۱). ارتفاع این دریاچه از سطح آب‌های آزاد ۱۲۸۰+ متر، طول آن ۱۴۰ کیلومتر، و عرض آن بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر است. سطح دریاچه بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومتر مربع و عمق متوسط آن بین ۶ تا ۸ متر است.

از نظر زمین‌شناسی دریاچه‌ی ارومیه یک فرونشست تکتونیکی



شکل ۱. نقشه‌ی عمومی دریاچه‌ی ارومیه و رودخانه‌های اطراف آن.

رحمانلو گسترش زیادی دارد و به شدت چین خورده است که در برخی از جزایر مثل مشکین و اسپر نیز پروند دارد. ج) گرانیت قوشچی که در جزیره‌های خاور دریاچه پروند دارد. د) سنگ‌های آهکی میوسن (سازند قم)، که در مقایسه با سنگ‌های فلیش وار کرتاسه چین خوردگی کمتری را تحمل کرده‌اند. این سازند در کناره‌ی باختری دریاچه و در بعضی از جزایر جنوبی و خاوری آن مثل قوشچی، قره باغ و غیره پروند دارد. ه) برش‌های آتشفشانی جزیره‌ی اسلامی و گمیچی که بزرگراه دریاچه روی آنها ساخته شده است. و) رسوبات دریاچه‌ی میوسن بالایی، که به نام سازند سراغه نیز خوانده می‌شود. در پای کوه زنبیل و کوه بزداغی پروند دارد. سن این سازند احتمالاً پلیوسن - پلیستوسن است. ز) سنگ‌های آتشفشانی تراکی آندزیت - داسیت کوه زنبیل و بزداغی

(گرابن) است که در بیشتر کناره‌های آن نشانه‌های وجود گسله بسیار مشخص است. از این رو پرونده‌هایی از سنگ‌های کف به خوبی آشکار شده است که از مقایسه‌ی لیتولوژیکی آنها با سنگ‌های گستره‌ی آبگیران می‌توان به سن آنها پی برد. رسوبات نرم و آبدار کف دریاچه به‌طور مستقیم روی سنگ کف آن قرار گرفته است. در گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور که برای وزارت راه و ترابری تهیه شده است می‌خوانیم: «... سنگ کف دریاچه به شدت چین خورده و با توجه به پرونده‌هایی که پیرامون دریاچه و در جزیره‌های آن دیده می‌شود، می‌توان این سنگ‌ها را از کهن به جوان به صورت زیر دسته‌بندی کرد: الف) سنگ‌های آهکی پرمین (سازند روته) که نزدیک‌ترین پروند آن در ناحیه‌ی جنوب خاوری حیدرآباد است. ب) سنگ‌های شیلی و فلیش وار کرتاسه که در گستره‌ی میاندوآب -

که رسوبات صدف دار در (ج) فقط «گرانیت قوشچی» ذکر شد روی آنها قرار دارد.

تا کنون پژوهش‌های رسوب‌شناختی کاملی روی رسوب‌های جوان کف دریاچه انجام نگرفته است. مطالعات انجام شده، توسط اداره‌ی کل راه و ترابری استان‌های آذربایجان خاوری و بیاختری، و به‌منظور ساختن بزرگراه دریاچه‌ی ارومیه صورت گرفته است. گمانه‌هایی که به‌منظور شناخت رسوب‌ها تا رسیدن به ژرفای لایه‌های سخت‌تر در روی بدنه‌ی بزرگراه، کناره‌های آن و در قسمت ساخته‌نشده‌ی میانی (کف طبیعی دریاچه) حفر شده نشان داده است که تا ژرفای ۱۸۰ تا ۲۰۰ متر همچنان رسوبات نرم رسی - فورشی وجود دارد. مغزه‌های به دست آمده از این گمانه‌ها رفتار سست و تحکیم نیافته‌ی نهشته‌های کف دریاچه را به‌خوبی آشکار می‌سازد.^[۱]

ویژگی رسوب‌گذاری در دریاچه‌ی فراشور

رسوبات نهشته شده در محیط‌های آبی سست‌اند. ساخت و بافت این رسوبات، با توجه به شرایط محیط رسوب‌گذاری، مختلف است. رسوبات سست دارای کانی‌های رسی هستند که از نظر کانی‌شناسی به‌علت خنثی نبودن مولکول‌های آنها در شبکه‌ی بلور آب‌دوست‌اند و به‌علت ناآروائی، آب در بین شبکه‌ی بلورین آنها و یا در بین حفره‌های موجود بین بلورهایشان محبوس می‌شود. از این رو در طبیعت به‌صورت نیمه‌اشباع یا اشباع کامل‌اند.^[۲] از طرف دیگر چون گیاهان بیشتر در این نوع رسوبات رشد و نمو می‌کنند، پس از مرگ اعضای بدن آنها در مجاورت آب و اکسیژن به‌ماده‌ی آلی ویژه‌ی تبدیل شده و در بین دانه‌های رس و لای باقی می‌ماند. بنابراین طبق تعریف خاک‌های آلی سست که در ابتدای مرحله‌ی متراکم شدن و سنگ‌زائی هستند، در محیط آب و تحت شرایط خاص فیزیکی - شیمیایی و زیست‌محیطی رسوب می‌کنند. بافت این خاک‌ها لخته‌یی - لانه‌زنبوری^۱ و دارای خاصیت کسب مقاومت با زمان^۲ نیز هستند که از نظر مهندسی ژئوتکنیک دارای اهمیت ویژه‌اند.^[۳] این خاک‌های آلی سست با خاک‌های غیرآلی که نشان تخلخل بالائی دارند ($e > 1/5$ برای لای و رس، $e > 1$ برای لوم، و $e > 0.8$ برای لوم ماسه‌یی) کاملاً متفاوت‌اند زیرا خاک‌های اخیر استحکام کاذب دارند و ساختمان آنها در اثر لرزش و ارتعاش به هم خواهد ریخت.^[۴]

رسوب‌گذاری در محیط شور دریاچه‌ی ارومیه به سه روش صورت می‌گیرد. در روش اول، رس‌ها و دانه‌های کلوئیدی در الکتروولیت (آب دریاچه) منعقد شده و به‌صورت لخته، یا اجتماعی از دانه‌های چسبیده به هم اسفنج مانند در آمده تا در اثر سنگینی وزن

خود بتوانند رسوب کنند. در این واکنش شیمیائی دانه‌های کلوئیدی بار منفی دارند و پاکاتیون‌های موجود در الکتروولیت منعقد می‌شوند. اضافه می‌شود که آستانه‌ی انعقاد حداقل مقدار غلظت یون‌ها در محیط است که در آن پدیده‌ی انعقاد شروع می‌شود. آستانه‌ی انعقاد بستگی به آب‌دوستی یون‌های کلوئیدی و رس در محیط رسوب‌گذاری نیز دارد. بنابراین هر چه یون‌های کلوئیدی و رس در محیط آب‌دوست‌تر باشند، آستانه‌ی انعقاد آن الکتروولیت بالاتر بوده و انعقاد دیرتر انجام می‌شود؛ به‌عکس هرچه ظرفیت یون‌های کلوئیدی بالاتر باشد آستانه‌ی انعقاد پائین‌تر است و انعقاد زودتر انجام می‌پذیرد. از این رو آب‌زدائی باعث انعقاد سریع رسوب می‌شود و در صورت خشک شدن رسوب خاصیت پلاستیسیته هم کاهش می‌یابد. در روش دوم نیروهای کششی بین یون‌های مثبت و منفی در پدیده‌ی رسوب‌گذاری مؤثرند. از این رو روند آزمایش نشان‌داده است که نسبت $[(Na+K)/Cl]$ در آب‌های شور به‌مراتب بیشتر از آب‌های شیرین بوده و آب‌های فراشور بیشترین مقدار را دارند.

روش سوم، که در محیط دریاچه دیده می‌شود، در اثر نیروهای «برونین» بین دانه‌ها به وجود می‌آید. در این حالت دانه‌های رس روی دانه‌های لای و ماسه می‌چسبند و عمل انعقاد صورت می‌گیرد. این پدیده وقتی که آب دریاچه شور می‌شود، یعنی محیط به‌صورت الکتروولیتی غلیظ است و آنیون‌ها و کاتیون‌ها در محیط بیشترند سریع‌تر صورت می‌گیرد.^[۴]

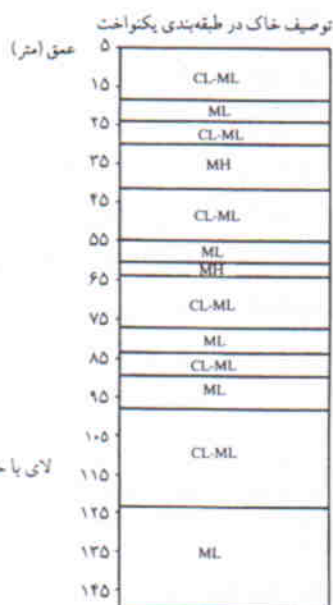
پس از رسوب‌گذاری، واکنش‌های شیمیائی اکسیداسیون و احیاء در کف دریاچه و در داخل رسوبات به‌وقوع می‌پیوندند که بر اثر آن رسوب شکل می‌گیرد و ترکیبات آهن و منگنز و مواد آلی اکسیده می‌شوند. اکسیداسیون مواد آلی اکسید کربن (CO_2) ایجاد می‌کند. وقتی که اکسیژن در محیط کم باشد، عمل اکسیداسیون مواد آلی در اثر اکسیژن آزاد شده از ترکیبات شیمیائی صورت می‌گیرد که اصطلاحاً اکسیداسیون ناقص^۳ نامیده می‌شود. رسوبات شور منعقد شده در کف دریاچه که دارای ترکیبات آهن هستند، با وجود ماده‌ی آلی فراوان و فعالیت زیستی باکتری‌ها هیدرژن سولفور به وجود می‌آورند. این پدیده را «احیای رسوب» در کف دریاچه می‌نامند. در محیط‌های شور که چرخش آب از کف بستر به‌طرف بالا در جریان است، عمل اکسیداسیون و احیا منحصراً در بالاترین لایه‌ی رسوبی صورت می‌گیرد. حال چنانچه اکسیژن به‌مقدار کافی وجود داشته باشد و مقدار ماده‌ی آلی هم کم باشد، عمل اکسیداسیون و احیا به اعماق بیشتر هم نفوذ می‌کند.^[۵]

با توجه به مطالب فوق چون دریاچه‌ی ارومیه یک دریاچه‌ی بسته است، رودخانه‌ها همه ساله، به‌خصوص در سال‌های پرباران،

رس و ماسه و ذرات کلوئیدی لخته شده طی یک دوره ی فساد شیمیایی به لجن تبدیل شده اند. تیرگی لجن ها از یک سو به علت ترکیب شدن ترکیبات آهن با هیدروژن سولفور و ایجاد سولفور آهن، و از سوی دیگر به علت بقایای تجزیه شده ی آگ ها و جلبک ها است.

نمای فیزیکی لایه های رسوبی کف دریاچه

به منظور دستیابی به اطلاعات ژئوتکنیکی کف دریاچه ی ارومیه، در مقاطع زمانی مختلف گمانه های اکتشافی بسیاری در مسیر بزرگراه حفر شده است. این مطالعات در حد فاصل ابتدای بزرگراه، از طرف ارومیه تا کیلومتر ۸۶۰+۱۰ و از کیلومتر ۲۸۰+۱۲ تا انتهای مسیر بزرگراه به طرف تبریز انجام شده است، که در طی آن ۲۲ گمانه ی اکتشافی حفر شده است. اما براساس شرایط زیست محیطی و جریان آب در دریاچه قطعه یی به طول تقریبی ۱۴۲۰ متر حد فاصل بین دو کیلومتر یاد شده دست نخورده باقی مانده است. مطالعه ی ژئوتکنیکی حاضر بر اساس اطلاعات به دست آمده از دو گمانه ی اکتشافی CB-۱ و CB-۲ است که به ترتیب تا عمق های ۱۵۰ و ۱۳۳ متر در کف دریاچه حفر شده اند.^[۱۲] ضخامت لایه ها و طبقه بندی لایه های خاک تا عمق حفاری شده روی لایه بندی گمانه های مذکور در شکل های (۲ و ۳) نشان داده شده است. از جمله آزمایش های صحرایی می توان به آزمایش نفوذ استاندارد (S.P.T) و آزمایش برش پره یی صحرایی اشاره کرد که از ۸ متر به بعد انجام گرفته است. از ابتدای حفاری نمونه های دست خورده برای تشریح نظری و طبقه بندی و از عمق ۲۰ متر به بعد تا عمق نهائی نمونه گیری دست نخورده با U۴ انجام گرفت.



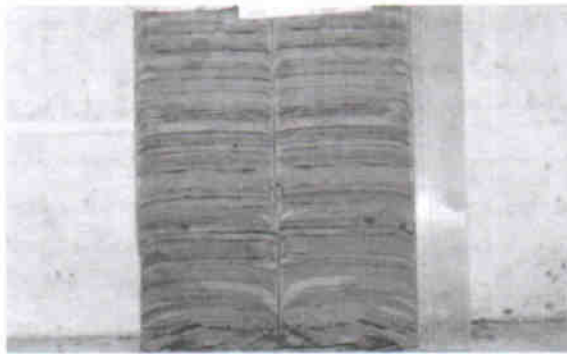
MH= لای با خاصیت کشسانی زیاد
CL-ML= لای - رسی

شکل ۲. لایه بندی گمانه ی اکتشافی در محل گمانه ی CB-۱.

مقدار بسیار زیادی آب شیرین وارد آن می کنند. از ابتدای بهار تا اواخر تیرماه تعادل شیمیایی و غلظت آب دریاچه بهم می خورد و از حالت فراشور به شور تبدیل می شود. با افزایش پدیده ی تبخیر در فصل گرما دوباره محیط فراشور می شود. به این ترتیب شرایط الکترولیتی آب دریاچه مرتباً تغییر می کند. این تغییرات بر پیوند بین ذرات نهشته شده در بستر تأثیر می گذارد و به همین سبب لایه های رسوب گذاری شده ریزدانه از سالی به سال دیگر متمایز می شود. مطالعات نشان می دهد که همه ساله به طور میانگین حدود ۵/۵ میلیون تن املاح مختلف وارد دریاچه ی ارومیه می شود. در سال پرآبی ۴۸-۴۷ مقدار رسوب ورودی بالغ بر ۲۱/۷ میلیون تن، و در سال آبی ۵۸-۵۷ بالغ بر ۱۴/۱ میلیون تن، و در سال آبی ۶۷-۶۶ نیز مقدار رسوب ورودی ۱۳/۵ میلیون تن بوده که در مقابل میانگین سالانه ۵/۵ میلیون تن رسوب قابل ملاحظه است. به این ترتیب دیده می شود که آهنگ رسوب گذاری از سالی به سال دیگر متفاوت است.^[۱۲]

در محیط شور دریاچه ی ارومیه که وزن مخصوص آب بین ۱/۱۲ تا ۱/۱۸ تن بر متر مکعب است، نکته ی جالب توجه این است که مواد معلق در آب با کندی بسیار رسوب می کنند زیرا ذرات بهم چسبیده و لخته شده می توانند در اثر سنگینی وزن خود (به طور استنفنجی) در بستر دریاچه قرار گیرند. این حالت رسوب گذاری پایدار نبوده و در اثر جریان های چرخشی آب دریاچه (بین ۱۵ تا ۲۰ سانتی متر بر ثانیه) و متلاطم شدن سطح آب آن در اثر وزش باد (سرعت بیش از ۸ متر بر ثانیه)، دوباره مواد رسوب شده در بستر بهم خورده، به حالت تعلیق درآمد و به سطح آب می رسند. به طوری که آب دریاچه به حالت کاملاً کدر متمایل می شود. رسوب کردن مجدد و افزایش ضخامت رسوبات به مرور زمان سبب متراکم شدن آنها می شود به طوری که از حالت لجنی - ابری درمی آیند.

همان طور که قبلاً اشاره شد، مواد آلی در تکامل تدریجی رسوبات کف دریاچه و همزمان با آن پیش می رود. در این دوره، تکامل از موجودات گیاهی آگ ها و جلبک ها و نیز جانوران سخت پوست آرتمیاسالینا نقش بسیار مهمی را بازی می کنند. رشد سریع این موجودات با افزایش میزان آب رسوبات همراه است. اولین تحقیقات در این مورد توسط پروفیسور وریگو در سال ۱۸۹۰ در دلتای رود «ادسا» و دریاچه ی «ساک» انجام شده است.^[۸] نتیجه ی این تحقیقات حاکی از آن است که لای های لجنی محیط شور با مقدار معتناهی ترکیبات آهن و مواد آلی حاصل تجزیه ی موجودات جانوری و گیاهی همراه است. به این ترتیب که این موجودات در دوره ی حیات خود نمک های موجود در آب دریاچه، در نواحی ساحلی و کم عمق، را جذب کرده و بعد از مرگ اجساد آنها با جریان های دریاچه یی در نواحی عمیق کف دریاچه همراه با لای و



شکل ۴. نمای کلی رسوبات سالجینه‌یی (رسوبات افقی نشانه‌ی رسوب‌گذاری آرام است).



شکل ۵. آشفته‌گی رسوبات سالجینه بر اثر زلزله.



شکل ۶. پرشدگی ترک و شکاف‌های سالجینه‌ها توسط رسوبات جوان‌تر.

تواتری از لایه‌های نرم رس و لای و از عمق ۴۰ متر به بعد بیشتر لای با رنگ تیره است. در آزمایش دانه‌بندی متوسط درصد عبوری از الک ۲۰۰ مصالح نسبت به عمق در شکل ۷ نشان داده شده است که بیانگر رسوبات ریزدانه است. در شکل ۸ حدوداً اتر برگ رسوبات بر روی نمودار پلاستیسیته کاساگرانده نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مصالح عمدتاً در حوالی خط A و در زیر خط $LL=50$ قرار گرفته‌اند. از این رو جنس رسوبات رارس لاغر

توصیف خاک در طبقه‌بندی یکنواخت

عمق (متر)	توصیف خاک
۱۰	CL-ML
۲۰	ML
۳۰	CL-ML
۳۵	ML
۴۰	ML
۵۰	ML
۶۰	CL-ML
۷۰	CL
۸۰	ML
۹۰	CL-ML
۱۰۰	CH
۱۱۰	CL-ML
۱۲۰	ML
۱۳۰	CL-ML

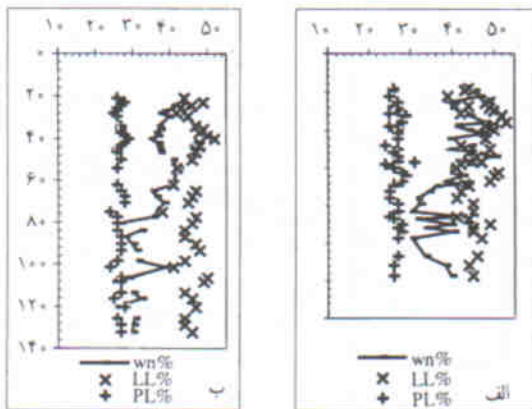
CL= رس یا خاصیت کسناسی کم
CH= رس یا خاصیت کسناسی زیاد
ML= لای یا خاصیت کسناسی کم

شکل ۳. لایه‌بندی گمانه‌ی اکتشافی در محل گمانه‌ی CB-۲.

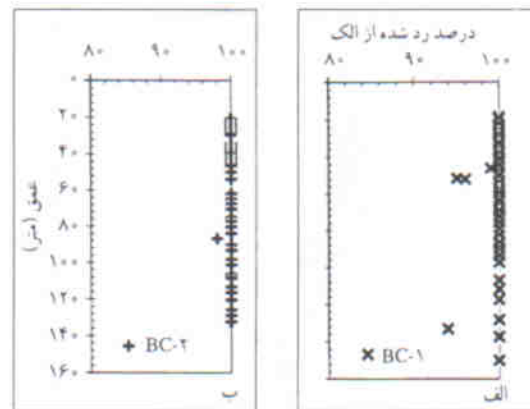
مغزه‌هایی که از گمانه‌ها به دست آمده همگی کم و بیش به رنگ خاکستری تیره‌اند. چگالی این رسوبات از سطح به پایین تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. چگالی رسوبات بین $1/2$ تا ۲ تن بر متر مکعب است؛ از این رو میانگین $1/6$ تن بر متر مکعب را می‌توان برای آنها در نظر گرفت. نهشته‌های دریاچه حالت لایه‌یی دارند و به رنگ خاکستری روشن و تیره تا خیلی تیره‌اند. این لایه‌ها را سالجینه^۴ می‌نامند که ضخامت متفاوت دارند. به‌طور میانگین می‌توان برای هر سالجینه ضخامت $5/0$ میلی‌متر را در نظر گرفت. (شکل ۴). چنان‌که دیده می‌شود، روی بعضی از مغزه‌ها حالت افقی سالجینه‌ها به‌هم خورده و دستخوش آشفته‌گی^۵ شده‌اند. (شکل ۵). بدون تردید این وضعیت اثر وقوع زلزله را در تشکیل رسوبات سست به‌اثبات می‌رساند، که باید این وضعیت را به‌عنوان نیرویی مؤثر بر رسوبات، پس از بارگذاری در نظر گرفت. در برخی از مغزه‌ها نیز نشانه‌هایی از ترک‌دار شدن و پرشدن بعدی شکاف‌ها دیده می‌شود. این وضعیت بیانگر آن است که رسوبات پس از تشکیل و متراکم شدن بر اثر حرکات تکنیکی از آب خارج شده‌اند و با از دست دادن آب و خشک شدن ترک‌دار شده، سپس مجدداً به‌زیر آب رفته و از رسوبات ثانویه پر شده‌اند. (شکل ۶).

ارزیابی خواص فیزیکی لایه‌های رسوبی بستر طبیعی دریاچه

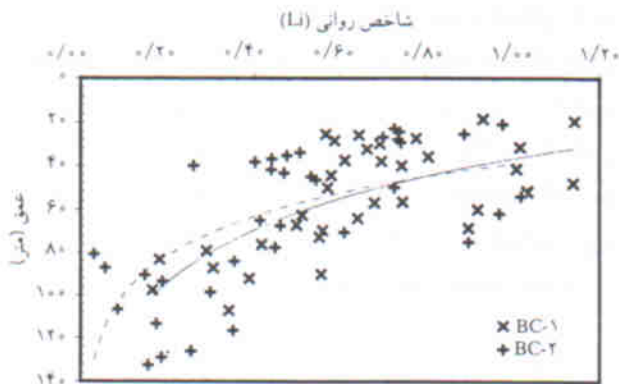
براساس آزمایش‌های طبقه‌بندی و تشریح نظری، رسوبات کف دریاچه تا عمق حفاری شده در گمانه‌های CB-۱ و CB-۲ مشتمل بر



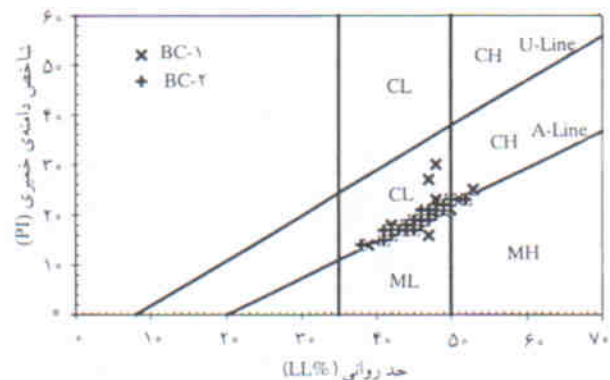
شکل ۹. تغییرات رطوبت با عمق در مقایسه با حدود اتربرگ.



شکل ۷. درصد رد شده از الک نمرة ۰۰۲.



شکل ۱۰. تغییرات شاخص روانی با عمق.



شکل ۸. موقعیت حدود اتربرگ رسوبات روی نمودار کاساگرانده.

که بر استحکام خاک‌های ریزدانه دلالت می‌کند و با رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

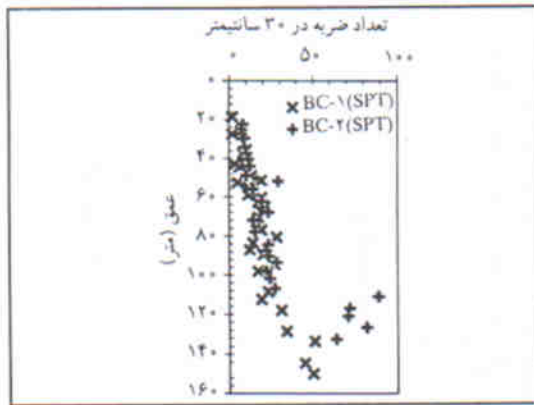
$$\text{شاخص روانی} = \frac{\omega_n - PL}{PI} \quad (۱)$$

شکل ۱۰ تغییرات شاخص روانی را با عمق نشان می‌دهد که یک روند نزولی دارد. تغییرات این شاخص بین ۰/۰ تا ۱/۱۵ بیانگر خاک سست در این منطقه از کف دریاچه است. از طرف دیگر چون کاهش رطوبت لایه‌های رسوبی نسبت به عمق با کاهش خمیرسانی همراه است، فعالیت لایه‌های رسوبی نسبت به عمق نیز یک روند روبه کاهش دارد (شکل ۱۱). در این شکل دیده می‌شود که پراکندگی داده‌ها بسیار زیاد است. این مسئله بستگی به وجود رگه‌های ظریف ماسه‌ی ریزدانه در بین لایه‌های لای-رسی دارد. این رگه‌های ماسه‌یی با ضخامت حداکثر دو میلی‌متر در تمامی اعماق و در هر دو گمانه مشاهده شده‌اند. رگه‌های ماسه‌یی به صورت یک شبکه و به‌عنوان لایه‌ی تراوا، طول مسیر مؤثر در زهکشی لایه‌های رسوبی را کاهش داده و به‌این ترتیب پدیده‌ی تحکیم را شدت می‌بخشد.^{۱۱}

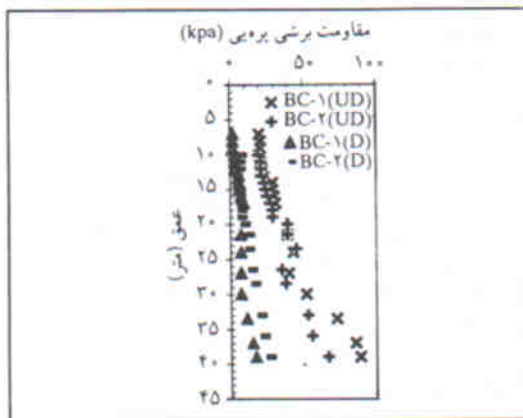
شاخص فعالیت، A، شاخصی است که دلالت بر رفتار خاک‌های رسی دارد و در آن نسبت بین دانه‌ی خمیری، PI، به درصد وزنی رس در خاک به‌عنوان شاخص فعالیت تعریف می‌شود. فعالیت خاک‌های

CL تا لای پلاستیک ML می‌توان نامید. با توجه به مشاهده‌ی مقادیر مختلف مواد آلی در رسوبات هیچ‌گونه آزمایشی مبنی بر تعیین میزان دقیق مواد آلی در رسوبات انجام نشده است. همان‌طوری که اشاره شد رسوبات عهد حاضر کف دریاچه رس لای دار خمیری همراه با مقدار قابل توجهی مواد آلی فعال است. وجود مواد آلی فعال توسط آزمایش حد روانی دوگانه بر روی نمونه‌های اعماق مختلف به‌اثبات رسیده است. یعنی حد روانی نمونه‌های خشک شده در کوره‌ی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های خشک شده در هوا اندازه‌گیری و نتایج حاصل مقایسه شده‌اند. نسبت حد روانی روی نمونه‌های خشک شده در کوره به حد روانی نمونه‌های خشک شده در هوا کمتر از ۰/۷۵ است که بیانگر ماده‌ی آلی فعال در خاک است.

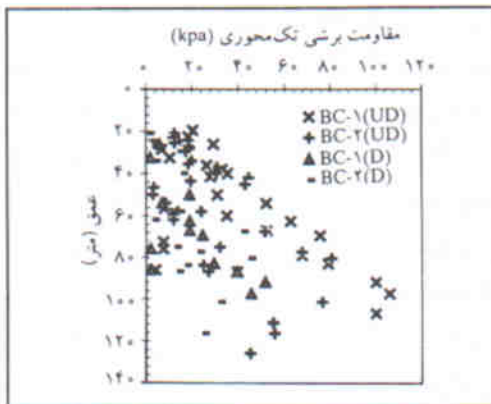
در شکل ۹ تغییرات رطوبت طبیعی و حدود اتربرگ لایه‌های رسوبی نسبت به عمق مقایسه شده است. در این شکل‌ها دیده می‌شود که وضعیت رطوبت طبیعی خاک کم و بیش بین حد روانی و حد خمیری قرار می‌گیرد. در لایه‌های سطحی بیشتر تمایل به حد روانی است و روند کلی رطوبت با عمق از یک کاهش نسبی برخوردار است. انعقاد رسوبات، آب‌دهی و تراکم آنها با افزایش عمق دلیل دیگری بر کاهش خمیرسانی نسبت به عمق است. شاخص روانی پارامتری است



شکل ۱۲. تعداد ضربات نفوذ استاندارد با عمق.

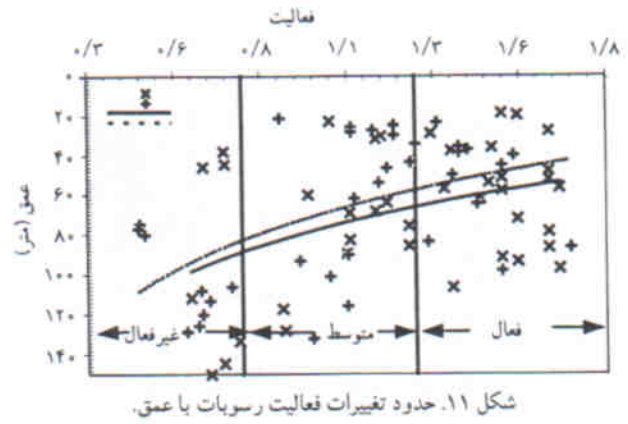


شکل ۱۳. تغییرات مقاومت برشی پرهی با عمق.



شکل ۱۴. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری با عمق.

است.^[۱۲] ارزیابی پارامترهای رفتار مکانیکی لایه‌های بسیار نرم بستر دریاچه با آزمایش برش پرهی امکان‌پذیر نیست و عملاً باید از مقاومت برشی آن صرف‌نظر کرد. از ژرفای ۸ تا ۴۰ متر مقاومت لایه‌ها با آزمایش برش پرهی (شکل ۱۳)، و از عمق ۲۰ متر به بعد هم مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده تعیین شده است (شکل ۱۴). از مقایسه‌ی شکل‌های ۱۲ تا ۱۴



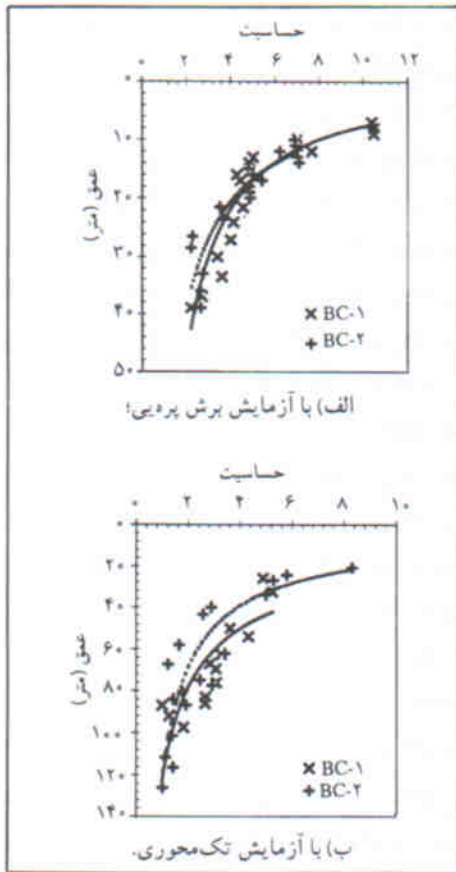
شکل ۱۱. حدود تغییرات فعالیت رسوبات با عمق.

رسی را از سویی دیگر می‌توان به خواص فیزیکی - شیمیایی خود کانی‌های رس نیز نسبت داد. به عبارت دیگر فعالیت یک خاک رسی بستگی به مقدار آبی دارد که به سطح کانی رس می‌چسبد. بنابراین خاک‌های با فعالیت بیشتر رفتار رسی‌تر دارند.^[۱۰] از این رو در شکل ۱۱ دیده می‌شود که فعالیت لایه‌های رسوبی در حد ایلیت تا کلسیم مونت موریلونیت $1/25 > A$ است. ناگفته نماند که خاک‌های رسی و سیمان‌دار با حساسیت $S < 16$ ، از خاصیت کسب مقاومت با زمان نیز برخوردارند.^[۱۱]

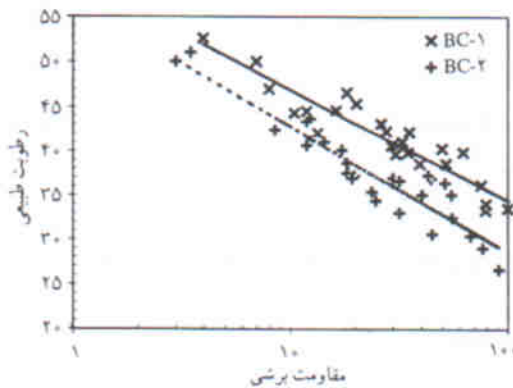
همبستگی بین مقاومت برشی و سایر شاخص‌های فیزیکی لایه‌های رسوبی بستر دریاچه

روند رسوب‌گذاری در دریاچه شریطی را به وجود آورده که در ضخامت ۱ تا ۸ متری بستر دریاچه لایه‌های رسوبی به علت دارا بودن رطوبت بیش از حد روانی بسیار سست‌اند. از آنجا که مطالعات مقاومت خاک‌های بسیار سست بر مبنای ساخت و بافت آنها صورت می‌گیرد، بر اساس مشاهدات میکروسکوپی نتیجه گرفته می‌شود که در حضور مواد آلی پوششی از آب سطح دانه‌های خاک رافرا گرفته و سبب از بین رفتن اصطکاک واقعی بین ذرات شده است. از این رو در این محدوده مقاومت برشی صرفاً در اثر وجود نیروهای «واندروالس» است. با افزایش عمق و کاهش مواد آلی در اثر فساد شیمیایی و همچنین وجود لایه‌های نازک ماسه‌یی سبب تحکیم رسوبات می‌شود. و رطوبت به حد خمیری می‌رسد. در نتیجه چسبندگی و اصطکاک افزایش می‌یابد. روند تغییرات خواص مکانیکی لایه‌ها در بررسی آزمایش‌های صحرایی (S.P.T) و برش پرهی (پرهی) به اثبات می‌رسد. تعداد ضربات نفوذ استاندارد از عمق ۲۰ تا ۱۵۰ متر حدوداً بین ۴ تا ۹۰ ضربه بازا ۳۰ سانتی‌متر نفوذ است. (شکل ۱۲).

بهترین روش برای تخمین مقاومت برشی خاک‌های لای و رس دارای مواد آلی یا سیمانی شده آزمایش درجای برش پرهی



شکل ۱۵. تغییرات حساسیت لایه‌های رسوبی با عمق.



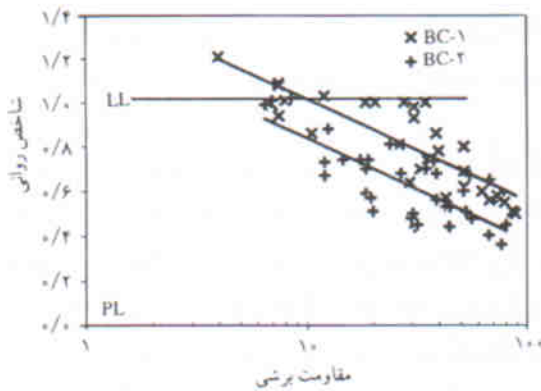
شکل ۱۶. تغییرات مقاومت برشی درجا با رطوبت طبیعی.

همان‌طور که اشاره شد، مقاومت برشی زهکشی نشده تحت تأثیر تغییرات رطوبت خاک قرار می‌گیرد؛ یعنی افزایش یا کاهش رطوبت در خاک‌های ریزدانه باعث سستی و سختی آنها می‌شود. از این رو منطقی است که ابتدا تغییرات مقاومت برشی با رطوبت بررسی شود. در شکل ۱۶ تغییرات لگاریتم مقاومت برشی با رطوبت نشان داده شده است. البته ناهمگن بودن و تغییر جنس لایه‌ها، شرایط محیط رسوب‌گذاری و نهایتاً محتوای ماده آلی رسوبات در این همبستگی

چنین استنباط می‌شود که در هر سه آزمایش در دو گمانه‌ی CB-۱ و CB-۲ روند کلی مقاومت و باربری لایه‌های رسوبی نسبت به عمق افزایش می‌یابد.

در بسیاری از تحقیقات ژئوتکنیکی به‌علت کمبود اطلاعات و داده‌های با کیفیت بالا، از نتایج حاصل از آزمایش روی نمونه‌های دست‌خورده و بازسازی شده با رطوبت طبیعی نیز در طراحی استفاده می‌شود به‌خصوص در خاک‌های تحکیم یافته عادی و حساس. از این رو مقاومت برشی خاک به‌عنوان حد پائینی مورد استفاده قرار می‌گیرد که قطعاً از مقاومت برشی واقعی آن کمتر است. علت این کاهش مقاومت برشی، از بین رفتن سیمان طبیعی رسوبات است که حاصل دست‌خوردگی است و در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) به وضوح دیده می‌شود. [۱۳ و ۱۴]

از نتایج آزمایش مقاومت برشی بر روی نمونه‌های دست‌خورده برای تعیین حساسیت لایه‌های رسوبی استفاده شده است که در آن نسبت بین مقاومت برشی در حالت دست‌نخورده به حالت دست‌خورده به‌عنوان «حساسیت خاک» تعریف می‌شود. براساس نتایج هر یک از دو آزمایش برش پره‌یی و مقاومت فشاری تک‌محوری تغییرات پارامتر حساسیت محاسبه و نسبت به عمق برای هر دو گمانه‌ی CB-۱ و CB-۲ نشان داده شده است (شکل ۱۵). در نتیجه دیده می‌شود که لایه‌های رسوبی در محل دو گمانه دارای حساسیت متوسط تا بسیارند ($2 < S < 11$). حساسیت خاک‌های رسی نرم علاوه بر جنس، بافت، منشاء پیدایش، سن و تنش‌های وارده بر این خاک‌ها، تابع شاخص روانی نیز هست. از این رو هر چه خاک حساس‌تر باشد شاخص روانی آن نیز بیشتر، مقاومت برشی و اصطکاک داخلی آن کمتر و رطوبت طبیعی آن به حد روانی نزدیک‌تر است. [۱۵] همان‌طوری که در شکل ۹ دیده می‌شود رطوبت طبیعی و حدود اثر بزرگ لایه‌های رسوبی کف دریاچه نسبت به عمق مقایسه شده‌اند. در این شکل دیده می‌شود که رطوبت طبیعی تا عمق حدود ۷۰ متر به حد روانی، و از آن پس تا عمق حفاری شده به حد خمیری نزدیک‌تر است. این بدان معنی است که در اعماق بیشتر به دلیل تحکیم یافتگی رسوبات در اثر اعمال تنش‌های بیشتر و از دست دادن بافت منعقد، حساسیت کم‌تر است و لذا دست‌خوردگی نمونه‌های گرفته شده نیز کمتر است. ولی در لایه‌های سطحی به‌علت داشتن رطوبت بالا نزدیک به حد روانی حساسیت بیشتر است و دست‌خوردگی نمونه‌های گرفته شده هم بیشتر خواهد بود. چنین استنباط می‌شود که مقاومت برشی حاصل از برش پره‌یی نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری از کیفیت بهتری برخوردار بوده که میزان حساسیت بالاتری را نشان داده‌اند.



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت برشی با شاخص روانی.

جدول ۱. نسبت مقاومت برشی به فشار سربار مؤثر با آزمایش برش پره‌یی و برش تک‌محوری.

CB-۱	$C_{II}/\sigma_v(\text{vane})$	۰/۲۱-۰/۴۳
CB-۱	$C_{II}/\sigma_v(\text{uncon})$	۰/۰۱-۰/۱۶
CB-۲	$C_{II}/\sigma_v(\text{vane})$	۰/۱۶-۰/۲۴
CB-۲	$C_{II}/\sigma_v(\text{uncon})$	۰/۰۱-۰/۱۳
CB-۱	$S_{II}/\sigma_v(\text{triaxial})$	۰/۱۳-۰/۵۹
CB-۲	$S_{II}/\sigma_v(\text{triaxial})$	۰/۱۶-۰/۷۱
Skempton (۱۹۵۳)	$S_{II}/\sigma_v(\text{triaxial})$	۰/۴۳-۰/۱۶
Bjerrum (۱۹۵۴)	$S_{II}/\sigma_v(\text{triaxial})$	۰/۲۸-۰/۰۸

رسوبی کف دریاچه از وزن مخصوص طبیعی غوطه‌ور استفاده شده است. اختلاف زیاد نسبت C_{II}/σ_v در آزمایش‌های برش پره‌یی و مقاومت تک‌محوری احتمالاً به علت دست‌خوردگی نمونه‌ها در آزمایش تک‌محوری بوده است. از این رو به نظر می‌رسد که داده‌های حاصل از آزمایش برش پره‌یی درست‌تر باشند. بنابراین تحقیقات انجام شده، نسبت C_{II}/σ_v کمتر از ۰/۱۵ که در رسوبات دریائی دیده می‌شود شدیداً بستگی به مقاومت رسوب، آرایش دانه‌بندی، کانی‌شناسی (که در مجموع تحت عنوان «مرزبندی ساختاری»^۶ نامیده می‌شود) و تاریخچه‌ی تنش رسوبات دارد و در نتیجه دلالت بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی ϕ کم برای رسوبات می‌کند. [۲۰، ۱۹]

در مورد لایه‌های رسوبی کف دریاچه همبستگی بین نسبت C_{II}/σ_v در برابر L_i در شکل ۱۸ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این شکل دیده می‌شود که نسبت C_{II}/σ_v کمتر از ۰/۱۵ و حساسیت زیاد، مربوط به لایه‌های رسوبی است که بیشترین مقدار L_i را دارا هستند. پس نتیجه می‌شود که این پارامترها با زیرساختار رسوبات کاملاً ارتباط دارند. یعنی ساخت و بافت این رسوبات ناپایدار و روان‌گرا، و قابلیت دست‌خوردگی آنها هنگام نمونه‌برداری زیاد است.

دخالت دارند و به دلیل این تغییرات، پراکندگی بسیاری در داده‌های شکل ۱۶ دیده می‌شود. اما روند کلی افزایش لگاریتمی مقاومت برشی با کاهش رطوبت به خوبی مشاهده می‌شود. البته باید در نظر داشت که تغییرات بسیار زیاد مقاومت برشی لایه‌ها با توجه به تغییرات کم شاخص روانی ($0/2 < L_i < 1/2$) نشانه‌ی خطای اندازه‌گیری در مقاومت برشی یا اختلاف شدید در ترکیب کانی‌شناسی لایه‌هاست که باید از آن صرف‌نظر کرد، زیرا به خوبی دیده می‌شود که لایه‌های مشابهی که رطوبت طبیعی تقریباً مساوی دارند مقاومت برشی آنها بیش از ۵۰٪ اختلاف دارند. در شکل ۱۶ دیده می‌شود که تغییرات کم رطوبت (تا حدود ۳۵٪) تأثیر قابل توجهی بر مقاومت برشی دارد. به خصوص در رطوبت‌های نزدیک‌تر به حد خمیری - ولی در رطوبت‌های زیاد (نزدیک به حد روانی) تغییرات مقاومت برشی با پراکندگی کمتری همراه است. چنان‌که مقاومت برشی با رطوبت در حد روانی و حد خمیری مقایسه شود، یعنی رطوبت خاک به عنوان شاخص روانی در نظر گرفته شود (نمودار تغییرات لگاریتم مقاومت برشی با شاخص روانی، L_i ، در شکل ۱۷) نقطه‌ی صفر روی محور شاخص روانی معادل حد خمیری، و نقطه‌ی یک معادل حد روانی است. در این شکل مشاهده می‌شود که رطوبت طبیعی که در آن مقاومت برشی اندازه‌گیری شده، غالباً بین حد خمیری و حد روانی بوده و هیچ‌گونه مقاومت برشی در رطوبت پایین‌تر از حد خمیری گزارش نشده است در حالی که مقاومت برشی بالاتر از حد روانی نیز برای رس‌های تحکیم‌نیافته قابل اغماض است.^{۱۶} از همبستگی بین مقاومت برشی با رطوبت یا شاخص روانی می‌توان نتیجه گرفت که برای تخمین مقاومت برشی خاک‌های عادی تحکیم یافته با هر رطوبت طبیعی، بین حد روانی و حد خمیری، از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌کنند.^{۱۷} بنابراین در تخمین مقاومت برشی دقت در اندازه‌گیری شاخص‌های حد روانی و خمیری و نیز رطوبت طبیعی بسیار اهمیت دارد.

$$C_{II} = 10^{-(2/2L_i - 3)} \quad (2)$$

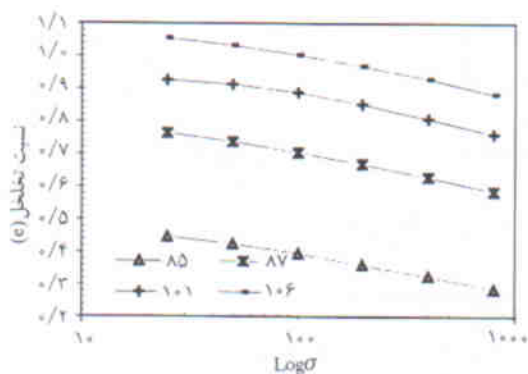
در نهشته‌های رسی تحکیم یافته‌ی عادی کف دریا نسبت بین مقاومت برشی دست‌نخورده به فشار سربار مؤثر یا فشار تحکیمی C_{II}/σ_v مورد بررسی قرار گرفته است. محققان این نسبت را برای خاک‌های با تحکیم عادی بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۳^{۱۱} و نیز بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۸ گزارش کرده‌اند.^{۱۸} حداکثر نسبت C_{II}/σ_v برای خاک‌های تحکیم یافته‌ی عادی ۰/۵ است. مقدار این نسبت برای لایه‌های رسوبی کف دریاچه در گمانه‌های CB-۱ و CB-۲ بسته به نوع آزمایش در تعیین مقاومت برشی در جدول ۱ داده شده است. که در آن برای محاسبه‌ی فشار سربار مؤثر با توجه به اشباع بودن لایه‌های

$$C_{II}/\sigma_v = 0.05PI + 0.01 \quad (4)$$

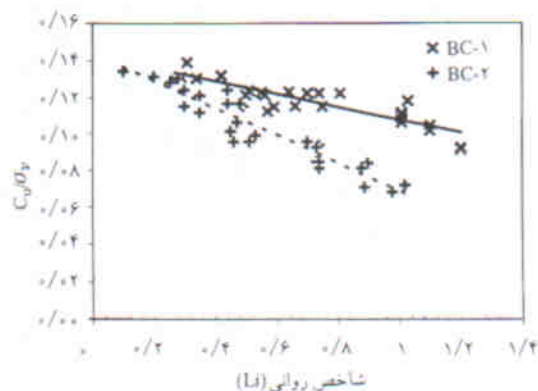
$$C_{II}/\sigma_v = 0.04PI + 0.01 \quad (5)$$

همبستگی بین شاخص‌های تحکیم و سایر شاخص‌های فیزیکی با آزمایش تحکیم یک‌بعدی

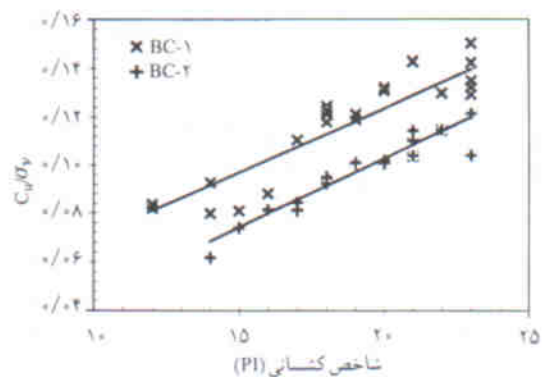
در تحلیل نشست پی‌ها، داشتن شاخص فشردگی C_c و ضریب تحکیم C_v از اهمیت خاصی برخوردار است که از آزمایش تحکیم یک‌بعدی به دست می‌آیند. با توجه به طبیعت خاک‌های حساس این محل، طی یک برنامه‌ی آزمایشگاهی نمونه‌های دست‌نخورده‌ی U4 که از اعماق مختلف به دست آمده است تحت آزمایش تحکیم یک‌بعدی قرار گرفته‌اند. در شکل ۲۰ نمودارهای نسبت تخلخل e در مقابل لگاریتم تنش مؤثر σ'_v در عمق‌های مختلف نشان داده شده است که به صورت خط نسبتاً مستقیم‌اند. چنانکه در این نمودارها دیده می‌شود علی‌رغم اختلاف زیاد در جنس لایه‌های رسوبی و نسبت تخلخل اولیه‌ی آنها همگی رفتار یکسانی دارند و به نظر می‌رسد که لایه‌های رسوبی در اثر وزن لایه‌های بالائی خود به‌طور عادی تحکیم یافته‌اند و هیچ‌گونه فشار پیش‌تحکیمی در آنها دیده نمی‌شود. از آنجائی‌که در نمونه‌های آزمایش تک‌محوری و برش پره‌یی دست‌خورده‌گی هائی مشاهده شده ممکن است در نمونه‌های این آزمایش نیز دست‌خورده‌گی‌هایی وجود داشته باشد. این امر باعث محو فشار پیش‌تحکیمی در نمودارهای $e - \log \sigma'_v$ می‌شود. شیب منحنی $e - \log \sigma'_v$ شاخص فشردگی C_c نام دارد. میانگین شاخص فشردگی که از آزمایش‌های تحکیم به دست آمده بین ۰/۱۳۱ تا ۰/۱۷۶ است. [۲۲] از آنجا که شاخص فشردگی مستقیماً در تحلیل نشست پی‌ها به‌کار می‌رود، همبستگی این شاخص با سایر شاخص‌های فیزیکی که اندازه‌گیری آنها در خاک آسان‌تر و با دقت بیشتری انجام می‌گیرد از اهمیت خاصی برخوردار است. در شکل ۲۰ نمودارهایی که شیب بیشتری دارند دارای نسبت تخلخل بیشتری هستند و در



شکل ۲۰. نمودار نسبت تخلخل در برابر لگاریتم تنش عمودی.



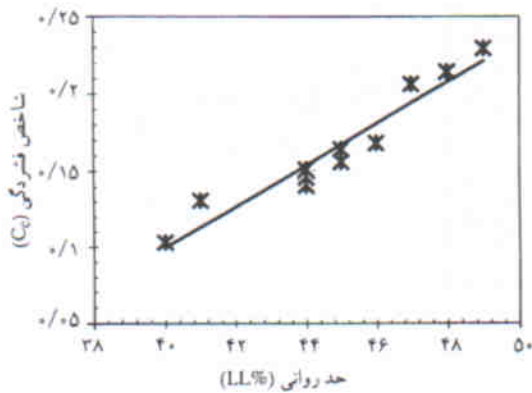
شکل ۱۸. همبستگی نسبت C_{II}/σ_v با Li .



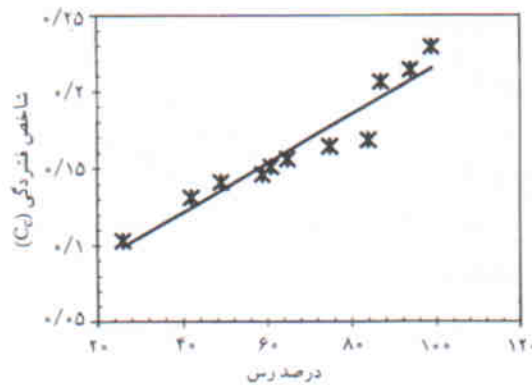
شکل ۱۹. همبستگی نسبت C_{II}/σ_v با PI .

از رسم نمودار نسبت C_{II}/σ_v در برابر PI به سهولت می‌توان دریافت که کمترین میزان نسبت C_{II}/σ_v مربوط به لایه‌هایی است که پایین‌ترین مقدار شاخص PI را دارند. این داده‌ها در دو باند قرار می‌گیرند: داده‌های آمده در باند پایین‌تر نشان‌دهنده‌ی رس با حساسیت کمتر، و در باند بالاتر نشان‌دهنده‌ی رس با حساسیت زیادتر است (شکل ۱۹). این همبستگی به ترتیب با روابط ۳ و ۴ بیان شده است. [۲۱] همچنین یک رابطه‌ی خطی بین نسبت C_{II}/σ_v و PI ارائه شده است که در آن، (طبق رابطه‌ی ۵) با افزایش نسبت C_{II}/σ_v ، شاخص پلاستیسیته هم افزایش می‌یابد. روابط ۳ و ۴ که توسط نویسنده برای این همبستگی به دست آمده است با رابطه‌ی ۵ اندکی اختلاف دارد. چنین استنباط می‌شود که در رسوبات دریاچه‌یی شور و با نسبت C_{II}/σ_v کمتر از ۰/۱۵، رسوبات حساس‌تر و مرزبندی ساختاری آنها شدیدتر و پایدارتر از رسوبات دریائی است. باید توجه داشت که این روابط همگی خطی بوده و با داشتن PI و تنش مؤثر سربار در یک محل می‌توان مقاومت برشی خاک را تخمین زد. روابط ۳ و ۴ به ترتیب مشخص‌کننده‌ی حد پائین و حد بالا در این همبستگی هستند.

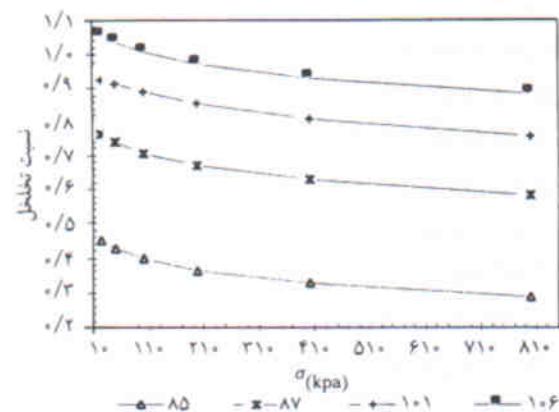
$$C_{II}/\sigma_v = 0.05PI - 0.01 \quad (3)$$



شکل ۲۲. همبستگی شاخص فشردگی با حد روانی.



شکل ۲۳. همبستگی شاخص فشردگی با میزان درصد رس در رسوبات.



شکل ۲۴. نمودار نسبت تخلخل در برابر تنش عمودی.

$$m_v = \frac{a}{1+e_p} \quad (9)$$

$$k = C_v m_v \gamma_w \quad (10)$$

در این جدول شاخص‌های مختلف تحکیم که بر روی نمونه‌های مختلف، و نیز در بارگذاری‌های متفاوت در گمانه‌های CB-۱ و CB-۲ به دست آمده‌اند نیز نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ضریب تحکیم پیوسته در لایه‌های مختلف تغییر می‌کند که خود به علت وجود مواد آلی در رسوبات است.

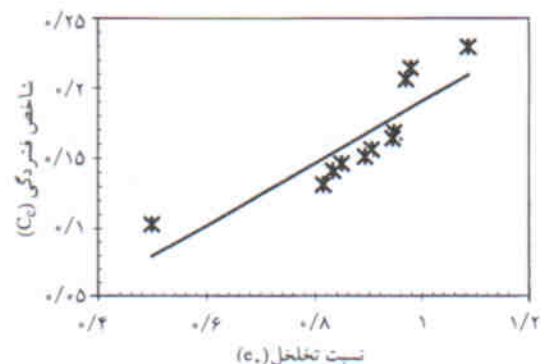
حقیقت می‌توان گفت که بین این دو شاخص خاک یعنی C_c و e همبستگی بسیار خوب است، (شکل ۲۱). در شکل ۲۲ همبستگی C_c با LL مورد بررسی قرار گرفته است که طبق آن هر چه حد روانی لایه‌های رسوبی بیشتر باشد مقدار C_c نیز بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت که شاخص فشردگی با حد روانی نسبت مستقیم دارد. این همبستگی خوب ممکن است به علت نزدیک بودن رطوبت طبیعی خاک به حد روانی باشد که در اغلب لایه‌های رسوبی چنین است. از طرف دیگر هر چه حد روانی بیشتر باشد محتوای دانه‌های رس خاک بیشتر است و در نتیجه شاخص فشردگی با درصد رس موجود در خاک نیز نسبت مستقیم دارد (شکل ۲۳). در این صورت می‌توان نتیجه گرفت که با ایجاد همبستگی بین شاخص‌های مختلف و استفاده از فرمول‌های تجربی به دست آمده از این همبستگی‌ها بدون انجام آزمایش تحکیم می‌توان شاخص فشردگی را با دقت کافی به دست آورد. در تمام این همبستگی‌ها ضریب همبستگی $R > 0.85$ است که بیانگر رابطه‌ی خطی خوب است. رابطه‌های تجربی ۶ و ۷ و ۸ بین C_c و e و LL و درصد رس به ترتیب زیر داده شده است که می‌توان از آنها در مورد رسوبات کف دریاچه ارومیه استفاده کرد.

$$C_c = 0.22e_p - 0.03 \quad (6)$$

$$C_c = 0.013 LL - 0.44 \quad (7)$$

$$C_c = \%0.002 \text{clay} - 0.06 \quad (8)$$

با استفاده از نمودار شکل ۲۴ از رسم تغییرات نسبت تخلخل در برابر فشار ضریب قابلیت فشردگی ($a = \Delta e / \Delta \sigma$) به دست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان ضریب کاهش حجم m_v را از رابطه‌ی ۹ به دست آورد. که نتایج این محاسبه در جدول ۲ ارائه شده است. از رابطه‌ی ۱۰ نیز ضریب نفوذپذیری لایه‌ها به دست می‌آید و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲۱. همبستگی شاخص فشردگی با نسبت تخلخل.

جدول ۲. شاخص‌های مختلف تحکیم یک بعدی.

شماره گمانه	عمق (متر)	a_v	m_v (cm ² /kg)	c_v (cm ² /sec)	K (cm/sec)
CB-۱	۷۶	۰/۰۵۶	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱۱۰	$۳/۱۱ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۱	۷۹	۰/۰۵۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۲۰۰	$۵/۰۷ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۷۵	۰/۰۳۴	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۷۶	$۵/۱۷ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۸۴	۰/۰۶۳	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱۱۲	$۳/۳۸ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۸۷	۰/۰۳۴	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۰۵	$۳/۸۰ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۹۸/۵	۰/۰۳۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۲۵	$۴/۲۵ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۱۰۱/۵	۰/۰۳۴	۰/۰۱۸	۰/۰۰۱۶۹	$۳/۱۱ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۱۰۶/۵	۰/۰۳۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۱۲۱	$۲/۳۰ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۱۱۱/۵	۰/۰۲۲۰	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۱۷۱	$۲/۵۱ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۱۱۶/۵	۰/۰۳۷	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۱۴	$۴/۰۶ \times ۱۰^{-۵}$
CB-۲	۱۲۶	۰/۰۳۱	۰/۰۱۶	۰/۰۰۱۱۸	$۱/۸۸ \times ۱۰^{-۵}$

نتیجه‌گیری

ساخته نشده، نمونه‌گیری تا عمق ۸ متر به دلیل نرمی شدید رسوبات امکان‌پذیر نبوده و همچنین آزمایش درجای برش پره‌یی نیز موفقیت‌آمیز نبوده است. لذا مقاومت برشی لایه‌ها تا این عمق قابل چشم‌پوشی است و صرفاً تأثیرات شیمیایی آن بر سازه‌ی بزرگراه حائز اهمیت است. از نظر ساخت و بافت و تراکم رسوبات دریاچه‌یی، رابطه‌ی مستقیم حساسیت نسبت به عمق قابل تعمیق است که در آن روند روبه‌کاهش حساسیت با افزایش عمق خود دلیل بر افزایش تراکم و در نتیجه افزایش مقاومت نسبت به عمق است. مقدار نسبت $C_{u/0.1}$ برای خاک‌های تحکیم یافته‌ی عادی بنا به پیشنهاد اسکمپتون حداکثر ۰/۵ است. این نسبت برای رسوبات کف دریاچه براساس آزمایش برش پره‌یی بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۳ است. پایین بودن این مقدار احتمالاً به علت ساختار سیمانی است که موجب عدم انتقال تنش‌های ناشی از وزن سربار لایه‌های زیرین شده است. در نتیجه لایه‌های زیرین شاخص تخلخل بالائی دارند. میزان شاخص فشردگی $C_c = ۰/۱۷۶ - ۰/۱۳۱$ به دست آمده از آزمایش تحکیم عادی هم بیانگر حساسیت زیاد رسوبات است.

رسوبات شور کف دریاچه‌ی ارومیه به سبب ناهمگنی و ضخامت زیاد و داشتن تخلخل بالا و عدم تحکیم یافتگی خاصیت فشردگی زیاد دارند. از این رو بررسی و شناسائی خواص فیزیکی و مکانیکی آنها اهمیت زیادی دارد.

رسوبات شور این دریاچه به سبب شرایط خاص فیزیکی - شیمیایی و زیست‌محیطی از نظر مهندسی ژئوتکنیک بسیار اهمیت دارند. از آنجا که پدیده‌های مختلفی در رسوب‌گذاری در این محیط‌ها دخالت دارند، رسوبات دارای ساخت و بافت ویژه‌یی هستند. پدیده‌ی انعقاد و وجود نیروهای کششی بین یون‌های مختلف در الکترولیت و بالاخره فعالیت‌های زیستی موجودات عواملی هستند که در آرایش دانه‌های رسوبات و کانی‌شناسی دخالت داشته و سبب به وجود آمدن نهشته‌های کف دریاچه به صورت لخته‌یی یا اسفنجی می‌شوند و فضای بین آنها را الکترولیت آب شور فراگرفته است.

در طرح بزرگراه دریاچه‌ی ارومیه به خصوص در قسمت میانی

پانوش

1. flocculent-honeycombed
2. thixotropy
3. sesquioxides
4. varve
5. convolution
6. structural-bonding

منابع

۱. گزارش شهرابی و همکاران به وزارت راه و ترابری، زمین‌شناسی دریاچه ارومیه، (۱۳۶۶).

۲. گزارش مهندسان مشاور آب‌نیرو به وزارت راه و ترابری، مطالعات ژئوتکنیکی مسیر بزرگراه دریاچه ارومیه، (۱۳۷۱).
3. Skempton, A.W. and Sowa, V.A. The behavior of saturated clays during sampling and testing, *Geotechnique*, 13 (4), pp 269-290, (1963).
4. Harrison, P.W. A clay-till fabric its character and origin. *Journal of Geology*, 65 (3), pp 275-308, (1957).
5. Sorokina, G.V. Engineering Properties of Weak Soil at Foundations of Buildings, *Geotechnika 12 Selected translations of Russian geotechnical literature*, A.A. Balkema,

- Rotterdam, (1995).
6. Rominger, J.F. and Rutledge, P.C. Use of soil mechanics data in correlation and interpretation of Lake Agassiz Sediments, *Journal of Geology*, **60**, pp 60-180, (1952).
 7. Hight, D.W. Characterization of the Bothkennar clay implications for site investigation practice, *Geotechnique*, **42** (2), pp 377-388, (1992).
 8. Verigo, A.A. 1890 in Sorokina, G.V. Engineering Properties of Weak Soil at Foundations of Buildings, *Geotechnika 12 Selected translations of Russian geotechnical literature*, A.A. Balkema, Rotterdam (1995).
 9. Hight, D.W. and El-Ghamrawy, M.K. and Gens, A. Some results from a laboratory study of sandy clay and implications regarding its in-situ behavior, *Proceeding of the 2th International Conference on Behavior of the off-shore Structure*, **1**, pp 133-149, (1979).
 10. Skempton A.W. The colloidal Activity of clays, *Proceeding of the 3th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering* **1**, pp 57-61, (1953).
 11. Skempton, A.W. and Northey, R.D. The sensitivity of clays, *Geotechnique*, **3** (1), pp 30-53, (1952).
 12. Bjerrum, L. Geotechnical properties of Norwegian marine clays, *Geotechnique*, **4** (2), pp 49-69, (1954).
 13. Kenny, T.C. The influence of mineral composition on the shear strength of natural soils, *Proceeding of the geotechnical conference*, Oslo 1, pp 123-129, (1967).
 14. Berre, T. and Bjerrum, L. Shear strenght of normally consolidated clays, *Proceeding of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, USSR, **1**, pp 39-49, (1973).
 15. Voight, B. Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, *Geotechnique*, **23** (2), pp 256-267, (1973).
 16. Youssef, M.S. and EL-Ramli, A.H. and El-Demery, M. Relationships between shear strength, consolidation, liquid limit and Plastic limit for remolded clays, *Proceeding of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, **1**, pp 126-129, (1965).
 17. Worth, C.P. and Wood, D.M. The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils, *Canadian Geotechnical Journal* **15** (2), pp. 137-145, (1978).
 18. Bjerrum, L. and Simon, N.E. Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays, *Proceeding of the ASCE Research Conference on shear strength of cohesive soil*, Boulder, Colorado, pp 711-726, (1960).
 19. Penman, A.M.D. Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression. *Geotechnique*, **93** (3), pp 312-328, (1953).
 20. Bjerrum, L. Fundamental considerations on the shear strength of soil, *Geotechnique*, **2** (3), pp 209-218, (1951).
 21. Worth, C.P. Correlation of some engineering properties of soils, *Proceeding of the 2th International Conference on Behavior of off-shore Structure*, **1**, pp 121-132, (1979).
 22. Kenny, T.C. A review of recent research on strength and consolidation of soft sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal* **5** (2), pp 79-118, (1968).