

مطالعه ویژگی‌های ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی کرج

علی قنبری^۱، سید صدرالدین زرنگ‌زاده^۲، فریدون رضایی^۳ و سید جمال شیخ زکریایی^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران، ایران.

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

^۳ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۴/۱۵

چکیده

کرج یکی از کلان‌شهرهای کشور است که در سال‌های اخیر توسعه عمرانی و صنعتی قابل توجهی داشته است. بر همین اساس شناخت آبرفت آن که ساختگاه بسیاری از سازه‌های عمرانی و صنعتی است اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش بر اساس نتایج آزمون‌های فراوان صحرایی و آزمایشگاهی در محدوده ۱۰ کیلومتری جهان‌شهر تا کمال‌شهر، بخش میانی رسوبات آبرفتی کرج مطالعه و در شش لایه مستقل طبقه‌بندی شده است. افزون بر این، ضمن معرفی ویژگی‌های ژئوتکنیکی هریک از لایه‌های خاک در منطقه یادشده روابطی برای محاسبه مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک ارائه شده است. همچنین بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، صحرایی و ابزار سنجی، ظرفیت باربری خاک در بخش میانی رسوبات آبرفتی کرج مورد بحث واقع و روابطی برای برآورد آن ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: رسوبات آبرفتی کرج، ویژگی‌های ژئوتکنیکی، ظرفیت باربری، آزمایش نفوذ استاندارد

*نویسنده مسئول: علی قنبری

E-mail: Ghanbari@tmu.ac.ir

۱- مقدمه

کرج، یکی از پرجمعیت‌ترین شهرهای ایران و از مراکز اصلی صنعتی و اقتصادی کشور است. در سال‌های اخیر فعالیت‌های عمرانی و ساخت بناهای بلند مرتبه در این منطقه رشد قابل توجهی داشته است و پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز سازه‌های قابل توجهی در این منطقه احداث شود. بر همین اساس، شناخت ساختگاه سازه‌های مورد نظر اهمیت بسیاری دارد. شهرستان کرج میان طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه قرار گرفته است.

آبرفت تهران از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده و تاکنون مطالعات قابل توجهی برای شناخت آن صورت پذیرفته است. بر اساس تقسیم‌بندی Rieben (1966) رسوبات تهران بر حسب سن آنها به چهار سری A، B، C و D تقسیم شده‌اند. همچنین پدرامی (۱۳۵۶)، بربریان و همکاران (۱۳۶۴)، امینی (۱۳۷۳)، جعفری و کشاورز (۱۳۸۰)، پهلوان و همکاران (۱۳۸۲)، حائری و همکاران (۱۳۸۲) و قنبری (۱۳۸۸) به تشریح ویژگی‌های ژئوتکنیکی آبرفت تهران پرداخته‌اند. با این حال مطالعه رسوبات آبرفتی کرج چندان مورد توجه پژوهشگران واقع نشده است. این در حالی است که با توسعه صنعتی و عمرانی منطقه کرج توجه به وضعیت ژئوتکنیکی آبرفت یادشده ضروری است.

رسوبات آبرفتی کرج در دامنه‌های جنوبی زون البرز مرکزی واقع شده‌اند. وضعیت زمین‌شناسی عمومی و زمین‌ساخت این منطقه بیشتر از شرایط منطقه البرز مرکزی پیروی می‌کند. (Dedual (1967) کلیه سنگ‌های توفی و آتشفشانی ائوسن را با عنوان سازند کرج در پنج بخش طبقه‌بندی کرده است. این بخش‌ها شامل شیل زیرین، توف میانی، شیل‌های آسارا، توف بالایی و شیل‌های کندوان است. به‌طور کلی سن سازند کرج را از اواسط تا اواخر ائوسن میانی در نظر می‌گیرند و در برخی نقاط ممکن است تا اواخر ائوسن پایانی ادامه داشته باشد. وجود توف‌های سبز در این سازند که در بیشتر نقاط دیده می‌شود از آشکارترین ویژگی‌های سازند کرج است. ارتفاعات شمال کرج نیز به‌طور عمده از توف تشکیل شده است. توف‌های شمال کرج اصلی‌ترین نقش را در تشکیل اجزا و عناصر آبرفت‌های دشت کرج دارند و در نتیجه به عنوان سنگ مادر، اهمیت زیادی در شناخت و خاستگاه آبرفت‌های شهر کرج دارد. به‌طور کلی محدوده مورد مطالعه در این پژوهش بر روی رسوبات آبرفتی

جوان شکل گرفته است. به‌گونه‌ای که در رسوبات هیچ‌گونه چین‌خوردگی دیده نشده است. رسوبات آبرفتی گستره کرج حاصل فعالیت رودخانه کرج و همچنین رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشأ گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی هستند. در برداشت‌هایی که توسط نگارندگان انجام شده است به‌خوبی شرایط و علائم رسوبات رودخانه‌ای آشکار است و بر اساس این بررسی‌ها در برخی از مناطق نیز در جاهایی که رسوبات کف کانال رودخانه‌های دیرین حفظ شده‌اند، ایمبرکاسیون دیده می‌شود و سوی چپ‌ریز را می‌توان شمال-شمال‌خاوری، جنوب-جنوب‌باختری در نظر گرفت. البته شرایط آب و هوایی نیز در تشکیل رسوبات نقش مهمی داشته است.

بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط (Mirzaie & Motamed 2005) اجزای تشکیل‌دهنده رسوبات آبرفتی کرج بیشتر دارای کانی‌های پیروکسن، پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی مانند کلریت و نیز دانه‌های گرد شده کوارتز است. همچنین پژوهشگران یادشده زمان ته‌نشست این رسوبات را کواترنری و پلیستوسن می‌دانند. محیط رسوبی رسوبات حوضه کرج دشت سیلابی و رودخانه‌ای و آب و هوای منطقه سرد و مرطوب بوده است. مخروط افکنه کرج که در مسیر رودخانه کرج تشکیل شده است گسترده‌ترین و ژرف‌ترین مخروط افکنه منطقه و از دیدگاه منابع آب زیرزمینی بسیار غنی و مهم است. چون در حوضه آبریز این رودخانه بیشتر سازندها از نوع توف‌های سبز و سنگ‌های آتشفشانی سازند ائوسن کرج هستند، مواد تشکیل‌دهنده مخروط افکنه کرج بیشتر دانه‌درشت بوده و رس در آنها کمتر دیده می‌شود. وجود جریان‌های بسیار سطحی در منطقه سبب شده است که ستبرای طبقه اشباع نیز قابل توجه باشد. گسترش این مخروط افکنه ۲۱۰ کیلومتر مربع و ژرفای رسوبات آبرفتی آن ۶۰۰ متر برآورد شده است.

در این نوشتار بر اساس اطلاعات حاصل از آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی، طبقه‌بندی جدیدی برای رسوبات آبرفتی کرج ارائه می‌شود. همچنین پاره‌ای از ویژگی‌های مهندسی رسوبات آبرفتی کرج مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش در شناخت بیشتر رسوبات آبرفتی کرج مؤثر است و می‌تواند اطلاعات اولیه‌ای را برای مهندسیین طراح به دست دهد. با این حال، برای هر ساختگاه خاص لازم است مطالعات جداگانه‌ای برای تکمیل اطلاعات صورت پذیرد.

۲- بانک اطلاعاتی مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش بخش مرکزی و باختری شهرستان کرج را شامل می‌شود و بین دو منطقه جهان‌شهر تا کمال شهر در امتداد خیابان شهید بهشتی کرج قرار دارد. در شکل ۱ این محدوده نمایش داده شده است. طول منطقه مورد مطالعه ۱۰ کیلومتر و حدود ۱۰۰ گمانه و چاه دستی در آن حفر شده است. مترژ حفاری این گمانه‌ها حدود ۲۷۰۰ متر است. آزمایش نفوذ استاندارد در همه گمانه‌ها و در فواصل ۱/۵ متری به تعداد ۱۳۰۰ مرتبه انجام پذیرفته است. افزون بر آزمون‌های معمول تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک، بر روی نمونه‌های حاصل ۱۴ آزمایش تحکیم، ۱۱۱ آزمایش برش مستقیم تند و کند، ۲۴ آزمایش تک محوری و ۳۲ آزمایش سه محوری انجام گرفته است. همچنین در میان آزمون‌های صحرایی تعداد محدودی آزمون برش مستقیم برجا، نفوذپذیری صحرایی و بارگذاری صفحه انجام و نتایج آن در پژوهش حاضر استفاده شده است.

به منظور شناخت و طبقه‌بندی رسوبات آبرفتی کرج، ابتدا نتایج حاصل از حفر گمانه‌ها ارزیابی و نوع خاک و ویژگی‌های مکانیکی نقاط مختلف با هم انطباق داده شده و سپس با انتخاب ۶ لایه معرف برای تمامی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، طبقه‌بندی صورت گرفت. موقعیت گمانه‌های یادشده در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۳. لایه‌های شن ۱ و ۲ (G1 و G2)

لایه شن ۱ (G1) حجم کمتری نسبت به دیگر لایه‌های ساختگاه دارد و به صورت پراکنده در بیشتر مناطق و بویژه در نواحی باختری محدوده مورد مطالعه دیده می‌شود. بیشترین ستبرای این لایه ۲۰ متر و مرز آن با لایه G2 به صورت میان‌انگشتی و با دیگر لایه‌ها به صورت آشکار و تاپ است. دانه‌بندی خاک در این لایه شامل گروه‌های GP، GC، GM، GP-GC و GP-GM است و از نظر جنس قطعات عموماً از قطعات شن جدا شده، از سنگ‌های سازند کرج (توف، توف آهکی، شیل، شیل آهکی و...) تشکیل شده‌اند.

همچنین لایه شن ۲ (G2) در نواحی مرکزی و باختری به صورت پراکنده و در نواحی خاوری به صورت انبوه دیده می‌شود. این لایه سبب‌ترین لایه رسوبات آبرفتی کرج است و در برخی از نقاط ستبرای آن به بیش از ۳۰ متر می‌رسد. مرز آن با لایه شن ۱ به صورت میان‌انگشتی و با بقیه لایه‌ها به صورت آشکار و تاپ است. دانه‌بندی خاک در این لایه افزون‌بر دانه‌بندی یاد شده در لایه G1 شامل نمادهای GW-GM، GW-GC و GC-GM است. این لایه از نظر سنگ‌شناسی از قطعات و خرده‌های سازند کرج تشکیل شده است و تفاوت آن با لایه G1 در میزان درصد ریزدانه و درشت‌دانه است. در لایه G2 درصد شن خیلی بیشتر از لایه G1 است و قطعات درشت‌دانه در آن تا ابعاد ۴۰ سانتی‌متر در نواحی خاوری محدوده دیده شده است. به طور کلی لایه G2 مقاومت برشی، سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد بالاتری نسبت به لایه G1 دارد. در درون لایه‌های شن ۱ و ۲، عدسی‌های ماسه‌ای و رسی فراوانی با ستبراهای کمتر از ۲ متر دیده شده است که گسترش چندانی ندارند.

ویژگی‌های مکانیکی و دانه‌بندی لایه‌های یادشده در جدول ۳ آمده است. این لایه‌ها بیشترین زاویه اصطکاک خاک و سرعت موج برشی را در رسوبات آبرفتی کرج دارند. درصد ریزدانه در این لایه‌ها کمتر از دیگر لایه‌های رسوبات آبرفتی کرج است. بر اساس مطالعات این پژوهش و اطلاعات ارائه شده در بندهای پیشین این نوشتار، به طور کلی رسوبات آبرفتی کرج در یک محیط رودخانه‌ای تشکیل یافته‌اند و از شمال خاوری به جنوب باختری تا باختر ریزدانه‌تر می‌شود. در نواحی شمال خاوری رودخانه، رسوبات درشت‌دانه تا حد قطعات تخته‌سنگی نهشته شده است اما در نواحی باختری و جنوب باختری درصد ریزدانه در رسوبات بیشتر است. در نواحی مرکزی بر اثر تغییر در شرایط رودخانه (کم شدن انرژی محیط بر اثر تغییرات آب‌وهوایی) لایه‌های رسی نیز ته‌نشست شده‌اند.

۴- مروری بر بررسی‌های پژوهشگران پیشین پیرامون رابطه میان

مدول الاستیسیته خاک و N

افزون بر روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی روش‌های تجربی نیز برای محاسبه مدول الاستیسیته استفاده می‌شوند. در این روش، مدول الاستیسیته از همبستگی‌های موجود و روابط تجربی بیان شده در مراجع فنی به‌دست می‌آید.

بررسی صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده توسط نگارندگان نشان می‌دهد که می‌توان ۶ لایه مستقل را به عنوان لایه‌های معرف کل آبرفت منطقه انتخاب کرد. در شکل ۳ برش طولی رسوبات آبرفتی کرج بر اساس طبقه‌بندی یادشده، نشان داده شده است. برای انطباق برش با پلان، نقاط A و B در شکل یادشده و همچنین در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه به شرح ویژگی‌ها و پراکنندگی بخش‌های شش‌گانه یادشده پرداخته می‌شود.

با وجود طبقه‌بندی مذکور در درون هر یک از لایه‌های یاد شده عدسی‌های ماسه‌ای و گاه شنی به ستبراهای کمتر از یک متر دیده می‌شوند که این موارد بیشتر بر اثر تغییر در شرایط رسوبگذاری (تغییر در انرژی محیط رسوبگذاری) به وجود آمده‌اند.

۳- طبقه‌بندی رسوبات آبرفتی کرج

بررسی صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده توسط نگارندگان نشان می‌دهد که می‌توان ۶ لایه مستقل را به عنوان لایه‌های معرف کل آبرفت منطقه انتخاب کرد. در شکل ۳ برش طولی رسوبات آبرفتی کرج بر اساس طبقه‌بندی یادشده، نشان داده شده است. برای انطباق برش با پلان، نقاط A و B در شکل یادشده و همچنین در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه به شرح ویژگی‌ها و پراکنندگی بخش‌های شش‌گانه یادشده پرداخته می‌شود.

با وجود طبقه‌بندی مذکور در درون هر یک از لایه‌های یاد شده عدسی‌های ماسه‌ای و گاه شنی به ستبراهای کمتر از یک متر دیده می‌شوند که این موارد بیشتر بر اثر تغییر در شرایط رسوبگذاری (تغییر در انرژی محیط رسوبگذاری) به وجود آمده‌اند.

۳-۱- لایه‌های رس و سیلت ۱ و ۲ (C1 و C2)

رسوبات آبرفتی کرج در این لایه‌ها بیشتر از خاک‌های ریزدانه رسی و سیلتی که در صد قابل توجهی ماسه دارند، تشکیل شده است. این لایه‌ها در مناطق خاوری و مرکزی محدوده مورد مطالعه حضور دارند و معمولاً در زیر خاک‌های دستی رسوبات آبرفتی کرج واقع شده‌اند که از ژرفاهای سطحی تا ژرفای بیشینه ۱۴ متر دیده می‌شوند و در مرزهای جانبی خود به صورت میان‌انگشتی با لایه رس و سیلت ۲ و به صورت تاپ با لایه‌های ماسه ۱ و ۲ و لایه‌های شن ۱ و ۲ در ارتباط هستند. ویژگی‌های دانه‌بندی و مکانیکی خاک برای لایه C1 و C2 در جدول ۱ آورده شده است. بر مبنای اطلاعات جمع‌آوری شده در این پژوهش، طبقه‌بندی خاک در لایه‌های یادشده شامل خاک‌های ریزدانه CL، ML و CL-ML است. تفاوت اصلی لایه‌های یادشده در آن است که با توجه به شرایط رسوبگذاری، لایه C2 تراکم بیشتری نسبت به لایه C1 دارد. بر همین اساس عدد نفوذ استاندارد و زاویه اصطکاک داخلی خاک در لایه C2 به مراتب بیشتر از لایه C1 است.

۳-۲- لایه‌های ماسه ۱ و ۲ (S1 و S2)

این لایه‌ها در مناطق مرکزی محدوده مورد مطالعه به صورت پراکنده و در نواحی باختری ساختگاه به صورت انبوه وجود دارند. معمولاً در زیر رسوبات دستی و در برخی موارد در زیر لایه‌های رس و سیلت ۱ و ۲ گسترش دارند و مرز آنها با لایه‌های ماسه‌ای به صورت میان‌انگشتی و با لایه رس و سیلت ۱ و شن ۱ و ۲ به صورت آشکار

دیده می‌شود، روابط یادشده برای خاک‌های شنی ضریب همبستگی بالاتری دارند و همچنین مدول الاستیسیته خاک در آبرفت درشت‌دانه کرج به‌طور قابل توجهی به اندازه درشت‌دانه‌ها وابسته است.

از سوی دیگر، مطالعات ابزار سنجی در دو کیلومتر از محدوده مورد مطالعه (کیلومتر ۶/۵ تا ۸/۵) انجام شده است. برای این منظور دو نقطه نشانه از جدار تونل متروی کرج علامت‌گذاری و تغییرمکان آن در زمان بارگذاری اندازه‌گیری شده است. موقعیت نقاط یادشده در شکل ۷ و نمونه‌ای از منحنی‌های روند افزایش تغییرمکان بر حسب زمان در شکل ۸ نشان داده شده است.

براساس نتایج ابزارهای مورد نظر و با توجه به ویژگی‌های خاک در نقاط ابزارگذاری شده، مدل آرمانی شده تونل متروی کرج براساس شکل ۹ تهیه و به روش اجزای محدود تحلیل عددی انجام شده است. در این روش با استفاده از روش سعی و خطا و تکرار عملیات تجزیه اجزاء محدود مدول الاستیسیته‌ای که منجر به تغییر مکان‌های ثبت شده می‌شود، محاسبه شده است. در جدول ۷، مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از روش تجزیه برگشتی برای لایه رسوبات آبرفتی کرج آورده شده است.

همان‌گونه که از نتایج حاصل روشن شده است، روش‌های مختلف محاسبه مدول الاستیسیته، نتایج و مقادیر متفاوتی را ارائه می‌دهند. با این حال، میزان دقت تحلیل‌های برگشتی بالاتر از آزمون‌های صحرایی و میزان دقت آزمون‌های صحرایی بیشتر از آزمون‌های آزمایشگاهی است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که به‌طور کلی مدول الاستیسیته حاصل از روش تجزیه برگشتی ۳ تا ۴ برابر مدول الاستیسیته حاصل از آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی و حدود ۱۰٪ بیشتر از آزمون بار گذاری صفحه‌ای است.

۶- مروری بر مطالعات پژوهشگران پیشین پیرامون رابطه میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و N

روابط همبستگی متعددی توسط پژوهشگران پیشین برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های دانه‌ای از راه عدد آزمایش نفوذ استاندارد ارائه شده است. برای این منظور Meyerhof (1956) جدول ۸ را ارائه کرده است. در این جدول ارتباط میان N_{SPT} اصلاح شده و زاویه اصطکاک داخلی برای ماسه‌های بدون چسبندگی ارائه شده است. در صورتی که ماسه مقادیری کانی رسی و سیلتی داشته باشد از ارقام ارائه شده در جدول ۸ برای زاویه اصطکاک داخلی تا ۵ درجه کم و در صورتی که ماسه دانه‌های شنی داشته باشد تا ۵ درجه اضافه می‌شود.

Hunt (1984) نیز جدول ۹ را برای برآورد زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های بدون چسبندگی ارائه کرده است. در جدول ۹ مقدار N_{SPT} عدد اصلاح نشده آزمون است. همچنین، Hatanaka & Uchida (1996) بر اساس نتایج تعداد قابل توجهی آزمایش سه محوری که بر روی نمونه‌های دست نخورده انجام شده بود، رابطه (۱) را به‌دست آورده‌اند:

$$\phi = \sqrt{15.4(NI_{60})} + 20^\circ \quad (1)$$

۶-۱. رابطه میان زاویه اصطکاک داخلی و عدد نفوذ استاندارد در خاک‌های دانه‌ای رسوبات آبرفتی کرج

به منظور ارائه روابطی برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی خاک در رسوبات آبرفتی کرج، از نتایج حاصل از آزمون‌های برش مستقیم و نفوذ استاندارد خاک استفاده شده است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که در برخی لایه‌ها، بویژه لایه‌های شنی، ارتباط قابل قبولی میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و عدد اصلاح شده آزمون نفوذ استاندارد (NI_{60}) وجود دارد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ارتباط میان زاویه اصطکاک داخلی و آزمون نفوذ استاندارد برای لایه‌های مختلف نشان داده

(Papadopoulos (1992), Bowles (1996) و Das(1983) روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف برای خاک‌های دانه‌ای را گردآوری و معرفی کرده‌اند. از سوی دیگر بررسی‌های محدودی که پیرامون همبستگی میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در خاک‌های چسبنده توسط Behpoor & Ghahramani (1989)، Webb (1969) و قنبری (۱۳۸۸) صورت پذیرفته است، نشان می‌دهد که ارتباط قابل توجه و معنی‌داری میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در خاک‌های چسبنده وجود دارد. همچنین Yagiz et al. (2008) ارتباط میان عدد نفوذ استاندارد و ویژگی‌های صحرایی خاک را مطالعه کرده است.

Behpoor & Ghahramani (1989) نتایج حدود ۶۰ مطالعه ژئوتکنیک برای خاک‌های ریزدانه در سطح ایران را گردآوری و رابطه میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در آنها را بررسی کرده‌اند. بر مبنای نتایج مطالعه یادشده برای خاک‌های چسبنده با عدد نفوذ استاندارد کمتر از ۲۵، ارتباط قابل قبولی میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، وجود دارد. پژوهشگران یادشده این رابطه را به‌صورت $E=170N$ بیان داشته‌اند که در آن N عدد نفوذ استاندارد و E مدول الاستیسیته خاک چسبنده بر حسب کیلونیوتن بر متر مربع است. قنبری (۱۳۸۸)، براساس مطالعه نتایج آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی در آبرفت جنوب تهران روابطی میان مدول الاستیسیته خاک و عدد آزمون نفوذ استاندارد ارائه کرده است. براساس پژوهش یادشده ارتباط مناسبی میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در آبرفت تهران وجود دارد. روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف در جدول ۴ به‌طور خلاصه ارائه شده است.

۵- رابطه میان مدول الاستیسیته و آزمون نفوذ استاندارد در رسوبات آبرفتی کرج

در بخش‌های پیشین این نوشتار بر مبنای مطالعات این پژوهش، طبقه‌بندی رسوبات آبرفتی کرج در ۶ لایه ارائه شد. در این بخش بر مبنای نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی محدوده، مدول الاستیسیته و همچنین رابطه میان مدول الاستیسیته حاصل از آزمون برش مستقیم و عدد آزمایش نفوذ استاندارد اصلاح شده برای لایه‌های یادشده بررسی می‌شود.

به‌طور کلی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته در رسوبات آبرفتی کرج بر اساس آزمایش برش مستقیم در محدوده ۳۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع تغییر می‌کند. همچنین محدوده تغییرات این ویژگی‌های در لایه‌های درشت‌دانه رسوبات آبرفتی کرج بر اساس جدول ۵ است.

در بررسی‌های انجام گرفته پیرامون تغییرات مدول الاستیسیته خاک در بخش ریزدانه رسوبات آبرفتی کرج (لایه‌های C1 و C2) این نتیجه به‌دست آمد که میان N_{SPT} و مدول الاستیسیته در لایه‌های ریزدانه رسوبات آبرفتی کرج رابطه مشخصی وجود ندارد و لازم است این رابطه با دیگر ویژگی‌های خاک مانند مقاومت زهکشی نشده خاک بررسی گردد. با این حال، برای لایه‌های ماسه‌ای و شنی روابط قابل قبولی میان مدول الاستیسیته و عدد نفوذ استاندارد و بیشترین اندازه دانه‌های خاک دیده می‌شود. در شکل‌های ۴ تا ۶ تغییرات مدول الاستیسیته خاک درشت‌دانه رسوبات آبرفتی کرج بر حسب مجموع عدد آزمایش نفوذ استاندارد (NI_{60}) افزون‌بر آن $5D_{90}$ نشان داده شده است. عبارت $5D_{90}$ به‌منظور در نظر گرفتن اثر بیشترین اندازه دانه‌های شنی در افزایش مدول الاستیسیته لایه خاک استفاده شده است و در آن D_{90} بر حسب میلی‌متر، اندازه الکی است که ۹۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند.

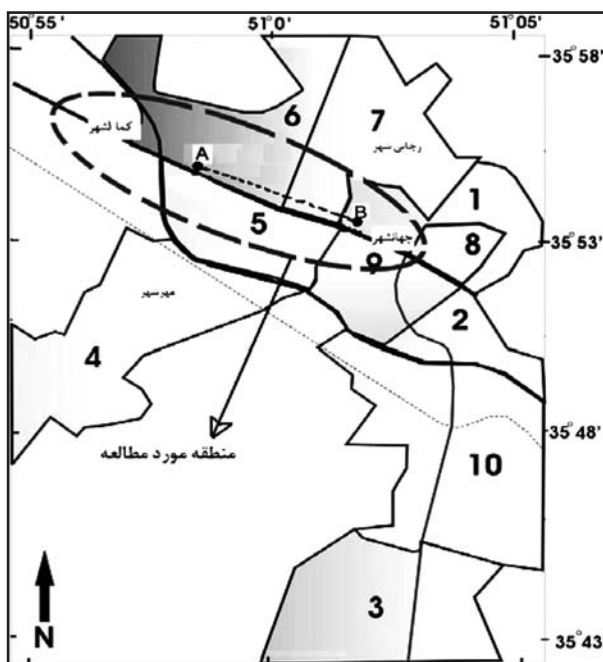
براساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۴ تا ۶، سه رابطه برای محاسبه مدول الاستیسیته در آبرفت درشت دانه کرج در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری گمانه‌ها و مشاهدات صحرائی افزون بر معرفی ویژگی‌های کلی رسوبات آبرفتی کرج، طبقه‌بندی جدیدی در شش لایه مستقل برای بخش میانی رسوبات آبرفتی کرج ارائه شد. همچنین برای هر یک از لایه‌های یادشده میانگین ویژگی‌های ژئوتکنیکی بیان شد. از سوی دیگر به منظور تعیین محدوده مدول الاستیسته خاک در رسوبات آبرفتی کرج از نتایج آزمون‌های صحرائی و آزمایشگاهی و همچنین داده‌های ابزار سنجی استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که به‌طور کلی مدول الاستیسته حاصل از روش تجزیه برگشتی ۳ تا ۴ برابر مدول الاستیسته حاصل از آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی و حدود ۱۰٪ بیشتر از آزمون بارگذاری صفحه‌ای است.

همچنین به منظور بیان رابطه میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و عدد آزمایش نفوذ استاندارد، نتایج آزمون‌های مختلف بررسی و روابط جدیدی برای هر یک از لایه‌های رسوبات آبرفتی کرج در محدوده مورد مطالعه ارائه شد. مقایسه روابط حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهشگران دیگر نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده توسط Meyerhof (1956) و Hatanaka & Uchida (1996) ارقام بالاتری برای زاویه اصطکاک داخلی رسوبات آبرفتی کرج به دست می‌دهد. با این حال جدول ارائه شده توسط Hunt (1984) تا حدودی برای استفاده در رسوبات آبرفتی کرج کارایی دارد.

در پایان بر اساس بررسی‌های صورت گرفته رابطه ظرفیت باربری خاک و عدد آزمایش نفوذ استاندارد در رسوبات آبرفتی کرج تعیین شد. مقایسه رابطه یادشده با روابط دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد که رابطه Meyerhof (1956) تقریب خوبی برای برآورد ظرفیت باربری در محدوده مورد مطالعه دارد، با این حال توصیه Bowels (1996) برای محاسبه ظرفیت باربری پی در رسوبات آبرفتی کرج مناسب نیست. همچنین رابطه Peck et al. (1974) در مقایسه با میانگین نتایج حاصل از تجزیه برگشتی در رسوبات آبرفتی کرج ارقام کمتری به دست داده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در میان مناطق شهرداری شهر کرج.

شده است. همچنین در جدول ۱۰ خلاصه روابط حاصل و ضریب همبستگی هر رابطه نشان داده شده است. در روابط یادشده D_{90} اندازه الکی است که ۹۰ درصد دانه‌ها از آن رد شده‌اند.

مقایسه روابط حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهشگران دیگر نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده توسط Meyerhof (1956) و Hatanaka & Uchida (1996) ارقام بالاتری برای زاویه اصطکاک داخلی رسوبات آبرفتی کرج به دست می‌دهد. با این حال جدول ارائه شده توسط Hunt (1984) تا حدودی برای استفاده در رسوبات آبرفتی کرج کارایی دارد. به نظر می‌رسد که علت اصلی اختلاف نتایج حاصل با روابط پیشنهادی توسط دیگر پژوهشگران، وجود مقادیر قابل توجهی از کانی‌های رسی در رسوبات آبرفتی کرج باشد.

۷- ظرفیت باربری خاک در رسوبات آبرفتی کرج

ظرفیت باربری خاک بر مبنای تجزیه تعادل حدی و کنترل بیشترین نشست برآورد می‌شود که برای این منظور روابط بسیاری توسط پژوهشگران ارائه شده است (Hanna & Meyerhof, 1981; Meyerhof, 1963; Hansen, 1970; Vesic, 1973). با این حال، افزون بر روابط تحلیلی، روابطی بر مبنای نتایج آزمون‌های صحرائی برای برآورد ظرفیت باربری ارائه شده است. Meyerhof (1956) رابطه (۲) را برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های کوچک توصیه کرد.

$$q_{all} = 12N \quad (2)$$

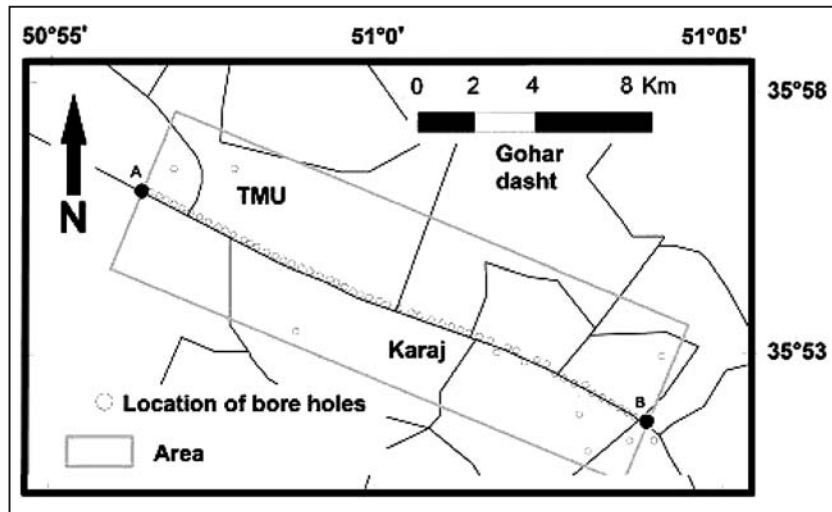
با این حال بررسی‌های Bowels (1996) نشان داد که رابطه یادشده درجه اطمینان بالایی دارد و میزان ظرفیت باربری حدود ۵۰٪ بیش از مقدار مورد توصیه توسط Meyerhof (1956) است. همچنین Peck et al. (1974) منحنی‌های بسیاری برای محاسبه ظرفیت باربری بر مبنای عدد نفوذ استاندارد ارائه کردند. در این بخش از نوشتار بر مبنای اطلاعات صحرائی و ابزارسنجی، میزان کارایی نظرات یادشده برای رسوبات آبرفتی کرج بررسی و رابطه مناسب پیشنهاد می‌شود.

با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده در رسوبات آبرفتی کرج و با داشتن مشخصات مکانیکی و فیزیکی خاک، ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر آن برای وقوع نشست یک اینچ محاسبه شده و با نتایج دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. برای این منظور از تحلیل عددی به روش اجزای محدود استفاده و برای یک پی نواری صلب به بر روی ۲۶ نمونه خاک از رسوبات آبرفتی کرج ظرفیت باربری محاسبه شده است. در جدول ۱۱ ویژگی‌های ۲۶ نمونه خاک در رسوبات آبرفتی کرج که مورد آزمایش صحرائی قرار گرفتند نشان داده شده است.

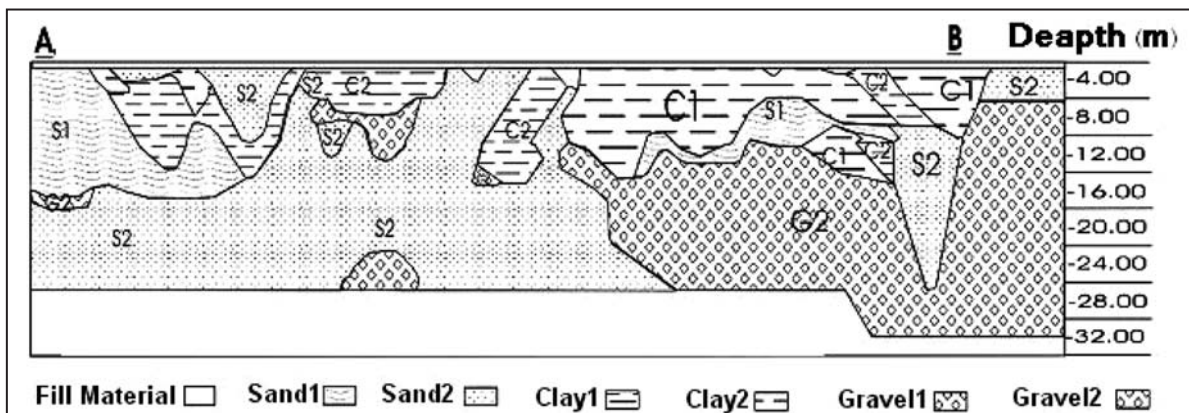
پس از تحلیل عددی، ظرفیت باربری برای هر نمونه محاسبه و در ستون آخر جدول یادشده ارائه شده است. در شکل ۱۳ تغییرات عدد آزمایش نفوذ استاندارد در مقابل ظرفیت باربری مجاز که با ضریب اطمینان ۳ به دست آمده رسم شده است. بر این اساس رابطه ۳ خطی با ضریب تعیین معادل $R^2 = 0.69$ به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$q_{all} = 11.66N_{i60} \quad (3)$$

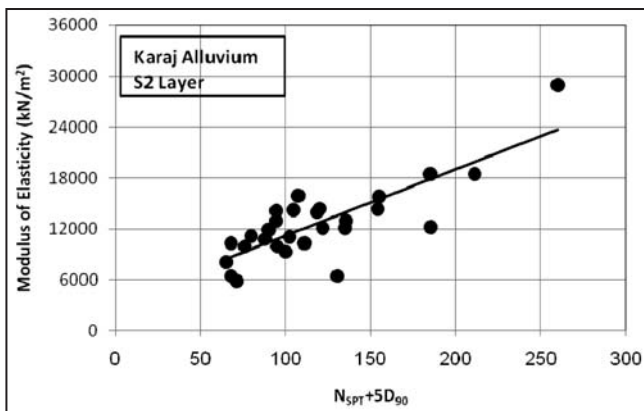
مقایسه رابطه یادشده با روابط دیگر پژوهشگران در شکل ۱۴ دیده می‌شود. بر این اساس رابطه Meyerhof (1956) تقریب خوبی برای برآورد ظرفیت باربری در محدوده مورد مطالعه دارد، اما توصیه Bowels (1996) برای محاسبه ظرفیت باربری پی در رسوبات آبرفتی کرج مناسب نیست. همچنین رابطه Peck et al. (1974) در مقایسه با میانگین نتایج حاصل از تجزیه برگشتی در رسوبات آبرفتی کرج ارقام کمتری به دست داده است.



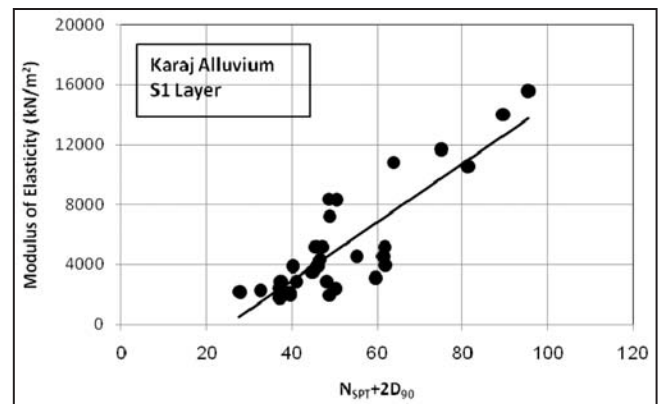
شکل ۲- موقعیت گمانه‌های حفاری شده در محدوده مورد مطالعه.



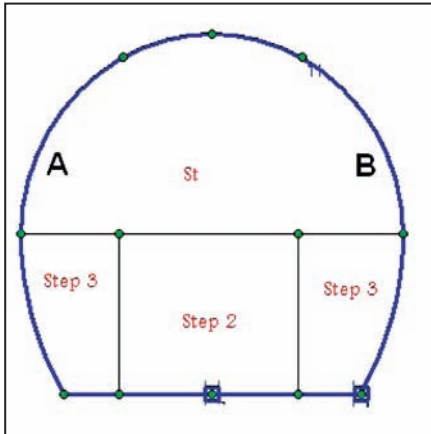
شکل ۳- مقطع نمونه از رسوبات آبرفتی کرج که بر مبنای نتایج این پژوهش در ۶ ناحیه طبقه‌بندی شده است.



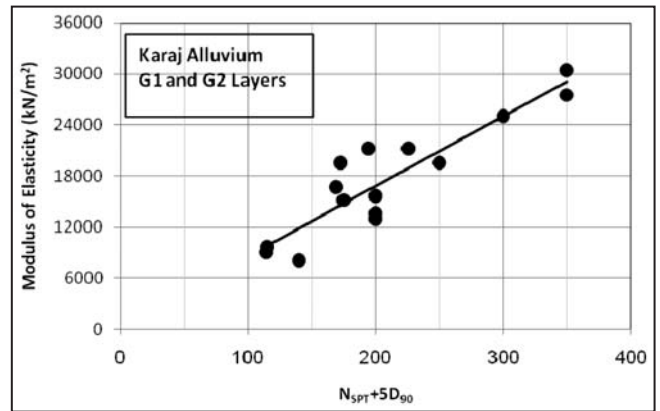
شکل ۵- ارتباط میان عدد آزمایش نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته برای لایه S2 رسوبات آبرفتی کرج.



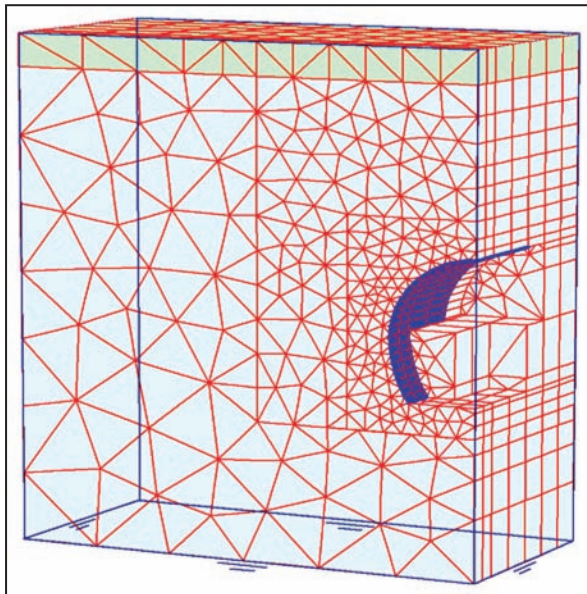
شکل ۴- ارتباط میان عدد آزمایش نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته برای لایه S1 رسوبات آبرفتی کرج.



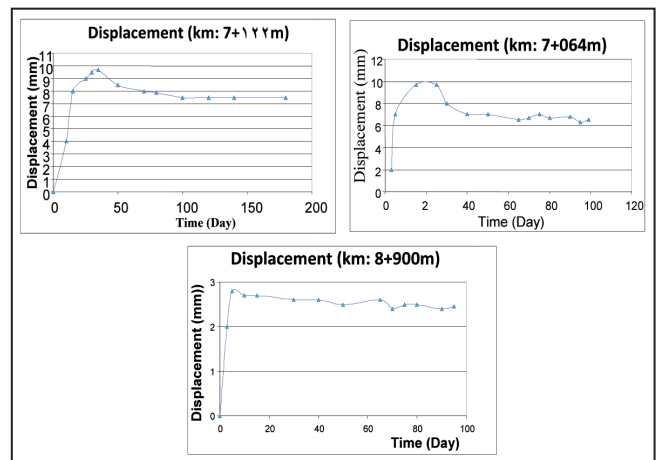
شکل ۷- موقعیت نقاط ابزار دقیق برای اندازه‌گیری تغییر مکان در دیواره تونل.



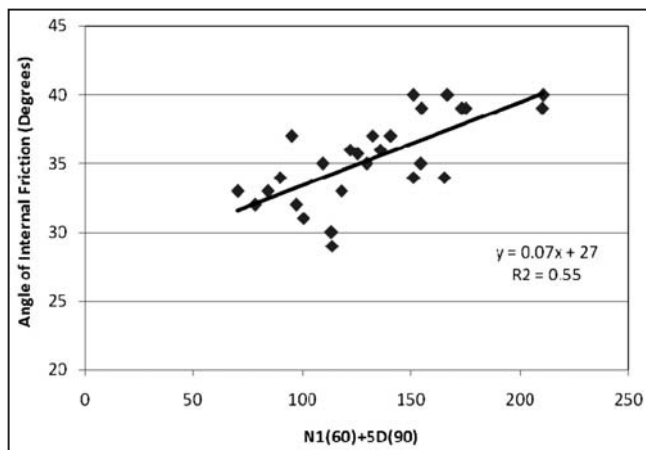
شکل ۶- ارتباط میان عدد آزمایش نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته برای لایه های G1 و G2 رسوبات آبرفتی کرج.



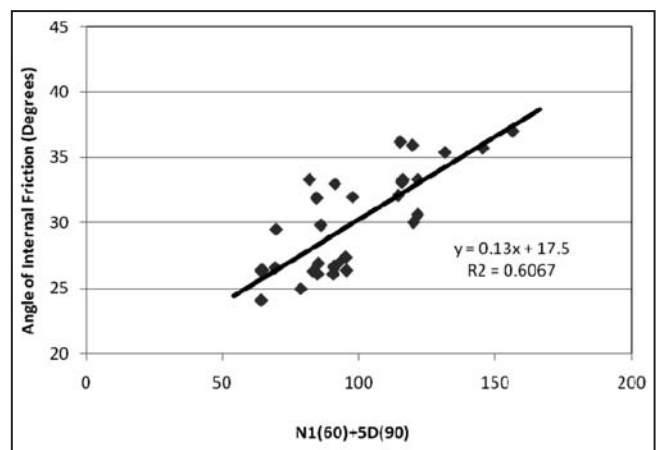
شکل ۹- مدل اجزای محدود مورد استفاده برای تحلیل برگشتی.



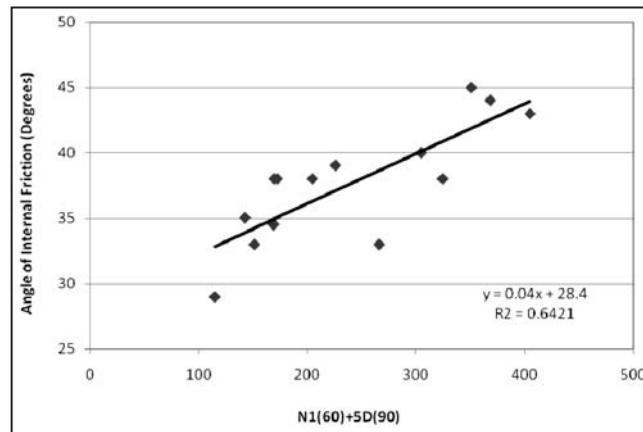
شکل ۸- نمونه منحنی تغییر فاصله میان نقاط A و B بر حسب زمان حاصل از ابزار سنجی.



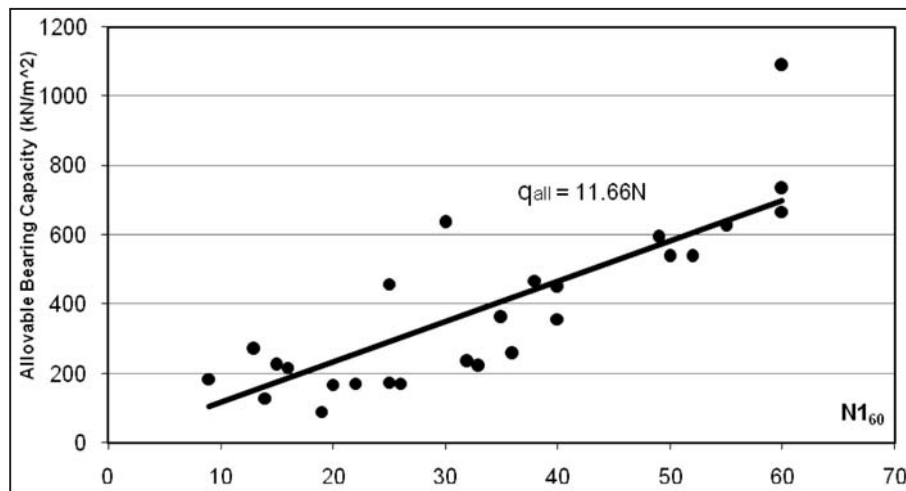
شکل ۱۱- ارتباط میان زاویه اصطکاک داخلی و آزمون نفوذ استاندارد برای لایه S2.



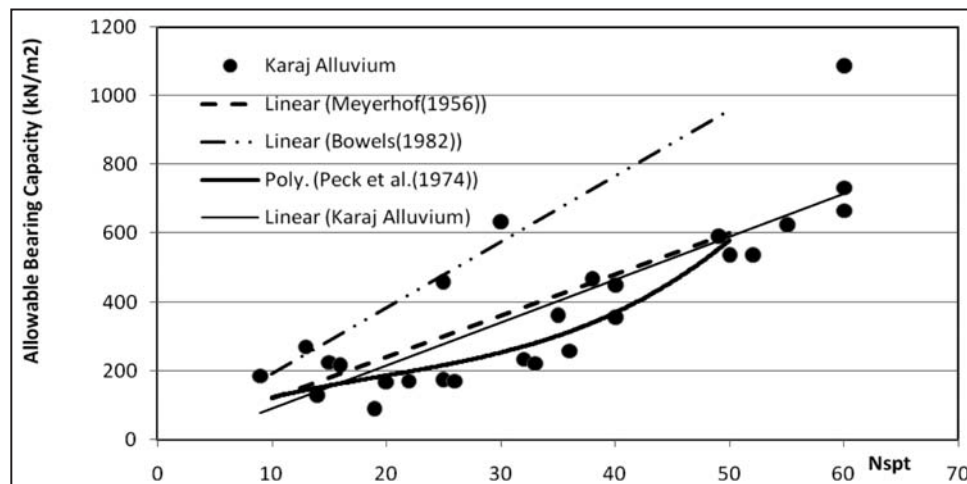
شکل ۱۰- ارتباط میان زاویه اصطکاک داخلی و آزمون نفوذ استاندارد برای لایه S1.



شکل ۱۲- ارتباط میان زاویه اصطکاک داخلی و آزمون نفوذ استاندارد برای لایه G1 و G2.



شکل ۱۳- تغییرات ظرفیت باربری در برابر عدد آزمایش نفوذ استاندارد برای محدوده مورد مطالعه.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج رابطه حاصل از این پژوهش با روابط پژوهشگران پیشین.

جدول ۱- ویژگی‌های مهندسی رسوبات آبرفتی کرج برای لایه های C1 و C2.

C2			C1			ویژگی لایه
معمول سطح	بیشینه	پایین	معمول سطح	بیشینه	پایین	
۶۲	۹۲	۵۰	۶۹	۸۹	۵۰	درصد رس و سیلت
۲۵/۵	۴۱	۵	۲۵/۴	۴۳	۱۱	درصد ماسه
۵/۷	۱۶	۰	۵/۸	۲۷	۰	درصد شن
۱۱	۲۰	۵	۱۰	۱۹	۱	شاخص خمیری % (PI)
۴۵	>۵۰	۳۷	۲۵	۳۵	۹	عدد نفوذ استاندارد (N)
۷۰	۱۲۰	۲۵	۴۳	۷۰	۱۴	چسبندگی زهکشی نشده (kN/m ²)
۲۸	۳۵	۲۲	۲۴	۳۱	۲۰	زاویه اصطکاک داخلی (φ)
۱۶/۸	۱۸	۱۵	۱۶/۷	۱۸	۱۵/۱	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)
۲۱۷	۲۵۰	۱۳۲	۲۰۸	۲۳۸	۱۲۶	سرعت موج برشی (m/sec)

جدول ۲- ویژگی‌های مهندسی رسوبات آبرفتی کرج برای لایه های S1 و S2.

S2			S1			ویژگی لایه
معمول سطح	بیشینه	پایین	معمول سطح	بیشینه	پایین	
۲۹	۴۹	۵	۲۶/۶	۴۹	۵	درصد رس و سیلت
۴۹	۸۱	۳۳	۵۳	۸۷	۲۸	درصد ماسه
۲۳/۴	۴۴	۸	۲۰/۴	۴۱	۴	درصد شن
۷	۱۵	۱	۵	۱۶	۱	شاخص خمیری (PI) %
۵۵	>۶۰	۴۰	۲۹	۴۰	۱۵	عدد نفوذ استاندارد (N)
۳۴	۱۰۵	۰	۲۹	۷۰	۲۰	چسبندگی زهکشی نشده (kN/m ²)
۳۵	۴۱	۳۰	۳۰	۳۵	۲۳	زاویه اصطکاک داخلی (φ)
۷۱/۵	۹۲	۵۱	۹۳	۱۰۰	۸۹	مقاومت فشاری محدود نشده (kN/m ²)
۱۸/۵	۱۹	۱۸	۱۷/۵	۲۰	۱۵/۸	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)
۳۵۵	۳۰۹	۱۸۸	۲۳۳	۲۶۷	۱۴۲	سرعت موج برشی (m/sec)

جدول ۳- ویژگی‌های مهندسی رسوبات آبرفتی کرج برای لایه های G1 و G2.

G2			G1			ویژگی لایه
معمول سطح	بیشینه	پایین	معمول سطح	بیشینه	پایین	
۱۰/۴	۳۵	۰	۱۷	۳۹	۵	درصد رس و سیلت
۱۹/۳	۴۳	۰	۳۴	۴۱	۲۳	درصد ماسه
۷۰/۵	۱۰۰	۳۹	۴۹	۶۲	۲۸	درصد شن
۷	۱۸	۱	۵	۱۰	۲	شاخص خمیری (PI) %
۵۶	>۶۰	۴۵	۳۷.۵	۴۴	۲۸	عدد نفوذ استاندارد (N)
۳۸	۴۳	۳۱	۳۰	۳۳	۲۷	زاویه اصطکاک داخلی (φ)
۶/۱۸	۱۹	۱۸	۵/۱۸	۱۹	۱۸	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)
۳۶۵	۳۳۰	۱۹۵	۳۰۹	۳۵۵	۱۸۸	سرعت موج برشی (m/sec)

جدول ۴- روابط پژوهشگران پیشین برای محاسبه مدول الاستیسیته از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد.

رابطه	نوع خاک مورد مطالعه	مرجع
E = 170N	خاک‌های ریزدانه چسبنده	Behpoor and Ghahramani(1989)
E = 320N+4800	ماسه رس دار	Bowles(1996)
E = 300N+1800	سیلت، سیلت ماسه دار، سیلت رس دار	
E = 360N+1800	ماسه رس دار	Webb(1969)
E= 400(N1) ₆₀	سیلت و سیلت ماسه دار با اندکی خاک چسبنده Silt, sandy silts, slightly cohesive mixtures	AASHTO(1996)
E= 700 (N1) ₆₀	Clean fine to medium sands and slightly silty sands	
E= 1000(N1) ₆₀	ماسه درشت دانه و ماسه با اندکی شن	
E= 1200 (N1) ₆₀	شن ماسه دار	
E= 600(N+2D)+10000	درشت دانه دارای اندکی ریزدانه	مناطق ۱۰ تا ۱۴ تهران
E= 700(N+2D)+2500	مخلوط درشت دانه و ریزدانه	مناطق ۱۵ تا ۱۷ تهران
E= 350(N+2D)+3200	خاک ریزدانه	مناطق ۱۸ تا ۲۰ تهران

جدول ۵- محدوده تغییرات مدول الاستیسیته در لایه های درشت دانه رسوبات آبرفتی کرج.

ویژگی های لایه	خاک درشت دانه شنی	خاک ماسه ای متراکم	خاک ماسه ای سست
محدوده مدول الاستیسیته (kN/m ²)	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰۰	۵۰۰۰-۲۰۰۰۰	۳۰۰۰-۱۵۰۰۰

جدول ۶- روابط حاصل برای مدول الاستیسیته در آبرفت درشت دانه کرج.

مشخصات خاک	رابطه حاصله برای مدول الاستیسیته بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع
لایه ماسه سست رسوبات آبرفتی کرج (S1)	$E=196(N_{160}+2D_{90})-4900$ $R^2=0.72$
لایه ماسه متراکم رسوبات آبرفتی کرج (S2)	$E=78(N_{160}+5D_{90})+3300$ $R^2=0.65$
لایه‌های شنی رسوبات آبرفتی کرج (G1 و G2)	$E=80(N_{160}+5D_{90})+350$ $R^2=0.83$

جدول ۸- مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و تراکم نسبی بر مبنای آزمون نفوذ استاندارد (Meyerhof, 1956).

نوع خاک	چگالی نسبی (%)	N_{SPT}	زاویه اصطکاک داخلی ϕ'
ماسه خیلی سست	< ۲۰	< ۴	> ۳۰
ماسه سست	۲۰-۴۰	۴-۱۰	۳۰-۳۵
ماسه متراکم	۴۰-۶۰	۳۰-۱۰	۳۵-۴۰
ماسه سخت	۶۰-۸۰	۳۰-۵۰	۴۰-۴۵
ماسه خیلی سخت	> ۸۰	> ۵۰	> ۴۵

 جدول ۷- مدول الاستیسیته رسوبات آبرفتی کرج حاصل از تجزیه برگشتی (kg/cm^2).

لایه	مدول الاستیسیته (kN/m^2)			
	کمینه	متوسط	بیشینه	تغییر مکان اندازه‌گیری شده (mm)
G2	۷۸۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۴۵۰۰۰	۲/۵
S2	۵۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۶۰۰۰۰	۹
C1	۲۵۰۰۰	۳۲۰۰۰	۳۵۰۰۰	۸
C2	۳۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۴۵۰۰۰	۷

جدول ۹- مقادیر ارائه شده برای زاویه اصطکاک داخلی و تراکم نسبی بر مبنای آزمون نفوذ استاندارد (Hunt, 1984).

نوع مصالح	میزان تراکم	چگالی نسبی (%)	N_{SPT}	زاویه اصطکاک داخلی ϕ
SP	متراکم	۷۵	۵۰	۳۶
SP	نیمه متراکم	۵۰	۳۰	۳۳
SP	سست	۲۵	< ۱۰	۲۹
SM	متراکم	۷۵	۴۵	۳۵
SM	نیمه متراکم	۵۰	۲۵	۳۲
SM	سست	۲۵	< ۸	۲۹
ML	متراکم	۷۵	۳۵	۳۳
ML	نیمه متراکم	۵۰	۲۰	۳۱
ML	سست	۲۵	< ۴	۲۷
GW	متراکم	۷۵	۹۰	۴۰
GW	نیمه متراکم	۵۰	۵۵	۳۶
GW	سست	۲۵	< ۲۸	۳۲
GP	متراکم	۷۵	۷۰	۳۸
GP	نیمه متراکم	۵۰	۵۰	۳۵
GP	سست	۲۵	< ۲۰	۳۲
SW	متراکم	۷۵	۶۵	۳۷
SW	نیمه متراکم	۵۰	۳۵	۳۴
SW	سست	۲۵	< ۱۵	۳۰

جدول ۱۰- روابط حاصل برای برآورد زاویه اصطکاک داخلی خاک در آبرفت درشت دانه کرج.

مشخصات خاک	رابطه حاصله برای زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه
لایه ماسه سست رسوبات آبرفتی کرج (S1)	$\phi=0.13(N_{160}+5D_{90})+17.5$ $R^2=0.61$
لایه ماسه متراکم رسوبات آبرفتی کرج (S2)	$\phi=0.06(N_{160}+5D_{90})+27.4$ $R^2=0.55$
لایه‌های شنی رسوبات آبرفتی کرج (G1 و G2)	$\phi=0.04(N_{160}+5D_{90})+28.4$ $R^2=0.65$

جدول ۱۱- ویژگی‌های ۲۶ نمونه از رسوبات آبرفتی کرج برای برآورد ظرفیت باربری.

ظرفیت باربری مجاز kN/m^2	عدد نفوذ استاندارد (N_{160})	مدول الاستیسیته kN/m^2	وزن مخصوص γ (kN/m^3)	چسبندگی kN/m^2	زاویه اصطکاک داخلی ϕ'	ظرفیت باربری مجاز kN/m^2	عدد نفوذ استاندارد (N_{160})	مدول الاستیسیته kN/m^2	وزن مخصوص γ (kN/m^3)	چسبندگی kN/m^2	زاویه اصطکاک داخلی ϕ'
۲۵۸	۳۶	۱۷۷۰۰	۱۸	۲۹	۳۲	۱۴	۱۸۵	۹	۱۱۵۰۰	۱۷	۲۸
۵۹۳	۴۹	۴۳۵۰۰	۱۹	۳۴	۳۷	۱۵	۲۷۰	۱۳	۱۳۰۰۰	۱۷/۳	۵۰
۲۲۲	۳۳	۱۹۵۰۰	۱۷/۶	۲۰	۲۲	۱۶	۲۲۴	۲۲	۱۵۶۰۰	۱۷	۸
۴۶۸	۳۸	۳۲۴۰۰	۱۸	۳۵	۳۶	۱۷	۱۷۱	۲۲	۱۱۷۰۰	۱۷	۱۶
۵۳۸	۵۲	۳۶۳۰۰	۱۹	۶۴	۳۶	۱۸	۹۰	۱۹	۶۰۰۰	۱۷	۳۵
۷۳۳	۶۰	۵۵۵۰۰	۱۹	۲۴	۳۹	۱۹	۱۷۵	۲۵	۱۲۰۰۰	۱۷	۱۶
۴۵۰	۳۰	۳۱۸۰۰	۱۹	۶۷	۲۶	۲۰	۳۶۳	۳۵	۲۴۹۰۰	۱۷	۵۱
۵۳۸	۵۰	۴۵۵۰۰	۱۹	۱۷	۴۳	۲۱	۱۳۰	۱۴	۸۷۰۰	۱۷	۲۵
۶۲۶	۵۵	۵۸۴۰۰	۱۹	۳۰	۳۴/۵	۲۲	۱۷۱	۲۶	۱۱۸۰۰	۱۷	۱۶
۶۳۵	۴۰	۶۸۲۰۰	۱۹	۱۷	۳۸/۹	۲۳	۲۲۵	۱۵	۱۵۰۰۰	۱۷/۵	۷۰
۴۵۹	۲۵	۳۴۱۰۰	۱۹	۶۱	۲۷	۲۴	۱۶۸	۲۰	۱۲۰۰۰	۱۷/۵	۱۳
۶۶۷	۶۰	۷۴۲۰۰	۱۸/۶	۱۰	۴۱	۲۵	۲۱۸	۱۶	۱۸۰۰۰	۱۷/۵	۱۳
۱۰۸۸	۶۰	۱۰۶۴۰۰	۱۹	۲۰	۴۵	۲۶	۳۵۷	۴۰	۲۴۳۰۰	۱۸	۴۱

کتابخانه

- امینی، م.، ۱۳۷۳- ویژگی‌های ژئوتکنیک رسوبات کواترنر دشت تهران، مجموعه مقالات نخستین سمپوزیم بین‌المللی کواترنر، دانشگاه تهران، ص ۱۷۱-۱۷۵.
- بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ‌روش، ا. و مهاجر اشجعی، ا.، ۱۳۶۴- پژوهش و بررسی ژرف‌نوزمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون، گزارش شماره ۵۶ سازمان زمین‌شناسی کشور.
- پدرامی، م.، ۱۳۵۶- مطالبی مختصر در مورد رسوبات کواترنر اطراف تهران، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۸ صفحه.
- پهلوان، ب.، فاخر، ع.، خامه‌چیان، م. و صنیعی، ه.، ۱۳۸۲- مطالعه متغیرهای تغییر شکل‌پذیری آبرفت‌های درشت‌دانه با استفاده از پرسومتر منارد، مجله علوم زمین، شماره ۴۷-۴۸، ص ۹۶-۱۱۸
- جعفری، م. ک. و کشاورز بخشایش، م.، ۱۳۸۰- بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ژئوتکنیکی آبرفت‌های جنوب تهران، مجموعه مقالات دومین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۵۳۳-۵۴۴.
- حائری، س. م.، یثربی، س. ش.، ارومیه‌ای، ع. و اصغری، ا.، ۱۳۸۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آبرفت‌های درشت‌دانه و سیمانی شده تهران، مجله علوم زمین، شماره ۴۷-۴۸، ص ۲-۱۵.
- قنبری، ع.، ۱۳۸۸- مطالعه مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران، مجله علوم زمین، پاییز ۱۳۸۸.

References

- AASHTO, 1996- "Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition." Washington, D.C.
- Behpoor, L. & Ghahramani, A., 1989- Correlation of SPT to strength and modulus of elasticity of cohesive soils, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, Rio do Janeiro, Brazil.
- Bowles, J. E., 1996- *Foundation Analysis and Design*, 3rd Edn.
- Das, B. M., 1983- *Advanced Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Company.
- Dedual, E., 1967- Zur geologie des mittleren und unteren Karaj – Tales, Zentral – Elburze (Iran), Univ. Zurich, 123p.
- Hanna, A. M., & Meyerhof, G. C., 1981- «Experimental evaluation of bearing capacity of footing subjected to inclined load» Canadian Geotechnical Journal, 18 (4), 599-603.
- Hansen, J. B., 1970- A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute, Bulletin 28, Copenhagen.
- Hatanaka, M., & Uchida, A., 1996- Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil. *Soils & Foundations*, Vol. 36 (4), 1-9, Japanese Geotechnical Society.
- Hunt, R. E., 1984- *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Meyerhof, G. G., 1963- Some recent research on the bearing capacity of foundations., Canadian Geotechnical Journal, 1 (1), 16-26.
- Meyerhof, G. G., 1956- Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils., journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol. 82, No. SM1, January, pp. 1-19.
- Mirzaie A. & Motamed A., 2005- The study of climate in karaj sedimentary basin by sedimentology, Journal of sciences (Islamic azad university), 15(57 (GEOLOGY ISSUE)):363-377.
- Papadopoulos, B. P., 1992- Settlements of shallow foundations on cohesionless soils., J. Geotech. Eng., ASCE, 118(3), 377-393.
- Peck, R. B., Hanson, W. E. & Thornburn, T. H., 1974- *Foundation Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 514.
- Rieben, E. H., 1966- Geological observation on alluvial deposits in northern Iran, Geological Survey of Iran, Report No. 9.
- Vesic, A. S., 1973- Analysis of ultimate loads of shallow foundation., J. Geotech. Engrg., ASCE, 99 (1), 43-73.
- Webb, D. L., 1969- Settlement of structures on deep alluvial sandy sediments in Durban, South Africa, Proceedings, Conf. on In Situ Behaviour of Soil and Rock, Institution of Civil Engineers, London, 181-188.
- Yagiz, S., Akyol, E. & Sen, G., 2008- Relationship between the standard penetration test and the pressuremeter test on sandy silty clays: a case study from Denizli, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 67, No.3.