بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی آبرفت جنوب کرج

*زهره صفی‌پور رشوانلو: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات
علی قنبری: دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی
سید جمال شیخ زکریایی: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات

تاریخ: دریافت ۸۹/۹/۲۹ **پذیرش** ۹۰/۸/۱۵

چکیده

آبرفتِ جنوبِ کرج بخش چشم‌گیری از محدودهٔ شهری کرج را تشکیل می‌دهد و عمدتاً دارای ساختاری درشت‌دانه حاوی ذرات ریزدانه است. در این مقاله بر اساسِ نتایج حاصل از آزمون‌های متعدد صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفته توسط سازمان قطار شهری کرج و حومه، آبرفت جنوبِ کرج حدفاصلِ پل فردیس تا سه راه اندیشه به‌طول ۱۰کیلومتر، بررسی شده است. در همین راستا آبرفت مذکور که عمدتاً متشکل از شن درشت دانه است به پنج لایه مستقل تقسیم شده است و پارامترهای ژئوتکنیکی هر لایه توصیف شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هم‌بستگی چشم‌گیری بین نتایج آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیتهٔ خاک که از آزمون‌های بارگذاری صفحه‌ای، برش مستقیم و سه محوری به‌دست آمده است وجود دارد. بر همین اساس به‌منظور ارائه روابط کاربردی برای تخمین مدول الاستیسیته در آبرفت جنوب کرج با توجه به آزمون‌های انجام شده، در هر آزمون رابطه‌ای برای محاسبهٔ مدول الاستیسیته ارائه شده است. هم‌چنین با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، جدول پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آبرفت جنوب کرج بر حسب لایه‌های تقسیم‌بندی شده، ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مدول الاستیسیتهٔ خاک، آزمون نفوذ استاندارد، آزمون بارگذاری صفحه‌ای، آبرفت جنوب کرج

*نویسنده مسئول zsafipoor@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

مقدمه

محدودهٔ بررسی شده در این تحقیق، حدفاصل پل فردیس تا سه راه اندیشه (به طول تقریبی ۱۰کیلومتر) در امتداد جادهٔ اصلی ملارد و به موازات این جاده است. براساس تقسیمات کشوری محدودهٔ مذکور در استان تهران و در دو شهرستان کرج و شهریار واقع گردیده است. لازم به ذکر است که علاوه بر محدودهٔ مذکور، پژوهش‌هایی در پل رودخانهٔ کرج و میدان شهید سلطانی(شمال محدوده) و پارکینگ ملارد (جنوب محدوده) نیز صورت گرفته است (شکل ۱).

با توجه به حجم چشم‌گیر ساخت و ساز در کرج به‌وسیلهٔ بخش‌های خصوصی و دولتی، لازم است ساخت‌گاه کلان شهر کرج از لحاظ ویژگی‌های مهندسی ژئوتکنیک بررسی شود. این اطلاعات در ارزیابی میزان خطرپذیری بخش‌های مختلف کرج کارایی دارد و به‌طور خاص برای انتخاب نوع سازه، تعداد طبقه مناسب، محاسبهٔ میزان ظرفیت باربری خاک و ارائه راه‌کار مناسب برای مقاوم‌سازی سازه‌های این منطقه کاربرد دارد. چنان‌که اطلاع از وضعیت عمومی و مشخصات اولیه فیزیکی و مکانیکی خاک در جنوب کرج می‌تواند برای تبیین دورنمای وضعیت ژئوتکنیکی خاک در پروژه‌های بزرگ منطقه مفید واقع شده و در تصمیم‌گیری پیرامون نوع و تعداد آزمایش‌ها مؤثر باشد. هم‌چنین در طرح‌های کوچک ساخت و ساز، در صورت عدم دسترسی به اطلاعات دقیق، ضمن رعایت جانب احتیاط می‌توان از این اطلاعات برای طراحی استفاده کرد. لازم به ذکر است که آزادراه تهران به قزوین به‌طور خاص از بخش‌هایی از کلان شهر کرج (نظیر پل فردیس) عبور می‌کند و این پل نقش گلوگاهی در تردد تهران به بخش‌های چشم‌گیری از غرب کشور را دارد. هم‌چنین با توجه به این‌که عمدهٔ بار ترافیکی غرب تهران مربوط به کلان شهر کرج است اتخاذ تدابیری خاص برای سهولت تردد و حمل ونقل در این مسیر الزامی است که تحقق تمامی این موارد مستلزم انجام پژوهش‌های پایه و اجرای پروژه‌های عمرانی در این زمینه است. در این تحقیق به‌منظور ارائه رابطه بین مدول الاستیسیتهٔ خاک با عدد حاصل از آزمون نفوذ استاندارد در آبرفت جنوب کرج و مقایسهٔ آن با روابط ارائه شده در متون فنی، نتایج آزمون‌های متعدد صحرایی و آزمایشگاهی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

بررسی می‌شود. همهٔ آزمون‌ها در طی سال‌های اخیر توسط چندین شرکت مشاور ژئوتکنیک به عنوان پیمانکاران سازمان قطار شهری کرج و حومه در پروژهٔ خط ۲ متروی کرج، انجام شده است. اطلاعات مذکور طی مکاتبات رسمی دانشگاه (نامهٔ شمارهٔ ۱۰٤٦٤٤ مورخ ۱۳۸۷/۱۲/۱۷) با سازمان قطار شهری کرج و حومه (کارفرمای محترم پروژه) در اختیار تهیه کنندهٔ مقاله قرار گرفته است. در این نوشتار ابتدا به‌طور اجمالی زمین‌شناسی عمومی و خصوصیات آبرفت محدودهٔ بررسی شده، معرفی و در پی آن در بارهٔ فرآیند دسترسی به نتایج و روابط نهایی بحث می‌شود.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

کرج از نظر موقعیت زمین‌شناسی در دامنه‌های جنوبی زون البرز مرکزی واقع شده است و فاصله‌ای ۱۰۰ کیلومتری با زون ایران مرکزی دارد. شرایط زمین‌شناسی و خصوصاً تکتونیکی این منطقه غالباً از شرایط زون البرز مرکزی تبعیت می‌کند. محدودهٔ بررسی شده مشتمل بر آبرفت کرج است که در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز مرکزی واقع شده است و بر روی مخروط افکنه‌های حاصل از فرسایش این رشته کوه قرارگرفته است. توپوگرافی حوضهٔ رسوبی کرج به‌صورت چین پلکانی[۱] است که در شمال از ارتفاعات بیش از ۱۷۰۰ متر شروع شده و در جنوب به ۱۰۰۰ متر ختم می‌گردد. روند تکاملی زمین ساخت کرج و حومه با کوه‌زایی آلپ شروع شده و در اواخر کرتاسه فرورفتگی[۲] شرقی و غربی بین کوه‌های البرز و شمال آنتی‌البرز در جنوب به‌وجود آمده است. این فرورفتگی ضمن بالا آمدن و مرتفع شدن البرز دچار گسلش و چین‌خوردگی شده است. رشته کوه‌های البرز فعلی در اوایل میوسن تشکیل شده‌اند. در اواخر میوسن فعالیت کوه‌زایی دیگری به‌وقوع پیوسته و پس از آن فعالیت‌های تکتونیکی باعث ایجاد گسل‌های متعددی گردیده است. گسل تراستی شمال تهران که حدوداً از فرورفتگی فشم شروع می‌شود تا نزدیکی‌های آبیک، بعد از مخروط افکنه کرج ادامه دارد [۱].

۱. En Echelon ۲. Depression

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

در تشکیل حوضهٔ رسوبی کرج واحدهای مختلف سازند کرج با سن ائوسن میانی تا بالایی نقش اساسی و تعیین کننده‌ای داشته‌اند. با این وجود در بلندی‌ها و ارتفاعاتی که این حوضه را احاطه کرده‌اند و مواد اولیه این حوضه را تأمین کرده‌اند، به رخنمون‌هایی از سازندهای قدیمی‌تر در وسعت‌های متفاوت برخورد می‌شود به‌طوری‌که در شمال‌شرقی شهرستان کرج رخنمون‌هایی از این سازندها مشاهده می‌گردد.

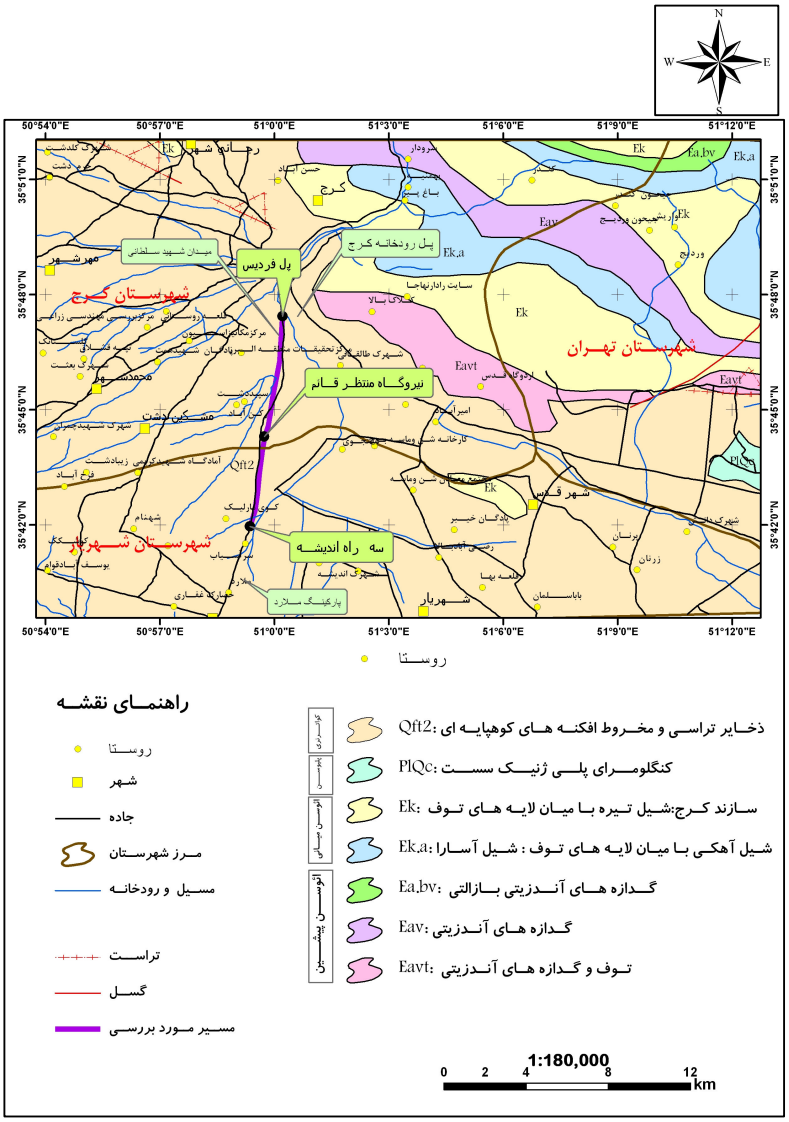
براساس بررسی‌هایی که نگارنده انجام داده است علاوه بر سازند کرج و نیز آبرفت‌های عهدحاضر که به‌طور عمده سطح دو شهرستان کرج و شهریار را پوشانده‌اند در جنوب غرب شهرستان کرج واحدهایی شامل آندزیت پیروکسن با کمی آذر آواری، توف اسیدی وسنگ‌های آذرآواری و توف وآهک ماسه‌ای با سن ائوسن و نیز سنگ‌های آذرآواری، گدازه و ایگنمبریت ریولیتی و آندزیت بازالت با سن الیگومیوسن مشاهده می‌گردد. در مرکز و شمال‌شرق شهرستان شهریار نیز واحدهایی شامل آندزیت پیروکسن‌دار و گدازه‌های روان ریوداسیتی همراه با سنگ‌های آذرآواری با سن الیگوسن و کنگلومرا و ماسه سنگ متعلق به سازند قرمز بالایی با سن پلیوسن رخنمون دارد. چنان‌که مشاهده می‌گردد منطقهٔ بررسی شده به‌طور کامل در ذخایر تراسی و مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای کواترنری (Qft2) قرار دارد (شکل۱).

مروری بر پژوهش‌های محققان پیشین پیرامون رابطهٔ بین مدول الاستیسیتهٔ خاک و آزمون نفوذ استاندارد

مدول الاستیسیتهٔ شیب خط تنش-کرنش در بخش الاستیک منحنی رفتار مصالح است و به‌طور عمومی با علامت E نمایش داده می‌شود. مدول الاستیسیتهٔ خاک به‌سه روش آزمایشگاهی، صحرایی و تجربی قابل‌تعیین است. در روش آزمایشگاهی نتایج هر یک از آزمون‌های تحکیم، تک‌محوری، برش‌مستقیم و سه‌محوری می‌تواند برای محاسبهٔ مدول الاستیسیتهٔ مورد استفاده واقع شود. هم‌چنین نتایج آزمون‌های صحرایی نظیر بارگذاری صفحه‌ای، پرسیومتری و دایلاتومتر تخت برای محاسبهٔ مدول الاستیسیتهٔ خاک کارایی دارد [۲].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

۱. روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی تعیین مدول الاستیسیته

آزمایش برش مستقیم ساده‌ترین روش برای برآورد مدول برشی خاک (G) است. با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

توجه به آن‌که در ناحیه الاستیک مدول‌های الاستیسیته و برشی خاک با پارامتر ضریب پواسون به‌هم ارتباط داده می‌شوند، می‌توان از نتایج آزمایش برش مستقیم مدول الاستیسیتهٔ خاک را به شکل زیر محاسبه کرد:

$$E=2G(1+\upsilon) \qquad (۱)$$

در این رابطه G مدول برشی، E مدول الاستیسیته و υ ضریب پواسون خاک است[۳]. هم‌چنین آزمایش سه‌محوری یکی از روش‌های تعیین مدول الاستیسیتهٔ خاک است، در این آزمایش $\Delta\varepsilon_1$ در مقابل افزایش تنش محوری $\Delta(\sigma_1-\sigma_3)$ محاسبه شده و از رابطهٔ زیر مدول الاستیسیته به‌دست می‌آید.

$$E=\Delta(\sigma_1-\sigma_3)/\Delta\varepsilon_1 \qquad (۲)$$

علاوه بر آزمون‌های آزمایشگاهی برش مستقیم و سه‌محوری، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای از دقیق‌ترین روش‌ها برای محاسبهٔ مدول الاستیسیته برجای خاک محسوب می‌شود. هدف از انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای تعیین پارامتر مدول عکس‌العمل بستر محیط‌های ژئوتکنیکی است. با این حال مدول الاستیسیتهٔ خاک نیز از نتایج این آزمون مطابق رابطهٔ زیر قابل محاسبه است [٤].

$$E_s=\Delta qB\frac{1-\nu^2}{\Delta\rho}I_{w'} \qquad (۳)$$

که Δq اضافه فشار اعمال‌شده به صفحه و خاک، B عرض صفحه بارگذاری، $\Delta\rho$ اختلاف نشست تحت اضافه تنش اعمال‌شده و ν ضریب پواسون خاک و $I_{w'}$ ضریب‌تأثیر شکل صفحه بارگذاری است که با توجه به شکل صفحه و میزان انعطاف پذیری آن جدول مقادیر آن در مراجع فنی ارائه شده است[۵] ، [٦].

۲. برآورد مدول الاستیسیته با روابط تجربی

در این روش مدول الاستیسیته از هم‌بستگی‌های موجود و روابط تجربی ذکرشده در مراجع فنی به‌دست می‌آید. بسیاری از محققان رابطهٔ بین مدول الاستیسیته و عدد نفوذ استاندارد را بررسی کرده‌اند، با این حال اکثر روابط ارائه شده مربوط به خاک‌های دانه‌ای است و در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

خاک‌های چسبنده عمدتاً این رابطه را بر حسب مقاومت حاصل از آزمون نفوذ مخروط بیان کرده‌اند. بولز[۱] [٤] و داس[۲] [۲] روابط ارائه شده توسط محققان مختلف برای خاک‌های دانه‌ای را گردآوری و معرفی کرده‌اند. از سوی دیگر بهپور و قهرمانی [۷] و قنبری[۱۰]، پژوهش‌های محدودی پیرامون هم‌بستگی بین عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیتهٔ در خاک‌های چسبنده انجام داده‌اند (جدول۱). هم‌چنین آرمی[۳] [۵]، محدودهٔ تقریبی مدول الاستیسیته را برای خاک‌های ریزدانه و ماسه‌ها ارائه کرده است.

قنبری [۱۰] براساس بررسی نتایج آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی در آبرفت جنوب تهران روابطی بین مدول الاستیسیتهٔ خاک و عدد آزمون نفوذ استاندارد ارائه کرده است. در روابط مذکور، N عدد نفوذ استاندارد، E مدول الاستیسیته بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و D حداکثر اندازهٔ دانه‌ها بر حسب سانتی‌متر است. لازم به ذکر است که متوسط اندازهٔ ذرات در مناطق ۱۰تا۱٤: ۰/۲۵ تا ۳/۵ سانتی‌متر، در مناطق ۱۵تا۱۷: ۰/۲۵ تا ۱ سانتی‌متر و در مناطق ۱۸ تا ۲۰: ۰/۲۵ سانتی‌متر است (جدول ۱).

زرنگ‌زاده [۹] نیز با بررسی آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی در آبرفت شمالی شهرستان کرج روابطی بین مدول الاستیسیته و عدد آزمون نفوذ استاندارد در منطقهٔ مذکور ارائه کرده است که در این روابط، عبارت $5D_{90}$ به‌منظور در نظر گرفتن اثر حداکثر اندازهٔ دانه‌های شنی در افزایش مدول الاستیسیتهٔ لایه خاک استفاده شده است و در آن D_{90} بر حسب میلی‌متر، اندازهٔ الکی است که ۹۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند. هم‌چنین $(N_1)_{60}$ عدد SPT اصلاح شده برای تنش‌های سربار صحرایی است (جدول۱).

مروری بر پژوهش‌های محققان پیشین پیرامون رابطهٔ بین زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و آزمون نفوذ استاندارد

محققان پیشین برای محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌های دانه‌ای از طریق عدد آزمایش نفوذ استاندارد، روابط هم‌بستگی متعددی ارائه کرده‌اند. برای این منظور میرهوف[٤] [۱۰]

۱. Bowles ۲. Das ۳. Army ٤. Meyerhof

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

(جدول ۲) را ارائه کرده است. در این جدول ارتباط بین N_{SPT} اصلاح شده و زاویهٔ اصطکاک داخلی برای ماسه‌های بدون چسبندگی ارائه شده است. در صورتی که ماسه حاوی مقادیری کانی رسی و سیلتی باشد از ارقام ارائه شده در جدول ۲ برای زاویهٔ اصطکاک داخلی تا ۵ درجه کم و در صورتی که ماسه حاوی دانه‌های شنی باشد تا ۵ درجه اضافه می‌شود.

جدول ۱. روابط محققان پیشین برای محاسبهٔ مدول الاستیسیته از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد

نام محقق		نوع خاک بررسی شده	رابطه
Behpoor and Ghahramani(1989)		خاک‌های ریزدانه چسبنده	E = 1.7N
Bowles(1996)		ماسه رس‌دار	E = 3.2N+48
		سیلت، سیلت ماسه‌دار، سیلت رس‌دار	E = 3.0N+18
Webb(1969)		ماسه رس‌دار	E = 3.6N+18
AASHTO(1996)		سیلت و سیلت ماسه‌دار با اندکی خاک چسبنده	$E= 4\ (N1)_{60}$
		ماسه متوسط تا ریزدانه و ماسه حاوی اندکی رس	$E= 7\ (N1)_{60}$
		ماسه درشت‌دانه و ماسه با اندکی شن	$E= 10\ (N1)_{60}$
		شن ماسه‌دار	$E= 12\ (N1)_{60}$
قنبری(۱۳۸۸)	**مناطق ۱۰ تا ۱٤ تهران**	درشت‌دانه حاوی اندکی ریزدانه (شن رس و لای‌دار همراه با ماسه و یا ریزدانه‌های حاوی شن و ماسه)	E= 6(N+2D)+100
	مناطق ۱۵ تا ۱۷ تهران	مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه (رس و لای ماسه‌دار همراه با شن و گاهی ماسه رس و لای‌دار همراه با شن)	E= 7(N+2D)+25
	مناطق ۱۸ تا ۲۰ تهران	خاک ریزدانه (رس و لای ماسه‌دار)	E= 3.5(N+2D)+32
زرنگ‌زاده (۱۳۸۷)	**آبرفت شمال شهرستان کرج**	لایهٔ ماسه سست آبرفت کرج (S1)	$E= 0.5\ ((N_1)_{60}+5D_{90})+3.3$
		لایهٔ ماسه متراکم آبرفت کرج (S2)	$E=0\ .78((N_1)_{60}+5D_{90})+33$
		لایه‌های شنی آبرفت کرج (G2، G1)	$E= 0.8((N_1)_{60}+5D_{90})+3.5$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

جدول۲. مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و تراکم نسبی بر مبنای آزمون نفوذ استاندارد (میرهوف[۱]،۱۹۵٦)

زاویهٔ اصطکاک داخلی Φ	N_{SPT}	تراکم نسبی DR%	نوع خاک
>۳۰	<٤	<۲۰	ماسهٔ خیلی سست
۳۰-۳۵	٤-۱۰	٤۰-۲۰	ماسهٔ سست
۳۵-٤۰	۳۰-۱۰	٤۰-٦۰	ماسهٔ متراکم
٤۰-٤۵	۳۰-۵۰	۸۰-٦۰	ماسهٔ سخت
>٤۵	>۵۰	>۸۰	ماسهٔ خیلی سخت

هانت[۲] [۱۱] نیز برای تخمین زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌های بدون چسبندگی جدول مقادیری را با توجه به N_{SPT} (عدد اصلاح نشده آزمون)، تراکم نسبی، نوع مصالح و میزان تراکم ارائه کرده است.

هم‌چنین هاتاناکا[۳] و یوشیدا[٤] [۱۲] براساس نتایج تعداد چشم‌گیر آزمایش سه‌محوری که بر روی نمونه‌های دست نخورده انجام شده بود رابطه زیر را به دست آورده‌اند:

$$\Phi' = \sqrt{15.4(N1_{60})} + 20° \qquad (٤)$$

همچنین زرنگ‌زاده [۹] جدول ۳ را برای محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی در آبرفت شمال کرج ارائه کرده است، وی اذعان داشته است که در آبرفت شمال کرج روابط حاصل برای زاویهٔ اصطکاک داخلی با مقادیر ارائه شده در جدول مایرهوف ارتباط نزدیکی دارد.

جدول۳. مقادیر ارائه شده زاویهٔ اصطکاک داخلی در آبرفت شمال کرج (زرنگ‌زاده،۱۳۸۷)

مشخصات خاک	رابطهٔ حاصل برای زاویهٔ اصطکاک داخلی بر حسب درجه
لایهٔ ماسهٔ سست آبرفت کرج (S1)	$\Phi = 0.13((N1)_{60}+5D90) + 17.5$ $R^2=0.61$
لایهٔ ماسهٔ متراکم آبرفت کرج (S2)	$\Phi = 0.06((N1)_{60}+5D90) + 27.4$ $R^2=0.55$
لایه‌های شنی آبرفت کرج (G1 و G2)	$\Phi = 0.04((N1)_{60}+5D90) + 28.4$ $R^2=0.65$

۱. Meyerhof ۲. Hunt ۳. Hatanaka ٤. Uchida

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی

به‌منظور شناسایی مشخصات فیزیکی و مکانیکی آبرفت در محدودهٔ بررسی شده، شرکت‌های مهندسی مشاور ماندرو [۱۳] و سانو [۱٤] (پیمانکاران سازمان قطار شهری کرج و حومه) حدود صد و پنجاه گمانه ۳٦۰۰ متر است. آزمایش نفوذ استاندارد در همهٔ گمانه‌ها و در فواصل ۲ متری به تعداد ۱۸۱۵ مرتبه انجام شده است. همهٔ نمونه‌های اخذ شده تحت دانه‌بندی آزمایشگاهی و آزمون حدود اتربرگ قرار گرفته‌اند و در اغلب موارد ضمن تعیین میزان رطوبت طبیعی نمونه‌ها، وزن مخصوص طبیعی آن‌ها نیز محاسبه شده است. علاوه بر این بر روی نمونه‌های حاصل ۱۰ آزمایش تراکم، ٦۷ آزمایش برش مستقیم تند و کند و ۱۹ آزمایش سه‌محوری انجام گرفته است. هم‌چنین در میان آزمون‌های صحرایی تعداد ۸ آزمون برش مستقیم برجا، ۱۸ آزمون نفوذپذیری صحرایی و ۸ نمونه آزمون بارگذاری صفحه انجام و نتایج آن در تحقیق حاضر استفاده شده است. خلاصه وضعیت گمانه‌ها و نمونه‌های اخذ شده در کل محدودهٔ بررسی شده در جدول ٤ و فهرست آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شدهٔ محدودهٔ مورد نظر در جدول ۵ بیان گردیده است.

در منطقهٔ مذکور عملیات حفاری به‌صورت دستی و ماشینی انجام شده است. درحفاری‌های دستی صورت گرفته، قطر چاه‌ها ۸۰ تا ۹۰ سانتی‌متر و عمق آن‌ها ۱۰ الی ۲۵ متر است، البته در بعضی چاه‌ها به‌دلیل وجود آب موضعی و نیز درشت‌دانه و ریزشی بودن مصالح، عمق حفاری کم‌تر از مقادیر مذکور بوده است. در حفاری‌های ماشینی که به دو روش شستشویی(با دستگاه‌های موبیل دریل و اسکیتی) و مغزه‌گیری ممتد صورت گرفته است در برخی از گمانه‌ها که خاک محل ریزشی بوده است از گل حفاری (بنتونیت) استفاده گردیده است. قطر گمانه‌ها بین ۷٦ تا ۱۱٦ میلی‌متر و عمق آن‌ها بین ۲۵ تا ۳۰ متر است. هم‌چنین در محل ایستگاه‌ها عمق گمانه‌ها ۳۰ متر گزارش شده است. در گمانه‌های ماشینی، نمونه‌گیری با نمونه‌گیر مخصوص آزمون نفوذ استاندارد برای نمونه‌های دست‌خورده و با نمونه‌گیر شلبی برای نمونه‌های دست‌نخورده انجام شده است. در بعضی موارد به‌دلیل درشت‌دانه بودن و سختی زیاد خاک از نمونه‌گیر کوربارل و مغزه‌گیری ممتد استفاده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

آزمایش دانسیتهٔ صحرایی در محل حفر چاه‌های دستی و در سطح زمین با مخروط ماسه طبق استاندارد ASTM D 1556 [۱۵] انجام شده است. برای تعیین نفوذپذیری خاک آزمایش لوفران و آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های منتخب انجام شده است. برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک آزمایش‌های طبقه‌بندی و مقاومت برشی و تغییر شکل‌پذیری طبق استانداردهای ASTM انجام گردیده است. به‌دلیل تراکم خاک، درشت‌دانه بودن و عدم وجود چسبندگی لازم میان ذرات امکان اخذ نمونه‌های دست‌نخورده[۱] مناسب برای انجام آزمایش‌های مقاومتی خاک وجود نداشت. لذا برای دست‌یابی به خواص مکانیکی خاک، آزمایش برش مستقیم و سه‌محوری بر روی نمونه‌های بازسازی[۲] شده به عمل آمده است. آزمایش برش مستقیم در جعبه برش مربع شکل و در ابعاد متفاوت ۵۰*۵۰ ،۳۰*۳۰ و ۶ *۶ سانتی‌متر مربع به‌روش تند بر روی نمونه‌های منتخب انجام گردیده است. برای شناخت و طبقه‌بندی آبرفت جنوب کرج، نتایج حاصل از حفر گمانه‌ها و چاه‌های دستی به‌صورت مقاطع عرضی ترسیم گردید (شکل‌های۲ و ۳). طبقه‌بندی خاک در این مقاطع براساس طبقه‌بندی متحدD-2487 [۱۶] استاندارد ASTM است. مبنای طبقه‌بندی، آزمون‌های دانه‌بندی خاک، هیدرومتری و حدود اتربرگ است. برای نمایش تصویری بهتر سعی شده از طیف رنگ‌ها استفاده گردد. در این تقسیم‌بندی رنگ‌های قرمز، صورتی و بنفش به خاک‌های ماسه‌ای، رنگ نارنجی به رس‌ها و رنگ‌های طیف سبز، آبی فیروزه‌ای، جگری و سبز لجنی به خاک‌های درشت دانه اختصاص داده شده است.

جدول ٤. خلاصه وضعیت گمانه‌ها،چاه‌های دستی و نمونه‌های اخذ شده در محدودهٔ بررسی شده

نام محل	تعداد گمانه	تعداد چاه دستی	تعداد کل نمونه‌ها	نمونه‌های انتخابی
پارکینگ ملارد	١٦	٢	٢٦٥	١٢٥
پل فردیس- نیروگاه	٤٧	٨	٤٥٦	٣٣٢
نیروگاه- سه راه اندیشه	٥٣	١٣	٩٣٧	٤٩٤
پل رودخانه کرج	٣	-	١١٤	٣٠
میدان شهید سطانی	-	٤	١١٩	٥٥
جمع کل	١٢١	٢٧	١٨٩١	١٠٣٦

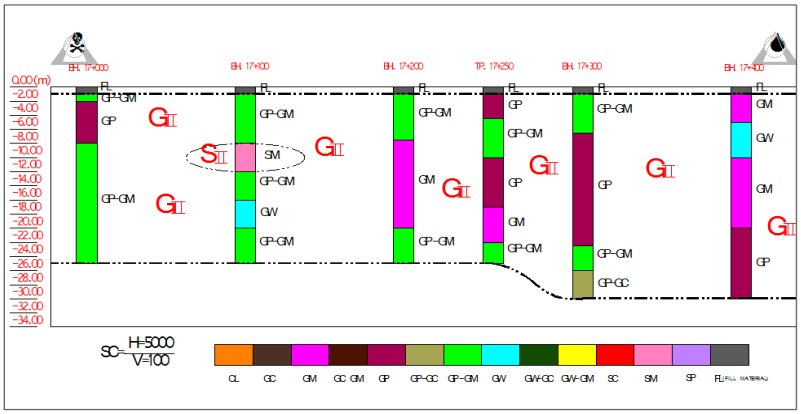
۱. Sample Undisturbed ۲. Remolded Sample

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

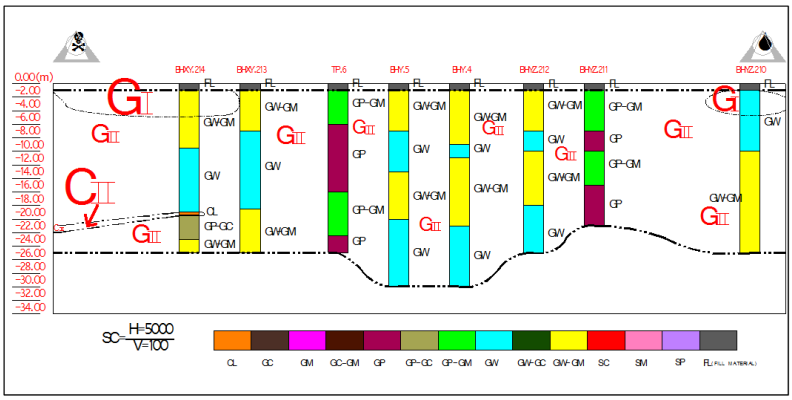
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

جدول ۵. آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده در محدودهٔ بررسی شده

نوع حفاری	آزمون SPT	دانسیتهٔ صحرایی	آزمایش لوفران	آزمایش دانه بندی خاک	آزمایش حدود اتربرگ	آزمایش برش مستقیم	آزمون سه محوری	آزمایش تراکم	آزمایش شیمیایی	آزمایش تفوذپذیری با بارثابت	آزمون برش مستقیم برجا	آزمون بارگذاری صفحه‌ای
گمانه	۱۸۱۵	۱۸	۱۲	۵۶۳	۱۵۵	۴۱	۷	۹	۱۷۹	۱۳	–	–
چاه دستی	–	۱۲۹	۶	۱۶۶	۳۰	۲۶	۱۲	۱	۱۸	۵	۸	۸



شکل ۲. پروفیل خاک برای متراژهای ۴۸۰۰ تا ۵۲۰۰



شکل ۳. پروفیل خاک برای متراژهای ۸۵۹۰ تا ۸۹۰۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

توصیف و طبقه‌بندی آبرفت جنوب کرج

در فاصلهٔ ٤٨٠٠ تا ٥٢٠٠ متری لایه‌های تحت‌الارضی عمدتاً از شن و ماسهٔ لای‌دار خاکستری رنگ تشکیل شده‌اند که در بعضی از گمانه‌ها و در برخی اعماق مقدار کمی رس قهوه‌ای رنگ به همراه قلوه سنگ نیز مشاهده می‌شود. براساس طبقه‌بندی متحد خاک[1] به‌دلیل تغییر میزان شن و ماسه و درصد ریزدانه، لایه‌های خاک در رده‌های GM, GC, GC-GM, GP, GW, GP-GC GP-GM, GW-GC, GW-GM، قرار می‌گیرند. براساس تعداد ضربات آزمون SPT و آزمون‌های آزمایشگاهی لایه‌های شن و ماسه‌ای محل، بسیار متراکم و لایهٔ رسی موجود، سخت گزارش گردید. به‌طور کلی مسیر بررسی شده شامل شن ماسه‌دار همراه با لای و قلوه سنگ، شن لای‌دار همراه با ماسه و شن رس‌دار است.

در فاصلهٔ ٥٣٠٠ تا ١٠٠٠٠ متری بافت کلی خاک درشت‌دانه و نسبتاً یک‌نواخت است. جدا از لایه‌های مخلوط متراکم شده سطحی که برای عملیات زیرسازی راه به‌کار رفته‌اند، خاک طبیعی محل از نوع درشت‌دانه معمولاً همراه با قلوه سنگ و تقریباً همه جا به‌صورت بسیار متراکم است. از دیدگاه سیستم طبقه‌بندی متحد خاک لایه‌های خاک در رده‌های GP, GW, GP-GM, GW-GC, GW-GM قرار می‌گیرند. قلوه سنگ در اکثر لایه‌ها مشاهده می‌شود. معمولاً از عمق ۲۰ متر به بعد در گمانه‌ها حالت چسب بین ذرات (سمنته شدن) مشاهده شده است ولی این حالت در تمام لایه‌های خاک (با عمق بیش از ۲۰ متر) یک‌سان نیست و به صورت موضعی در نقاط مختلف کم یا زیاد می‌گردد. لازم به ذکر است که در لایه‌هایی که در عمق کم‌تر از ۲۰ متر قرار دارند حالت چسب بین ذرات وجود نداشته است و خاک شدیداً ریزشی است.

به‌منظور طبقه‌بندی آبرفت در بخش جنوبی کرج بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های دانه‌بندی خاک و حدود اتربرگ یک طبقه‌بندی کلی انجام شد که محصول آن سه لایهٔ اصلی رس و سیلت (خاک‌های ریزدانه) ماسه (خاک‌های دانه‌دار) و شن (خاک‌های درشت‌دانه) است. از آن‌جا که چنین تقسیم‌بندی کاملاً توصیفی است و در کارهای مهندسی نمی‌تواند مؤثر باشد نتایج حاصل از آزمون نفوذ استاندارد کـه معیاری شناخته شده برای مهندسان است به‌طور

۱. Unified Soil Classification System

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

مستقیم در تقسیم‌بندی مذکور وارد گردید. بر این اساس در سه لایهٔ مذکور مقدار N_{SPT} مبنای دوم تقسیم‌بندی قرار گرفت لذا در لایهٔ رس و سیلت، عدد آزمون نفوذ استاندارد برابر با ۳۵ مرز جدایش دو لایه رس و سیلت ۱ و۲ قرار گرفت. در لایهٔ ماسه این عدد ٤۰ و در لایهٔ شن ٤٤ در نظر گرفته شد. بر مبنای این تقسیم‌بندی، آبرفت جنوب کرج شامل ۵ لایه رس و سیلت ۲ (CII)، ماسهٔ ۱ (SI)، ماسهٔ ۲ (SII)، شن ۱ (GI) و شن ۲ (GII) است. در جدول‌های ٦ الی ۸ خصوصیات مکانیکی و دانه‌بندی هر یک از لایه‌های مذکور ذکر شده است. هم‌چنین متوسط اندازهٔ ذرات در لایه‌های رس و سیلت ۲، ماسهٔ ۱ ، ماسهٔ ۲ ، شن ۱ و شن ۲ به‌ترتیب ۰/۰۵، ۱/۳ ، ٤ ، ۲۰/۲ ، ٤٤ میلی‌متر است.

۱. لایهٔ رس و سیلت ۲ (لایهٔ رس متراکم) (CII)

لایهٔ رس و سیلت ۲ به‌صورت دو لنز رسی در متراژهای ۸٤۰۰ تا ۸۹۰۰ (بخش جنوبی) و ٤۰۰۰ (بخش مرکزی) به‌ترتیب در اعماق ۲۹ و ۲۰ متری قابل مشاهده است (شکل ٤). این لایه در مجاورت گمانه ۳۰۰+۱٦ به‌صورت لنزی متراکم رسی و در کنار گمانه‌های BHXY-214 و BHXY-215 به‌شکل یک لنز باریک رسی مشاهده می‌شود. لایهٔ CII به‌صورت تاپ و واضح از طرفین با لایهٔ شن ۲ (GII) در تماس است. در طبقه‌بندی متحد خاک، این لایه دارای گروه CL است. سایر ویژگی‌های دانه‌بندی و مکانیکی لایه CII در جدول ٦ ذکر شده است.

جدول ٦. مشخصات مهندسی ژئوتکنیک آبرفت جنوب کرج برای لایهٔ رس و سیلت ۲ (لایهٔ رس متراکم) CII

ویژگی‌های لایهٔ رس و سیلت ۲ (CII)	حداک	حداقل	میانگین
درصد شن	۲۵	۲۱/۵	۲۳/۳
درصد ماسه	۷۰	۱۲/۹	٤۱/۵
درصد رس و سیلت	٦۵/٦	۵	۳۵/۳
اندازه ذرات (میلی‌متر)	_	_	۰/۰۵
شاخص خمیری (PI)	۱۳	۱۲	۱۲/۵
زاویهٔ اصطکاک داخلی (برش مستقیم تند) ϕ' (درجه)	–	–	۲۸
چسبندگی (برش مستقیم تند) (kg/cm^2)	–	–	۰/۱۵
چسبندگی (سه‌محوری UU) (kg/cm^2)	-	-	۰/٦۳
درصد رطوبت	۱٦/۱	۵/٦	۱۰/۹
وزن مخصوص خشک γ_d (g/cm^3)	۱/۹۳	۱/۹۳	۱/۹۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

۲. لایه‌های ماسه ۱ و ۲ (SII و SI)

لایهٔ SI به‌استثنا پارکینگ ملارد در مکان دیگری از محدودهٔ مطالعاتی مشاهده نمی‌شود. لایهٔ مذکور در زیر رسوبات دستی از عمق ۱/۵ تا ٤/٦ متری قرار دارد و مرز آن با لایه‌های شن ۱ و ماسهٔ ۲ به‌صورت بین‌انگشتی و با لایهٔ شن ۲ به‌صورت واضح و تاپ است. به‌لحاظ نوع ذرات تشکیل‌دهنده از دیدگاه سیستم طبقه‌بندی متحد خاک این لایه شامل گروه‌های SC، SM و SP است. سایر ویژگی‌های دانه‌بندی و مهندسی لایه SI در جدول ۷ آمده است.

لایهٔ SII نیز به‌صورت لنزهای سطحی (عمق۳ متری) و عمیق (اعماق ١٤ و۲۳ متری) در نقاط مختلف محدودهٔ پژوهش پراکنده است و مرز آن با سایر لایه‌های محدودهٔ پژوهش به صورت تاپ گزارش می‌شود.گروه‌های SM و SP در این لایه جای دارند. با توجه به خصوصیات مکانیکی و دانه‌بندی لایهٔ مذکور که در جدول ۷ بیان شده است، تفاوت این لایه با لایهٔ ماسهٔ ۱ در درصد شن، رس و سیلت و نیز پارامترهایی چون شاخص خمیری و عدد N است.

جدول ۷. مشخصات مهندسی ژئوتکنیک آبرفت جنوب کرج برای لایه‌های SI و SII

لایه	لایهٔ ماسهٔ ۱ (SI)			لایهٔ ماسهٔ ۲ (SII)		
پارامتر	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین
درصد شن	۳۸	۲	۲۳/٤	٤۱	۲٦	۳۲/۵
درصد ماسه	٦۸	۳۲	٤۵/۵	٦۲	۳۱/۵	۵۰/٦
درصد رس و سیلت	۵۲	۲	۳۱/۱	۳۹/٦	۲	۱٦/۹
اندازهٔ ذرات (میلی‌متر)	٤/۸	۰/۳	۱/۳	۱٦	۰/۸	٤
شاخص خمیری (PI)	۱۱	۳	۸/۱	۱۵	۱۵	۱۵
عدد آزمون نفوذ استاندارد (N_{SPT})	۱۸	۸	۱۲	۷۰	٤۵	۵٦/۳
زاویهٔ اصطکاک داخلی (برش مستقیم تند) ϕ' (درجه)	–	–	–	–	–	۳٤
چسبندگی (برش مستقیم تند) (kg/cm^2)	–	–	–	–	–	۰/۰۹
درصد رطوبت	۲۷/۷	۱۲/۲	۲۰/۹	۱٦/٦	۲	۱۱/٤
وزن مخصوص خشک γ_d (g/cm^3)	--	–	–	–	–	–

۳. لایه‌های شن۱ و۲ (GI و GII)

لایهٔ شن ۱ (GI) نسبت به سایر لایه‌های محدودهٔ مطالعاتی که تا کنون تشریح گردیدند، حجم بیش‌تری از خاک منطقه را به‌خود اختصاص داده است. حداقل و حداکثر عمق حضور

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

این لایه از سطح زمین تا عمق ٦/٥ متری گزارش می‌گردد. در نواحی شمالی محدودهٔ پژوهش از متراژ ۰۰ تا ۱۰۰۰ تعداد دو لنز شنی، در نواحی مرکزی و متراژ ۵۸۰۰ یک لنز، از نواحی مرکزی تا جنوبی محدوده (متراژ ٦۹۵۰ الی ۹۹۰۰) لنزهای متعددی عمدتاً تا عمق ٦ متری و در تمامی مقاطع ذکرشده در پارکینگ ملارد چندین لنز از این لایه قابل مشاهده است. لایهٔ شن ۱ عمدتاً شامل قطعات شن که از سنگ‌های توف، توف آهکی، شیل، شیل آهکی و... سازند کرج تشکیل شده است، است. در این لایه گروه‌های GW,GM,GP- GP-GM ,GW- GC GM از طبقه بندی متحد خاک وجود دارند.

لایهٔ شن ۲ (GII) تقریباً تمامی محدودهٔ بررسی شده را در بر می‌گیرد به استثنا قسمت‌هایی که با لایه‌های بیان شده در بخش‌های پیشین پوشانده شده، سایر بخش‌های منطقهٔ بررسی شده از لایهٔ شن ۲ تشکیل گردیده است. ضخامت این لایه در بعضی از نقاط به بیش از ۳۰ متر نیز می‌رسد. مرز آن با شن ۱ به‌صورت بین‌انگشتی و با سایر لایه‌ها به‌صورت واضح و تاپ است. لایهٔ مذکور شامل‌گروه‌های GC,GM,GP,GP-GC,GP-GM,GW,GW-GC, GC-GM و GW-GM است. این لایه نیز همانند لایهٔ شن ۱ از سنگ‌های موجود در سازند کرج تشکیل شده است و تفاوت آن با لایهٔ ماسهٔ ۱ در مقدار شن، ماسه و رس وسیلت (ذرات عبوری از الک ۲۰۰) است، به‌طوری‌که در لایهٔ شن ۲ قطعات درشت‌دانه خیلی بیش‌تر از لایهٔ شن ۱ هستند و قطعات درشت در حد تخته سنگ و قلوه سنگ نیز در نواحیِ شمالی ساخت‌گاه، در این لایه مشاهده شده است. چنانه پیش‌تر بیان شد در درون لایهٔ شن ۲ لنزهایی از سایر لایه‌ها به‌صورت پراکنده وجود دارد. به‌دلیل گسترش اندک لایهٔ شن ۱، آزمون‌های انجام گرفته برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی و نیز سایر آزمون‌ها در این لایه انجام نشده است، لذا نمی‌توان به‌لحاظ پارامترهای برشی لایهٔ شن ۱ و ۲ را با هم مقایسه کرد. میانگین عدد SPT در لایهٔ شن۲، ٥٦ ضربه و در لایهٔ شن۱، ۳۰ ضربه است، همچنین میانگین شاخص خمیری در لایهٔ شن ۲، مقدار ۸/۷ و در لایهٔ شن ۱، به میزان ۸ گزارش می‌گردد. خصوصیات مکانیکی و دانه‌بندی لایه‌های شنی مذکور در جدول ۸ آمده است. این لایه‌ها بیش‌ترین زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک را در آبرفت جنوب کرج دارا هستند. لازم به ذکر است، به‌دلیل این‌که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

قسمت اعظم منطقهٔ بررسی شده از لایهٔ شن ۲ تشکیل شده است، روابط حاصل مربوط به لایهٔ مذکورند.

جدول ۸ مشخصات مهندسی ژئوتکنیک آبرفت کرج برای لایه‌های GI و GII

لایه	لایهٔ شن۱ (GI)			لایهٔ شن۲ (GII)		
پارامتر	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین
درصد شن	۷۰	۳۶	۵۹/٤	۱۰۰	۲۸/۷	٦٦/۸
درصد ماسه	۳۷	۲٤/۹	۲۹/٤	٦۰	۱/۱	۲٦/۲
درصد رس و سیلت	۳۵	۲	۱۱/۲	٤٦/۹	۰/۵	۷/۵
اندازه ذرات (میلیمتر)	۲۵/٤	۱۵	۲۰/۲	۸۹	٤	٤٤
شاخص خمیری (PI)	–	–	۸	۲۲	۲	۸/۷
عدد آزمون نفوذ استاندارد (N_{SPT})	٤٤	۷	۳۰/٦	>۵۰	٤۵	۵٦/۵
زاویهٔ اصطکاک داخلی (برش مستقیم تند) ø′ (درجه)	–	–	–	۵۳/۹	۱٦	۳۹/۲
زاویهٔ اصطکاک داخلی (سه محوری UU) ø′ (درجه)	–	–	–	٤۰	۱۵/۹	۳٦/۸
چسبندگی (برش مستقیم تند) (kg/cm^2)	–	–	–	۲/۷۵	۰/۰۰	۰/۲
چسبندگی (سه‌محوری UU) (kg/cm^2)	–	–	–	۰/٦۸	۰/۰۰	۰/۱
درصد رطوبت	۲۲/٤	۳/۵	۹/۹	۲۰	۱/٦	۹/۲
وزن مخصوص خشک γ_d (g/cm^3)	–	–	–	۲/٤	۱/۷	۲
وزن مخصوص مرطوب γ_w (g/cm^3)	–	–	–	۲/۲٦	۲/۰۳	۲/۱۰
چگالی ویژه G_S	–	–	–	۲/۷۵	۲/٦۵	۲/۷۱

لازم به ذکر است که به‌طور کلی آبرفت جنوب کرج در محیط رودخانه‌ای تشکیل گردیده است و از شمال به جنوب محدودهٔ مطالعاتی با وجود نوعی یک‌نواختی در اندازهٔ ذرات، کاهش اندازه آن‌ها قابل مشاهده است، به‌طوری‌که در محل پارکینگ ملارد (منتهی الیه جنوبی محدوده) رسوبات ماسه‌ای و رسی بیش‌تر نمایان هستند. در نواحی شمالی محدودهٔ بررسی شده به‌دلیل انرژی زیاد آب رودخانه قطعات بزرگ در حد تخته سنگ نهشته شده‌اند. ته نشست لنزهایی از ذرات رس و سیلت (ریزدانه‌ها) نیز به‌دلیل کاهش انرژی آب رودخانه کرج (تغییرات شرایط آب و هوایی) است [۱۷].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

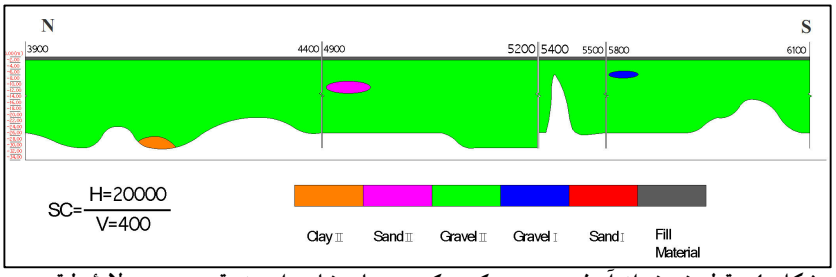
رابطه بین مدول الاستیسیته و آزمون نفوذ استاندارد در آبرفت جنوب کرج

بر مبنای پژوهش‌های انجام شده مدول الاستیسیته از طریق آزمون‌های برش مستقیم آزمایشگاهی و صحرایی، بارگذاری صفحه‌ای و نیز آزمون سه‌محوری در نمونه‌های منتخب از آبرفت جنوبِ کرج محاسبه شد. چنان‌که در جدول ۹ ملاحظه می‌گردد مدول الاستیسیتهٔ (مدول تانژانت) به‌دست آمده از آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی بین ٤١ تا ١٨٦٩ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در آزمون برش مستقیم صحرایی از ١٢٤٨ تا ٦٩٣٣ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در تغییر است. لازم به ذکر است که مدول مذکور در حدود ۵۰ درصد از کرنش محاسبه می‌شود. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که میانگین مدول الاستیسیتهٔ حاصل از آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی ۳ برابر مدول آزمون سه‌محوری و میانگین مدول الاستیسیتهٔ آزمون بارگذاری صفحه‌ای ۱/۵ برابر مدول آزمون برش مستقیم صحرایی است. چنان‌که در جدول ۹ ملاحظه می‌گردد، داده‌های صحرایی به‌واقعیت نزدیک‌تر هستند؛ زیرا حجم بیش‌تری از خاک را تحت تنش قرار می دهند و فشار جانبی زمین نیز در این آزمایش‌ها به شرایط واقعی نزدیک‌تر است. از سوی دیگر نمونه‌های آزمایشگاهی سه‌محوری با قطر کم و پس از دست‌خوردگی چشم‌گیری که ناشی از نمونه‌گیری و حمل آن است، آزمایش می‌شود و بر این اساس نیز دقت آزمایش‌های صحرایی بیش‌تر است. در مجموع نگارندگان در نقاط متعددی از آبرفت تهران و کرج اختلاف چشم‌گیری بین نتایج بارگذاری صفحه و سه‌محوری ملاحظه کرده‌اند و لذا بر استخراج مدول الاستیسیته از آزمون‌های صحرایی تأکید دارند. در شکل ۵ تغییرات مدول الاستیسیتهٔ به‌دست آمده از آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی برحسب مجموع عدد آزمایش نفوذ استاندارد (N_{60}) به‌علاوه $5D_{90}$ نشان داده شده است. عبارت $5D_{90}$ به‌منظور در نظرگرفتن اثر حداکثر اندازه دانه‌های شنی در افزایش مدول الاستیسیتهٔ لایهٔ خاک استفاده شده است و در آن D_{90} برحسب میلی‌متر، اندازهٔ الکی است که ۹۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند. در محدودهٔ بررسی شده به‌دلیل درشت‌دانه بودن ذرات خاک، میانگین اندازهٔ آن‌ها ٤٣ میلی‌متر گزارش شده است. بدین‌ترتیب برای مدول‌های الاستیسیتهٔ به‌دست آمده از سایر آزمون‌ها نیز نمودارهایی ترسیم و به‌صورت شکل‌های ٦ الی ٨ ارائه شده است و نتایج حاصل به‌صورت روابط (۵) تا (۸) بیان شده است. در روابط حاصل R^2 ضریب هم‌بستگی و Ei درصد خطا است. ذکر این نکته ضروری است که آزمایش نفوذ استاندارد در شرایط ایده‌آل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

برای خاک‌های ماسه‌ای توصیه شده است، با این حال در شرایط فعلی به‌طور فراگیر در ایران و چند کشور دیگر با استفاده از نفوذسنج مخروطی شکل آزمایش در خاک‌های شنی هم انجام می‌شود. هر چند صرفاً در مراجع معدودی این روش آزمایش توصیه شده است، از آن‌جا که تجهیزات، همان تجهیزات آزمایش نفوذ استاندارد است، به‌کارگیری آن گسترش یافته است.



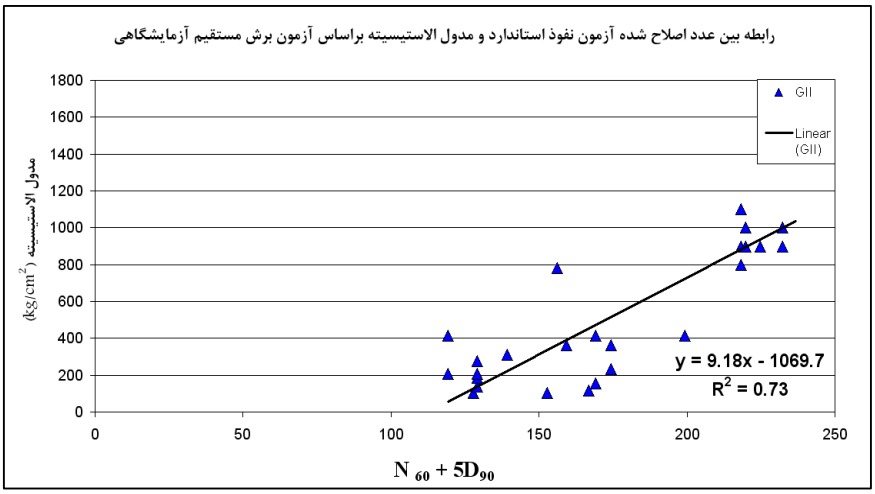
شکل ٤. مقطع نمونه از آبرفت جنوب کرج که بر مبنای نتایج این تحقیق در پنج لایهٔ طبقه‌بندی شده است (فاصلهٔ ۳۹۰۰ الی ٦۱۰۰ متری)

جدول ۹. محدودهٔ تغییرات مدول الاستیسیته در لایه‌های آبرفت جنوب کرج بر مبنای آزمون‌های مختلف

مدول الاستیسیته kg/cm^2						
	نوع آزمون			آزمون	آزمون سه	آزمون برش	آزمون برش مستقیم
لایهٔ GII (شن۲)	عمق	۰_۱۰	Max	٦٥٥٢	۱۸۸	۱۳۸۷	۱۸٦۹
			Min	٤۲۰۸	٦۳	۱۲٤۸	٤۱
			Ave	٥۳۸۰	۱۱۳	۱۳۱۲	٦۱٥
		۱۰_۲۰	Max	٤۳٦۹	٥۰۰	٦۹۳۳	۱٦۹۰
			Min	۳۱٥٥	۱۷۰	۲۰٥۸	۱۳۹
			Ave	۳٥۱۸	۲۷۱	۳۸۱٥	٦٤٥
		۲۰_۳۰	Max	_	٤۰۰	_	۱٤۰۸
			Min	_	۲۰۰	_	۱۸۷
			Ave	۳۱٤۱	۳۰٦	۳٦۸۳	٥٤۰
	لایه GII (شن۲)			**Min: ۳۱٤۱**	**Min: ٦۳**	**Min: ۱۲٤۸**	**Min: ٤۱**
				Max: ٦٥٥۲	**Max: ٥۰۰**	**Max: ٦۹۳۳**	**Max: ۱۸٦۹**
				Ave: ۳۹۹٦	**Ave:۲۰۹**	**Ave:۲۸٦۰**	**Ave: ٦۱٦**
لایه CII (رس و سیلت۲)				_	٥۰	_	۲٦۱
لایه SII (ماسه۲)				_	_	_	۱٥۰

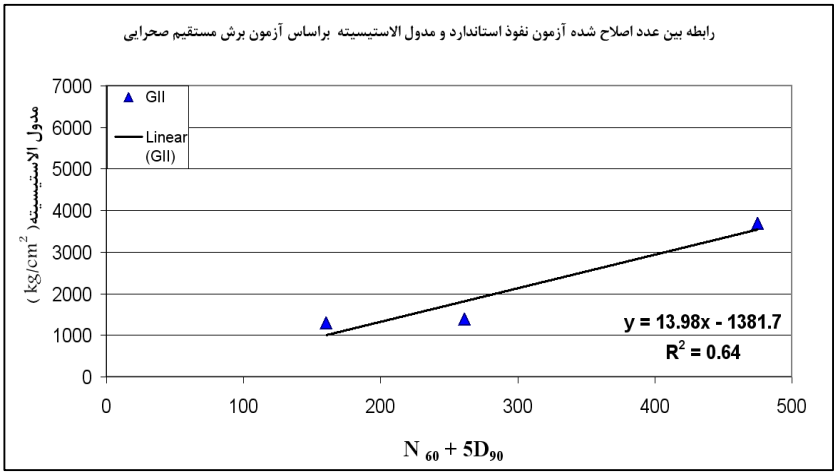
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]



شکل ۵. ارتباط بین عدد اصلاح شده آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در آبرفت درشت‌دانه جنوبِ کرج برمبنای آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی

$$E = 9.18(N_{60} + 5D_{90}) - 1069.7 \qquad Ei = 0.15 \qquad R^2 = 0.73 \qquad (۵)$$

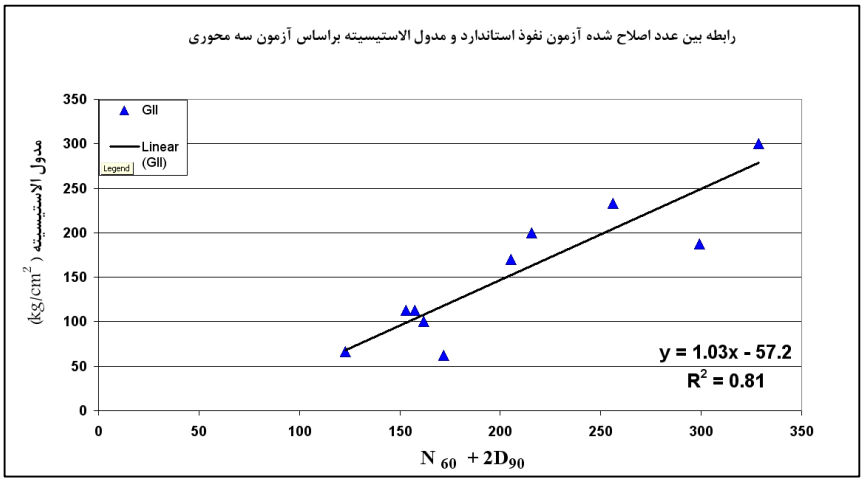


شکل ٦. ارتباط بین عدد اصلاح شده آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در آبرفت درشت‌دانه جنوب کرج بر مبنای آزمون برش مستقیم صحرایی

$$E = 13.98(N_{60} + 5D_{90}) - 1381.7 \qquad Ei = 0.04 \qquad R^2 = 0.64 \qquad (٦)$$

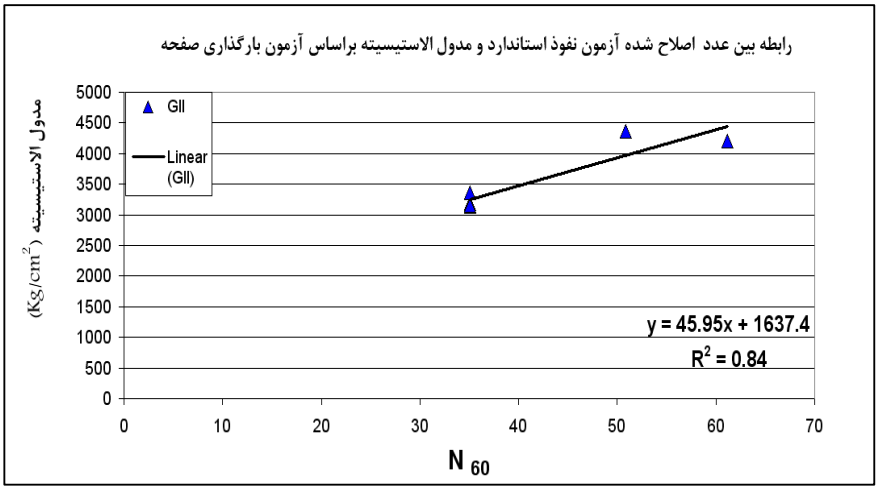
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]



شکل ۷. ارتباط بین عدد اصلاح شده آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در آبرفت درشت‌دانه جنوب کرج بر مبنای آزمون سه‌محوری

$$E = 1.03(N_{60} + 2D_{90}) - 57.2 \qquad R^2 = 0.81 \qquad Ei = 0.11 \qquad (۷)$$



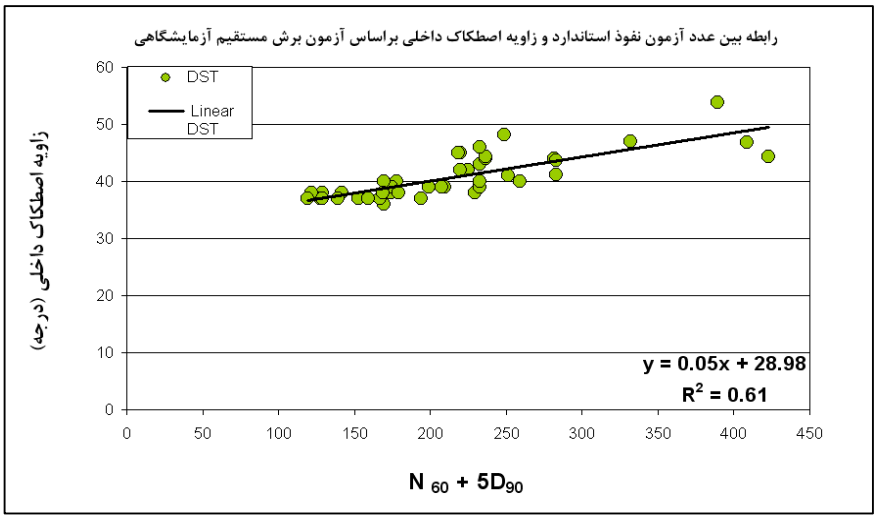
شکل ۸. ارتباط بین عدد اصلاح شده آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در آبرفت درشت‌دانه جنوب کرج برمبنای آزمون بارگذاری صفحه‌ای

$$E = 45.95(N_{60}) + 1637.4 \qquad R^2 = 0.84 \qquad Ei = 0.07 \qquad (۸)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

رابطهٔ بین زاویهٔ اصطکاک داخلی و عدد آزمون نفوذ استاندارد در خاک‌های دانه‌ای آبرفت جنوب کرج

در بخش آبرفت جنوب کرج به‌منظور ارائه روابطی برای محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی نتایج حاصل از آزمون‌های برش مستقیم آزمایشگاهی و صحرایی به‌همراه عدد آزمون نفوذ استاندارد استفاده شده است. در اشکال ۹ و۱۰ ارتباط بین عدد اصلاح شده آزمون نفوذ استاندارد (N_{60}) و زاویهٔ اصطکاک داخلی بر اساس آزمون‌های مذکور به‌صورت نمودار نمایش داده شده است. از آن‌جا که در آزمایش نفوذ استاندارد میزان درصد درشت‌دانه تأثیر زیادی در مقدار نتایج دارند این فاکتور نیز در مقایسهٔ مذکور دخالت داده شده است. روابط حاصل از نمودارهای ذیل، ضرایب هم‌بستگی هر رابطه و درصد خطا در روابط ۹ الی ۱۰ ارائه شده است. در این روابط عبارت D_{90} بر حسب میلی‌متر است و عبارت است از اندازهٔ الکی است که ۹۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند.



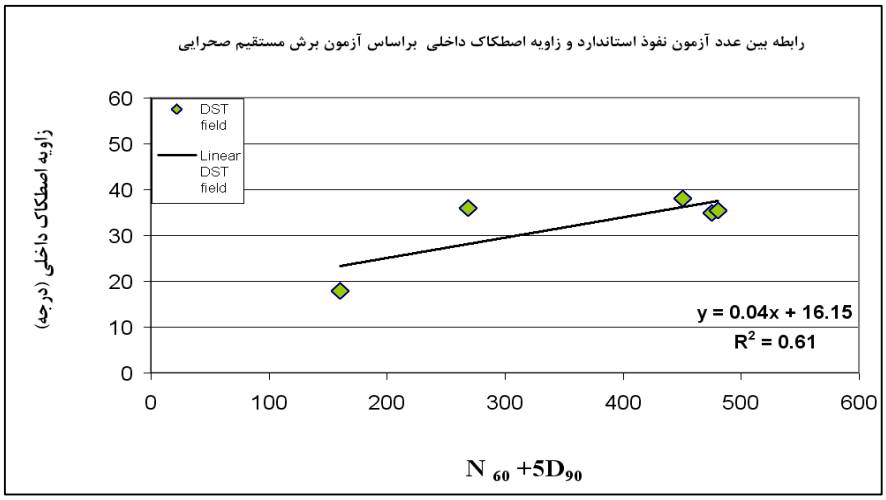
شکل ۹. ارتباط بین زاویهٔ اصطکاک داخلی و آزمون نفوذ استاندارد در لایه شن۲ برمبنای آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی

$$\Phi=0.05\,(N_{60}+5D_{90})+28.98 \qquad R^2=0.61 \qquad Ei=0.16 \qquad (۹)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

در شرایطی که نتایج روابط بیان شده با جدول‌های ارائه شده توسط مایرهوف و هانت مقایسه گردد زاویهٔ اصطکاک داخلی به‌دست آمده با مقادیر جدول هانت مطابقت بیش‌تری خواهد داشت که دلایل آن می‌تواند درشت‌دانه بودن ذرات و تراکم نسبی بالا در خاک منطقهٔ بررسی شده، باشد. لازم به ذکر است که گردشدگی‌های متفاوت در ذرات خاک، بر روی هم‌بستگی نمودارها تأثیر فراوان داشته است. پیشنهاد می‌گردد که برای تخمین زاویهٔ اصطکاک داخلی در آبرفت جنوب کرج از روابط ۹ و۱۰ و یا از مقادیر ارائه شده توسط هانت استفاده شود [۱۱].



شکل ۱۰. ارتباط بین زاویهٔ اصطکاک داخلی و آزمون نفوذ استاندارد در لایهٔ شن ۲ برمبنای آزمون برش مستقیم صحرایی

$$\Phi=0.04\ (N_{60}+5D_{90})+16.15 \qquad R^2=0.61 \qquad Ei=0.13 \qquad (۱۰)$$

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر مبنای بررسی آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی برای آبرفت جنوب کرج طبقه‌بندی جدیدی ارائه شد. بر این اساس، پنج لایه مستقل شامل یک لایه ریزدانه، دو لایه درشت‌دانه ماسه‌ای و دو لایهٔ درشت‌دانه شنی به‌ترتیب با میانگین اندازهٔ ذرات ۰/۰۵، ۱/۳،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

٤، ۲۰/۲، ٤٤ میلی‌متر معرفی شد. سپس ارتباط مدول الاستیسیته لایه‌های درشت‌دانه آبرفت جنوب کرج با نتایج آزمون نفوذ استاندارد بررسی شد و ٤ رابطهٔ جدید بر پایه آزمون‌های مختلف حاصل گردید. روابط مذکورحاکی از آن است که میانگین مدول الاستیسیتهٔ حاصل از آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی ۳ برابر مدول آزمون سه‌محوری و میانگین مدول الاستیسیتهٔ آزمون بارگذاری صفحه‌ای ۱/۵ برابر مدول آزمون برش مستقیم صحرایی است. این مطلب گویای آن است که در آزمون‌های صحرایی، داده‌ها به‌دلیل حفظ شرایط طبیعی خاک به‌واقعیت نزدیک‌تر هستند درحالی‌که نمونه‌های آزمایشگاهی به‌علت دست‌خوردگی و قطر کم از دقت کم‌تری برخوردارند.

هم‌چنین حاصل بررسی ارتباط بین زاویهٔ اصطکاک داخلی‌خاک و عدد نفوذ استاندارد برای لایه‌های درشت‌دانه آبرفت جنوب کرج ۲ رابطهٔ جدید بر مبنای آزمون‌های برش مستقیم صحرایی و آزمایشگاهی است. مقایسهٔ این روابط با نتایج به‌دست آمده در بخش شمالی آبرفت کرج مؤید مقادیر بالاتر زاویهٔ اصطکاک داخلی در آبرفت جنوب کرج است. به‌نظر می‌رسد که علت اصلی این تفاوت وجود مقادیر چشم‌گیری از کانی‌های رسی در آبرفت شمال کرج باشد.

به‌طورکلی برای آبرفت‌های کرج و به‌خصوص منطقه بررسی شده توصیه می‌گردد که انجام آزمایش صحرایی بارگذاری صفحه در اولویت قرار گیرد. علاوه بر این از آن‌جا که بخش جنوبی کرج از آبرفت درشت‌دانه شکل گرفته است، آزمایش صحرایی برش مستقیم نیز می‌تواند اطلاعات مفیدی به‌دست دهد. بررسی‌های صورت گرفته حاکی از آن است که اختلاف چشم‌گیری بین مشخصات حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی در منطقه وجود دارد و با توجه به‌آن‌که شرایط آزمون‌های صحرایی به‌شرایط واقعی نزدیک تر است، لازم است توجه بیش‌تری به این آزمون‌ها گردد.

تشکر و قدرانی

این پژوهش با همکاری معاونت فنی و عمرانیِ سازمان قطارشهری کرج وحومه و شهرداری کرج انجام گرفته است. بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس‌گذاری از مراکز مذکور اعلام

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

می‌گردد. هم‌چنین از مساعدت و همکاری آقایان مهندس نوری، مهندس سلجوقی و مهندس شبستری کمال تشکر را دارم.

منابع

۱. بربریان.م، قریشی.م، ارژنگ‌روش.ا، مهاجراشجعی.ا، *پژوهش و بررسی ژرف نو زمین ساخت و خطر زمینلرزه-گسلش در گستره تهران و پیرامون*،گزارش شماره ٥٦ سازمان زمین‌شناسی کشور (١٣٦٤).

2. Das, B. M., "Advanced Soil Mechanics", McGraw-Hill Book Company, (1983).

3. Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., Zettler, T. E., "Geotechnical engineering Circular", No.5, Evaluation of Soil and Rock Properties (2002).

4. Bowles, J. E. "Foundation Analysis and Design" , 3rd Edn (1996).

5. US Army, "U.S. Army Corps Engineers", Engineer Manual (EM1110-1-1904), Engineering and Design-Settlement Analysis (1990).

6. IS 8009, "Code of Practice for Calculation of Settlement of Foundation" B.I.S., New Delhi (1976).

7. Behpoor, L. and Ghahramani, A., "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 (1989).

۸. قنبری.ع، *مطالعه مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران*، مجله علوم زمین-سال هجدهم، شماره ۷۱، ۳ (بهار۱۳۸۸) .

۹. زرنگ‌زاده.سیدصدرالدین، *مطالعه خصوصیات مهندسی آبرفت کرج و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به منظور احداث پروژه خط ۲ متروی کرج*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، (۱۳۸۷).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]

10. Meyerhof, G. G., "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils, journal of the mechanics and foundation division", ASCE, Vol.82, No. SM1, January (1956) 1-19.

11. Hunt, R. E., "Geotechnical Engineering Investigation Manual", Mc Graw-Hill, New York, NY (1984) .

12. Hatanaka, M., Uchida, A., "Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil" Soils & Foundations, Vol. 36 (4), 1-9, Japanese Geotechnical Society (1996).

۱۳. مهندسین مشاور ماندرو، *گزارش نهایی مطالعات و تحقیقات ژئوتکنیک و مکانیک قطعه چهارم مسیر مصوب قطار شهری کرج و حومه*، ۳۹۵ صفحه (۱۳۸٤).

۱٤. مهندسین مشاور سانو.، *گزارش مطالعات ژئوتکنیک در محل مسیر قطعه پنجم خط ۲ قطارشهری کرج وحومه*، ٤۲۰ صفحه(۱۳۸٦).

15. ASTM D1 556 -0, "Standard test method for density and unit weight of soil in place by the sand-core method", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA (1990).

16. ASTM D2487-92, "Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA (1992).

۱۷.پدرامی.م.، *مطالبی مختصر در مورد رسوبات کواترنر اطراف تهران*، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۸ صفحه (۱۳٥٦).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.1.6]