



University Of Qom



The Effect of Humidity and Calcium Carbonate on the Shear Strength of Type D Alluvium in Southern Tehran

Mehdi Talkhablou¹ , Arash Mahmoudi² , Dariush Fallah³

1. Corresponding author, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: talkhablou@khu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran. E-mail: a.mahmoudi@alumni.basu.ac.ir
3. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: dr.fallah2020@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 Sep 2025
Revised 02 Dec 2025
Accepted 27 Dec 2025
Published 28 Dec 2025

Keywords:
Type D alluvium,
Moisture Content,
Calcium Carbonate,
Shear Strength,
Mixed-effects
Regression Analysis.

ABSTRACT

This study investigates the simultaneous effects of moisture content and calcium carbonate (CaCO_3) percentage on the shear strength of Type D alluvium in southern Tehran. Fifty soil samples were systematically collected from districts 11 to 20 at depths of 1.5–4.0 m, with sampling locations precisely mapped on the alluvial zoning map of Tehran (Figure 1). Laboratory tests were conducted under three controlled moisture conditions: 8, 14, and 31% (representing dry, intermediate, and saturated states, respectively). Results show that increasing moisture to saturation causes a significant reduction in shear strength: cohesion (c) decreases by 38.8% (from 5.20 kPa to 3.18 kPa), and the internal friction angle (ϕ) drops by 8.4° (from 25.5° to 17.1°). Mixed-effects regression analysis confirms that moisture content ($\beta = -1.78$, $p < 0.001$) is the dominant predictor of cohesion, while calcium carbonate content (mean = 12.4%, range: 7–26%) shows no statistically significant correlation with shear strength parameters ($r = 0.12$, $p > 0.05$). Notably, even in the presence of naturally occurring carbonate nodules (caliche), moisture remains the overriding factor controlling mechanical behavior. This study concludes that for geotechnical design in southern Tehran, critical moisture scenarios (particularly saturation) must be treated as governing conditions, as the soil exhibits relatively uniform shear response under identical moisture states contrary to common assumptions about the strengthening role of carbonate cementation.

Cite this article: Talkhablou M, Mahmoudi A, Fallah D. The Effect of Humidity and Calcium Carbonate on the Shear Strength of Type D Alluvium in Southern Tehran. *Civil Infrastructure Researches*. 2026; 12(1): 23–45. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13865.1651>



Introduction

Southern Tehran is underlain by heterogeneous Type D alluvium, the youngest and most variable unit in Rieben's (1966) classification of Tehran's Quaternary deposits. This deposit is predominantly composed of fine-grained silty clays with variable natural cementation (primarily calcium carbonate) and poses significant geotechnical challenges. Accurate characterization of its shear strength behavior under varying moisture conditions is critical for safe urban development; however, the relative influence of moisture versus calcium carbonate content remains insufficiently quantified.

Methodology

Fifty soil samples were systematically collected from southern districts (11 to 20) at depths of 1.5–4.0 meters. Sampling locations were precisely mapped on Tehran's alluvial

zoning map (Figure 1). Laboratory testing included particle-size distribution, Atterberg limits, dry density, calcium carbonate content (determined via acid-base titration according to ASTM D4373-21), and direct shear tests under three controlled moisture conditions: 8% (representing near-dry field conditions), 14% (approximating natural moisture content), and 31% (corresponding to the optimum moisture content from standard Proctor compaction tests, and representing a practical saturation state). The selection of these moisture levels reflects typical field variations in southern Tehran due to rainfall, leakage, or seasonal groundwater fluctuations.

Calcium carbonate in the samples primarily originates from naturally occurring caliche nodules, which were crushed during sample preparation and quantified as total CaCO_3 .

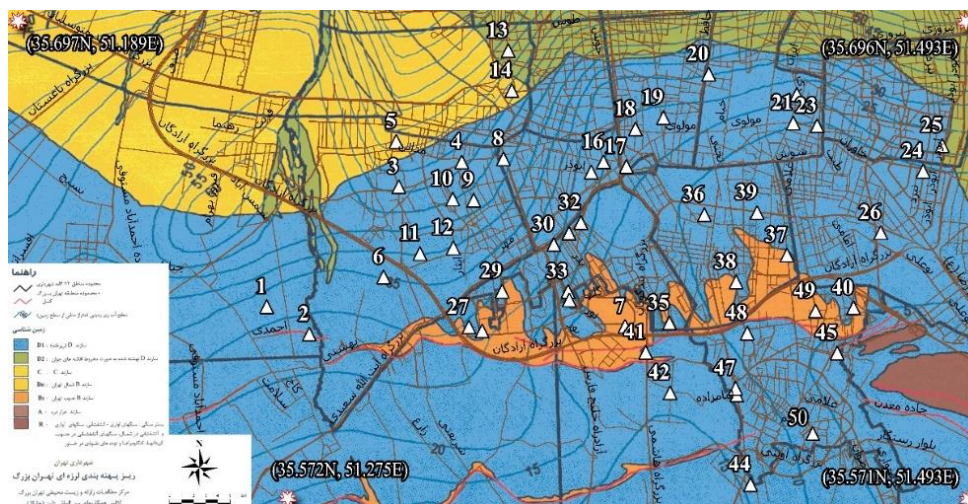


Fig. 1. Sampling locations plotted on the zoning map of Tehran's Quaternary alluvial deposits

To rigorously identify the dominant factors controlling shear strength, a mixed-effects multivariate regression model was employed, with "sample" treated as a random effect to capture localized variability in geotechnical behavior. Key statistical outputs are summarized in Table. 1. Future studies should incorporate in-situ tests (e.g., CPT/SPT) to validate laboratory findings under real field conditions.

Results and Discussion

Results confirm that Type D alluvium in southern Tehran is highly sensitive to moisture. Increasing moisture from 8 to 31%

(representing practical saturation) caused a 38.8% reduction in cohesion (c), from 5.20 kPa to 3.18 kPa, and an 8.4° decrease in internal friction angle (ϕ), from 25.5° to 17.1° . The mixed-effects regression model (Table. 1) identified moisture content ($\beta = -1.78$, $p < 0.001$) as the dominant predictor of cohesion, followed by plasticity index ($\beta = 0.41$, $p = 0.002$). Crucially, calcium carbonate content (mean = 12.4%) showed a positive but statistically insignificant effect ($\beta = 0.11$, $p = 0.217$), indicating that even in the presence of caliche nodules, natural cementation does not govern shear strength. Although the soil exhibits

relatively uniform composition (average 86% silt and clay), localized variability is observed in geotechnical parameters likely due to post-

depositional processes such as uneven consolidation and scattered carbonate nodules.

Table 1- Mixed-effects regression model results for predicting shear strength parameters

Predictor Variable	Effect on Cohesion (c) β (SE), p-value	Effect on Friction Angle (ϕ) β (SE), p-value
Intercept	53.2 (1.4), <0.001	32.8 (4.2), <0.001
Moisture content (ω , %)	-1.78 (0.21), <0.001	-0.32 (0.12), 0.008
Dry density (γ_d , kN/m ³)	1.25 (0.38), 0.001	0.68 (0.22), 0.002
Percent finer than #200 sieve (%)	-0.09 (0.04), 0.025	-0.11 (0.02), <0.001
Plasticity Index (PI)	0.41 (0.13), 0.002	-0.18 (0.08), 0.024
Calcium carbonate content (CaCO ₃ %)	0.11 (0.09), 0.217	0.04 <0.001

From an engineering standpoint, this pronounced sensitivity to moisture necessitates treating saturated conditions as governing design scenarios, as the soil demonstrates consistent weakening under elevated moisture, irrespective of carbonate content.

Conclusion

In line with the abstract, this study confirms that the shear strength of Type D alluvium in southern Tehran is predominantly governed by moisture content, not by calcium carbonate content. Even in the presence of naturally occurring caliche nodules, the mechanical behavior of the soil remains highly sensitive to moisture variations. Crucially, under identical moisture conditions, the soil exhibits relatively uniform geotechnical response-contrary to assumptions about significant inherent heterogeneity. Therefore, geotechnical designs in the region must treat critical moisture scenarios (particularly saturation) as governing conditions. To enhance design reliability, future studies should include undisturbed sampling, in-situ testing (e.g., CPT/SPT), and microstructural analysis (e.g., SEM/XRD) to further clarify the role of carbonate distribution and post-depositional processes.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Mehdi Talkhablou:

Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Software; Supervision; Validation; Writing – review & editing.

Arash Mahmoudi:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Writing – original draft; Writing – review & editing.

Dariush Fallah:

Data curation; Investigation; Methodology; Resources; Writing – original draft.

تأثیر رطوبت و کربنات کلسیم بر مقاومت برشی آبرفت نوع D جنوب تهران

مهدی تلخابلو^۱، آرش محمودی^۲، داریوش فلاح^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: talkhablou@khu.ac.ir

۲. دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: a.mahmoudi@alumni.basu.ac.ir

۳. گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: dr.fallah2020@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، تأثیر همزمان رطوبت و درصد کربنات کلسیم بر مقاومت برشی آبرفت نوع D در جنوب تهران مورد بررسی قرار گرفت. ۵۰ نمونه خاک از مناطق جنوبی شهر تهران (شامل مناطق ۱۱ تا ۲۰) جمع‌آوری و آزمایش‌ها برای سه سطح رطوبت (۸، ۱۴ و ۳۱٪) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش رطوبت تا حد اشباع (۳۱٪)، مقاومت برشی خاک را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد؛ به‌طوری‌که چسبندگی (c) از ۵/۲۰ kPa در رطوبت ۸٪ (نزدیک‌ترین سطح رطوبت به حالت خشک) به ۳/۱۸ kPa در رطوبت ۳۱٪ کاهش یافت (کاهش ۳۸.۸٪)، و زاویه اصطکاک داخلی (φ) از ۲۵/۵ درجه به ۱۷/۱ درجه کاهش پیدا کرد. تحلیل رگرسیون آمیخته چندمتغیره تأیید می‌کند که رطوبت ($\beta = -1.78, p < 0.001$) قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده چسبندگی است. همچنین، شاخص خمیری (PI) دومین پیش‌بینی‌کننده معنادار چسبندگی ($\beta = 0.41, p = 0.002$) شناسایی شد. در مقابل، مقایسه مقدار کربنات کلسیم (میانگین: ۱۲/۴٪، دامنه: ۷-۲۶٪) با پارامترهای مقاومتی نشان می‌دهد که همبستگی آن با چسبندگی و زاویه اصطکاک ضعیف و از نظر آماری معنادار نیست ($r = 0.12, p > 0.05$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که حتی در حضور نودول‌های کربناته، رفتار مقاومتی آبرفت نوع D در جنوب تهران عمدتاً تحت کنترل رطوبت است و ناهمگنی طبیعی نیز در تغییرپذیری پارامترهای آن مؤثر است، نه کربنات کلسیم. بنابراین، در طراحی‌های ژئوتکنیکی در جنوب تهران، باید سناریوهای رطوبتی بحرانی (به‌ویژه اشباع) به‌عنوان شرایط حاکم در نظر گرفته شوند، زیرا خاک در شرایط یکسان رطوبتی، رفتاری نسبتاً یکنواخت از خود نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

کلیدواژه‌ها:

آبرفت نوع D،

رطوبت،

کربنات کلسیم،

مقاومت برشی،

تحلیل رگرسیون آمیخته.

استناد: تلخابلو مهدی، محمودی آرش، فلاح داریوش. تأثیر رطوبت و کلسیم کربنات بر مقاومت برشی آبرفت نوع D جنوب تهران. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۵؛ ۱۲(۱): ۲۳-۴۵. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13865.1651>

۱- مقدمه

شهر تهران بر نهشته‌های آبرفتی کواترنری ناهمگن بنا شده است که شرایط ژئوتکنیکی پیچیده‌ای را برای توسعه شهری ایجاد می‌کند. این آبرفت‌ها براساس طبقه‌بندی رین به چهار واحد A (سازند هزاردره)، B (سازند ناهمگن شمال تهران)، C (سازند تهران) و D (آبرفت‌های کنونی) تقسیم می‌شوند که واحد D جوانترین نهشته رسوبی بوده که در شمال تهران و مسیر رودخانه‌ها درشت دانه و در جنوب تهران ریزدانه است [۱]. همچنین سازند D به دو واحد چینه‌شناسی مختلف به نام واحدهای D_1 و D_2 تقسیم شده است [۲]:

۱- واحد D_1 : این واحد از سیلت ریزدانه تشکیل شده که در برخی مکان‌ها ماسه‌ای و سنگریزه‌ای است. مواد ریزدانه، مانند سیلت و رس، در قسمت جنوب غربی دشت تهران غالب هستند و هیچ لایه‌بندی مشخصی در این واحد وجود ندارد. واحد D_1 معادل کمی قدیمی‌تر واحد D_2 در منطقه شمال تهران و سن واحد آن کمتر از ۴۰۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود.

۲- واحد D_2 : از کلسیت‌هایی به اندازه شن و سنگریزه با تحکیم ضعیف تا تحکیم نیافته تشکیل شده است که در اندازه‌های سیلت و ماسه هستند. این واحد منشأ آبرفتی و رودخانه‌ای، مشابه سازند C دارد؛ با این حال، فقدان سیمانی شدن، فشردگی کمتر و فقدان کالیچ و اکسید آهن می‌تواند به راحتی آن را از سازند C متمایز کند. مخروط‌افکنه‌های آبرفتی جوان و فعال و دشت‌های سیلابی در منطقه شمال تهران از واحد D_2 تشکیل شده‌اند.

آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای منطقه تهران بزرگ را مورد مطالعه قرار داد و نقشه پهنه‌بندی آبرفت‌های تهران را ارائه نموده است [۲]. اصغری و همکاران با استفاده از نتایج آزمون سه‌محوری، تأثیر سیمانی‌شدگی را بر مقاومت برشی ماسه حاوی شن تهران

مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سیمان سبب افزایش پیک مقاومت برشی و در نتیجه سبب افزایش چسبندگی می‌شود [۳]. چشمی، ویژگی‌های مکانیکی آبرفت تهران را در رساله دکتری خود براساس آزمون‌های معمول و ابزار ساده مکانیکی مورد پژوهش قرار داده است [۴]. فاخر و همکاران، آبرفت درشت‌دانه تهران را مورد پژوهش قرار داده و ویژگی‌های ژئوتکنیکی این آبرفت را به طبقه‌بندی زمین‌شناسی آن اضافه کردند. آنان در پژوهش خود، طبقه‌بندی رین را مورد توجه قرار داده و ویژگی‌ها و پارامترهای مهندسی را در آبرفت A و C و بخش‌هایی از آبرفت‌های B و D به این طبقه‌بندی اضافه و در راستای اضافه کردن برخی پارامترهای مهندسی نظیر c ، ϕ ، E و V_s به طبقه‌بندی‌های زمین‌شناسی قبلی به‌منظور کاربردی کردن این دسته‌بندی‌ها پیش رفتند [۵]. خان‌محمدی، تأثیر متغیرهای شکل و اندازه دانه‌ها بر پارامترهای مکانیکی خاک (مطالعه موردی آبرفت‌های درشت‌دانه تهران) را مورد تأیید قرار داده است [۶]. قنبری، ناهمگنی در خواص مکانیکی آبرفت‌های جنوب تهران، از جمله مدول الاستیسیته، را گزارش کرده است [۷]. محققان، زمین‌شناسی آبرفت تهران و ارزیابی طبقه‌بندی رین برای مطالعات ژئوتکنیک را مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده‌اند [۸]. حائری و همکاران، رفتار مکانیکی ماسه شنی سیمانی شده تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای (مطالعه موردی آبرفت تهران) را مورد بررسی قرار دادند. در نتیجه این پژوهش، بخش عمده‌ای از شهر تهران روی آبرفت‌های سیمانی درشت‌دانه توسعه یافته است. به‌منظور درک رفتار مکانیکی این خاک، آزمون‌های سه‌محوری سیکلی زهکشی نشده روی نمونه‌های سیمانی‌نشده و سیمانی‌شده مصنوعی با کلسیت انجام شده و در این راستا، اثرات سیمان، فشار محصورکننده و تنش انحرافی سیکلی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی، با افزایش مقدار سیمان، حداکثر مدول برشی افزایش می‌یابد و نسبت میرایی، تغییرات محسوسی را نشان نداده است [۹]. در تحقیقی دیگر، تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آبرفت‌های تهران بر روی

مقاومت برشی خاک به‌ویژه در خاک‌های رسی، تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله رطوبت و ترکیب کانی‌شناسی قرار دارد. افزایش رطوبت معمولاً منجر به کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌شود درحالی‌که سیمان‌شدگی طبیعی (به‌ویژه کربناتی) می‌تواند مقاومت برشی را افزایش دهد [۳ و ۴]. با این حال، تأثیر کربنات کلسیم در خاک‌های آبرفتی جنوب تهران، به‌ویژه در شرایط مختلف رطوبتی، هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. از سوی دیگر، ناهمگنی ذاتی آبرفت‌های تهران و حساسیت آن‌ها به تغییرات رطوبتی، لزوم بررسی دقیق‌تر پارامترهای مقاومتی را ضروری می‌سازد. در پژوهش‌های گذشته، تمرکز کمی بر تعامل همزمان رطوبت و کربنات کلسیم در بخش ریزدانه رسوبات D تهران صورت گرفته است.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر همزمان رطوبت و درصد کربنات کلسیم بر مقاومت برشی آبرفت نوع D در جنوب تهران و ارزیابی نقش غالب هریک از این عوامل در رفتار ژئوتکنیکی خاک است. برخلاف پژوهش‌های قبلی که عمدتاً بر تحلیل‌های تک‌متغیره تمرکز داشتند، این پژوهش با استفاده از مدل آمیخته چندمتغیره و تحلیل حساسیت مهندسی، چشم‌انداز جامع‌تری از رفتار خاک ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و نمونه‌ها

در این پژوهش، ۵۰ نمونه خاک از مناطق جنوبی شهر تهران (شامل مناطق ۱۱ تا ۲۰) جمع‌آوری و محل نمونه‌برداری براساس نقشه پهنه‌بندی آبرفت‌های تهران و بازدیدهای میدانی تعیین شد که غالب آنان در محدوده سازند D₁ قرار دارند. نمونه‌ها از عمق‌های بین ۱/۵ تا ۴/۰ متر از پروژه‌های گودبرداری، ترانشه و چاهک‌های حفاری به صورت مختلط جمع‌آوری شدند، که ممکن است تأثیر سیمان‌شدگی طبیعی را کم ارزیابی کند. عمق و منطقه

نشست در اثر تونل‌زنی بررسی شد [۱۰]. رمضان‌نژاد و همکاران، دقت نقشه‌های زمین‌شناسی مربوط به گسترش جغرافیایی آبرفت‌های شهر تهران را با توجه به برداشت‌های سطحی از بیرون‌زدگی‌های مختلف آبرفت‌های گستره تهران مورد ارزیابی قرار دادند [۱۱]. اسدزاده و همکاران، به بررسی تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها در آبرفت‌های تهران پرداخته‌اند [۱۲]. پژوهشگران، اثرات لایه‌های خاک ناشی از روانگرایی در آبرفت‌ها در جنوب شرقی تهران را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، پتانسیل روانگرایی خاک منطقه مورد مطالعه و براساس نتایج آزمون نفوذ استاندارد (SPT)، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۳]. همچنین در پژوهش‌های اخیر، نقش رطوبت در رفتار مقاومتی خاک‌های غیراشباع به‌طور قابل‌توجهی تأیید شده است. فن^۱ و همکاران نشان دادند که با افزایش رطوبت از ۹ به ۲۱٪، مقاومت برشی خاک از ۱۲۸ کیلوپاسکال به ۳۰ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد و به‌طور کلی افزایش رطوبت، مقاومت برشی را تضعیف می‌کند [۱۴]. احمد و اوچیمورا^۲، گزارش کردند که رطوبت در زمان تراکم و ترکیب دانه‌بندی، به شکل معناداری مقاومت برشی خاک غیراشباع را کنترل می‌کند و نمونه متراکم‌شده در رطوبت بهینه، بیشترین مقاومت را در رطوبت باقی‌مانده دارد [۱۵]. در همین راستا، محققان با آزمایش‌های سه‌محوری نشان دادند که افزایش رطوبت سبب کاهش چسبندگی و افت سریع زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت‌های بیشتر از رطوبت بهینه می‌شود [۱۶]. فن^۲ و همکاران نیز بیان کردند که دقت مدل‌های پیش‌بینی مقاومت برشی در خاک‌های با شاخص خمیری بالا کاهش می‌یابد و به نوع خاک وابسته است [۱۷]. همچنین در پژوهشی دیگر، نشان داده شد که با افزایش مکش، مقاومت برشی خاک‌های رس منبسط‌شونده افزایش یافته و رفتار خاک از تراکمی به اتساعی تغییر می‌کند [۱۸].

3- Pham

1- Fan

2- Ahmad W, Uchimura

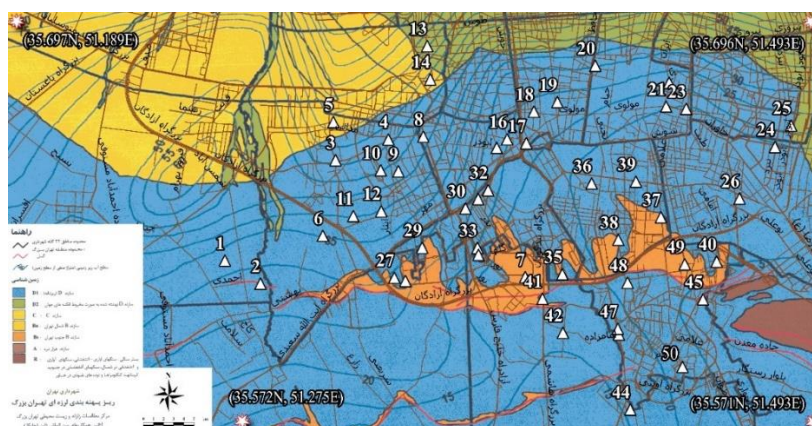
موقعیت و محل برداشت نمونه‌های شماره ۴۵ و ۴۷ از پروژه‌های عمرانی واقع در شهر ری به‌ترتیب در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است.

محل برداشت نمونه‌ها در جدول ۱ (و پیوست ۱) و موقعیت نمونه‌برداری‌ها روی نقشه پهنه‌بندی آبرفت‌های تهران در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین به‌عنوان نمونه،

جدول ۱- عمق و منطقه برداشت نمونه‌ها در جنوب تهران

شماره نمونه	عمق (m)	منطقه شهرداری	شماره نمونه	عمق (m)	منطقه شهرداری	شماره نمونه	عمق (m)	منطقه شهرداری
۱	۲	چهاردانگه	۱۸	۲	منطقه ۱۱	۳۵	۱	منطقه ۱۹
۲	۵	چهاردانگه	۱۹	۳	منطقه ۱۱	۳۶	۵	منطقه ۱۶
۳	۳	منطقه ۱۸	۲۰	۲	منطقه ۱۲	۳۷	۸	منطقه ۱۶
۴	۳	منطقه ۱۸	۲۱	۳	منطقه ۱۲	۳۸	۳	منطقه ۱۶
۵	۳	منطقه ۱۸	۲۲	۳	منطقه ۱۲	۳۹	۵	منطقه ۱۶
۶	۳	منطقه ۱۸	۲۳	۳	منطقه ۱۲	۴۰	۴	منطقه ۲۰
۷	۴	منطقه ۱۹	۲۴	۳	منطقه ۱۴	۴۱	۳	منطقه ۲۰
۸	۵	منطقه ۱۸	۲۵	۴	منطقه ۱۴	۴۲	۲	منطقه ۲۰
۹	۳	منطقه ۱۸	۲۶	۴	منطقه ۱۵	۴۳	۲	منطقه ۲۰
۱۰	۳	منطقه ۱۸	۲۷	۴	منطقه ۱۹	۴۴	۳	منطقه ۲۰
۱۱	۲	منطقه ۱۸	۲۸	۴	منطقه ۱۹	۴۵	۳	منطقه ۲۰
۱۲	۳	منطقه ۱۸	۲۹	۳	منطقه ۱۹	۴۶	۲	منطقه ۲۰
۱۳	۴	منطقه ۱۰	۳۰	۴	منطقه ۱۹	۴۷	۴	منطقه ۲۰
۱۴	۴	منطقه ۱۰	۳۱	۴	منطقه ۱۹	۴۸	۲	منطقه ۲۰
۱۵	۳	منطقه ۱۷	۳۲	۳	منطقه ۱۹	۴۹	۲۰	منطقه ۲۰
۱۶	۳	منطقه ۱۷	۳۳	۲	منطقه ۱۹	۵۰	۴	منطقه ۲۰
۱۷	۳	منطقه ۱۷	۳۴	۳	منطقه ۱۹			

میانگین عمق نمونه‌برداری: ۳/۲ متر (SD=1.1)



شکل ۱- موقعیت نمونه‌برداری‌ها روی نقشه پهنه‌بندی آبرفت‌های تهران

۲-۲- روش‌های آزمایشگاهی

(الف) آزمایش دانه‌بندی: براساس استاندارد

ASTMD2487 [۱۹] با ترکیب الک‌کردن و

هیدرومتری ASTM D7928 [۲۰].

بعد از نمونه‌برداری و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه،

آزمایش‌های زیر براساس استانداردهای بین‌المللی انجام

شد:

(ب) حدود اتربرگ: براساس استاندارد

ASTMD4318 [۲۱]

(پ) آزمایش برش مستقیم: براساس استاندارد

ASTM D3080 [۲۲]. (نمونه‌ها در جعبه برش

مربعی ۱۰×۱۰ سانتی‌متری تحت تنش‌های قائم

۹۸، ۱۹۶ و ۲۹۴ کیلوپاسکال قرار گرفتند که این

مقادیر متناسب با بارهای احتمالی وارده از

سازه‌های سبک تا متوسط در منطقه جنوب تهران

انتخاب شده‌اند. نرخ جابه‌جایی ۰/۳ میلی‌متر بر

دقیقه با توجه به ریزدانه بودن خاک‌های مورد

مطالعه و برای جلوگیری از فشار منفذی اضافی

انتخاب شد. آزمایش‌ها برای سه سطح رطوبت (۸،

۱۴ و ۳۱٪) انجام شد که به‌ترتیب نماینده شرایط

نزدیک به خشک، رطوبت طبیعی و اشباع هستند.

(ت) آزمایش تعیین دانسیته خاک به روش موم‌اندود

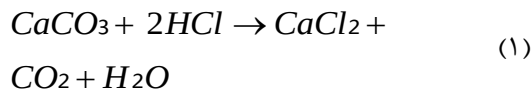
براساس استاندارد ASTM D1188 [۲۳].

(ث) تعیین کربنات کلسیم به روش تیتراسیون اسید-

باز براساس استاندارد ASTM D4373 [۲۴].

در روش تیتراسیون حجم معینی از اسید کلریدریک

با مقدار معینی از خاک واکنش می‌دهند (رابطه (۱)).



با توجه به رابطه (۱)، مقدار CaCO_3 برحسب گرم از

طریق حجم HCl مصرفی با نرمالیت N، از رابطه (۲)

به‌دست می‌آید:

$$m(\text{CaCO}_3)_{\text{sr}} = \frac{M}{2} \times N \times V \quad (۲)$$

که در آن، M جرم مولی (gr/mol)، m_{sr} جرم مولکولی

نمونه، N نرمالیت محلول تیترکننده و V حجم مصرفی

محلول تیترکننده (ml) می‌باشد.



شکل ۳- محل برداشت نمونه ۴۷ شهری، جنب مجتمع مسکونی

خاتم‌الانبیاء، چاهک حفره شده برای خط انتقال فاضلاب



شکل ۲- محل برداشت نمونه ۴۵، شهری، خیابان محمدی،

خیابان بهشت، گودبرداری پروژه مسکونی

در واکنش، هر مول CaCO_3 معادل ۲ اکی‌والان،

جرم مولی کربنات کلسیم $M=100/09 \text{ gr/mol}$ و اسید

مصرفی آزمایش با نرمالیت $N=1$ است؛ پس با توجه به رابطه

(۲) خواهیم داشت:

$$m(\text{CaCO}_3)_{\text{sr}} = 50.045 \times V \quad (۳)$$

درصدی از هیدروکلریک اسید (HCl) اضافه شده به

نمونه خاک، صرف واکنش با کربنات کلسیم و باقی‌مانده

اسید با سود (NaOH) یک نرمال با استفاده از روش

تیتراسیون اندازه‌گیری می‌شود و HCl مصرف شده برای

واکنش با کربنات به‌دست می‌آید. عمل تیتراسیون تا مرحله

تغییر رنگ محلول از رنگ روشن تا رنگ ارغوانی (شکل ۴)

ادامه داده شد. به‌محض مشاهده تغییر رنگ محلول، عمل

تیتراسیون پایان یافته و مقدار سود مصرفی از طریق کاهش

ارتفاع محلول سود در بورت اندازه می‌شود. برای تعیین

همبستگی منفی نیز بیانگر رابطه معکوس بین دو متغیر است؛ به طوری که اگر متغیری افزایش یابد، متغیر دیگر کاهش پیدا خواهد کرد. چنانچه ضریب همبستگی به مقدار صفر نزدیک شود، نشان می‌دهد که بین دو متغیر، عملاً همبستگی وجود ندارد [۲۵].

۲- مدل رگرسیون آمیخته چندمتغیره: برای پیش‌بینی چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) براساس ویژگی‌های فیزیکی خاک (رطوبت، وزن مخصوص خشک، درصد عبوری #۲۰۰، شاخص خمیری و درصد کربنات کلسیم) با در نظر گرفتن اثر تصادفی نمونه برای کنترل ناهمگنی انجام و با استفاده از نرم‌افزار R و بسته nlme اجرا شد. در این مدل رگرسیون، β نمایانگر تأثیر تخمینی یا اثر یک متغیر مستقل بر متغیر وابسته با فرض ثابت بودن سایر متغیرها و p نشان‌دهنده احتمال مشاهده داده‌ای شبیه یا بهتر از داده‌های مشاهده شده است.

۳- تحلیل حساسیت: ظرفیت باربری پی سطحی ($B=2m$) با استفاده از رابطه ترزاقی (رابطه (۶)) برای سه سناریو رطوبتی ارزیابی شد:

$$q_u = cN_c s_c + qN_q s_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma \quad (6)$$

خشک: $c = 28 \text{ kPa}$, $\phi = 22^\circ$

مرطوب (۱۴٪): $c = 20 \text{ kPa}$, $\phi = 20^\circ$

اشباع: $c = 14 \text{ kPa}$, $\phi = 17^\circ$

۳- نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها

۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی

الف) نتایج و تحلیل دانه‌بندی و طبقه‌بندی خاک با توجه به نتایج آزمایش دانه‌بندی انجام شده بر ۵۰ نمونه خاک از منطقه مورد پژوهش (جدول ۲)، مشاهده می‌شود که آبرفت نوع D در جنوب تهران عمدتاً از خاک‌های ریزدانه تشکیل شده است. میانگین کل

کربنات کلسیم خاک با استفاده از حجم اسید مصرفی از رابطه (۴) استفاده شده است.

$$\%CaCO_3 = (V_{HCl} - V_{NaOH}) \times 5 / M_{Soil} \quad (4)$$

در این رابطه، V_{HCl} حجم هیدروکلریک اسید اضافه شده (ml)، V_{NaOH} حجم سود (سدیم هیدروکسید) مصرفی (ml) و M_{Soil} وزن خاک (gr) می‌باشد.



شکل ۴- آزمایش تعیین کربنات کلسیم کل خاک

۳-۲- روش‌های آماری

برای تحلیل داده‌ها از روش‌های آماری پیشرفته استفاده شد:

۱- تحلیل آماری پایه: با استفاده از نرم‌افزار SPSS

نسخه ۲۶ انجام و ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه بین متغیرها محاسبه شد. ضریب همبستگی پیرسون بین دو متغیر تصادفی برابر با کوواریانس آن‌ها تقسیم بر انحراف معیار آن‌ها تعریف و برای یک نمونه آماری با n زوج داده (X_i, Y_i) به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$r_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

ضریب همبستگی (r)، مقداری در بازه $[-1, +1]$ است. همبستگی مثبت به این معناست که هرچه مقدار متغیر افزایش پیدا کند، متغیر دیگر نیز افزایش پیدا خواهد کرد (رابطه مستقیم بین متغیرها) و

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ۸۶ درصد ذرات از نوع رس و سیلت، ۱۲ درصد ماسه و ۲ درصد شن هستند. این ترکیب نشان‌دهنده غالب بودن فاز ریزدانه در خاک‌های منطقه مورد پژوهش است.

جدول ۲- ترکیب دانه‌بندی و طبقه‌بندی USCS نمونه‌های خاک در جنوب تهران

شماره نمونه	کلاس	مسانه %	نسبت %	کلاس	شماره نمونه	کلاس	مسانه %	نسبت %	کلاس	شماره نمونه	کلاس	مسانه %	نسبت %	کلاس	شماره نمونه
۱	CL	۴۳	۷	CL	۱۸	۹۸	۲	صفر	CL	۳۵	۹۱	۴	۵	CL	۳۵
۲	CL	۳۴	۲	CL	۱۹	۹۱	۹	صفر	CL	۳۶	۷۲	۲۰	۸	CL	۳۶
۳	ML	۳۸	۵	ML	۲۰	۹۴	۶	صفر	CL	۳۷	۸۱	۱۸	۱	CL	۳۷
۴	ML	۲۷	صفر	ML	۲۱	۸۹	۱۰	۱	CL	۳۸	۹۵	۵	صفر	CL	۳۸
۵	ML	۱۳	صفر	ML	۲۲	۹۳	۷	صفر	CL	۳۹	۹۱	۸	۱	CL	۳۹
۶	ML	۲۸	صفر	ML	۲۳	۹۶	۴	صفر	CL	۴۰	۹۴	۶	صفر	CL	۴۰
۷	CL	۸	صفر	CL	۲۴	۹۷	۳	صفر	CL	۴۱	۸۷	۱۱	۲	CL	۴۱
۸	CL	۵	صفر	CL	۲۵	۹۴	۶	صفر	CL	۴۲	۸۸	۱۱	۱	CL	۴۲
۹	ML	۱۲	۴	ML	۲۶	۷۸	۱۶	۶	CL	۴۳	۷۲	۲۰	۸	CL	۴۳
۱۰	CL	۲	صفر	CL	۲۷	۹۱	۹	صفر	CL	۴۴	۸۱	۱۸	۱	CL	۴۴
۱۱	CL	۸	صفر	CL	۲۸	۹۸	۲	صفر	CL	۴۵	۹۱	۸	۱	CL	۴۵
۱۲	CL	۱۱	۱	CL	۲۹	۹۴	۶	صفر	CL	۴۶	۹۳	۷	صفر	CL	۴۶
۱۳	CL	۱۳	۱	CL	۳۰	۹۳	۷	صفر	CL	۴۷	۹۲	۸	صفر	CL	۴۷
۱۴	ML	۱۴	۶	ML	۳۱	۹۶	۴	صفر	CL	۴۸	۹۳	۶	۱	CL	۴۸
۱۵	CL	۸	۱	CL	۳۲	۹۷	۳	صفر	CL	۴۹	۸۶	۱۴	صفر	CL	۴۹
۱۶	CL	۷	صفر	CL	۳۳	۹۴	۶	صفر	CL	۵۰	۹۴	۵	۱	CL	۵۰
۱۷	CL	۶	صفر	CL	۳۴	۸۸	۱۱	۱	CL	-	-	-	-	-	-

این ویژگی‌ها تأیید می‌کند که رفتار ژئوتکنیکی آبرفت نوع D در جنوب تهران عمدتاً تحت تأثیر فاز ریزدانه قرار دارد.

ب) نتایج و تحلیل حدود اتربرگ و شاخص خمیری حدود اتربرگ، یک معیار اساسی برای سنجش رطوبت و خواص خمیری خاک‌های ریزدانه است. نتایج مربوط به آزمایش حدود اتربرگ، PI هر نمونه و PI_A به‌دست آمده از خط $A=0.73(LL-20)$ در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، PI تمام نقاط برداشت شده بالای خط A قرار گرفته و حد روانی کمتر از ۵۰ دارند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از حدود اتربرگ در پیش‌بینی رفتار مقاومتی خاک‌های ریزدانه را برجسته می‌کند.

طبقه‌بندی خاک‌ها براساس سیستم USCS نشان می‌دهد که ۴۴ نمونه از ۵۰ نمونه مورد آزمایش در دسته CL و ۶ نمونه در دسته ML قرار می‌گیرند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های قبلی از جمله فاخر و همکاران همخوانی دارد که آبرفت‌های جنوب تهران را عمدتاً از نوع خاک‌های ریزدانه گزارش کرده‌اند. وجود فاز ریزدانه غالب (۸۶٪) در این آبرفت‌ها، دو پیامد مهم ژئوتکنیکی دارد:

- ۱- کاهش قابل‌توجه نفوذپذیری خاک که منجر به زهکشی کند و افزایش پتانسیل فشار آب حفره‌ای در شرایط بارگذاری می‌شود؛
- ۲- افزایش پتانسیل تغییر حجم در اثر تغییرات رطوبت که می‌تواند منجر به نشست یا بالآمدگی نامتقارن پی سازه‌ها شود.

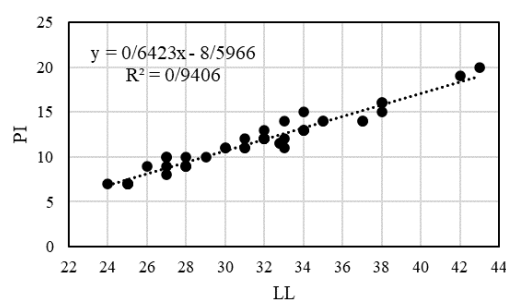
جدول ۳- نتایج آزمایش حدود اتربرگ

شماره نمونه	LL	PI	PI _A	شماره نمونه	LL	PL	PI	PI _A	شماره نمونه	LL	PL	PI	PI _A
۱	۲۴	۱۷	۷	۱۸	۳۲	۲۰	۱۲	۸/۸	۳۵	۳۴	۲۱	۱۳	۱۰/۲
۲	۲۶	۱۷	۹	۱۹	۳۸	۲۲	۱۶	۱۳/۱	۳۶	۲۵	۱۸	۷	۳/۷
۳	NL	-	NP	۲۰	۳۰	۱۹	۱۱	۷/۳	۳۷	۲۵	۱۸	۷	۳/۷
۴	NL	-	NP	۲۱	۲۸	۱۹	۹	۵/۸	۳۸	۳۵	۲۱	۱۴	۱۱/۰
۵	NL	-	NP	۲۲	۳۱	۲۰	۱۱	۸/۰	۳۹	۳۴	۲۱	۱۳	۱۰/۲
۶	NL	-	NP	۲۳	۳۲	۲۰	۱۲	۸/۸	۴۰	۳۳	۲۱	۱۲	۹/۵
۷	۲۸	۱۸	۱۰	۲۴	۳۷	۲۳	۱۴	۱۲/۴	۴۱	۴۲	۲۳	۱۹	۱۶/۱
۸	۳۵	۲۱	۱۴	۲۵	۳۳	۲۱	۱۲	۹/۵	۴۲	۲۷	۱۷	۱۰	۵/۱
۹	NL	-	NP	۲۶	۲۷	۱۹	۸	۵/۱	۴۳	۲۵	۱۸	۷	۳/۷
۱۰	۳۸	۲۳	۱۵	۲۷	۳۸	۲۲	۱۶	۱۳/۱	۴۴	۲۵	۱۸	۷	۳/۷
۱۱	۲۹	۱۹	۱۰	۲۸	۳۲	۲۰	۱۲	۸/۸	۴۵	۳۴	۲۱	۱۳	۱۰/۲
۱۲	۲۸	۱۹	۹	۲۹	۳۰	۱۹	۱۱	۷/۳	۴۶	۳۱	۱۹	۱۲	۸/۰
۱۳	۲۷	۱۸	۹	۳۰	۳۱	۲۰	۱۱	۸/۰	۴۷	۳۳	۱۹	۱۴	۹/۵
۱۴	NL	-	NP	۳۱	۳۲	۲۰	۱۲	۸/۸	۴۸	۳۳	۲۲	۱۱	۹/۵
۱۵	۲۸	۱۹	۹	۳۲	۳۷	۲۳	۱۴	۱۲/۴	۴۹	۴۳	۲۳	۲۰	۱۶/۸
۱۶	۳۲	۲۰	۱۲	۳۳	۳۳	۲۱	۱۲	۹/۵	۵۰	۳۴	۱۹	۱۵	۱۰/۲
۱۷	۳۲	۱۹	۱۳	۳۴	۳۴	۲۷	۱۷	۵/۱					

با توجه به سادگی و هزینه پایین آزمایش حدود اتربرگ نسبت به آزمایش‌های مقاومتی، این یافته می‌تواند در مطالعات اولیه ژئوتکنیکی جنوب تهران به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای تخمین سریع پارامترهای طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

ج) نتایج و تحلیل دانسیته خاک جدول ۴ نتایج رطوبت و دانسیته نمونه‌ها و جدول ۵ خلاصه‌ای از آمار توصیفی پارامترهای دانسیته خاک‌های جنوب تهران را ارائه می‌دهد. میانگین دانسیته مرطوب $17/17 \text{ kN/m}^3$ و دانسیته خشک $15/90 \text{ kN/m}^3$ اندازه‌گیری شد. پراکندگی داده‌ها (انحراف معیار $1/31$ برای دانسیته مرطوب و $0/99$ برای دانسیته خشک) نشان‌دهنده ناهمگنی آبرفت‌های منطقه است. این ناهمگنی با پراکندگی مشابه در پارامترهای مقاومتی هم‌راستا است و نشان می‌دهد که تغییرات دانسیته خشک (γ_d) با چسبندگی ($\beta=1.25$) همبستگی مثبت معناداری دارد (شکل ۶). ($p=0.001$)

تحلیل داده‌های حدود اتربرگ نشان می‌دهد که در نمونه‌های CL منطقه جنوب تهران، رابطه خطی قوی‌ای بین شاخص خمیری (PI) و حد روانی (LL) وجود دارد ($y = 0.6423x - 8.5966$, $R^2 = 0.9406$) (شکل ۵).



شکل ۵- مقدار شاخص خمیری برحسب حد روانی

این رابطه که هم‌راستا با روند کلی خاک‌های رسی است، پایه‌ای برای استفاده از PI به‌عنوان یک شاخص پیش‌بینی‌کننده قوی ($\beta = 0.41$, $p = 0.002$) برای چسبندگی در مدل رگرسیون آمیخته فراهم می‌کند.

جدول ۴- نتایج درصد رطوبت و دانسیته نمونه‌ها

نمونه	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω (%)	نمونه	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω (%)	نمونه	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω (%)
۱	۱۶/۷۷	۱۶/۳۸	۲/۴۰	۱۸	۱۸/۲۴	۱۶/۷۷	۸/۷۷	۳۵	۱۸/۹۳	۱۵/۹۸	۱۸/۴۰
۲	۱۶/۲۸	۱۵/۸۹	۲/۴۷	۱۹	۱۷/۱۶	۱۵/۹۸	۷/۳۶	۳۶	۱۶/۹۶	۱۵/۵۹	۸/۸۱
۳	۱۵/۵۹	۱۳/۷۳	۱۳/۵۷	۲۰	۱۷/۲۶	۱۵/۸۹	۸/۶۴	۳۷	۱۷/۲۶	۱۵/۹۸	۷/۹۸
۴	۱۵/۴۰	۱۳/۴۳	۱۴/۶۰	۲۱	۱۷/۵۵	۱۶/۳۸	۷/۱۹	۳۸	۱۷/۹۴	۱۶/۴۷	۸/۹۳
۵	۱۴/۴۱	۱۴/۰۲	۲/۸۰	۲۲	۱۷/۷۵	۱۶/۴۷	۷/۷۴	۳۹	۱۷/۶۵	۱۶/۱۸	۹/۰۹
۶	۱۴/۸۱	۱۴/۴۱	۲/۷۲	۲۳	۱۷/۳۶	۱۶/۳۸	۵/۹۹	۴۰	۱۸/۱۴	۱۶/۸۷	۷/۵۶
۷	۱۷/۵۵	۱۵/۹۸	۹/۸۲	۲۴	۱۷/۹۴	۱۶/۵۷	۸/۲۸	۴۱	۱۹/۲۲	۱۷/۳۶	۱۰/۷۳
۸	۱۸/۰۴	۱۷/۱۶	۵/۱۴	۲۵	۱۷/۵۵	۱۶/۱۸	۸/۴۸	۴۲	۱۵/۴۰	۱۴/۹۱	۳/۲۹
۹	۱۶/۱۸	۱۴/۸۱	۹/۲۷	۲۶	۱۶/۲۸	۱۵/۱۰	۷/۷۹	۴۳	۱۴/۲۲	۱۳/۸۳	۲/۸۲
۱۰	۱۶/۳۸	۱۵/۸۹	۳/۰۹	۲۷	۱۷/۴۵	۱۶/۲۸	۷/۲۳	۴۴	۱۴/۹۱	۱۳/۸۳	۷/۸۰
۱۱	۱۶/۰۸	۱۵/۶۹	۲/۵۰	۲۸	۱۷/۰۶	۱۵/۹۸	۶/۷۵	۴۵	۱۶/۹۶	۱۶/۱۸	۴/۸۵
۱۲	۱۵/۷۹	۱۴/۸۱	۶/۶۲	۲۹	۱۶/۹۶	۱۶/۲۸	۴/۲۲	۴۶	۱۹/۰۲	۱۷/۲۶	۱۰/۲۳
۱۳	۱۷/۴۵	۱۶/۲۸	۷/۲۳	۳۰	۱۸/۴۴	۱۵/۳۰	۲۰/۵۱	۴۷	۱۹/۵۱	۱۷/۰۶	۱۴/۳۷
۱۴	۱۵/۴۰	۱۴/۶۱	۵/۳۷	۳۱	۱۷/۶۵	۱۶/۴۷	۷/۱۴	۴۸	۱۷/۲۶	۱۶/۷۷	۲/۹۲
۱۵	۱۷/۲۶	۱۵/۸۹	۸/۶۴	۳۲	۱۸/۱۴	۱۶/۳۸	۱۰/۷۸	۴۹	۲۰/۷۹	۱۷/۶۵	۱۷/۷۸
۱۶	۱۷/۵۵	۱۶/۱۸	۸/۴۸	۳۳	۱۸/۱۴	۱۶/۷۷	۸/۱۹	۵۰	۱۷/۴۵	۱۶/۵۷	۵/۳۳
۱۷	۱۷/۷۵	۱۶/۱۸	۹/۷۰	۳۴	۱۷/۱۶	۱۶/۰۸	۶/۷۱				

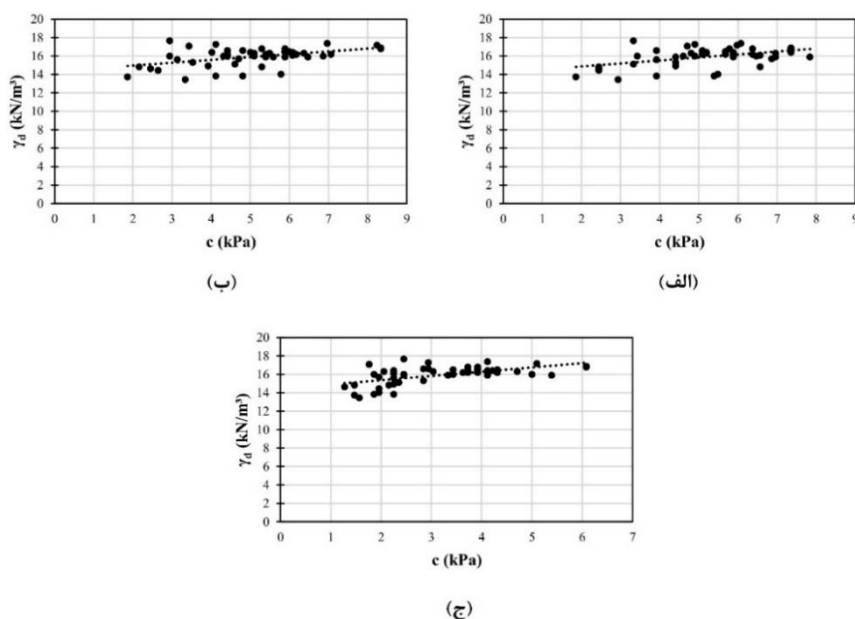
جدول ۵- آمار توصیفی پارامترهای دانسیته خاک‌های جنوب تهران

γ_d (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	
۱۵/۹۰	۱۷/۱۷	میانگین
۰/۹۹	۱/۳۱	انحراف معیار استاندارد
۱۳/۴۳	۱۴/۲۲	کمینه
۱۵/۶۲	۱۶/۳۰	چارک اول (۲۵٪)
۱۶/۱۸	۱۷/۳۱	چارک دوم (۵۰٪)
۱۶/۴۷	۱۷/۹۰	چارک سوم (۷۵٪)
۱۷/۶۵	۲۰/۷۹	بیشینه

این یافته‌ها لزوم انجام مطالعات محلی دقیق و نمونه‌برداری گسترده را برای طراحی‌های ژئوتکنیکی در این منطقه ضروری می‌سازد. در مقایسه با آبرفت‌های سایر مناطق تهران، دانسیته خشک پایین این منطقه (میانگین $15/90 \text{ kN/m}^3$) نشان‌دهنده ساختار بازتر و تراکم کمتر خاک‌هاست که ناشی از تفاوت منحنی دانه‌بندی و اندازه ذرات بوده و می‌تواند به‌عنوان یکی از عوامل کاهش مقاومت برشی در شرایط مرطوب عمل کند.

(د) نتایج و تحلیل میزان کرنبات کلسیم

میزان کرنبات کلسیم در نمونه‌های مورد آزمایش بین $8/77$ تا $23/15\%$ متغیر بود که میانگین آن $12/40\%$ اندازه‌گیری شد (جدول ۶). با توجه به اینکه این مقادیر در محدوده معمول خاک‌های ماری قرار دارند و به‌طور همزمان، آزمایش‌های حدود ات‌برگ نشان‌دهنده غالب بودن فاز رسی-سیلتی هستند، می‌توان نتیجه گرفت که این آبرفت‌ها بیشتر دارای ویژگی‌های رس ماری یا رس همراه با مارن هستند تا خاک‌های کرنباته با سیمان‌شدگی مؤثر.



شکل ۶- مقدار دانسیته خشک برحسب چسبندگی نمونه‌ها در (الف) رطوبت ۸ درصد، (ب) رطوبت ۱۴ درصد و (ج) رطوبت ۳۱ درصد

جدول ۶- میزان کربنات کلسیم اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های خاک آبرفت نوع D

شماره نمونه	وزن نمونه (gr)	HCl (cc)	NaOH (cc)	CaCO ₃ (%)	شماره نمونه	وزن نمونه (gr)	HCl (cc)	NaOH (cc)	CaCO ₃ (%)
۱	۰/۵۰۱	۲۰	۱۹/۳	۶/۹۰	۱۸	۰/۵۰۰	۲۰	۱۹/۰	۱۰/۴۵
۲	۰/۵۰۲	۲۰	۱۸/۹	۱۰/۸۰	۱۹	۰/۵۰۳	۲۰	۱۸/۶	۱۴/۱۵
۳	۰/۵۰۳	۲۰	۱۹/۰	۹/۸۲	۲۰	۰/۵۰۳	۲۰	۱۸/۹	۱۰/۸۰
۴	۰/۵۰۱	۲۰	۱۹/۰	۹/۹۱	۲۱	۰/۵۰۲	۲۰	۱۹/۱	۸/۷۳
۵	۰/۵۰۰	۲۰	۱۹/۲	۷/۸۵	۲۲	۰/۵۰۰	۲۰	۱۸/۸	۱۲/۳۵
۶	۰/۵۰۱	۲۰	۱۹/۱	۸/۸۹	۲۳	۰/۵۰۱	۲۰	۱۸/۷	۱۳/۰۹
۷	۰/۵۰۲	۲۰	۱۹/۱	۹/۱۰	۲۴	۰/۵۰۲	۲۰	۱۸/۸	۱۱/۶۷
۸	۰/۵۰۱	۲۰	۱۹/۰	۱۰/۵۰	۲۵	۰/۵۰۱	۲۰	۱۸/۶	۱۴/۱۷
۹	۰/۵۰۳	۲۰	۱۸/۸	۱۱/۵۷	۲۶	۰/۵۰۰	۲۰	۱۸/۳	۱۷/۱۲
۱۰	۰/۵۰۱	۲۰	۱۹/۱	۸/۹۵	۲۷	۰/۵۰۴	۲۰	۱۸/۷	۱۳/۱۹
۱۱	۰/۵۰۱	۲۰	۱۹/۰	۹/۸۰	۲۸	۰/۵۰۴	۲۰	۱۸/۶	۱۴/۰۰
۱۲	۰/۵۰۲	۲۰	۱۹/۲	۷/۹۶	۲۹	۰/۵۰۲	۲۰	۱۸/۴	۱۵/۵۷
۱۳	۰/۵۰۱	۲۰	۱۸/۹	۱۱/۲۰	۳۰	۰/۵۰۲	۲۰	۱۸/۲	۱۷/۷۰
۱۴	۰/۵۰۲	۲۰	۱۸/۹	۱۰/۸۵	۳۱	۰/۵۰۱	۲۰	۱۸/۳	۱۶/۹۶
۱۵	۰/۵۰۳	۲۰	۱۹/۰	۹/۶۰	۳۲	۰/۵۰۲	۲۰	۱۸/۴	۱۵/۹۴
۱۶	۰/۵۰۴	۲۰	۱۹/۱	۸/۷۷	۳۳	۰/۵۰۱	۲۰	۱۸/۴	۱۵/۸۷
۱۷	۰/۵۰۰	۲۰	۱۸/۷	۱۳/۱۴	۳۴	۰/۵۰۳	۲۰	۱۸/۴	۱۶/۳۲

ناشی از توزیع ناهمگن کربنات در قالب نودول‌های آهکی است که در آبرفت‌های جنوب تهران شایع‌اند. این نودول‌ها در حین فرآیند آزمایش (به‌ویژه خردکردن نمونه برای تیتراسیون) ممکن است به‌عنوان کربنات کلسیم شناسایی

تحلیل آماری (جدول ۷) نشان می‌دهد که همبستگی معناداری بین میزان کربنات کلسیم و پارامترهای مقاومتی وجود ندارد. این نتیجه با توجه به ضعیف بودن ضریب همبستگی (r) در تمامی سطوح رطوبتی است و احتمالاً

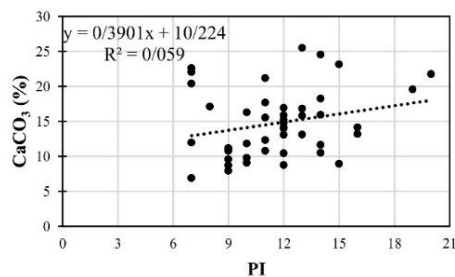
تهران، تأثیر مثبت سطح سیمان‌شدگی بر پارامترهای مقاومتی را گزارش کرده‌اند که می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت‌های منطقه‌ای در نحوه تشکیل و توزیع کربنات در آبرفت‌های تهران باشد [۲۷].

شکل ۷، رابطه بین درصد کربنات کلسیم و پارامترهای دیگر را نشان می‌دهد. شکل ۷-الف، نشان‌دهنده همبستگی بسیار ضعیف بین کربنات کلسیم و دانسیته خشک (γ_d) ($R^2=0.0312$) و شکل ۷-ب، بیانگر همبستگی ضعیفی بین کربنات کلسیم و شاخص خمیری (PI) است ($R^2=0.0849$).

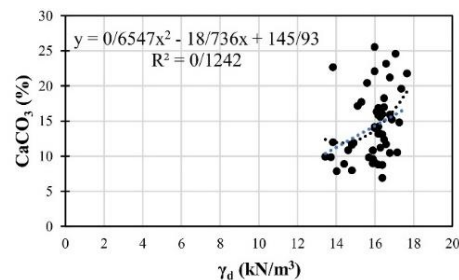
شوند، اما به دلیل اندازه‌ی درشت، پراکندگی موضعی و عدم ایجاد یک شبکه پیوسته سیمانی در ماتریس خاک، تأثیر مؤثری بر مقاومت برشی ندارند. حضور فازهای دیگر مانند سیلت نیز می‌تواند از شکل‌گیری یک سیمان‌شدگی مؤثر جلوگیری کند. این یافته‌ها با پژوهش چن و همکاران که عنوان کردند افزایش کربنات کلسیم، بسته به میزان و نحوه توزیع آن، لزوماً منجر به افزایش چسبندگی یا زاویه اصطکاک نمی‌شود و این اثر به کیفیت و یکنواختی سیمان‌شدگی وابسته است، همخوانی دارد [۲۶]. حسینی و همکاران نیز در پژوهش خود بر روی آبرفت‌های شرق

جدول ۷- تحلیل آماری و همبستگی بین داده‌های مقدار کربنات کلسیم خاک با پارامترها و داده‌های آزمون‌های آزمایشگاهی

PI	ϕ (°)	ϕ (°)	ϕ (°)	ϕ (°)	c (kN/m ²)	c (kN/m ²)	γ_d (kN/m ³)	CaCO ₃ (%)	CaCO ₃ (%)
+۰/۲۴۳	-۰/۳۲۰	-۰/۲۱۲	-۰/۱۳۵	+۰/۰۸۲	-۰/۰۰۹	-۰/۱۰۴	+۰/۳۱۵	+۱/۰	(%) CaCO ₃



(ب)



(الف)

شکل ۷- رابطه بین درصد کربنات کلسیم با (الف) دانسیته خشک (γ_d) و (ب) شاخص خمیری (PI)

نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که رفتار مقاومتی خاک‌های آبرفت نوع D در جنوب تهران به شدت تحت تأثیر رطوبت قرار دارد. آزمایش‌ها برای سه سطح رطوبت ۸، ۱۴ و ۳۱٪ انجام شد که نتایج آن در جدول ۸ (و پیوست ۲) ارائه شده است. خلاصه آمار توصیفی پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه‌های آبرفت نوع D در جدول ۹ نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت از ۸ به ۱۴ و سپس به ۳۱٪، چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) به طور چشمگیری کاهش می‌یابند. میانگین چسبندگی در رطوبت ۸٪ (نزدیک‌ترین سطح رطوبت به حالت خشک) kPa ۵/۲۰، در رطوبت ۱۴٪ برابر kPa ۵/۰۷ و در حالت اشباع

این یافته‌ها نشان می‌دهند که رفتار مقاومتی آبرفت نوع D در جنوب تهران عمدتاً تحت تأثیر رطوبت و مقدار ریزدانه (رس و سیلت) قرار دارد، نه میزان کربنات کلسیم. با توجه به وجود کربنات در قالب نودول‌های آهکی و عدم ارتباط آن با پارامترهای مقاومتی، پیشنهاد می‌شود از اصطلاحاتی مانند رس مارنی یا رس حاوی نودول‌های کربناته استفاده شود تا ویژگی‌های واقعی رفتاری این خاک‌ها به درستی بازتاب داده شود.

۳-۲- رفتار مقاومتی خاک تحت تأثیر رطوبت

الف) نتایج و تحلیل آزمایش برش مستقیم

(معادل حداکثر رطوبت ۳۱٪)، مقدار ۳/۱۸ kPa نمی‌توان از پارامترهای خشک یا نیمه‌خشک استفاده کرد و اندازه‌گیری شد. این کاهش ۳۸.۸٪ چسبندگی نشان می‌دهد که در طراحی‌های ژئوتکنیکی جنوب تهران جدی در نظر گرفته شوند.

جدول ۸- نتایج چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از انجام آزمایش برش مستقیم

نمونه	c (kPa) θ (°)	رطوبت ۸٪	رطوبت ۱۴٪	رطوبت ۳۱٪	نمونه	c (kPa) θ (°)	رطوبت ۸٪	رطوبت ۱۴٪	رطوبت ۳۱٪	نمونه	c (kPa) θ (°)	رطوبت ۸٪	رطوبت ۱۴٪	رطوبت ۳۱٪
۱	C	۷/۳۵	۵/۸۸	۳/۷۳	۱۸	C	۵/۷۹	۵/۳۰	۳/۹۲	۳۵	C	۶/۴۷	۶/۸۶	۵/۰۰
	∅	۲۵/۲	۲۷/۸	۲۴/۸		∅	۲۳/۹	۲۱/۳	۱۶/۱		∅	۲۴/۰	۲۵/۰	۱۰/۸
۲	C	۷/۸۴	۶/۴۷	۳/۳۳	۱۹	C	۴/۶۱	۵/۱۰	۳/۴۳	۳۶	C	۳/۹۲	۳/۱۴	۲/۲۶
	∅	۲۴/۷	۲۷/۲	۲۴/۰		∅	۲۵/۱	۲۲/۵	۱۴/۰		∅	۲۷/۲	۳۰/۰	۲۵/۰
۳	C	۱/۸۶	۱/۸۶	۱/۴۷	۲۰	C	۴/۴۱	۵/۳۹	۴/۱۲	۳۷	C	۳/۴۳	۲/۹۴	۱/۸۶
	∅	۳۲/۷	۲۹/۴	۲۶/۱		∅	۲۴/۱	۲۵/۰	۱۴/۵		∅	۲۹/۰	۲۹/۰	۲۳/۰
۴	C	۲/۹۴	۳/۳۳	۱/۵۷	۲۱	C	۵/۲۰	۴/۰۲	۲/۲۶	۳۸	C	۵/۱۰	۵/۸۸	۳/۴۳
	∅	۲۹/۹	۲۸/۸	۲۴/۲		∅	۲۲/۳	۲۴/۲	۱۵/۴		∅	۲۲/۰	۲۲/۰	۱۳/۸
۵	C	۵/۴۹	۵/۷۹	۱/۹۶	۲۲	C	۵/۶۹	۵/۹۸	۴/۳۱	۳۹	C	۵/۱۰	۴/۴۱	۳/۶۳
	∅	۳۱/۲	۲۷/۰	۲۸/۳		∅	۲۵/۰	۲۳/۰	۱۴/۲		∅	۲۴/۰	۲۴/۰	۱۵/۰
۶	C	۲/۴۵	۲/۶۵	۱/۹۶	۲۳	C	۵/۶۹	۶/۰۸	۴/۱۲	۴۰	C	۷/۳۵	۸/۳۴	۶/۰۸
	∅	۳۰/۴	۲۵/۸	۲۸/۵		∅	۲۵/۰	۲۲/۰	۱۴/۳		∅	۲۳/۰	۲۵/۸	۱۲/۸
۷	C	۵/۸۸	۴/۴۱	۲/۴۵	۲۴	C	۳/۹۲	۴/۴۱	۲/۹۴	۴۱	C	۶/۰۸	۶/۹۶	۴/۱۲
	∅	۲۷/۱	۲۷/۸	۲۵/۱		∅	۲۲/۸	۲۰/۰	۸/۰		∅	۲۶/۸	۲۵/۰	۱۱/۱
۸	C	۵/۹۸	۸/۲۴	۵/۱۰	۲۵	C	۵/۸۸	۵/۳۹	۳/۷۳	۴۲	C	۴/۴۱	۳/۹۲	۲/۲۶
	∅	۲۶/۰	۲۴/۰	۱۳/۸		∅	۲۴/۱	۲۱/۸	۱۲/۰		∅	۲۸/۰	۲۶/۰	۲۰/۰
۹	C	۲/۴۵	۲/۱۶	۱/۴۷	۲۶	C	۳/۳۳	۴/۶۱	۲/۳۵	۴۳	C	۳/۹۲	۴/۸۰	۲/۲۶
	∅	۳۱/۱	۳۰/۱	۲۷/۳		∅	۲۷/۴	۲۳/۸	۱۶/۰		∅	۳۱/۰	۲۵/۰	۲۲/۰
۱۰	C	۶/۹۶	۵/۸۸	۵/۳۹	۲۷	C	۵/۲۰	۶/۳۷	۴/۷۱	۴۴	C	۵/۳۹	۴/۱۲	۱/۸۶
	∅	۲۶/۰	۲۳/۴	۱۲/۱		∅	۲۶/۳	۲۴/۰	۱۴/۰		∅	۳۰/۰	۲۸/۰	۲۳/۰
۱۱	C	۶/۸۶	۴/۷۱	۱/۹۶	۲۸	C	۴/۹۰	۴/۳۱	۳/۴۳	۴۵	C	۵/۱۰	۶/۱۸	۳/۹۲
	∅	۲۱/۵	۲۱/۷	۲۰/۵		∅	۲۳/۰	۲۱/۰	۱۳/۰		∅	۲۳/۱	۲۳/۱	۱۵/۱
۱۲	C	۶/۵۷	۵/۳۰	۲/۱۶	۲۹	C	۴/۸۰	۵/۱۰	۳/۰۴	۴۶	C	۴/۹۰	۴/۱۲	۲/۹۴
	∅	۲۶/۰	۲۵/۰	۱۸/۰		∅	۲۴/۱	۲۵/۰	۱۴/۵		∅	۲۲/۰	۲۰/۰	۱۲/۰
۱۳	C	۶/۹۶	۵/۴۹	۲/۰۶	۳۰	C	۴/۴۱	۳/۵۳	۲/۸۴	۴۷	C	۴/۷۱	۳/۴۳	۱/۷۷
	∅	۲۵/۲	۲۳/۰	۱۴/۸		∅	۲۳/۰	۲۱/۰	۱۲/۰		∅	۲۲/۰	۱۹/۰	۱۱/۰
۱۴	C	۲/۴۵	۲/۴۵	۱/۲۷	۳۱	C	۵/۶۹	۵/۹۸	۳/۹۲	۴۸	C	۶/۳۷	۵/۸۸	۳/۷۳
	∅	۲۷/۱	۲۴/۵	۲۴/۴		∅	۲۴/۰	۲۲/۰	۱۴/۳		∅	۲۳/۰	۲۲/۹	۱۵/۵
۱۵	C	۵/۸۸	۵/۵۹	۲/۴۵	۳۲	C	۵/۸۸	۵/۰۰	۴/۲۲	۴۹	C	۳/۳۳	۲/۹۴	۲/۴۵
	∅	۲۴/۲	۲۲/۸	۱۵/۳		∅	۱۹/۰	۲۰/۰	۷/۰		∅	۲۸/۰	۲۵/۰	۱۶/۰
۱۶	C	۵/۶۹	۶/۱۸	۴/۱۲	۳۳	C	۷/۳۵	۸/۳۴	۶/۰۸	۵۰	C	۵/۱۰	۴/۸۰	۲/۸۴
	∅	۲۴/۳	۲۱/۴	۱۵/۲		∅	۲۳/۲	۲۵/۸	۱۲/۸		∅	۲۴/۰	۲۲/۷	۱۵/۸
۱۷	C	۶/۳۷	۷/۰۶	۴/۳۱	۳۴	C	۶/۵۷	۶/۰۸	۲/۲۶					
	∅	۲۴/۸	۲۱/۰	۱۲/۸		∅	۲۷/۰	۲۸/۰	۲۳/۶					

می‌شود، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در شرایط رطوبت ۳۱٪، پایین‌تر از سایر سطوح رطوبت است. این نتایج به‌وضوح کاهش مقاومت برشی خاک را با افزایش رطوبت تأیید می‌کنند.

همچنین، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) نیز از ۲۵/۵ درجه در رطوبت ۸٪ به ۲۴/۱ درجه در رطوبت ۱۴٪ و سپس به ۱۷/۱ درجه در رطوبت ۳۱٪ کاهش یافته است که معادل کاهش ۸/۴ درجه‌ای از رطوبت ۸ به رطوبت ۳۱٪ است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۸ مشاهده

جدول ۹- خلاصه آمار توصیفی پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه‌های آبرفت نوع D

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)			چسبندگی (c (kPa))			
رطوبت ۳۱٪	رطوبت ۱۴٪	رطوبت ۸٪	رطوبت ۳۱٪	رطوبت ۱۴٪	رطوبت ۸٪	
۱۷/۱	۲۴/۱	۲۵/۵	۳/۱۸	۵/۰۷	۵/۲۰	میانگین
۵/۶	۲/۸	۳/۰	۱/۲۲	۱/۵۳	۱/۴۲	انحراف معیار استاندارد
۷/۰	۱۹/۰	۱۹/۰	۱/۲۸	۱/۸۶	۱/۸۶	کمینه
۱۳/۲	۲۱/۷	۲۳/۴	۲/۲۶	۴/۱۲	۴/۴۱	چارک اول (۲۵٪)
۱۵/۲	۲۴/۰	۲۴/۹	۲/۹۹	۵/۲۰	۵/۳۰	چارک دوم (۵۰٪)
۲۲/۸	۲۵/۸	۲۷/۱	۴/۰۷	۵/۹۸	۶/۰۶	چارک سوم (۷۵٪)
۲۸/۵	۳۰/۱	۳۲/۷	۶/۰۸	۸/۳۴	۷/۸۵	بیشینه

این رفتار می‌تواند منجر به نشست یا کاهش پایداری گودها در شرایط بارندگی یا نشت آب شود. کانگ^۵ و همکاران نیز در پژوهش خود بر خاک‌های سیلتی-رسی، کاهش چشمگیر چسبندگی و زاویه اصطکاک با افزایش رطوبت را تأیید کرده‌اند [۲۸]. این یافته‌ها با یافته‌های پژوهش‌های قبلی همخوانی دارد و نشان‌دهنده حساسیت بالای خاک‌های رسی منطقه به رطوبت است [۵ و ۸]. همچنین پراکندگی قابل‌توجهی در مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، به‌ویژه در حالت اشباع، وجود دارد. این پراکندگی ناشی از تغییرپذیری خواص خاک در منطقه است که ریشه در فرآیندهای پس از رسوب‌گذاری (مانند تحکیم ناهمگن و تشکیل نودول‌های کربناته موضعی) دارد. این تغییرپذیری، ضرورت در نظر گرفتن پارامترهای مقاومتی محافظه‌کارانه‌تر در تحلیل‌های ریسک و اعمال ضرایب اطمینان مناسب در طراحی‌های ژئوتکنیکی را تأکید می‌کند.

ب) تأثیر رطوبت بر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

تحلیل آماری (جدول‌های ۹ و ۱۰) نشان می‌دهد که در آبرفت نوع D جنوب تهران، رطوبت ($\beta = -1.78$, $p < 0.001$) قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده چسبندگی است، در حالی که تأثیر کربنات کلسیم ($r = 0.12$, $p > 0.05$) از نظر آماری ناچیز است. این یافته حاکی از آن است که حتی در حضور کربنات کلسیم (میانگین ۱۲/۴٪)، رفتار ژئوتکنیکی خاک کاملاً تحت سلطه رطوبت قرار دارد، نکته‌ای که در طراحی‌های مهندسی این منطقه اغلب نادیده گرفته می‌شود. کاهش چسبندگی با افزایش رطوبت می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- ۱- افزایش فاصله بین صفحات کانی‌های رسی^۴ که با نفوذ مولکول‌های آب بین لایه‌های رس رخ می‌دهد و منجر به کاهش نیروهای بین‌مولکولی و پیوندهای الکترواستاتیک می‌شود؛
- ۲- کاهش نیروهای بین‌ذره‌ای در خاک‌های ریزدانه که باعث جدایی ذرات و کاهش چسبندگی مؤثر می‌گردد.

⁵ Kang

⁴ Swelling of clay minerals

تأیید می‌کند که رطوبت عامل اصلی تأثیرگذار بر مقاومت برشی آبرفت نوع D در جنوب تهران است.

همچنین، تحلیل مدل رگرسیون آمیخته (جدول ۱۰) نشان می‌دهد که شاخص خمیری (PI) دومین عامل تأثیرگذار بر کاهش زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) پس از رطوبت است ($\beta = -0.18, p = 0.024$). این یافته تأکید می‌کند که در خاک‌های کاملاً ریزدانه جنوب تهران، ترکیب دقیق فاز رسی (که توسط PI بازتاب داده می‌شود) نسبت به درصد کل ریزدانه، نقش مؤثرتری در کنترل رفتار برشی دارد.

ب) مدل رگرسیون آمیخته چندمتغیره نتایج مدل رگرسیون آمیخته چندمتغیره در جدول ۱۰ خلاصه شده است. این مدل نشان می‌دهد که رطوبت ($\beta = -1.78, p < 0.001$) و شاخص خمیری ($\beta = 0.41, p = 0.002$) قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های چسبندگی (c) هستند؛ درحالی‌که درصد کرنات کلسیم ضریب مثبت اما غیرمعناداری ($\beta = 0.11, p = 0.217$) دارد. برای زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، درصد عبوری از الک ۲۰۰ ($\beta = -0.18, p < 0.001$) و شاخص خمیری ($\beta = 0.11, p < 0.001$) تأثیر منفی معناداری دارند ($p = 0.024$).

حضور اثر تصادفی نمونه با واریانس قابل‌توجه ($3/2$) برای c و $1/8$ برای ϕ ناهمگنی آبرفت‌های منطقه را تأیید می‌کند. ضرایب تعیین شرطی (R^2 -conditional) بالاتر از 0.79 نشان می‌دهد که مدل ترکیبی از اثرات ثابت و تصادفی، تنوع مشاهده شده در پارامترهای مقاومتی را به‌خوبی تبیین می‌کند. استفاده از مدل‌های آمیخته برای در نظر گرفتن ناهمگنی خاک‌ها، در مطالعات اخیر ژئوتکنیک نیز به‌طور گسترده‌ای مورد تأیید قرار گرفته است [۲۹]. این مدل تأیید می‌کند که رفتار ژئوتکنیکی آبرفت نوع D در جنوب تهران عمدتاً تحت تأثیر رطوبت و پراکندگی پارامترهای مکانیکی قرار دارد، نه میزان کرنات کلسیم.

چسبندگی در رطوبت $1/8$ بین $1/86$ تا $7/85$ کیلوپاسکال (میانگین $5/20$ kPa)، در رطوبت $1/4$ بین $1/86$ تا $8/34$ کیلوپاسکال (میانگین $5/07$ kPa) و در رطوبت $3/1$ بین $1/28$ تا $6/08$ کیلوپاسکال (میانگین kPa $3/18$) متغیر است. این تغییرپذیری در چسبندگی، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم رطوبت بر قدرت چسبندگی ذرات خاک است که در شرایط مرطوب، پیوندهای چسبنده تضعیف می‌شود.

زاویه اصطکاک داخلی در رطوبت $1/8$ بین $19/0$ تا $32/7$ درجه (میانگین $25/5$ درجه)، در رطوبت $1/4$ بین $19/0$ تا $30/1$ درجه (میانگین $24/1$ درجه) و در رطوبت $3/1$ بین $7/0$ تا $28/5$ درجه (میانگین $17/1$ درجه) متغیر است. این کاهش $8/4$ درجه‌ای در زاویه اصطکاک داخلی، نشان‌دهنده تضعیف پارامترهای مقاومتی خاک در شرایط مرطوب است که می‌تواند به‌دلیل کاهش اصطکاک بین ذرات خاک به‌علت حضور لایه‌های آب و تغییر در آرایش ذرات خاک در شرایط مرطوب باشد.

۳-۳- تحلیل حساسیت مهندسی (کاهش ظرفیت باربری)

با افزایش رطوبت از 8 به $3/1$ ، چسبندگی (c) $38/8$ درصد و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) $8/4$ درجه کاهش می‌یابد. این کاهش‌های چشمگیر در پارامترهای مقاومتی، به‌طور مستقیم منجر به کاهش قابل‌توجه در ظرفیت باربری پی‌ها و پایداری گودها می‌شود. بنابراین، استفاده از پارامترهای مقاومتی مربوط به شرایط اشباع در طراحی‌های ژئوتکنیکی جنوب تهران ضروری است.

۳-۴- تحلیل آماری و مدل‌سازی رفتار خاک

الف) همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مقاومتی تحلیل آماری نشان می‌دهد که رطوبت قوی‌ترین همبستگی را با چسبندگی ($r = -0.74, p < 0.01$) دارد، در حالی که همبستگی بین کرنات کلسیم و چسبندگی ضعیف است ($r = 0.12, p > 0.05$) (جدول ۱). این یافته‌ها

جدول ۱۰- نتایج مدل رگرسیون آمیخته چندمتغیره برای پیش‌بینی c و ϕ براساس ویژگی‌های فیزیکی خاک

متغیر پیش‌بینی‌کننده	ضریب چسبندگی برای β (SE), p-value	زاویه اصطکاک داخلی برای β (SE), p-value
ثابت (Intercept)	$32/5$ ($4/1$), $<0/001$	$28/3$ ($2/4$), $<0/001$
رطوبت (ω , %)	$-1/78$ ($0/21$), $<0/001$	$-0/32$ ($0/12$), $0/008$
دانشیه خشک (γ_d , kN/m ³)	$1/25$ ($0/38$), $0/001$	$0/68$ ($0/22$), $0/002$
درصد عبوری از الک #۲۰۰	$-0/09$ ($0/04$), $0/025$	$-0/11$ ($0/02$), $<0/001$
شاخص خمیری (PI)	$0/41$ ($0/13$), $0/002$	$-0/18$ ($0/08$), $0/024$
درصد کربنات کلسیم (CaCO ₃)	$0/11$ ($0/09$), $0/217$	$0/04$ ($0/05$), $0/432$
اثر تصادفی (نمونه)	واریانس: $3/2$	واریانس: $1/8$
خطای باقیمانده (Residual)	واریانس: $2/1$	واریانس: $1/5$
ضریب تعیین تطبیقی (R ² -marginal)	$0/74$	$0/68$
ضریب تعیین شرطی (R ² -conditional)	$0/83$	$0/79$

این پراکندگی در پارامترهای مکانیکی، علیرغم یکنواختی نسبی محیط رسوب‌گذاری آبرفت نوع D، احتمالاً ناشی از تغییرات پس از رسوب‌گذاری است، از جمله، تحکیم ناهمگن ناشی از تفاوت در بارهای سطحی، تشکیل نودول‌های کربناته به‌صورت پراکنده و تغییرات محلی در سطح آب زیرزمینی در طول زمان.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر همزمان رطوبت و درصد کربنات کلسیم بر مقاومت برشی آبرفت نوع D در جنوب تهران براساس تحلیل ۵۰ نمونه خاک تحت سه سطح رطوبتی (۸، ۱۴ و ۳۱٪) مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های کلیدی این پژوهش، که با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته (همبستگی پیرسون و مدل رگرسیون آمیخته چندمتغیره) استخراج شده‌اند، در ادامه به‌صورت دسته‌بندی‌شده و همراه با پیامدهای مهندسی آن‌ها ارائه می‌شوند.

۱- ترکیب ریزدانه و پاسخ به رطوبت: پایه‌های رفتار ژئوتکنیکی آبرفت نوع D جنوب تهران عمدتاً از خاک‌های ریزدانه (رس و رس سیلتی) تشکیل

شده است (میانگین ۸۶٪ ذرات ریزدانه). این ترکیب، خاک را به‌طور ذاتی بسیار حساس به تغییرات رطوبت می‌کند. غالب بودن فاز ریزدانه، عامل اصلی کاهش چشمگیر مقاومت برشی تحت شرایط مرطوب است. هرچند ویژگی‌های اصلی خاک (مانند دانه‌بندی و شاخص خمیری) در منطقه نسبتاً یکنواخت است، پراکندگی قابل‌توجهی در پارامترهای مکانیکی (مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک) در شرایط مشابه رطوبتی مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از تغییرات محلی در فرآیندهای پس از رسوب‌گذاری (مانند تحکیم ناهمگن و توزیع پراکنده نودول‌های کربناته) است. تحلیل آماری نشان می‌دهد که تغییرات دانشیه خشک (γ_d) با چسبندگی (c) همبستگی مثبت و معناداری دارد ($\beta = 1.25$, $p = 0.001$). این یافته‌ها ضرورت استفاده از پارامترهای مقاومتی محافظه‌کارانه و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مکانی در طراحی‌های ژئوتکنیکی منطقه را برجسته می‌کند.

یک ابزار کاربردی برای تخمین سریع پارامترهای طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

۴- کربنات کلسیم و نقش محدود آن در رفتار مقاومتی: مقایسه میزان کربنات کلسیم (میانگین: ۱۲/۴٪، دامنه: ۷-۲۶٪) با پارامترهای مقاومتی، همبستگی آماری معناداری را نشان نداد ($r=0.12, p>0.05$). تحلیل رگرسیون آمیخته نیز تأثیر غیرمعنادار کربنات کلسیم بر چسبندگی را تأیید کرد ($\beta=0.11, p=0.217$). این یافته نشان می‌دهد که حتی در حضور نودول‌های اهکی که ممکن است در فرآیند آماده‌سازی نمونه خرد شده و در آزمایش تیتراسیون به‌عنوان کربنات کلسیم شناسایی شوند، سیمان‌شدگی طبیعی تأثیر مؤثری بر افزایش مقاومت برشی ندارد. این عدم تأثیر احتمالاً ناشی از توزیع ناهمگن، اندازه درشت و پراکندگی موضعی نودول‌ها است که مانع از تشکیل یک شبکه پیوسته سیمانی در ماتریس خاک می‌شود. نکته قابل توجه این است که در مطالعات مشابه در سایر بخش‌های تهران (مانند شرق شهر)، گاهی تأثیر مثبت سطح سیمان‌شدگی گزارش شده است که نشان‌دهنده تفاوت‌های منطقه‌ای در نحوه تشکیل و توزیع کربنات در آبرفت‌های تهران است. در هر صورت، این پژوهش تأکید می‌کند که در طراحی‌های ژئوتکنیکی جنوب تهران، نباید انتظار داشت که حضور کربنات کلسیم، مقاومت برشی را به‌طور مؤثری افزایش دهد.

محدودیت‌های پژوهش

هرچند این مطالعه یافته‌های ارزشمندی درباره رفتار ژئوتکنیکی آبرفت نوع D در جنوب تهران ارائه می‌دهد، اما چندین محدودیت در روش‌شناسی و اجرای پژوهش وجود دارد که باید در تفسیر نتایج و تعمیم آن‌ها به سایر مناطق مورد توجه قرار گیرد:

۲- رطوبت به‌عنوان عامل کنترل‌کننده اصلی رفتار برشی: در آبرفت نوع D جنوب تهران، افزایش رطوبت از ۸ به ۳۱٪ (معادل حداکثر رطوبت و نشان‌دهنده شرایط اشباع عملی) منجر به کاهش ۳۸/۸ درصد در چسبندگی (از ۵/۲۰ به ۳/۱۸ kPa) و کاهش ۸/۴ درجه در زاویه اصطکاک داخلی (از ۲۵/۵ درجه به ۱۷/۱ درجه) می‌شود. این کاهش چشمگیر، ظرفیت باربری نهایی پی سطحی را تا ۴۴٪ کاهش می‌دهد. تحلیل رگرسیون آمیخته تأیید می‌کند که رطوبت ($\beta = -1.78, p<0.001$) قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده چسبندگی است، در حالی که کربنات کلسیم ($\beta = 0.11, p=0.217$) تأثیر آماری معناداری ندارد. این یافته نشان می‌دهد که فرض رایج در مهندسی مبنی بر مقاوم‌بودن خاک‌های جنوب تهران به‌دلیل حضور کربنات نیازمند بازنگری است و باید در طراحی‌ها، سناریوهای رطوبتی بحرانی (به‌ویژه اشباع) به‌عنوان شرایط حاکم در نظر گرفته شوند.

۳- شاخص خمیری به‌عنوان شاخص پیش‌بینی‌کننده چسبندگی در خاک‌های ریزدانه: در این پژوهش، رابطه خطی قوی بین شاخص خمیری (PI) و حد روانی (LL) در نمونه‌های CL منطقه ($y = 0.6423x - 8.5966, R^2 = 0.9406$) مشاهده شد. این رابطه، هم‌راستا با روند کلی خاک‌های رسی، امکان استفاده از PI را به‌عنوان یک شاخص قابل اعتماد برای پیش‌بینی چسبندگی فراهم می‌کند. این امر، توسط مدل رگرسیون آمیخته تأیید شد که PI را به‌عنوان دومین پیش‌بینی‌کننده معنادار چسبندگی پس از رطوبت شناسایی کرد ($\beta=0.41, p=0.002$). با توجه به سادگی و هزینه پایین آزمایش‌های حدود اتربرگ نسبت به آزمایش‌های مقاومتی، این یافته می‌تواند در مطالعات اولیه ژئوتکنیکی جنوب تهران به‌عنوان

برجا (مانند CPT و SPT) برای اعتبارسنجی نتایج استفاده نشده است. این محدودیت می‌تواند بر قابلیت تعمیم نتایج به شرایط واقعی میدانی تأثیر گذاشته باشد.

این محدودیت‌ها به‌هیچ‌وجه از ارزش یافته‌های این پژوهش نمی‌کاهد، اما خواننده را در تفسیر نتایج و تعمیم آن‌ها به سایر مناطق هشدار می‌دهد. پیشنهادهای ارائه‌شده در ادامه به‌طور مستقیم از این محدودیت‌ها استخراج شده‌اند.

پیشنهادهای

۱- بررسی‌های گسترده‌تر در منطقه: انجام مطالعات مشابه در بخش‌های دیگر آبرفت نوع D و مقایسه نتایج برای تکمیل نقشه‌های پهنه‌بندی ژئوتکنیکی.

۲- بررسی‌های ریزساختاری: استفاده از روش‌های ریزساختاری SEM و XRD برای بررسی توزیع کربنات کلسیم و کانی‌شناسی رس، که می‌تواند عدم تأثیر معنادار CaCO_3 بر مقاومت برشی را تبیین کند.

۳- آزمون‌های برجا: انجام آزمون‌های برجا CPT و SPT برای اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی و درک بهتر رفتار خاک در شرایط واقعی.

۴- آزمون‌های سه‌محوری: انجام آزمون‌های سه‌محوری روی نمونه‌های دست‌نخورده همراه با اندازه‌گیری فشار حفره‌ای برای ارزیابی کمی و کیفی سیمان‌شدگی طبیعی.

۱- محدودیت در نمونه‌برداری: این پژوهش براساس ۵۰ نمونه خاک از جنوب تهران انجام شده است. اگرچه این تعداد برای یک مطالعه آماری کافی است، اما پوشش جغرافیایی آن محدود به مناطق دسترس‌پذیر در جنوب شهر تهران بوده و ممکن است نماینده کامل آبرفت نوع D در سایر بخش‌های شهر نباشد.

۲- استفاده از نمونه‌های دست‌خورده: آزمایش‌ها عمدتاً بر روی نمونه‌های دست‌خورده انجام شده‌اند که می‌تواند ساختار طبیعی خاک و اثرات سیمان‌شدگی را تحت تأثیر قرار دهد. برای بررسی دقیق‌تر سیمان‌شدگی طبیعی، استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده و آزمون‌های سه‌محوری ضروری است.

۳- تعداد محدود سطوح رطوبتی: آزمایش‌ها در سه سطح رطوبتی (۸، ۱۴ و ۳۱٪) انجام شده‌اند. بررسی تأثیر تغییرات تدریجی رطوبت و اثرات زمانی آن بر رفتار خاک می‌توانست درک جامع‌تری از حساسیت خاک به رطوبت فراهم کند.

۴- عدم بررسی ریزساختار خاک: عدم استفاده از روش‌های ریزساختاری (مانند SEM و XRD) مانع از درک دقیق‌تر توزیع کربنات کلسیم، کانی‌شناسی رس و مکانیسم‌های سیمان‌شدگی طبیعی شده است. این امر می‌توانست توضیح بهتری برای عدم تأثیر معنادار کربنات کلسیم بر مقاومت برشی ارائه دهد.

۵- عدم انجام آزمون‌های برجا: این مطالعه براساس آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده و از آزمون‌های

References

- [1] Berberian M, Qorashi M, Arzhang-Ravesh B, Mohajer-Ashjai A. Recent Tectonics, Seismotectonic, and Earthquake-Fault Hazard Study of the Greater Tehran region, Tehran Quadrangle Area. Tehran, Iran: Geological Survey of Iran. 1985. [In Persian]
- [2] Japan International Cooperation Agency (JICA). The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran. Tokyo, Japan. 2000.
- [3] Asghari E, Toll DG, Haeri SM. Triaxial Behaviour of a Cemented Gravely Sand, Tehran Alluvium. Geotechnical & Geological Engineering. 2003; 21(1): 1-28. doi: 10.1023/A:1022934624666

- [4] Cheshomi A. Study of Mechanical Properties of Coarse Alluvial in Tehran Based on Usual Tests and Simple Mechanical Tool. Ph.D. Dissertation. Tarbiat Modares University. 2006. [In Persian]
- [5] Fakher A, Cheshomi A, Khamechiyan M. The Addition of Geotechnical Properties to a Geological Classification of Coarse-Grained Alluvium in Apediment Zone. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2007; 40: 163-174. **doi: 10.1144/1470-9236/06-029**
- [6] Khan Mohammadi N. The Effect of Grain Shape and Size Variables on Soil Mechanical Parameters (Case Study of Coarse-Grained Alluvium in Tehran). Master of Science Thesis. University of Tehran. 2008. [In Persian]
- [7] Ghanbari A. Study of Elastic Modulus of Alluvium Deposits in Southern Tehran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 2009; 18: 3-8. **doi: 10.22071/gsj.2010.56979** [In Persian]
- [8] Cheshomi A, Fakher A, Khamechiyan M. Geology of Tehran Alluvium and Evaluation of Rieben Classification for Geotechnical Studies. Journal of Science University of Tehran. 2008; 34(2): 1-15. [In Persian]
- [9] Haeri SM, Shahcheraghi SA, Shakeri R, Seiphoori A. Mechanical Behavior of a Cemented Gravely Sand under Monotonic and Cyclic Loading-Case Study of Tehran Alluvium. 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran. 2009. [In Persian]
- [10] Baghban Golpasand MR, Nikudel MR, Uromeihy A. Effect of Engineering Geological Characteristics of Tehran's Recent Alluvia on Ground Settlement due to Tunneling. Geopersia. 2014; 4(2): 185-199. **doi: 10.22059/jgeope.2014.52718** [In Persian]
- [11] Ramezannejad Elyerdi SR, Cheshomi A, Fakher A. Evaluation of Accuracy Geological Maps Related to Geographical Expansion of the Tehran Alluviums. 2nd International Geosciences Congress, Tehra, Iran. 2016. [In Persian]
- [12] Asadzadeh Saghavaz O, Ghorashi M, Pourkermani M. The Role of Faults on Tehran Alluvial and its Impact on Resistance of Alluvial. Open Journal of Geology. 2017; 07: 1128-1139. **doi: 10.4236/ojg.2017.78075**
- [13] Nouhi Oskoui R, Dabiri R, Amelsakhi M. Evaluation of Settlement in Soil Layers due to Liquefaction in Alluviums in South Eastern of Tehran. Journal of Civil Engineering and Urbanism. 2017; 7: 70-79.
- [14] Fan Y, Zheng M, Wu J. A Study on the Shear Strength Characteristics and Microscopic Mechanism of Coal-Bearing Soil under Dry-Wet Cycles. Frontiers in Earth Science. 2023; 10: 1096980. **doi: 10.3389/feart.2022.1096980**
- [15] Ahmad W, Uchimura T. The Effect of Moisture Content at Compaction and Grain Size Distribution on the Shear Strength of Unsaturated Soils. Sustainability. 2023; 15: 5123. **doi: 10.3390/su15065123**
- [16] Ma S, Yao Y, Bao P, Guo C. Effects of Moisture Content on Strength and Compression Properties of Foundation Soils of Cultural Relics in Areas Flooded by the Yellow River. Frontiers in Materials. 2023; 10: 1186750. **doi: 10.3389/fmats.2023.1186750**
- [17] Pham TA, Sutman M, Medero GM. Validation, Reliability, and Performance of Shear Strength Models for Unsaturated Soils. Geotechnical and Geological Engineering. 2023; 41: 4271-4309. **doi: 10.1007/s10706-023-02520-7**
- [18] Niu G, Zhu X, Li J, Lu M, An L, Chen Z. Experimental Study on Shear Strength of Unsaturated Soil over a Wide Suction Range and Its Prediction. Rock and Soil Mechanics. 2023; 44: 3349-3359.
- [19] ASTM D2487-17. Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2017. **doi: 10.1520/D2487-17**
- [20] ASTM D7928-21e1. Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. 2021. **doi: 10.1520/D7928-21E01**
- [21] ASTM D4318-17e1. Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2017. **doi: 10.1520/D4318-17E01**
- [22] ASTM D3080/D3080M-11. Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions. 2011. **doi: 10.1520/D3080_D3080M-11**
- [23] ASTM D1188-07. Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. 2015. **doi: 10.1520/D1188-07R15**
- [24] ASTM D4373-21. Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils. 2021. **doi: 10.1520/D4373-21**
- [25] Patten ML, Newhart M. Understanding Research Methods: An Overview of the Essentials. Routledge. 2013. **doi: 10.4324/9781315266312**
- [26] Chen L, Chen X, Yang X, Bi P, Ding X, Huang X, et al. Effect of Calcium Carbonate on the Mechanical Properties and Microstructure of Red Clay. Advances in Materials Science and Engineering. 2020; 2020(1): 5298186. **doi: 10.1155/2020/5298186**
- [27] Hosseini M, Taromi M, Saeidi M, Soleimani V, Soltani Negar M. The Study of Cementation Level Effect on the Strength Characteristics and Shear Wave Velocity of Coarse-Grained Alluvium in Eastern Areas of Tehran, Iran. Journal of Engineering Geology. 2020; 14: 581-608. **doi: 10.52547/jeg.14.4.581** [In Persian]

- [28] Kang Q, Xia Y, Li X, Zhang W, Feng C. Study on the Effect of Moisture Content and Dry Density on Shear Strength of Silty Clay Based on Direct Shear Test. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022(1): 2213363. **doi: 10.1155/2022/2213363**
- [29] Phoon K-K, Tang C. Characterisation of Geotechnical Model Uncertainty. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2019; 13: 101-130. **doi: 10.1080/17499518.2019.1585545**

جدول پیوست ۱- محل دقیق نمونه‌برداری و مختصات برداشت نمونه‌ها

شماره نمونه	N	E	محل نمونه‌برداری	توضیحات	شماره نمونه	N	E	محل نمونه‌برداری	توضیحات
۱	۳۵/۶۲۲۱۶	۵۱/۲۶۸۵۱	گلدسته- خیابان احمدی- جنب کوره آجرپزی شمس‌آباد	ترانشه مربوط به گودبرداری آجرپزی	۲۶	۳۵/۶۴۰۹۱	۵۱/۴۶۵۴۲	اتوبان بعثت-شهرک شهید بروجردی	گودبرداری ساختمان تجاری - مسکونی
۲	۳۵/۶۱۴۹۴	۵۱/۲۸۲۱۱	فیروز بهرام	گودبرداری کوره آجرپزی	۲۷	۳۵/۶۱۶۶۶	۵۱/۳۳۳۲۹	نعمت‌آباد-بلوار شقایق-نرسیده به بزرگراه آزادگان- جمع‌آوری آب‌های سطحی	گود برداری پروژه انتقال آب
۳	۳۵/۶۵۳۴	۵۱/۳۱۰۹۶	یافت‌آباد- بلوار الغدیر- نرسیده به تقاطع بلوار معلم	چاهک حفر شده برای انتقال فاضلاب	۲۸	۳۵/۶۱۵۶۱	۵۱/۳۳۷۵۲	محله خلایز-بلوار شقایق-خیابان شهید حیدری	ترانشه مربوط به گودبرداری آجرپزی
۴	۳۵/۶۵۹۸۱	۵۱/۳۳۱۱۹	یافت‌آباد- بلوار معلم- نرسیده به میدان معلم	چاهک حفر شده برای انتقال فاضلاب	۲۹	۳۵/۶۲۶	۵۱/۳۴۳۹۷	محله خلایز- بلوار شهید عباس ورامینی-خیابان فیروز	گودبرداری پروژه مسکونی
۵	۳۵/۶۶۵۲۸	۵۱/۳۱۰۱۸	شادآباد- میدان جانبازان- بلوار مدائن- روبروی بانک کارآفرین	کانال ایجاد شده برای احداث بزرگراه	۳۰	۳۵/۶۳۸۱۸	۵۱/۳۶۰۶	عبدل‌آباد-خیابان ورزش-روبروی هنرستان افشار نادری	گودبرداری پروژه پارکینگ طبقاتی
۶	۳۵/۶۲۹۸۳	۵۱/۳۰۶	شادآباد- خیابان سبحانی-روبروی فرهنگسرای محله شادآباد	گودبرداری پروژه مسکونی	۳۱	۳۵/۶۴۱۱	۵۱/۳۶۵۴۷	بزرگراه شهید چراغی- روبروی بازار پرده	چاهک حفر شده برای انتقال فاضلاب
۷	۳۵/۶۱۶۷	۵۱/۳۸۳۳۳	منطقه ۱۸-خیابان مدائن-خیابان معلم- هنرستان شهید رجایی	پروژه استخر و سونا	۳۲	۳۵/۶۴۳۸۷	۵۱/۳۶۹۲۸	شهرک شریعتی- خیابان مهران-نیش کوچه مدرسه	گودبرداری پروژه مسکونی
۸	۳۵/۶۶۰۶۰۴	۵۱/۳۴۴۵۵۷	خیابان آیت‌الله سعیدی- ضلع غربی چهارراه یافت آباد	گود برداری ساختمان تجاری	۳۳	۳۵/۶۲۵۸۷	۵۱/۳۶۵۱۱	خانی‌آباد-خیابان بخشنده-نیش خیابان لقمان شمالی	گودبرداری پروژه مسکونی
۹	۳۵/۶۴۹۸۵	۵۱/۳۳۴۹۷	شهرک ولیعصر-خیابان حیدری-نیش کوچه عادل	چاهک حفره شده برای انتقال فاضلاب	۳۴	۳۵/۶۲۳۶۶	۵۱/۳۶۵۴۹	شکوفه جنوبی-خیابان بخشنده-خیابان رازی	گودبرداری پروژه مسکونی
۱۰	۳۵/۶۵۰۱۴	۵۱/۳۲۸۲۳	منطقه ۱۸- شهرک ولیعصر-ضلع شرقی پارک قائم	گودبرداری پروژه عمرانی	۳۵	۳۵/۶۱۷۵۲	۵۱/۳۹۷۵۵	یاخچی‌آباد-خیابان میعاد جنوبی-نیش کوچه ماستری فرهانی	گودبرداری پروژه مسکونی
۱۱	۳۵/۶۳۵۹۲	۵۱/۳۱۷۶۷	اسماعیل‌آباد-خیابان منصور عمرانی-جنب بیمارستان کودکان حکیم	گودبرداری پروژه عمرانی	۳۶	۳۵/۶۴۵۸۳	۵۱/۴۰۸۸۷	منطقه ۱۶-تقاطع بزرگراه بعثت و شهید رجایی	محل احداث سیلو شهید اسدزاده
۱۲	۳۵/۶۳۷۳۸	۵۱/۳۲۸۳۶	اسماعیل‌آباد-خیابان منصور عمرانی-روبروی بوستان عمرانی-محل خیابان در حال احداث	کانال ایجاد شده برای احداث بزرگراه	۳۷	۳۵/۶۳۵۱۶	۵۱/۴۳۵۳۱	فدائیان اسلام-نیش افشارنو	گودبرداری مجتمع تجاری- اداری
۱۳	۳۵/۶۸۸۹	۵۱/۳۴۶۱۹	تقاطع استاد معین و هاشمی	چاهک حفره شده برای انتقال فاضلاب	۳۸	۳۵/۶۲۸۲	۵۱/۴۱۹	بلوار دستواره-بعد از کوچه کاظمی-روبروی هنرستان دخترانه	محل احداث ساختمان‌های مسکونی
۱۴	۳۵/۶۷۸۴۸	۵۱/۳۴۷۲۹	تقاطع سی متری جی- شهید هادی زاهد	پارکینگ طبقاتی توفیقی	۳۹	۳۵/۶۴۶۳	۵۱/۴۲۵۸۱	اتوبان بعثت-نیش خیابان تقوی	گودبرداری ساختمان اداری- تجاری
۱۵	۳۵/۶۵۷۰۶	۵۱/۳۷۲۶۴	محله فلاح تقاطع خیابان ابوذر-حقیقی جنوبی	گودبرداری پروژه مسکونی	۴۰	۳۵/۶۲۱۳	۵۱/۴۵۶۵۵	بزرگراه آزادگان-دولت آباد-پارک جنگلی توسکاه	گودبرداری احداث خروجی (ع) امام علی
۱۶	۳۵/۶۵۹۷۲	۵۱/۳۷۶۶۲	محله فلاح-تقاطع خیابان رشید جهانی و شهدای مدافع حرم	گودبرداری پروژه عمرانی	۴۱	۳۵/۶۰۹۸۸	۵۱/۳۸۹۸۹	بزرگراه تندگویان- صالح آباد غربی-نیش کوچه حبیبی	گودبرداری پروژه مسکونی

جدول پیوست ۱- ادامه

شماره نمونه	N	E	محل نمونه برداری	توضیحات	شماره نمونه	N	E	محل نمونه برداری	توضیحات
۱۷	۳۵/۶۵۸۴۸	۵۱/۳۸۳۹۴	جوادیه-خیابان دشت آزادگان-کوچه نصیری	گودبرداری پروژه مسکونی	۴۲	۳۵/۵۹۹۲۸	۵۱/۳۹۷۶۷	بزرگراه بهشت زهرا- صالح آباد شرقی- جنب امام زاده ابراهیم	کانال ایجاد شده برای احداث کانال آب
۱۸	۳۵/۶۶۸۲۹	۵۱/۳۸۶۹	خیابان هلال احمر- کوچه طالشی	گودبرداری پروژه مسکونی	۴۳	۳۵/۵۵۶۶۶	۵۱/۴۱۵۱۳	جاده قدیم قم تهران-پشت کارخانه دیزل پمپ پارسا	گودبرداری پروژه عمرانی
۱۹	۳۵/۶۷۱۲۲	۵۱/۳۹۵۸۹	خیابان کارگر جنوبی- تقاطع مدرس جنوبی- پشت تعمیرگاه هیدرولیک صادق	گودبرداری پروژه مسکونی	۴۴	۳۵/۵۷۵۲	۵۱/۴۲۳۲۹	جاده قدیم قم تهران-خیابان صاحب الزمان	گودبرداری پروژه مسجد
۲۰	۳۵/۶۸۲۵۵	۵۱/۴۱۰۴۷	پارک شهر-نیش خیابان بهشت	گودبرداری ساختمان تجاری	۴۵	۳۵/۶۰۹۴۹	۵۱/۴۵۱۲۶	شهر ری-خیابان محمدی-خیابان بهشت	گودبرداری پروژه مسکونی
۲۱	۳۵/۶۶۹۷	۵۱/۴۳۷۵	میدان قیام-خیابان شهید مختاری-کوچه شهید رستگارانژاد	گودبرداری پروژه عمرانی	۴۶	۳۵/۵۹۸۶۲	۵۱/۴۱۹۰۳	جنب ایستگاه متروی شهر ری	گودبرداری پروژه عمرانی
۲۲	۳۵/۶۷۷۱۵	۵۱/۴۳۸۷	خیابان ری-بعد از پل آهنگ	گودبرداری پروژه عمرانی	۴۷	۳۵/۶۰۰۴۱	۵۱/۴۱۸۶۶	شهر ری-بزرگراه رجایی-جنب مجتمع مسکونی خاتم الانبیا	چاهک حفر شده برای خط انتقال فاضلاب
۲۳	۳۵/۶۶۸۹۲	۵۱/۴۴۵۱۸	خیابان هفده شهریور- نرسیده به میدان خراسان-روبروی جهان پناه	گودبرداری ساختمان اداری-تجاری	۴۸	۳۵/۶۱۴۸۱	۵۱/۴۲۲۴۶	جوانمرد قصاب- دستواره-نرسیده به میدان مادر	گودبرداری پروژه عمرانی
۲۴	۳۵/۶۵۶۹۴	۵۱/۴۷۹۰۸	منطقه ۱۴-نبرد جنوبی- خیابان آقاجانلو-کوچه گلستان ۴۳	گودبرداری پروژه مسکونی	۴۹	۳۵/۶۲۰۵	۵۱/۴۴۴۳۶	دولت آباد-بلوار بروجردی-نیش خیابان شکوفه	از گمانه ایجاد شده توسط دستگاه حفاری برای پروژه مسکونی
۲۵	۳۵/۶۶۳۶۲	۵۱/۴۸۵۲۸	منطقه ۱۴-اتوبان شهید محلاتی-بلوار ابوذر-محل احداث مسجد	گودبرداری پروژه مسجد	۵۰	۳۵/۵۸۸۴۶	۵۱/۴۴۳۳۳	شهری-میدان شهید سلیمانی-خیابان قدس	گودبرداری پروژه مسکونی

جدول پیوست ۲- تنش قائم (σ) و تنش برشی (τ) آزمایش برش مستقیم نمونه‌ها

شماره نمونه	درصد رطوبت	$\tau(\sigma=98)$	$\tau(\sigma=196)$	$\tau(\sigma=294)$	شماره نمونه	درصد رطوبت	$\tau(\sigma=98)$	$\tau(\sigma=196)$	$\tau(\sigma=294)$
۱	۸٪	۱۱۹/۶۵	۱۶۵/۷۴	۲۱۱/۸۳	۲۶	۸٪	۸۴/۳۴	۱۳۵/۳۴	۱۸۶/۳۳
	۱۴٪	۱۱۰/۸۲	۱۶۱/۸۲	۲۱۳/۷۹		۱۴٪	۸۹/۲۴	۱۳۲/۳۹	۱۷۵/۵۵
	۳۱٪	۸۲/۳۸	۱۲۷/۴۹	۱۷۳/۵۸		۳۱٪	۵۱/۹۸	۷۹/۴۴	۱۰۷/۸۸
۲	۸٪	۱۲۳/۵۷	۱۶۸/۶۸	۲۱۳/۷۹	۲۷	۸٪	۱۰۰/۰۳	۱۴۹/۰۷	۱۹۷/۱۲
	۱۴٪	۱۱۴/۷۴	۱۶۵/۷۴	۲۱۵/۷۵		۱۴٪	۱۰۷/۸۸	۱۵۱/۰۳	۱۹۵/۱۶
	۳۱٪	۷۷/۴۸	۱۲۰/۶۳	۱۶۴/۷۶		۳۱٪	۷۱/۵۹	۹۶/۱۱	۱۲۰/۶۳
۳	۸٪	۸۱/۴۰	۱۴۴/۱۶	۲۰۷/۹۱	۲۸	۸٪	۹۰/۲۲	۱۳۲/۳۹	۱۷۳/۵۸
	۱۴٪	۷۳/۵۵	۱۲۹/۴۵	۱۸۴/۳۷		۱۴٪	۸۰/۴۲	۱۱۸/۶۶	۱۵۵/۹۳
	۳۱٪	۶۲/۷۶	۱۱۰/۸۲	۱۵۸/۸۷		۳۱٪	۵۶/۸۸	۷۹/۴۴	۱۰۱/۹۹
۴	۸٪	۱۰۵/۹۲	۱۶۱/۸۲	۲۱۸/۷۰	۲۹	۸٪	۹۲/۱۹	۱۳۵/۳۴	۱۷۹/۴۷
	۱۴٪	۹۶/۱۱	۱۵۱/۰۳	۲۰۴/۹۷		۱۴٪	۹۷/۰۹	۱۴۲/۲۰	۱۸۸/۲۹
	۳۱٪	۵۹/۸۲	۱۰۲/۹۷	۱۴۷/۱۱		۳۱٪	۵۵/۹۰	۸۱/۴۰	۱۰۶/۹۰
۵	۸٪	۱۱۴/۷۴	۱۷۳/۵۸	۲۳۳/۴۱	۳۰	۸٪	۸۵/۳۲	۱۲۷/۴۹	۱۶۸/۶۸
	۱۴٪	۱۰۷/۸۸	۱۵۷/۸۹	۲۰۷/۹۱		۱۴٪	۷۲/۵۷	۱۱۰/۸۲	۱۴۸/۰۹
	۳۱٪	۷۲/۵۷	۱۲۵/۵۳	۱۷۸/۴۹		۳۱٪	۴۹/۰۴	۷۰/۶۱	۹۱/۲۱
۶	۸٪	۸۲/۳۸	۱۳۹/۲۶	۱۹۷/۱۲	۳۱	۸٪	۱۰۱/۰۱	۱۴۴/۱۶	۱۸۸/۲۹
	۱۴٪	۷۳/۵۵	۱۲۱/۶۱	۱۶۸/۶۸		۱۴٪	۹۹/۰۵	۱۳۹/۲۶	۱۷۸/۴۹
	۳۱٪	۷۲/۵۷	۱۲۶/۵۱	۱۷۹/۴۷		۳۱٪	۶۳/۷۵	۸۹/۲۴	۱۱۳/۷۶
۷	۸٪	۱۰۸/۸۶	۱۵۸/۸۷	۲۰۹/۸۷	۳۲	۸٪	۹۲/۱۹	۱۲۶/۵۱	۱۵۹/۸۵
	۱۴٪	۹۶/۱۱	۱۴۷/۱۱	۱۹۹/۰۸		۱۴٪	۸۵/۳۲	۱۲۱/۶۱	۱۵۶/۹۱
	۳۱٪	۷۰/۶۱	۱۱۶/۷۰	۱۶۲/۸۰		۳۱٪	۵۳/۹۴	۶۶/۶۹	۷۸/۴۶
۸	۸٪	۱۰۷/۸۸	۱۵۵/۹۳	۲۰۳/۰۰	۳۳	۸٪	۱۱۵/۷۲	۱۵۷/۸۹	۲۰۰/۰۶
	۱۴٪	۱۲۶/۵۱	۱۶۹/۶۶	۲۱۳/۷۹		۱۴٪	۱۳۰/۴۳	۱۷۸/۴۹	۲۲۵/۵۶
	۳۱٪	۷۵/۵۱	۹۹/۰۵	۱۲۳/۵۷		۳۱٪	۸۳/۳۶	۱۰۴/۹۳	۱۲۷/۴۹
۹	۸٪	۸۳/۳۶	۱۴۳/۱۸	۲۰۲/۰۲	۳۴	۸٪	۱۱۵/۷۲	۱۶۵/۷۴	۲۱۵/۷۵
	۱۴٪	۷۸/۴۶	۱۳۵/۳۴	۱۹۲/۲۲		۱۴٪	۱۱۲/۷۸	۱۶۴/۷۶	۲۱۷/۷۲
	۳۱٪	۶۵/۷۱	۱۱۵/۷۲	۱۶۶/۷۲		۳۱٪	۶۵/۷۱	۱۰۷/۸۸	۱۵۱/۰۳
۱۰	۸٪	۱۱۷/۶۸	۱۶۵/۷۴	۲۱۲/۸۱	۳۵	۸٪	۱۰۸/۸۶	۱۵۲/۰۱	۱۹۶/۱۴
	۱۴٪	۱۰۱/۰۱	۱۴۴/۱۶	۱۸۶/۳۳		۱۴٪	۱۱۴/۷۴	۱۵۹/۸۵	۲۰۵/۹۵
	۳۱٪	۷۴/۵۳	۹۶/۱۱	۱۱۶/۷۰		۳۱٪	۶۸/۶۵	۸۷/۲۸	۱۰۵/۹۲
۱۱	۸٪	۱۰۶/۹۰	۱۴۶/۱۲	۱۸۴/۳۷	۳۶	۸٪	۹۶/۱۱	۱۵۲/۰۱	۲۰۸/۸۹
	۱۴٪	۸۶/۳۰	۱۲۵/۵۳	۱۶۳/۷۸		۱۴٪	۸۱/۴۰	۱۳۲/۳۹	۱۸۲/۴۱
	۳۱٪	۵۵/۹۰	۹۳/۱۷	۱۲۹/۴۵		۳۱٪	۶۸/۶۵	۱۱۳/۷۶	۱۵۹/۸۵
۱۲	۸٪	۱۱۳/۷۶	۱۶۱/۸۲	۲۰۸/۸۹	۳۷	۸٪	۸۸/۳۶	۱۴۳/۱۸	۱۹۷/۱۲
	۱۴٪	۹۹/۰۵	۱۴۴/۱۶	۱۹۰/۲۶		۱۴٪	۷۹/۴۴	۱۲۹/۴۵	۱۷۹/۴۷
	۳۱٪	۵۲/۹۶	۸۵/۳۲	۱۱۶/۷۰		۳۱٪	۵۹/۸۲	۱۰۱/۹۹	۱۴۳/۱۸
۱۳	۸٪	۱۱۵/۷۲	۱۶۱/۸۲	۲۰۷/۹۱	۳۸	۸٪	۹۰/۲۲	۱۳۰/۴۳	۱۶۹/۶۶
	۱۴٪	۹۶/۱۱	۱۳۸/۲۸	۱۷۹/۴۷		۱۴٪	۹۶/۱۱	۱۳۴/۳۶	۱۷۱/۶۲
	۳۱٪	۴۶/۰۹	۷۲/۵۷	۹۸/۰۷		۳۱٪	۵۸/۸۴	۸۲/۳۸	۱۰۶/۹۰

جدول پیوست ۲- ادامه

شماره نمونه	درصد رطوبت	$\tau(\sigma=98)$	$\tau(\sigma=196)$	$\tau(\sigma=294)$	شماره نمونه	درصد رطوبت	$\tau(\sigma=98)$	$\tau(\sigma=196)$	$\tau(\sigma=294)$
۱۴	۸٪	۷۴/۵۳	۱۲۴/۵۵	۱۷۵/۵۵	۳۹	۱۴٪	۶۹/۶۳	۱۱۳/۷۶	۱۵۸/۸۷
	۳۱٪	۵۶/۸۸	۱۰۱/۹۹	۱۴۶/۱۲		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۶۹/۶۳	۱۱۳/۷۶	۱۵۸/۸۷		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۱۵	۸٪	۱۰۲/۹۷	۱۴۷/۱۱	۱۹۱/۲۴	۴۰	۳۱٪	۶۲/۷۶	۸۹/۲۴	۱۱۴/۷۴
	۳۱٪	۵۱/۰۰	۷۸/۴۶	۱۰۴/۹۳		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۹۷/۰۹	۱۳۸/۲۸	۱۷۹/۴۷		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۱۶	۸٪	۱۰۱/۰۱	۱۴۵/۱۴	۱۸۹/۲۸	۴۱	۳۱٪	۶۰/۸۰	۷۹/۴۴	۹۹/۰۵
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۴/۱۵	۱۲۱/۶۱		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۱۰۰/۰۳	۱۳۸/۲۸	۱۷۷/۵۱		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۱۷	۸٪	۱۰۸/۸۶	۱۵۳/۹۷	۲۰۰/۰۶	۴۲	۳۱٪	۶۰/۸۰	۷۹/۴۴	۹۹/۰۵
	۳۱٪	۶۵/۷۱	۸۷/۲۸	۱۰۹/۸۴		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۱۰۷/۸۸	۱۴۶/۱۲	۱۸۳/۳۹		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۱۸	۸٪	۱۰۱/۰۱	۱۴۵/۱۴	۱۸۸/۲۹	۴۳	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۶/۱۱	۱۲۴/۵۵		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۹۱/۲۱	۱۲۹/۴۵	۱۶۷/۷۰		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۱۹	۸٪	۹۲/۱۹	۱۳۸/۲۸	۱۸۴/۳۷	۴۴	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۶/۱۱	۱۲۴/۵۵		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۹۱/۲۱	۱۳۲/۳۹	۱۷۲/۶۰		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۲۰	۸٪	۸۸/۲۶	۱۳۱/۴۱	۱۷۵/۵۵	۴۵	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۶/۶۹	۹۲/۱۹	۱۱۷/۶۸		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۱۰۰/۰۳	۱۴۵/۱۴	۱۹۱/۲۴		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۲۱	۸٪	۹۲/۱۹	۱۳۲/۳۹	۱۷۲/۶۰	۴۶	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۶/۱۱	۱۲۴/۵۵		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۸۴/۳۴	۱۲۸/۴۷	۱۷۲/۶۰		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۲۲	۸٪	۱۰۲/۹۷	۱۴۸/۰۹	۱۹۴/۱۸	۴۷	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۶/۱۱	۱۲۴/۵۵		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۱۰۱/۰۱	۱۴۳/۱۸	۱۸۴/۳۷		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۲۳	۸٪	۱۰۲/۹۷	۱۴۸/۰۹	۱۹۴/۱۸	۴۸	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۶/۱۱	۱۲۴/۵۵		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۱۰۰/۰۳	۱۴۰/۲۴	۱۷۹/۴۷		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۲۴	۸٪	۸۰/۴۲	۱۲۱/۶۱	۱۶۲/۸۰	۴۹	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۴۳/۱۵	۵۶/۸۸	۷۰/۶۱		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۷۹/۴۴	۱۱۵/۷۲	۱۵۱/۰۳		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹
۲۵	۸٪	۱۰۲/۹۷	۱۴۶/۱۲	۱۹۰/۲۶	۵۰	۳۱٪	۶۱/۷۸	۸۱/۰۷	۹۸/۱۱
	۳۱٪	۶۷/۶۷	۹۳/۱۷	۱۷۱/۶۲		۸٪	۹۵/۱۳	۱۳۸/۲۸	۱۸۲/۴۱
	۱۴٪	۱۰۰/۰۳	۷۹/۴۴	۱۰۰/۰۳		۱۴٪	۸۲/۳۸	۱۲۰/۶۳	۱۵۷/۸۹