

بررسی اثرات دست‌خوردگی نمونه بر روی خصوصیات مقاومتی خاک رسی

محمد درفشی‌نوا^۱، علیرضا علیزاده مجدی^۲ و روزبه دبیری^{۳*}

۱- کارشناسی‌ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

نویسنده مسئول: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۵

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۳۱

چکیده

یکی از موضوعات چالش برانگیز در زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، تاثیر دست‌خوردگی نمونه‌های خاک در تعیین خصوصیات مختلف فیزیکی و مقاومتی می‌باشد. دست‌خوردگی در کلیه مراحل شامل حفاری گمانه، تهیه، ارسال و آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش در آزمایشگاه روی می‌دهد. در عمل تهیه نمونه دست‌نخورده ایده‌آل ممکن نمی‌باشد. بدلیل مشکلات تهیه نمونه‌های دست‌نخورده به ویژه در لایه‌های خاکی، در بیشتر مواقع آزمایش بر روی نمونه بازسازی شده انجام می‌گیرد. مطالعات متعددی در مورد روشهای ارزیابی دست‌خوردگی نمونه انجام گرفته است. هدف این تحقیق ارزیابی اثرات دست‌خوردگی بر روی خصوصیات مقاومتی خاکهای رسی براساس مطالعه موردی شهر تبریز می‌باشد. با انجام آزمایشات فشاری محصور نشده و برش مستقیم بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده، اثرات دست‌خوردگی و حساسیت نمونه‌ها بررسی شده است. به طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌های بازسازی شده در اثر دست‌خوردگی حدود ۲۰ الی ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. ضمن تعیین ضریب همبستگی اسپیرمن، تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی به منظور برآورد مقاومت فشاری نمونه دست‌نخورده انجام گردید. نسبت حساسیت بین ۱ الی ۲ بدست آمده و در رده با حساسیت کم قرار می‌گیرند. همبستگی بین نتایج مقاومت نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده در آزمایش برش مستقیم با انجام تحلیل رگرسیون مطالعه گردید. بر اساس این نتایج، چسبندگی نمونه‌های دست‌خورده به طور متوسط ۱۲/۴ درصد کاهش یافته ولی برای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی رابطه معنی‌داری بدست نمی‌آید.

واژه‌های کلیدی: خاک رسی، نمونه بازسازی شده، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی

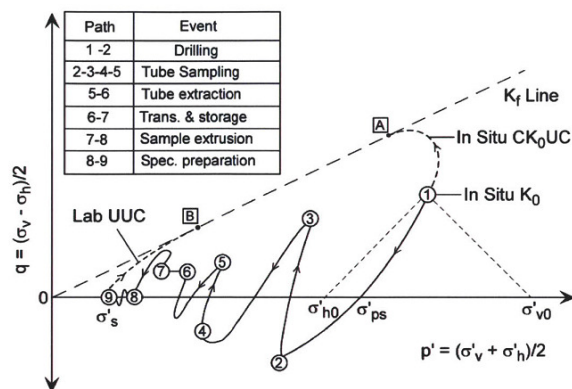
۱- پیشگفتار

دست‌نخورده، در بیشتر مواقع آزمایش بر روی نمونه‌های بازسازی شده خاک بر اساس وزن مخصوص و رطوبت طبیعی درجا انجام می‌گیرد در این حالت ارزیابی اثرات دست‌خوردگی در نتایج از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. بطور کلی دست‌خوردگی در نمونه خاک باعث کاهش مقادیر پارامترهای مقاومتی آن نسبت به مقاومت واقعی آن در شرایط طبیعی درجا می‌گردد. مطابق شکل (۱)، لامب و همکاران (۱۹۶۳) به طور خلاصه تغییرات مسیر تنش‌های وارده به یک نمونه خاک را از حالت برجا یعنی نقطه شماره ۱ تا زمان آمدگی نمونه در آزمایشگاه یعنی نقطه شماره ۹ ارائه نموده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که چگونه مراحل مختلف حفاری، نمونه‌گیری تیوبی، آماده‌سازی و قراردادن نمونه در دستگاه آزمایش سه محوری می‌تواند مسیر تنش خاک را در مقایسه با حالت طبیعی آن به طور پیچیده‌ای تغییر دهد و اختلاف قابل توجه در مسیر تنش بارگذاری خاک در مدت گسیختگی برشی زهکشی نشده

ارزیابی میزان تاثیر دست‌خوردگی نمونه‌های خاک بر روی خصوصیات مختلف فیزیکی و مکانیکی و حتی شیمیایی آن‌ها، یکی از موضوعات تحقیقی در زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک می‌باشد. این موضوع با توجه به لزوم انتخاب صحیح پارامترهای مختلف واقعی خاک به منظور انجام طراحی‌های مناسب و بهینه فونداسیون انواع سازه‌ها و همچنین ارزیابی موضوعات مختلف از قبیل پایداری شيروانی‌های خاکی، سازه‌های حائل و نگهبان و انواع گودبرداری‌ها حائز اهمیت می‌باشد. به طور کلی بروز اثرات دست‌خوردگی حتی در نمونه‌های به ظاهر دست‌نخورده اجتناب‌ناپذیر می‌باشد و در کلیه مراحل حفاری گمانه، تهیه و ارسال نمونه به آزمایشگاه و آماده‌سازی و انجام آزمایش، این اثرات به وجود می‌آید. در واقع تهیه نمونه دست‌نخورده ایده‌آل ممکن نمی‌باشد. لذا به خصوص در مورد خاک‌ها، با توجه به مشکلات و هزینه تهیه نمونه‌های

گفته شده به دلیل اثرات دست‌خوردگی قابل توجه می‌باشد. برای یک نمونه بازسازی شده به دلیل تغییر در اسکلت طبیعی خاک، اختلاف مسیر تنش نمونه تا مرحله گسیختگی نسبت به حالت طبیعی و درجای خاک به مراتب بیشتر خواهد بود (علیزاده و همکاران، ۲۰۱۹).

تا پوش گسیختگی بوجود آورد. به عبارت دیگر برای حالت برجای خاک، مسیر تنش از نقطه شماره ۱ طبق این شکل شروع گردیده و به پوش گسیختگی منتهی می‌شود در حالی که برای نمونه با اثرات دست‌خوردگی مسیر تنش از نقطه شماره ۹ شروع و تا پوش گسیختگی ادامه می‌یابد. چنانکه ملاحظه می‌گردد اختلاف مسیر تنش در دو حالت



شکل ۱. مقایسه مسیر تنش کلیه مراحل نمونه‌گیری با حالت برجای خاک توسط لد و لامب (کانتوپولوس، ۲۰۱۲)

Fig. 1. Comparison of the stress path of all sampling stages with the in-situ condition of the soil by Ladd and Lamb (Kontopoulos, 2012).

لیون در سال ۱۹۹۷ دو روش کیفی ساده را برای مشخص نمودن کیفیت نمونه توسعه دادند. این محققان سعی کردند تا موضوع دست‌خوردگی را به کرنش حجمی حاصل از تحکیم مجدد در اثر تنش موثر در جای خاک مرتبط نمایند. ترزاقی و همکاران (۱۹۹۶) از روش کلستاد و اندرسون اقتباس کرده و پارامتر SQD^۱ را به عنوان تعریف کیفیت نمونه معرفی کرده‌اند. ایشان جدول ۲ رده‌بندی نمونه‌ها از بهترین کیفیت (A) تا بدترین کیفیت (E) با در نظر گرفتن کرنش حجمی نمونه را ارائه نمودند. همچنین از نظر ایشان تعیین پارامترهای مهندسی خاک از نمونه‌های با SQD منطبق با رده A یا B می‌تواند منطقی بوده و نمونه‌های خاک با دست‌خوردگی در سه طبقه‌بندی C, D و E نباید برای تعیین پارامترهای مهندسی مورد استفاده قرار گیرند. لیون و همکاران (۱۹۹۷) سعی نمودند تا دست‌خوردگی را به نسبت $\Delta e/e_0$ ، یعنی نسبت تغییر تخلخل در تحکیم مجدد نمونه در اثر تنش موثر اولیه درجا به تخلخل اولیه مرتبط نمایند. این معیار نیز در جدول ۲ ارائه شده است در این جدول OCR^۲ نسبت پیش تحکیم یافتگی رس می‌باشد (کانتوپولوس، ۲۰۱۲).

تحقیقاتی که در خصوص ارزیابی اثرات دست‌خوردگی خاک انجام گرفته به طور کلی بر اساس بررسی و مقایسه خصوصیات مختلف خاک در حالت‌های درجا و آزمایشگاهی و یا نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده یا بازسازی شده بوده است که به طور خلاصه به چند مورد اشاره می‌شود. طبق نظر کلستاد و اندرسون (۱۹۷۹) برای ارزیابی میزان دست‌خوردگی خاک پیشنهاد کردند تا کرنش قائم در مدت تحکیم در اثر اعمال تنش موثر قائم مربوط به محل و عمق تهیه نمونه اندازه‌گیری شود. برای کیفیت خوب نمونه، کرنش خیلی کمی در اثر اعمال این تنش انتظار می‌رود. در حالی که در نمونه‌های با دست‌خوردگی بالا، کرنش‌های زیادی در اثر این بارگذاری روی خواهد داد. طبق جدول ۱ برای کرنش‌های کمتر از ۱ درصد، میزان دست‌خوردگی نمونه ناچیز و سطح کیفیت نمونه A یعنی خیلی خوب و عالی و به همین ترتیب برای کرنش‌های بزرگ‌تر B کیفیت خوب، C نسبتاً خوب بوده در حالی که D و E به ترتیب کیفیت‌های ضعیف و خیلی ضعیف برای نمونه پیشنهاد گردیده است (کانتوپولوس، ۲۰۱۲). ترزاقی و همکاران (۱۹۹۶) و یک سال بعد از آن‌ها

² Over Consolidation Ratio, OCR

¹ Specimen Quality Designation, SQD

می‌باشد به عبارت دیگر شاخص فشردگی در نمونه دست‌خورده نسبت به شرایط واقعی در محل، کاهش می‌یابد که می‌تواند بر روی محاسبات نشست سازه نتایج خلاف اطمینان و گمراه کننده به همراه داشته باشد (کانتوپولوس، ۲۰۱۲).

به طور کلی اثر دست‌خوردگی نمونه برای رس تحکیم یافته عادی در نتایج آزمایش تحکیم مانند شکل (۲) می‌تواند خلاصه شود. بنابراین افزایش دست‌خوردگی با انحنای بیشتر در منحنی فشردگی مربوط بوده و لذا نسبت به شیب خط فشاری حالت درجا با کاهش در شاخص فشردگی^۳ همراه

جدول ۱. ارزیابی کیفی نمونه به روش کلاستاد و اندرسون (کانتوپولوس، ۲۰۱۲)

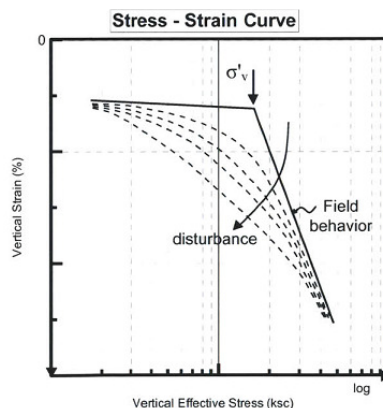
Table 1. Anderson and Kolstad's qualitative assessment of the sample (Kontopoulos, 2012)

کرنش قائم در σ'_{vo}	سطح کیفیت نمونه
$< 1\%$	A
$1-2\%$	B
$2-4\%$	C
$4-8\%$	D
$> 8\%$	E

جدول ۲. معیارهای دست‌خوردگی نمونه بر اساس تغییر حجم و تخلخل نمونه در تحکیم مجدد (کانتوپولوس، ۲۰۱۲)

Table 2. Sample disturbance criteria based on volume change and sample void ratio in reconsolidation (Kontopoulos, 2012)

Specimen Auality Designation (SQD) (Terzaghi et al.1996)		$\Delta e/e_o$ Criteria (Lunne et al. 1997)		
Volumetric Strain (%)	SQD	OCR = 1-2 $\Delta e/e_o$	OCR =2-4 $\Delta e/e_o$	Rating
< 1	A	$0.04-0.07$	< 0.03	Very good to excellent
1-2	B	$0.07-0.14$	$0.03-0.05$	Good to fair
2-4	C	> 0.14	$0.05-0.10$	Poor
4-8	D		> 0.10	Very poor
> 8	E			



شکل ۲. اثرات دست‌خوردگی بر روی منحنی تنش - کرنش در نتایج آزمایش تحکیم (کانتوپولوس، ۲۰۱۲)

Fig. 2. The effects of disturbance on the stress-strain curve in the consolidation test results (Kontopoulos, 2012)

متعددی بر روی حساسیت خاک‌های رسی نرم^۱ انجام داده‌اند و رده‌بندی خاک‌ها از نظر حساسیت از طرف محققان مختلف ارائه شده است. طبقه‌بندی‌های اسکمپتون و همکاران (۱۹۵۲)، سوئدی و آمریکائی و راهنمای مهندسی کانادا^۲ جهت طبقه‌بندی حساسیت خاک‌ها به ترتیب در جدول‌های ۳ الی ۶ ارائه شده است (کارینا و همکاران، ۲۰۱۰).

اثرات دست‌خوردگی باعث کاهش مقاومت فشاری محصور نشده نیز می‌گردد. همچنین حساسیت در خاک‌های چسبنده از نسبت مقاومت فشاری نمونه دست‌خورده به مقاومت فشاری حالت بازسازی شده تعریف می‌گردد. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد خاک به اثرات دست‌خوردگی حساسیت بیشتری خواهد داشت. هولتز و کوکس (۱۹۸۱) و توپیتی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعات

² Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM

³ Compression coefficient, Cc

¹ Soft Clay

جدول ۳. رده‌بندی خاک‌های رسی بر اساس حساسیت طبق نظر (اسکمپتون و همکاران، ۱۹۵۲)

Table 3. Classification of clay soils based on sensitivity according to Skempton et al. in 1952 (Skempton et al., 1952)

طبقه‌بندی	St
رس غیر حساس	۱ ~
رس با حساسیت پایین	۲-۱
رس با حساسیت متوسط	۴-۲
رس با حساسیت زیاد	۸-۴
رس با حساسیت فوق‌العاده	>۸
رس بسیار حساس	>۱۶

جدول ۴. طبقه‌بندی بولز برای انواع خاک‌ها از نظر حساسیت (کارینا و همکاران، ۲۰۱۰)

Table 4. Bowles's classification for all types of soils in terms of sensitivity (Karina et al., 2010)

طبقه‌بندی	St
رس غیر حساس	$4St \leq$
رس حساس	$8 < St \leq 4$
رس فوق‌العاده حساس	$8St >$

جدول ۵. طبقه‌بندی‌های سوئد و آمریکا برای انواع خاک‌ها از نظر حساسیت (کارینا و همکاران، ۲۰۱۰)

Table 5. Swedish and American classifications for soil types in terms of sensitivity (Karina et al., 2010)

طبقه‌بندی	St	
	آمریکا	سوئد
رس با حساسیت پایین	۴-۲	<۱۰
رس با حساسیت متوسط	۸-۴	۳۰-۱۰
رس با حساسیت بالا	۱۶-۸	۵۰-۳۰
رس بسیار حساس	>۱۶	۱۰۰-۵۰
رس فوق‌العاده بسیار حساس		>۱۰۰

جدول ۶. طبقه‌بندی راهنمای مهندسی پی کانادا (CFEM) برای انواع خاک‌ها از نظر حساسیت (کارینا و همکاران، ۲۰۱۰)

Table 6. Classification of the Canadian Foundation Engineering Manual for all types of soils in terms of sensitivity (Karina et al., 2010)

طبقه‌بندی	St
حساسیت پایین	<۲
حساسیت متوسط	۴-۲
حساسیت بالا	۸-۴
بسیار حساس	>۱۶

گزارش شده است. افزایش و یزدانی (۲۰۱۹) و افزایش و همکاران (۲۰۱۹) مطالعاتی به منظور بررسی اثر دست‌خوردگی بر روی نتایج آزمایش برش مستقیم انجام دادند در این تحقیق آزمایش‌های برش آزمایشگاهی به ابعاد $۱۵ \times ۳۰ \times ۳۰$ سانتی‌متر و نتایج آزمایش‌های برش برجا به ابعاد $۱۵ \times ۳۰ \times ۳۰$ سانتی‌متر و $۳۰ \times ۶۰ \times ۶۰$ سانتی‌متر بر روی یک نمونه خاک انجام شد و از مقایسه نتایج مشاهده گردید که نتایج آزمایشگاهی نسبت به نتایج برجا دارای چسبندگی کمتر ولی زاویه اصطکاک بیشتر می‌باشند. رس‌های با حساسیت بالا، درجات مختلفی از یک ویژگی

لیانگ و همکاران (۲۰۱۵) مطالعاتی بر روی رابطه خاصیت حساسیت رس‌ها و نتیجه آزمایش نفوذ استاندارد^۱ انجام داده‌اند. در این تحقیق با افزایش حساسیت خاک، نفوذ استاندارد کاهش می‌یابد. گلیسند و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی، مقاومت برشی رسوبات نرم پل دریاچه ارومیه را بررسی نموده‌اند. در این تحقیق حساسیت رسوبات با استفاده از نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده برابر ۴ بوده و نسبت حساسیت براساس نتایج بازسازی شده نسبت به نتایج آزمایش صحرایی^۲ CPTu تا مقدار ۵ نیز

² Cone Penetration Test

¹ Standard Penetration Test, SPT

ریزدانه چسبنده رسی، سیلتی و ماری می‌باشد. شایان ذکر است مطالعات قابل‌توجهی بر روی خصوصیات خاک‌های چسبنده رسی و سیلتی شهر تبریز توسط محققان مختلف انجام گرفته است که با توجه به انجام مطالعه موردی تحقیق حاضر بر روی این خاک‌ها به مواردی اشاره می‌گردد. هوشمند و همکاران (۲۰۱۱) بر روی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مارن رسی تبریز مطالعه نموده‌اند. در این تحقیق، خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل این خاک‌ها و رفتار تنش-کرنش آن‌ها با استفاده از آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی بررسی شده است. سه نوع از این خاک‌ها در شهر تبریز به رنگ‌های زرد، سبز و خاکستری یافت می‌شوند. در جدول ۷ خلاصه خصوصیات فیزیکی و خمیری نمونه‌های مارن تبریز ارائه شده است. علیزاده و همکاران (۲۰۱۹) بر روی خصوصیات رسی و ماری تبریز با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد^۷ و روش شبکه عصبی مصنوعی^۸ مطالعاتی انجام داده‌اند. پارسا و همکاران (۲۰۲۲) بر روی مشکلات مارن‌های منطقه نگین پارک شهر تبریز مطالعه نموده‌اند.

با توجه به مشکلات و هزینه تهیه نمونه‌های دست‌نخورده و تهیه نمونه‌های بازسازی شده در بیشتر مواقع آزمایش، ارزیابی اثرات دست‌خوردگی در نتایج حائز اهمیت خواهد بود. در تحقیق حاضر ۱۵ نمونه دست‌نخورده از انواع مارن‌ها حاصل از سه گمانه ماشینی تحقیقاتی در منطقه کوی مرزداران شهر تبریز تهیه گردید. بر روی نمونه‌ها، آزمایشات برش مستقیم و مقاومت فشاری محصور نشده در دو حالت بازسازی‌شده و دست‌نخورده انجام گرفت. اثرات دست‌خوردگی بر روی پارامترهای مقاومت فشاری و برشی خاک و همچنین عدد حساسیت نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همبستگی بین نتایج نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی‌شده در هر بخش مورد بررسی قرار گرفته و با انجام تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی روابط حاکم بر نتایج نمونه‌های مذکور مطالعه شده است.

۲- معرفی محدوده مورد مطالعه

بخش قابل‌توجهی از خاک شهر تبریز واقع در شمال غرب کشور از نوع خاک‌های ماری (رس کرینات‌دار) می‌باشد و رخنمون آن‌ها در بیشتر نواحی این شهر مخصوصاً شمال و

دیگر به نام تیکسوتروپیک^۳ را نیز از خود نشان می‌دهند. این ویژگی افزایش تدریجی مقاومت نمونه‌های دست‌خورده با مرور زمان می‌باشد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) مشابه با تحقیق راگ و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که تیکسوتروپی یک پدیده رئولوژیکی وابسته به زمان است که در بسیاری از مواد پیچیده، به ویژه سیستم‌های کلوئیدی خاک‌های ریزدانه دیده می‌شود. شوش پاشا و همکاران (۲۰۰۵) عوامل موثر بر کاهش مقاومت و زمان بازیافت مقاومت (یعنی پارامترهای حساسیت و تیکسوتروپی) خاک‌های ریزدانه را در استان مازندران مطالعه نموده‌اند. نتایج حاصل از مطالعات و آزمایش‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که برای این خاک‌ها از نوع رسی سیلتی با فعالیت^۴ کم، کاهش مقاومت در اثر دست‌خوردگی کم بوده و معمولاً مقدار زیادی از این مقاومت نیز پس از گذشت زمان نسبتاً کمی بازیابی می‌شود. لیون و همکاران (۲۰۱۱) اثر دست‌خوردگی بر روی رفتار تحکیمی رس‌های نرم دریایی را مطالعه نموده‌اند. طبق نتایج این تحقیق، تاثیر دست‌خوردگی روی ضرایب تحکیم قابل توجه می‌باشد. کانتوپولوس (۲۰۱۲) تاثیر دست‌خوردگی را بر روی فشار پیش تحکیم خاک‌های تحکیم یافته عادی و پیش تحکیم یافته مطالعه نموده‌اند. علیزاده و همکاران (۲۰۲۰) اثرات دست‌خوردگی را بر روی نمونه خاک‌های چسبنده رسی شهر تبریز مطالعه کرده‌اند. در این تحقیق از اندازه‌گیری سرعت موج برشی بر روی خاک محل با روش آزمایش صحرایی درون چاهی^۵ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی در نمونه‌های دست‌نخورده تهیه شده از خاک محل نیز روش آزمایشگاهی المان خمشی^۶ بکار برده شده است. بدلیل اثرات دست‌خوردگی در تهیه نمونه‌های دست‌نخورده، سرعت موج برشی نسبت به شرایط درجا کاهش یافته است. همچنین با بارگذاری نمونه‌ها تحت تنش موثر برجا، سرعت موج برشی افزایش یافته و بخشی از اثرات دست‌خوردگی مربوط به حذف تنش موثر برجا بر روی نمونه جبران می‌گردد و لیکن به دلیل اثرات دست‌خوردگی ناشی از سایر عوامل موثر در دست‌خوردگی، مقدار سرعت موج برشی به مقدار صحرایی خود نمی‌رسد. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده است. کلانشهر تبریز واقع در شمال غربی ایران، دارای خاک‌های متنوع

^۶ Bender Element, BE

^۷ Standard Penetration Test, SPT

^۸ Artificial Neural Network, ANN

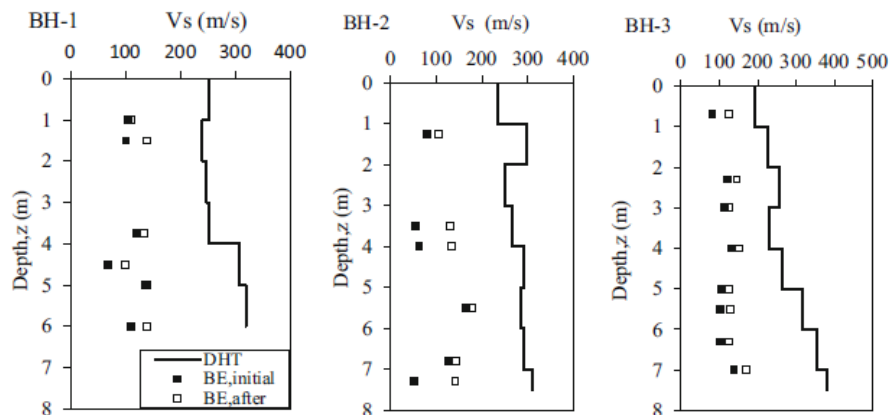
^۳ Tixotropic

^۴ Activity

^۵ Down Hole Test, DHT

منطقه تبریز نشان داده شده است. مارن‌های تبریز به دلیل حرکات زمین‌ساختی در انتهای دوران سوم زمین‌شناسی، دچار چین‌خوردگی و گسلس متعدد گردیده‌اند (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۱). توسط اوحدی و همکاران (۱۹۹۳) مطالعات متعددی بر روی مارن‌ها انجام گرفته است.

شمال شرقی قابل مشاهده می‌باشد. زمان تشکیل این مارن‌ها به دوران‌های زمین‌شناسی میوسن و پلیوسن مربوط می‌گردد. بیشتر مارن‌های تبریز متعلق به بستر باغمیشه می‌باشند. از نظر زمین‌شناسی، بستر باغمیشه بین بستر قرمز بالایی و سازند رسوبات ماهی‌دار متعلق به پلیوسن قرار می‌گیرند. در جدول ۸ ستون چینه‌شناسی



شکل ۳. مقایسه سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده اولیه و بعد از تحکیم به روش المان خمشی با نتایج روش درون چاهی (علیزاده و همکاران، ۲۰۲۰).

Fig. 3. Comparison of the measured shear wave velocity of the initial and after consolidation by bending element with the results of the down Hole test (Alizadeh et al., 2020).

جدول ۷. خلاصه خصوصیات فیزیکی و خمیری مارن تبریز (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۱)

Table 7. Summary of physical and yeast characteristics of Tabriz Marl (Hooshmand et al., 2011)

نوع خاک	طبقه‌بندی خاک	LL (%)	PI (%)	رطوبت (%)	نسبت تخلخل	وزن مخصوص (Kg/cm ³)	فشار تورم (Kg/cm ²)
مارن زرد	CL-CH	۷۵-۵۵	۳۵-۳۰	۲۵	۰/۷۵-۰/۹۵	۱/۷	۱-۲
مارن سبز	CL-CH	۶۵-۵۰	۲۵-۲۰	۲۰	۰/۶۵-۰/۸۵	۱/۸	۱-۲
مارن خاکستری	CL-CH, MH	۶۰-۴۰	۲۰-۱۵	۱۵	۰/۵-۰/۷	۱/۹	۰/۵-۱/۵

جدول ۸. ستون چینه‌شناسی منطقه تبریز (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۱)

Table 8. Stratigraphic column of Tabriz region (Hooshmand et al., 2012)

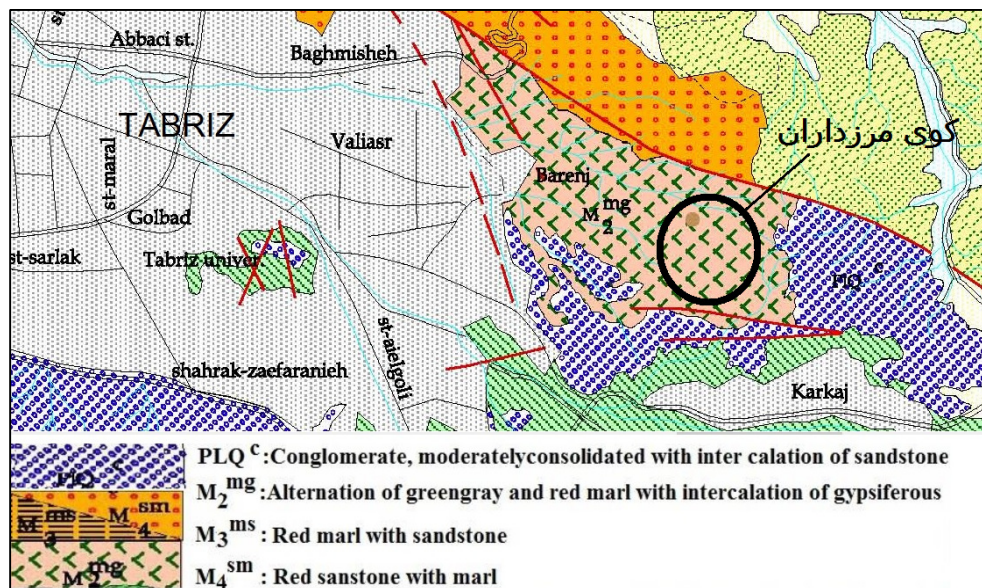
دوران زمین‌شناسی	ستون چینه‌شناسی
کواترنری	آبرفت
پلیوسن	(marl, Lapilli, Diatomite) بستر رودخانه
میوسن	(Marl with shale and lignite) بستر باغمیشه
	(Marl, Sandstone, Siltstone) بسترهای بالایی قرمز

شده است. به منظور تهیه نمونه‌های دست نخورده، سه گمانه به قطر ۷۶ میلی‌متر و به عمق ۳۰ متر به روش دورانی در منطقه کوی مرزداران شهر تبریز حفاری گردید. موقعیت محدوده تحقیق بر روی نقشه مرجع سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در شکل ۴ نشان داده شده است. ۱۵ نمونه به روش مغزه کوربارل با نسبت

بروز اثرات دست‌خوردگی‌های مختلف در نمونه‌گیری از این خاک‌ها و به ویژه در نمونه‌های بازسازی شده نسبت به شرایط طبیعی بر جا قابل توجه می‌باشد که در نهایت بدلیل تاثیرگذاری بر روی پارامترهای انتخابی و مورد نیاز خاک در طراحی پی انواع سازه‌ها می‌تواند حائز اهمیت باشد. این شهر به عنوان محدوده نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته

رخنمون داشته و در عمق بتدریج مارن سبز زیتونی و سپس در عمق‌های بیشتر مارن به رنگ خاکستری و تیره مشاهده می‌گردد.

مساحت کوچک‌تر از ۱۰ درصد از عمق‌های مختلف تهیه گردیدند. نمونه‌ها موم اندود شده و با دقت به آزمایشگاه منتقل گردیدند. تصویری از موقعیت یکی از گمانه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. در این محدوده مارن رسی زرد



شکل ۴. موقعیت محدوده گمانه‌های حفاری شده بر روی نقشه زمین‌شناسی شهر تبریز

Fig. 4. The location of the drilled boreholes on the geological map of Tabriz city



شکل ۵. تصویری از موقعیت یکی از گمانه‌های حفاری شده در کوی مرزداران شهر تبریز

Fig. 5. General view of the location of one of the drilled boreholes in Marzadaran Allay, Tabriz city

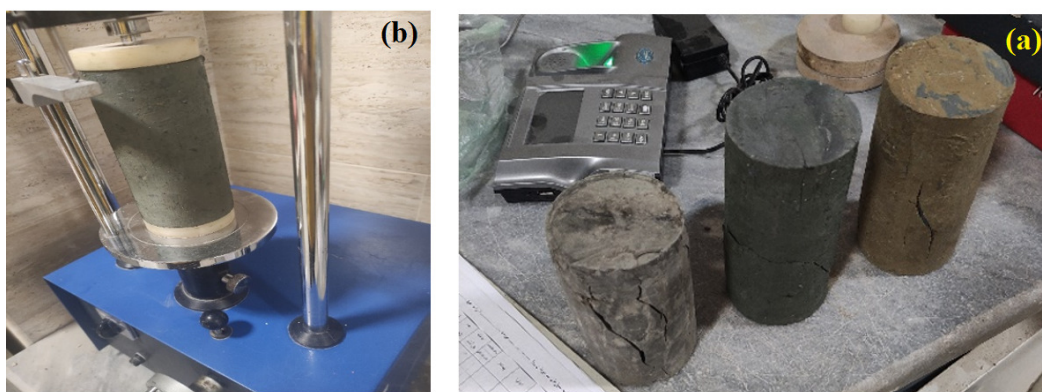
برنامه‌ریزی و انجام گردید. همانگونه که در مقدمه عنوان شد عوامل مختلف شامل مراحل و نحوه حفاری گمانه، تهیه و ارسال نمونه به آزمایشگاه و آماده‌سازی و انجام آزمایش در بروز دست‌خوردگی در نمونه‌ها تاثیر گذار می‌باشند که در نهایت این عوامل باعث تغییر مسیر تنش وارده بر روی نمونه در آزمایشگاه نسبت به شرایط تنش واقعی می‌گردد و نتیجه آزمایش را تحت تاثیر قرار می‌دهد لذا تمرکز این

۳- مواد و روش‌ها

بر روی نمونه‌های تهیه شده، ابتدا آزمایشات تعیین وزن مخصوص و رطوبت طبیعی، چگالی ویژه ذرات و حدود اتربرگ انجام گردید. در ادامه آزمایشات تعیین مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم در دو حالت دست‌نخورده و بازسازی شده تحت شرایط برجای خاک محل بر اساس وزن مخصوص و درصد رطوبت طبیعی

شده و ارزیابی اثرات ناشی از دست‌خوردگی به دلیل بازسازی نمونه و بررسی حساسیت آن‌ها می‌باشد. مقاومت فشاری محصورنشده عبارت است از نسبت حداکثر بار محوری که بر واحد سطح نمونه استوانه‌ای خاک وارد می‌شود. حداکثر نیروی وارد بر واحد سطح نیز از لحظه شکست نمونه و یا نیروی وارده در حالت بروز ۲۰٪ کرنش محوری بدست می‌آید. در این تحقیق با توجه به میزان فشردگی نمونه‌ها و مقاومت موجود، حداکثر نیروی وارده به هنگام شکست نمونه در محاسبات استفاده شده است. در شکل (۶) چند نمونه خاک مورد آزمایش در تعیین مقاومت فشاری محصور نشده و دستگاه مربوطه ارائه شده است.

تحقیق ارزیابی تغییرات حاصله در نتایج آزمایشات بر روی نمونه دست‌خورده نسبت به نتایج آزمایش بر روی نمونه دست‌نخورده می‌باشد. آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، برای تعیین مقاومت فشاری محصورنشده خاک‌های چسبنده دست‌نخورده یا دست‌خورده و بازسازی شده بکار می‌رود. در این تحقیق، آزمایش طبق استاندارد ASTM D2166 به روش کنترل تنش انجام گردیده است. لازم است نسبت طول به قطر نمونه‌ها بین ۲ تا ۳ باشد. این آزمایش یکبار بر روی نمونه دست‌نخورده انجام شده و سپس بر روی نمونه بازسازی شده طبق درصد رطوبت و وزن مخصوص طبیعی تکرار گردیده است. هدف از انجام این آزمایش در تحقیق حاضر تعیین مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌ها در دو حالت دست‌نخورده و بازسازی



شکل ۶. (a) نمونه‌های گسیخته شده مارن رسی زرد، سبز و خاکستری، (b) دستگاه مقاومت فشاری محصورنشده
Fig. 6. a) Failed samples of yellow, green and gray marl and b) unconfined compression apparatus

مشخصات فیزیکی و خمیری آن‌ها تعیین می‌شود. آزمایشات کامل تعیین خصوصیات فیزیکی خاک شامل چگالی ویژه ذرات طبق استاندارد ASTM D854، دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری طبق استاندارد ASTM D422، دانسیته و درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D2216، حدود اتربرگ با استفاده از استاندارد ASTM D4318 و طبقه‌بندی با کاربرد استاندارد ASTM D2487 انجام گردید. تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار SPSS, V.16, 2007 انجام گردیده و میانگین و انحراف معیار استاندارد متغیرها به طور خلاصه طبق جدول ۱۰ برای خصوصیات فیزیکی و خمیری نمونه‌ها ارائه شده است. براساس خصوصیات مذکور و طبق روش طبقه‌بندی یونیفاید، نمونه‌ها متنوع بوده و بر اساس این طبقه‌بندی در رده‌های MH, CL, CH و ML قرار می‌گیرند.

برای تعیین مقاومت برشی نمونه‌های مورد مطالعه از آزمایش مقاومت برشی مستقیم طبق استاندارد ASTM D6528 استفاده شده است. برای آزمایش بر روی نمونه دست‌نخورده، از مغزه‌های نمونه دست‌نخورده (قطر ۷۶ میلی‌متر)، نمونه‌ها به اندازه ابعاد داخلی و ارتفاع جعبه برش (به ابعاد ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر) بریده و در داخل جعبه قرار شده است. به منظور مشابه بودن نحوه قرار دادن نمونه در داخل جعبه برش دستگاه، ابتدا نمونه در داخل قالب تراکم با ابعاد بزرگ‌تر از جعبه برش با درصد رطوبت و وزن مخصوص طبیعی خاک محل تراکم می‌شود. پس از عمل تراکم، نمونه به اندازه ابعاد داخلی جعبه برش بریده و در داخل جعبه قرار داده می‌شود. برنامه‌ریزی آزمایشات اصلی تحقیق به طور خلاصه طبق جدول ۹ ارائه شده است. پس از تهیه و انتقال کلیه نمونه‌ها،

جدول ۹. برنامه آزمایشات اصلی مطالعه حاضر

Table 9. The program of the main experiments of the present study

مجموع	نوع آزمایش	تعداد	نوع نمونه	خاک	ردیف
۶	مقاومت فشاری محصور نشده	۳	دست خورده و دست نخورده	مارن زرد	۱
۴	برش مستقیم	۲			۲
۶	مقاومت فشاری محصور نشده	۳		مارن سبز	۳
۴	برش مستقیم	۲			۴
۶	مقاومت فشاری محصور نشده	۳		مارن خاکستری	۵
۴	برش مستقیم	۲			۶

جدول ۱۰. توصیف آماری مشخصات نمونه‌های خاک، کوی مرزداران شهر تبریز

Table 10. Statistic descriptive of marl specimen properties, Marzadaran allay of Tabriz city.

مشخصات خاک	حد اقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
Gs چگالی ویژه	۲/۶۰	۲/۸۸	۲/۷۰	۰/۰۶۹
C درصد ذرات رس	۷۵	۹۶	۸۶	۶/۱۰
LL حد مایع (%)	۳۸	۷۴	۵۳	۱۱/۸۶
PI شاخص پلاستیسیته (%)	۹	۳۴	۲۱	۹/۱۰
γ (gr/cm ³) وزن مخصوص طبیعی	۱/۸۴	۱/۹۹	۱/۹۱	۰/۱۸۰
W _n رطوبت طبیعی (%)	۲۴/۷۴	۳۶/۹۵	۲۹/۵۵	۴/۹۷
e _۰ نسبت تخلخل طبیعی	۰/۷۰۵	۱/۰۵	۰/۸۶۹	۰/۱۵۷

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده بر روی ۹ نمونه شامل سه نمونه از هر نوع خاک مارنی (رس کربنات‌دار) زرد، سبز و خاکستری رنگ و در دو حالت دست‌نخورده و بازسازی شده با شرایط برجا یعنی با وزن مخصوص و رطوبت طبیعی انجام گردید. به طور کلی مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های مارن خاکستری نسبت به نمونه‌های مارن زرد و سبز بیشتر بوده است. خلاصه نتایج این آزمایش طبق نمودارهای شکل (۷) ارائه شده است. چنانکه ملاحظه می‌گردد حداکثر تنش گسیختگی نمونه‌های بازسازی شده نسبت به نمونه‌های دست‌نخورده کاهش یافته است. به طور متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های مارن زرد، سبز و خاکستری به ترتیب برابر: ۴/۵۰، ۵/۳۱ و ۶/۰۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بدست آمده است. کرنش قائم در لحظه گسیختگی در کلیه نمونه‌ها با توجه به خمیری قابل توجه و درصد رطوبت نسبتاً بالای نمونه‌ها حدود ۰/۵ درصد بوده است. متوسط مقاومت فشاری در نمونه‌های بازسازی شده از مارن زرد، سبز و خاکستری به ترتیب برابر ۳/۶، ۳/۹ و ۴/۲ کیلوگرم بر

سانتی‌متر مربع بدست آمده است. نمونه‌های مارن زرد و سبز کاهش مقاومت حدود ۲۰ الی ۳۵ درصد را نشان می‌دهند. در نمونه‌های مارن خاکستری که بیشترین مقاومت را نتیجه داده‌اند، کاهش مقاومت در اثر دست خوردگی در نمونه‌های بازسازی شده بیشتر بوده و به حدود ۳۵ الی ۴۵ درصد می‌رسد. به طور کلی با توجه به میزان فشردگی و تراکم نمونه، اثرات کاهش مقاومت در اثر بازسازی نمونه در نمونه‌های با مقاومت فشاری بزرگ‌تر، بیشتر بوده است. بین نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی به روش اسپیرمن^۱ تعیین گردیده و برابر ۰/۸۸۳ بدست آمده است. مثبت بودن این ضریب بیانگر رابطه مستقیم بین نتایج بوده و مقدار بالای آن همبستگی قابل توجه دو متغیر را نتیجه می‌دهد. همچنین تحلیل رگرسیون‌های خطی و غیرخطی بین نتایج انجام گردید. بهترین رابطه برای اعمال اثرات دست‌خوردگی ناشی از بازسازی نمونه برای محدوده خاک‌های منطقه مورد مطالعه در شهر تبریز رابطه نمایی^۲ طبق رابطه ۱ با مقدار مناسب برای ضریب تعیین^۳ برابر $R^2 = ۰/۹۱۱۲$ و خطای ریشه میانگین مربعات^۴ نرمالیزه شده طبق رابطه ۲ برابر مقدار $RMSE = ۰/۰۴۲۲$ بدست آمده است. در رابطه ۲، مقاومت

^۳ Determination Coefficient^۴ Root Mean Squared Error^۱ Spearman^۲ Exponential

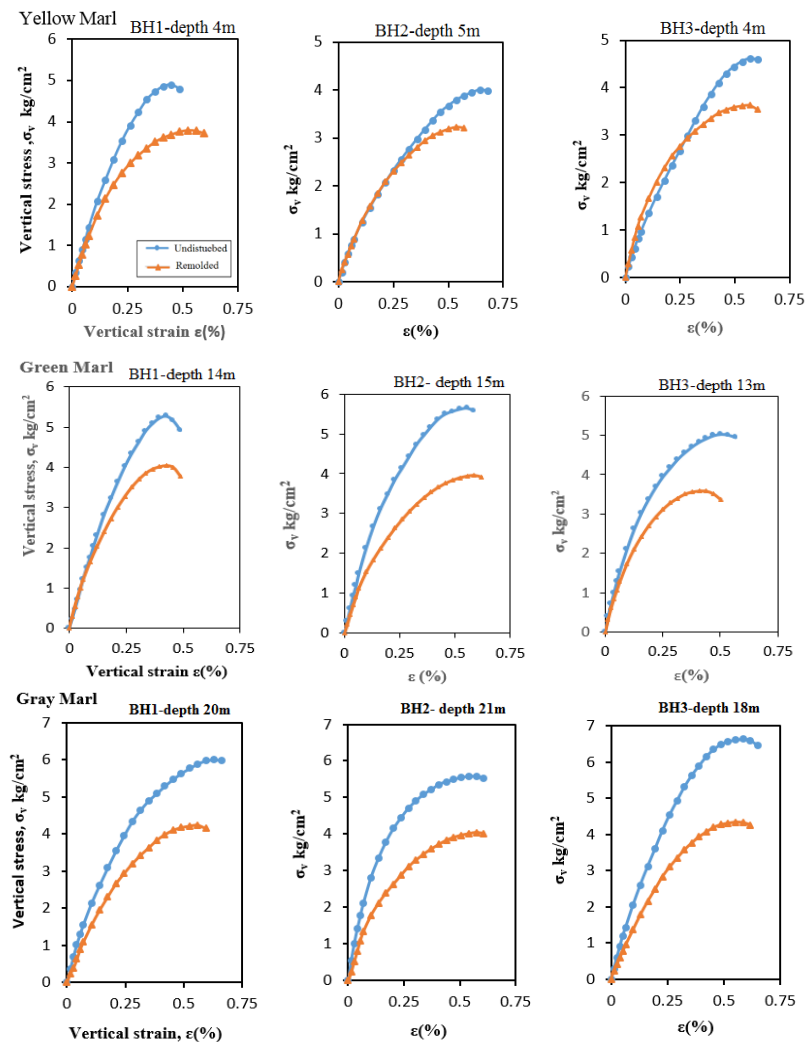
بدین ترتیب با استفاده از رابطه ۱ و انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه بازسازی شده (q_u) با وزن مخصوص و درصد رطوبت طبیعی خاک محل، می‌توان مقاومت فشاری محصور نشده مربوط به نمونه دست‌نخورده را برآورد نمود. خلاصه نتایج انواع رگرسیون بررسی شده در جدول (۱۱) ارائه شده است. شیب خط رگرسیون و نمودار مربوط به بهترین رابطه نیز در شکل (۸) ترسیم شده است.

فشاری نمونه بازسازی شده (q_{um}) و مقاومت فشاری برآورد شده (q_{up}) برای نمونه دست‌نخورده می‌باشد.

$$q_{u \text{ predicted}} = 1.086 e^{0.407q_u} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RMSE = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_{um} - q_{up})^2}{N}} \right) / (quave) \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه N نیز تعداد نمونه‌ها و $quave$ ، متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های بازسازی شده می‌باشد. شیب خط رگرسیون نیز برابر $CR = 1/0.01$ محاسبه گردیده است.



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش آزمایشات فشاری محصور نشده نمونه‌های دست‌خورده و بازسازی شده
Fig. 7. Stress-strain diagram of uniaxial compression tests of remolded and undisturbed specimens

طبقه‌بندی‌های مربوط به انجام رده‌بندی حساسیت خاک از قبیل اسکمیتون، باولز و CFEM، خاک‌های مارنی (رس کرنات‌دار) محدوده تحقیق در شهر تبریز در رده رس‌های کمی حساس قرار می‌گیرند. حساسیت نمونه‌های مارن خاکستری کمی بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد.

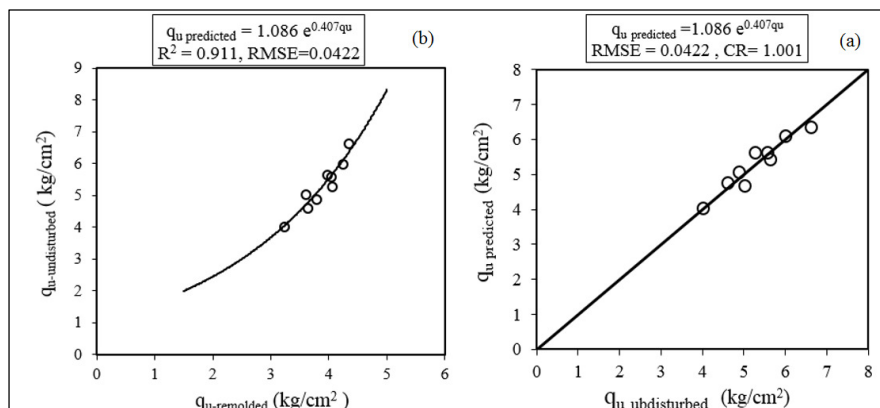
۴-۲- عدد حساسیت

در این بخش نسبت حساسیت خاک در نمونه‌های مورد آزمایش محاسبه شده و به‌طور خلاصه در جدول (۱۲) ارائه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود نتایج نسبت حساسیت خاک بین ۱ الی ۲ قرار داشته و با استفاده از کلیه

جدول ۱۱. روابط رگرسیونی اثرات دست‌خوردگی بازسازی نمونه‌های مارنی برای برآورد مقاومت فشاری دست‌نخورده

Table 11. Regression relationships of the disturbance effects of remolding of marl specimens in order to estimate undisturbed compression strength

شماره معادله	معادلات	RMSE	R ²	CR
۱	$q_{up} = 7.873 \ln(q_u) - 5.338$	۰/۰۴۷۸	۰/۸۸۱	۱/۰۰۲
۲	$q_{up} = 0.665 q_u^{1.522}$	۰/۰۴۴۱	۰/۹۰۵	۱/۰۰۱
۳	$q_{up} = 2.101 q_u - 2.844$	۰/۰۴۵۱	۰/۸۹۴	۱/۰۰۲
۴	$q_{up} = 1.086 e^{0.407 q_u}$	۰/۰۴۲۲	۰/۹۱۱	۱/۰۰۱



شکل ۸. (a) خط رگرسیون و (b) نمودار بهترین رابطه برآورد مقاومت فشاری دست‌نخورده

Fig. 8. a) regression line and b) diagram of best equation in order to estimate undisturbed compression strength

جدول ۱۲. نسبت حساسیت نمونه‌ها

Table 12. Sensivity ratio of specimens

ردیف	نوع خاک	شماره نمونه	دست‌نخورده q_u (kg/cm ²)	دست‌خورده q_u (kg/cm ²)	حساسیت S_t
۱	ملر زرد	۱	۴/۸۹	۳/۷۹	۱/۲۹
۲		۲	۴/۰۱	۳/۲۳	۱/۲۴
۳		۳	۴/۶۱	۳/۶۳	۱/۲۷
۴	ملر سبز	۱	۵/۰۳	۳/۵۹	۱/۴۰
۵		۲	۵/۲۷	۴/۰۵	۱/۳۰
۶		۳	۵/۶۴	۳/۹۶	۱/۴۲
۷	مارن خاکستری	۱	۶	۴/۲۴	۱/۴۲
۸		۲	۶/۶۳	۴/۳۴	۱/۵۳
۹		۳	۵/۵۸	۴/۰۴	۱/۳۸

۹ ترسیم شده است. در هر حال با توجه به تنوع خاک‌های رسی و دامنه گسترده تغییرات خصوصیات این خاک‌ها، انجام آزمایشات بیشتر بر روی انواع دیگر خاک‌های رسی مناطق مختلف به منظور تعمیم روابط توصیه می‌شود.

۴-۳- نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

در این بخش به منظور ارزیابی اثرات کاهش دست‌خوردگی بر روی پارامترهای مقاومتی برش مستقیم، بر روی ۶ نمونه از انواع خاک‌های رسی حاصل از مارن‌های زرد، سبز و خاکستری و از هر نوع دو نمونه و برای هر نمونه در دو حالت دست‌نخورده و بازسازی شده آزمایش برش

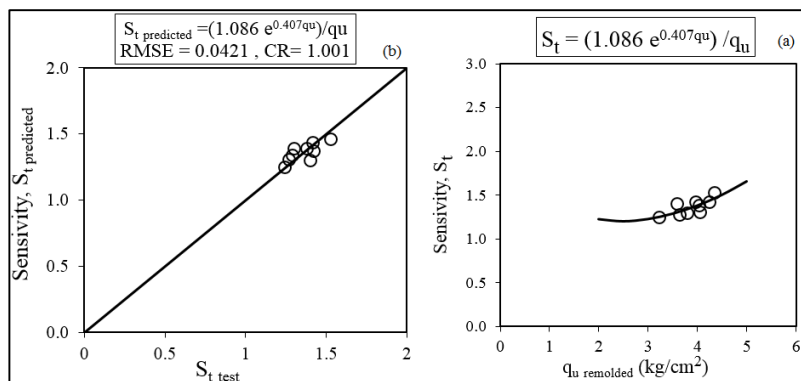
با توجه به رابطه پیشنهادی برای برآورد مقاومت فشاری نمونه دست‌نخورده بر اساس نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های بازسازی شده (رابطه ۱) و طبق تعریف حساسیت خاک، رابطه زیر برای برآورد نسبت حساسیت خاک قابل توسعه خواهد بود.

$$S_t = \frac{1.086 e^{0.407 q_u}}{q_u} \quad \text{رابطه ۳}$$

بدین ترتیب تنها با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه بازسازی شده و به کمک این رابطه می‌توان نسبت حساسیت خاک را نیز برآورد کرد. شیب خط رگرسیون $CR = 1/0.01$ و خطای $RMSE = 0.0421$ برای رابطه ۳ نیز محاسبه گردید. خط رگرسیون و نمودار این رابطه در شکل

نمونه‌های مارن زرد، سبز و خاکستری به ترتیب ۰/۷۰، ۰/۷۸ و ۰/۹۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده و برای زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱۴/۳، ۱۴/۷ و ۱۵/۸ درجه بدست آمده است.

مستقیم انجام گرفته است. خلاصه نتایج این آزمایش در جدول (۱۳) ارائه شده است. در این آزمایش نیز پارامترهای مقاومتی نمونه‌های مارن خاکستری در تطابق و همانند نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری بیشتر از سایر نمونه‌ها بدست آمده است. متوسط چسبندگی زهکشی نشده برای



شکل ۹. (a) خط رگرسیون و (b) نمودار بهترین رابطه برآورد حساسیت نمونه

Fig. 9. a) regression line and b) diagram of best equation in order to estimate sensitivity of specimen

جدول ۱۳. خلاصه پارامترهای مقاومت برش مستقیم نمونه‌های مارن، کوی مرزداران تبریز

Table 13. Summary of direct shear strength of marl specimens, Tabriz's Marzdaran Allay

دست‌خورده		دست‌نخورده		شماره نمونه	نمونه
زاویه اصطکاک داخلی Φ, \circ	چسبندگی Cu, kg/cm ²	زاویه اصطکاک داخلی Φ, \circ	چسبندگی Cu, kg/cm ²		
۱۳/۳	۰/۶۰	۱۳/۵	۰/۶۷	۱	مارن زرد
۱۳/۳	۰/۶۴	۱۵	۰/۷۲	۲	
۱۶/۵	۰/۶۷	۱۶/۳	۰/۷۶	۱	مارن سبز
۱۷/۶	۰/۷۱	۱۳/۱	۰/۸۰	۲	
۱۵/۸	۰/۷۸	۱۵/۵	۰/۹۲	۱	مارن خاکستری
۱۶/۷	۰/۸۱	۱۶	۰/۹۵	۲	

RMSE = ۰/۰۰۶۷ و شیب خط رگرسیون CR = ۱/۰۰۲ بدست آمده است.

$$C_{cu-predicted} = 0.245 e^{1.684 C_u} \quad \text{رابطه ۴}$$

خلاصه نتایج انواع رگرسیون بررسی شده در جدول (۱۴) ارائه شده است. شیب خط رگرسیون و نمودار مربوط به بهترین رابطه نیز در شکل (۱۰) ترسیم شده است.

زاویه اصطکاک برای نمونه مارن زرد به طور متوسط ۶/۴۱ درصد کاهش ولی برای سایر نمونه‌ها با افزایش متوسط ۱۰/۴۱ درصد همراه بوده است. چنین نتیجه‌ای در آزمایش برش مستقیم از طرف سایر محققان از جمله افزاری و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش شده است. این موضوع می‌تواند به ماهیت گسیختگی نمونه در یک سطح اجباری افقی در جعبه برش مستقیم و به عبارت دیگر به محدودیت‌های موجود در آزمایش برش مستقیم مربوط

برای کلیه نمونه‌های بازسازی شده، چسبندگی به طور متوسط ۱۲/۴ درصد کاهش یافته است. در این قسمت نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی به روش اسپیرمن محاسبه شده و با دقت سه رقم اعشار عدد یک بدست می‌آید که نشانگر همبستگی بالای بین مقادیر چسبندگی نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده می‌باشد. بین نتایج مقاومت چسبندگی تحکیم یافته زهکشی نشده (C_{cu}) برای نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده، تحلیل رگرسیونی خطی و غیرخطی انجام گردیده و همانند مقاومت فشاری محصورنشده بهترین رابطه برای اعمال اثرات دست‌خوردگی ناشی از بازسازی نمونه برای محدوده خاک‌های منطقه مورد مطالعه در شهر تبریز رابطه نمایی طبق رابطه ۴ با مقدار ضریب تعیین R² = ۰/۹۹۶۵ و خطای ریشه میانگین مربعات نرمالیزه شده

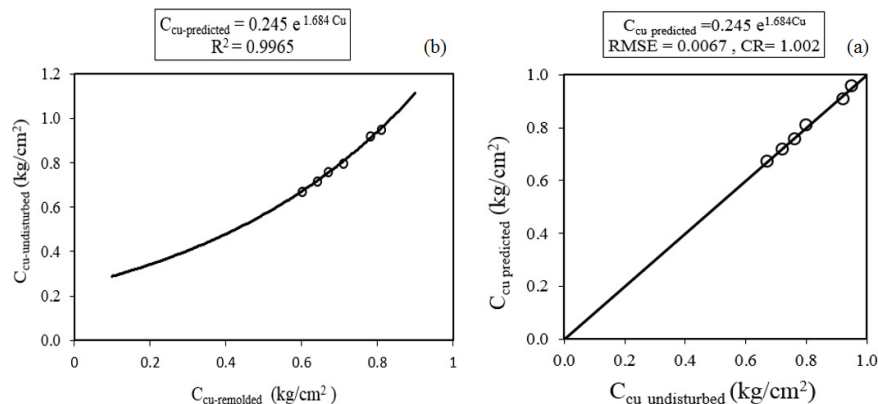
می‌نماید. با توجه به موضوع تشریح شده، با استفاده از نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی به روش اسپیرمن برای تانژانت زاویه اصطکاک نمونه دست‌نخورده با نمونه بازسازی شده محاسبه و همبستگی ضعیف 0.058 بدست می‌آید و در نتیجه رگرسیون با ضریب تعیین مناسب برای این دو متغیر حاصل نمی‌شود. به عنوان نمونه نتیجه رگرسیون خطی با ضریب $R^2 = 0.282$ بدست می‌آید. این بررسی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. خط مقاومت موهر-کولمب خاک برای کلیه نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده طبق شکل (۱۲) ترسیم گردیده است.

باشد. ضمن اینکه اختلاف نتیجه نحوه بازسازی و تراکم نمونه با شرایط واقعی و برجای خاک نیز موثر می‌باشد. بازسازی نمونه در آزمایش برش با تراکم خاک به صورت لایه‌لایه بوده لذا سطح اصطکاک بوجود آمده بین لایه‌ها در نمونه بازسازی شده در مقایسه با وضعیت اصطکاک واقعی بین دانه‌ها در شرایط برجای خاک متفاوت و چه بسا می‌تواند بزرگ‌تر باشد. در حالی که خاصیت چسبندگی در خاک‌های رسی بیشتر به خصوصیات خمیری و ذاتی ذرات بستگی داشته و کمتر تحت تاثیر روش بازسازی و نحوه گسیختگی نمونه در آزمایش برش مستقیم قرار می‌گیرد و لذا عموماً اثرات دست‌خوردگی در مقادیر چسبندگی بروز

جدول ۱۴. روابط رگرسیونی اثرات دست‌خوردگی بازسازی نمونه‌های مارنی برای برآورد مقاومت چسبندگی به روش مستقیم.

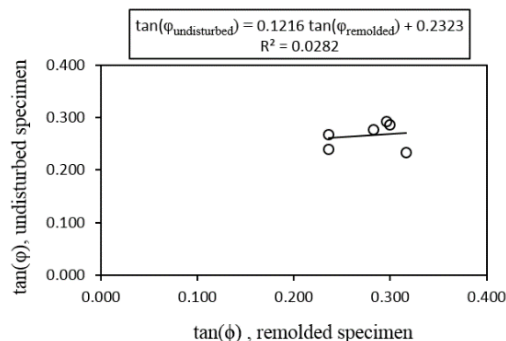
Table 14. Regression relationships of disturbance effects of marl specimens in order to estimate the cohesion strength of direct shear test

شماره معادله	معادله	RMSE	R ²	CR
۱	$C_{cu} = 0.956 \ln(C_u) + 1.147$	۰/۰۱۰۷	۰/۹۸۹۳	۱
۲	$C_{cu} = 1.220 C_u^{1.184}$	۰/۰۰۷۳	۰/۹۹۵۳	۱
۳	$C_{cu} = 2.101 C_u - 0.153$	۰/۰۰۷۳	۰/۹۹۴۴	۰/۹۹۹
۴	$C_{cu} = 0.245 e^{1.684 C_u}$	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹۶۵	۱/۰۰۲



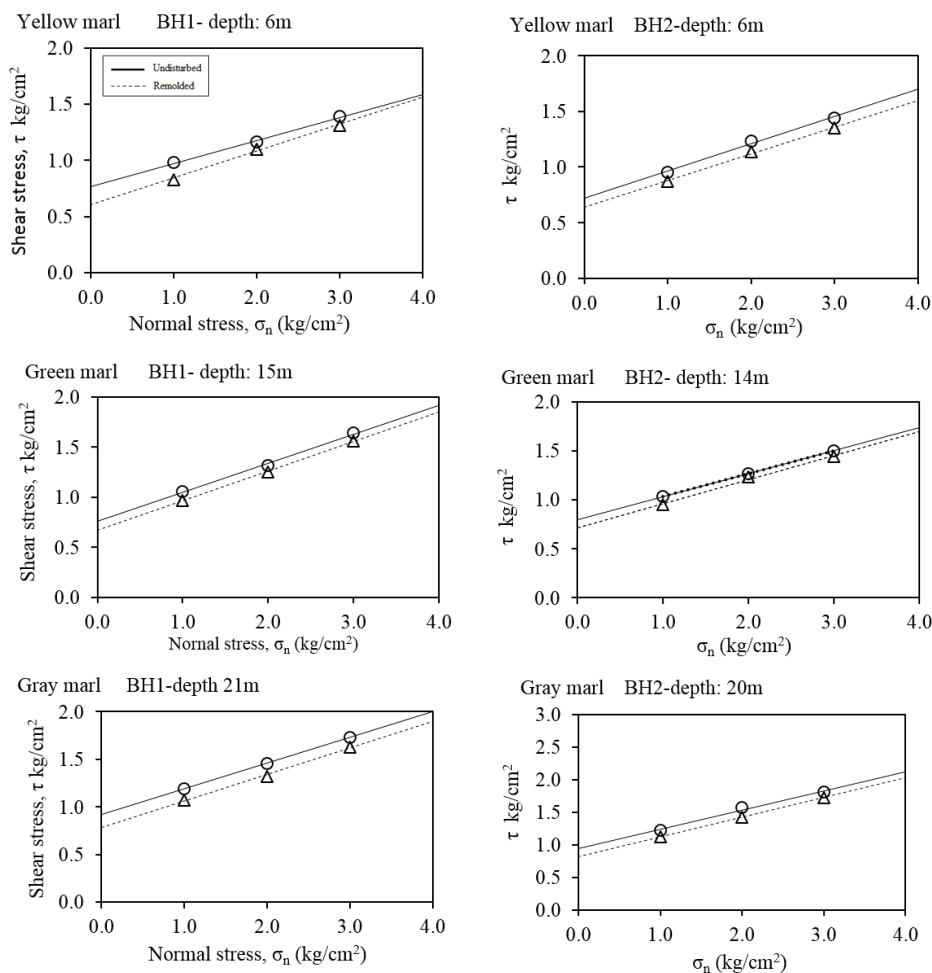
شکل ۱۰. (a) خط رگرسیون و (b) نمودار بهترین رابطه برآورد چسبندگی یافته زهکشی نشده

Fig. 10. a) Regression line and b) diagram of best equation in order to estimate of consolidated undrained cohesion



شکل ۱۱. رگرسیون خطی با همبستگی ضعیف بین تانژانت زاویه اصطکاک نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده در آزمایش برش مستقیم

Fig. 11. Linear regression with weak correlation between friction angle tangent of undisturbed and remolded specimens in direct shear test



شکل ۱۲. خط مقاومت موهر-کولمب نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده مارن تبریز

Fig. 12. Mohr-Coulomb strenght line of undisturbed and remolded of Tabriz marl specimens

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات دست‌خوردگی ناشی از تهیه نمونه‌های بازسازی شده از انواع خاک‌های مارنی (رس کربنات‌دار) شهر تبریز مطالعه شده است. بدین منظور از آزمایشات مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم بر روی دو سری نمونه دست‌نخورده و بازسازی شده استفاده گردید. خلاصه مهم‌ترین نتایج به صورت زیر جمع‌بندی می‌گردد:

۱- مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های رسی حاصل از مارن خاکستری نسبت به نمونه‌های مارن زرد و سبز بیشتر بوده است. در نمونه‌های مارن زرد و سبز کاهش مقاومت حدود ۲۰ الی ۳۵ درصد بوده و این کاهش در نمونه‌های مارن خاکستری بیشتر و به حدود ۳۵ الی ۴۵ درصد می‌رسد. لذا به طور کلی می‌توان گفت اثرات کاهش مقاومت در اثر بازسازی نمونه در نمونه‌های با مقاومت فشاری بزرگ‌تر، بیشتر بوده است.

۲- ضریب همبستگی به روش اسپیرمن بین نتایج مقاومت نمونه‌های دست‌نخورده و بازسازی شده برابر ۰/۸۸۳ بوده و بیانگر همبستگی قابل توجه بین نتایج می‌باشد. از انجام تحلیل رگرسیون بین نتایج نیز رابطه نمایی با مقدار بسیار خوب ضریب تعیین ($R^2 = ۰/۹۱۱۲$) بدست آمده است. بدین ترتیب آزمایش مقاومت به راحتی بر روی نمونه بازسازی شده انجام شده و با استفاده از رابطه مذکور مقاومت فشاری محصورنشده مربوط به نمونه دست‌نخورده قابل برآورد خواهد بود.

۳- نتایج نسبت حساسیت خاک برای نمونه‌ها بین ۱ الی ۲ نتیجه شده و بر اساس طبقه‌بندی‌های موجود خاک‌های رسی حاصل از انواع مارن محدوده تحقیق در شهر تبریز در رده رس‌های با حساسیت کم قرار می‌گیرند. به منظور برآورد نسبت حساسیت خاک بر اساس مقاومت فشاری نمونه بازسازی شده رابطه نمایی پیشنهاد گردید. به کمک

روی سایر انواع خاک‌های رسی مناطق دیگر و بررسی و صحت‌سنجی روابط پیشنهادی در این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

References

- Afrazi, M., and Yazdani, M (2019) Investigating the effect of disturbance on the results of direct shear test. National Conference on Civil Engineering and Architecture in 21st Century Urban Management, ISC96170-82101. (In Persian)
- Afrazi, M., Yazdani, M., Talesh, M., and Fakhimi, A (2019) Numerical analysis of effective parameters in direct shear test by hybrid discrete – finite element method, Scientific Research Journal of Modares Civil Engineering, 18 (3): 13–24, (In Persian).
- Alizadeh Majdi, A. R., and Dabiri, R (2019) Estimation of SPT test results using by probabilistic methods and artificial neural network in clay layers.) case study: Clay layers of Tabriz, Advanced Applied Geology, doi.org/10.22055/ aag. 26391.1871. (In Persian).
- Alizadeh Majdi, A. R., Dabiri, R., Ganjian, N., and Ghalandarzadeh, A (2020) Evaluation of the Specimen Disturbance Effects in the Consolidation Test Using Shear Wave Velocity, Geotechnical and Geological Engineering, 38: 2927–2943.
- ASTM-D 2166 (2013) Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D6528 (2007) Standard Test Method For Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing Of Cohesive Soils, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D 854 (2002) Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D422 (1963) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Annual book of ASTM standards (reapproved 1998).
- ASTM D2216 (2019) Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D 4318 (1995) Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D2487 (1998) Classification of soils for engineering purposes unified soil classification system, Annual book of ASTM standards.
- Golpasand, M. B., Nikoudel, M., Asghari, E., and Yasrebi, S. S (2007) Comparison of CPTu Test and Laboratory Test Results in Determination of Shear Strength of Uromieh Lake Bridge Site, Scientific Quarterly Journal Geosciences, 15: 12-21 (In Persian).

این رابطه با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه بازسازی شده نسبت حساسیت قابل برآورد خواهد بود.

۴- در بخش آزمایشات برش مستقیم نیز چسبندگی کلیه نمونه‌های بازسازی شده به طور متوسط ۱۲/۴ درصد کاهش یافته است. ضریب همبستگی به روش اسپیرمن بین نتایج بالا بوده و با دقت سه رقم اعشار برابر یک می‌باشد. از تحلیل رگرسیون بین نتایج مقاومت چسبندگی رابطه نمایی با مقدار ضریب تعیین بسیار عالی ($R^2 = 0.9965$) بدست آمده است. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های بازسازی شده برای مارن زرد به طور متوسط ۶/۴ درصد کاهش ولی برای سایر نمونه‌ها با افزایش متوسط ۱۰/۴ درصدی همراه بوده است. افزایش زاویه اصطکاک نمونه‌های بازسازی شده در آزمایش برش مستقیم از طرف سایر محققان از جمله افرازی و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش شده است. این موضوع می‌تواند به ماهیت گسیختگی نمونه در یک سطح اجباری افقی در جعبه برش مستقیم مربوط باشد. ضمن اینکه نحوه بازسازی نمونه و تراکم خاک به صورت لایه‌لایه و ایجاد سطح اصطکاک متفاوت با وضعیت طبیعی اصطکاک خاک نیز می‌تواند موثر باشد. درحالی‌که خاصیت چسبندگی در خاک‌های رسی بیشتر به خصوصیات ذاتی ذرات بستگی داشته و لذا کمتر تحت تاثیر سطح برش و روش بازسازی نمونه قرار می‌گیرد رگرسیون با ضریب تعیین مناسبی برای نتایج زاویه اصطکاک داخلی حاصل نشده است.

۵- بروز دست‌خوردگی در فرآیند تهیه انواع نمونه خاک‌ها، یک موضوع اجتناب‌ناپذیر بوده و اثرات قابل توجهی بر روی ساختار ذرات خاک می‌گذارد. از طرف دیگر بدلیل مشکلات و هزینه تهیه نمونه‌های دست‌نخورده، در بیشتر مواقع آزمایش بر روی نمونه‌های بازسازی شده خاک انجام می‌گیرد و در نتیجه ارزیابی اثرات دست‌خوردگی در نتایج این نمونه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. در نمونه‌های بازسازی شده اگرچه درصد رطوبت و وزن مخصوص طبیعی خاک با دقت خوبی قابل بازسازی می‌باشد لیکن ساختار ذرات که طی زمان طولانی از قبیل رسوب‌گذاری شکل گرفته امکان بازسازی نخواهد داشت. در نهایت در نظر گرفتن موضوع بررسی و اعمال اثرات دست‌خوردگی در انتخاب پارامترهای طراحی انواع سازه‌های خاکی ضروری خواهد بود. برای تحقیقات آتی با توجه به تنوع خاک‌های رسی، انجام آزمایشات بیشتر بر

- Engineering, Sharif University of Technology. (In Persian).
- Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York
- Touiti, L., Lmpe, W. V., and Bouassida, M (2009) Discussion on Tunis soft soli sensitivity, *Geotechnical and geological engineering*, 27: 631-643, doi:10.1007/s10706-009-9263-2.
- Zhang, X., Kong, L., Md. And Sayem, H (2017) Thixotropic mechanism of clay a microstructural investigation, *Soils and Foundations*, 57: 23-35, doi: 10.1016/j.sandf.2017.01.002.
- Holtz, R. D., and Kovacs, W. D (1981) An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Hooshmand, A., Aminfar, M. H., Asghari, E., and Ahmadi, H (2011) Mechanical and Physical Characterization of Tabriz Marls, Iran, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30: 219-232. doi.org/10.1007/s10706-011-9464-3.
- Karina, R. Dahl, K. R., Boulanger, R. W., DeJong, J. T., and Driller, M. W (2010) Effects of Sample Disturbance and Consolidation Procedures on Cyclic Strengths of Intermediate Soils. Fifth International Conference on recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego California. (<https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd>).
- Kontopoulos, N. S (2012) The effects of sample disturbance on preconsolidation pressure for normally consolidated and overconsolidated clays. Massachusetts Institute of Technology, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Field of Civil and Environmental Engineering. (<http://hdl.handle.net/1721.1/74419>).
- Liang, Y., Cao L., and Lio, J (2015) Statistical Correlations between SPT N-Values and Soil Parameters. Technical Report, Department of Civil Engineering, Ryerson University, (www.researchgate.net/publication/281109498).
- Lunne, T., Berre T., Andersen, K. H., Sjursen, M., and Mortensen, N (2011) Effects of sample disturbance on consolidation behaviour of soft marine Norwegian clays. *Canadian Geotechnical Journal*, ([https://doi: 10.1139/t06-040](https://doi.org/10.1139/t06-040)).
- Ouhadi, V. R., Ghalandarzadeh, A., and Behnia, K (1993) Engineering characteristics and properties of marly soils. Proceedings of the second international seminar on soil mechanics and foundation engineering of Iran, Tehran, Iran. (In Persian).
- Parsa, Z., Asghari Kalajahi, E., and Hajjalilou Bonab, M (2022) Investigating the problems of marly and sandy soils in Nagin Park area of Tabriz in the implementation of deep excavation projects, *New Findings in Applied Geology*, 15: 47-65, doi: 10.22084/nfag.2021.22961.1438.
- Ruge, C., Gómez, M., and Rojas, P (2019) Thixotropic behaviour study of clayey soils from the lacustrine deposits of Bogotá high plateau. 5th International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Technology, doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012050.
- Skempton, A. W., and Northey, R. D (1952) The sensitivity of clays. *Géotechnique*, doi:10.1680/geot.3.1.30.
- Shosh Pasha, E., Farhadi, A., and Barjeste, B (2005) Evaluating of the sensitivity and thixotropy of silty clay soil, First National Congress of Civil

Evaluation of the Specimen Disturbance Effects on the Strength Properties of Clayey Soils

M. Derafshinou¹, A. Alizadeh Majdi², and R. Dabiri^{3*}

1- M. Sc. of Geotechnical Engineering, Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Assist. Prof., Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3- Assoc. Prof., Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

* rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

Received: 2023.5.21 Accepted: 2023.8.16

Abstract

One of the challenging subjects in geological and geotechnical engineering is the effects of soil specimen disturbance in order to determine several physical and strength characteristics. Disturbance occurs in all stages, including drilling the borehole, preparing, transporting and conducting tests in the laboratory. Practically, it is impossible to prepare an ideal undisturbed sample. Due to the difficulties of preparing undisturbed samples, especially in soil layers, the tests are mostly performed on the remolded samples. Several studies have been conducted on the methods of evaluating sample disturbance. The target of this study was to evaluate the effects of disturbance on the strength properties of clay soils as case study of Tabriz city. By conducting uniaxial compressive and direct shear tests on undisturbed and remolded samples, the effects of disturbance and sensitivity of the samples were investigated. Generally, the compressive strength of remolded samples decreases due to disturbance. In addition to determining Spearman's correlation coefficient, linear and non-linear regression analysis were performed in order to estimate the compressive strength of the undisturbed sample. By determining the sensitivity ratio, the sensitivity of samples is low. Correlation between the strength of undisturbed and remolded samples in direct shear test, including cohesion and internal friction angle, was studied by performing regression analysis.

Keywords: Clayey soil, Remolded specimen, Cohesion, Internal friction

Introduction

One of the challenging topics in geological and geotechnical engineering is the evaluation disturbance of soil and rock specimens. In general, the occurrence of disturbance effects is inevitable even in apparently undisturbed specimens. These effects occur in all stages of drilling a borehole, preparing and sending samples to the laboratory, and preparing and conducting tests. In soils, due to the difficulties and cost of preparing undisturbed specimens, mostly the tests are performed on remolded specimens with natural on-site unit weight and moisture. In this case, the evaluation of the effects of remolding in the results will be more important. In general, the effects of disturbance in the soil specimens cause a decrease in its strength parameters compared to the on-site conditions and the natural state. Due to the effects of disturbance, there are significant changes in the path of the stress applied to the sample compared to the on-site condition of the

soil. This difference will be much greater for a remolded sample due to the change in the natural skeleton of the soil. In general, studied researches on the evaluation of the effects of soil disturbance has been carried out based on the test and comparison of different soil properties in situ and laboratory conditions, or undisturbed and disturbed or remolded specimens. The disturbance of the specimens for the normal consolidated clay causes more curvature in the compression curve in the consolidation test results and the compression index is reduced compared to the in-situ state. The effects of disturbance also reduce uniaxial compressive strength. One of the parameters related to the effects of disturbance in cohesive soils is the sensitivity ratio. The greater this ratio, the more sensitive the soil will be to the effects of disturbance. The classification of soils in terms of sensitivity is provided by various references such as Skempton et al. (1952) and the Canadian

Engineering Manual. The metropolis of Tabriz, located in the northwest of Iran, has diverse fine-grained cohesive clayey, silty marl soils. Significant studies on the properties of cohesive clayey soils in Tabriz city have been conducted by various researchers such as: Hoshmand et al. (2012) and Alizadeh et al. (2019). In this present study, by drilling three machine boreholes in Koe-Marzadaran of Tabriz city and preparing samples, the effects of disturbance on the compressive and shear strength parameters of the soil as well as the sensitivity ratio of the samples have been evaluated and regression relationships have been developed.

Material and methods

The clayey marl soils have spread in Tabriz city, located in the northwest of Iran. The age of these marls is related to the Miocene and Pliocene geological eras. Most marls of Tabriz belong to Baghmisheh bed. Geologically, the Baghmisheh bed is placed between the upper red bed and the fish bed belonging to the Pliocene. In order to obtain undisturbed specimens, three boreholes were drilled in Koe-Marzadaran area of Tabriz city. The fifteen shellby samples from different depths were prepared and carefully transported to the laboratory. In the site of the present study, yellow clayey marls are outcropped and green marl is gradually observed in depth, and then gray and dark marl is observed at more depths. On the prepared samples, firstly, the unit weight, natural moisture, specific gravity and the Atterberg limits were determined. In the following, the unconfined compressive strength tests were performed on the undisturbed samples. Then, the tests were repeated on the remolded sample with natural moisture percentage and unit weight. Thus, the effects of disturbance due to the remolding of the specimens on the compressive strength were studied. The sensitivity ratio of the samples was also investigated.

To perform the direct shear strength test on the undisturbed samples, the samples were prepared from the shellby samples as for internal dimensions of the shear box mold. To prepare the remolded specimens, according to the internal volume of the compaction mold and carrying out weight and volume calculations, the soil was compacted inside the compaction mold with the on-site natural unit weight and moisture content. A compaction

mold with larger dimensions than a shear box was used. After compaction, the sample is cut to the dimensions of inside the shear box and placed inside. In this way, the effects of disturbance caused by sample remolding on the parameters of shear strength including cohesion and friction angle of the samples were studied.

Results and discussions

1- Unconfined Compressive Test

Based on the physical and plasticity characteristics of the samples and the unified classification method, the specimens are classified as MH, CL, CH and ML.

In general, the uniaxial compressive strength of gray marl samples was higher than other samples. The compressive strength of the remolded samples were reduced compared to the undisturbed samples. Spearman's correlation coefficient between the compressive strength results of undisturbed and remolded samples was significant. By performing regression analysis, the best relationship for applying the effects of disturbance due to sample remolding for the soils in the study area in Tabriz city were an exponential relationship with a significant determination coefficient ($R^2=0.9112$) and insignificant root mean square error ($RMSE = 0.0422$).

The ratio of soil sensitivity for the samples is between 1 and 2, which are in the category of slightly sensitive clays. By performing the test on the remolded sample and according to the proposed relationship for the compressive strength, the sensitivity ratio of the sample can also be estimated.

2- Direct Shear Test

In the direct shear tests the cohesion for all remolded samples compared to the undisturbed samples has decreased. The Spearman's correlation coefficient between the mentioned results is obtained with the precision of three decimal accuracy equal to the one, which indicated a high correlation between the results. By performing regression analysis, the exponential relationship was obtained in the study site in Tabriz city. The friction angle has decreased for the remolded yellow marl sample, but increased for other samples. This, similar to results have been reported in the direct shear test by other researchers including. This issue can be related to the concept of how

to failure of sample in a horizontal imposed plane in the direct shear box. In addition, the method of remolding of the sample and its compaction can cause a significant difference in the friction between the particles in the remolded state compared to the undisturbed sample. Therefore, for the results of the friction angle of the samples, a weak correlation coefficient was obtained and the significant relationship is not obtained from the regression analysis.

Conclusion

The uniaxial compressive strength of the remolded clayey samples obtained from marl in the study site in Tabriz city were reduced by (20 to 45) percentage compared to the undisturbed samples. The correlation coefficient between the results was significant and the best regression was suggested. Because of problems of an undisturbed sample preparing, the tests can be easily performed on the remolded samples. Therefore, the compressive strength of the undisturbed samples can be estimated by using the proposed relationship. The soil sensitivity ratio for the samples was between 1 and 2. Therefore, based on the existing classification, the clayey soils obtained from marl in the study site in Tabriz city were classified as low-sensitivity clays. Also, according to the proposed relationship for the compressive strength of the undisturbed sample, the sensitivity ratio can also be estimated. The cohesion of all remolded samples have decreased compared to undisturbed samples. Spearman's correlation coefficient between the results was high. Between the results of cohesion strength for undisturbed and remolded samples, the exponential relationship has the best statistical coefficients. The internal

friction angle of the remolded samples for yellow marl has decreased compared to undisturbed samples, but it has increased for other samples. The increase in the friction angle of the remolded samples in the direct shear test has also been reported by other researchers, including. This issue can be related to the concept of how to failure in a horizontal imposed plane in the direct shear box. The method of remolding the sample and compacting the soil in layers and creating a friction surface different from the natural friction of the soil particles can also be effective. While the cohesion properties of clayey soils depend more on the inherent properties of the particles, therefore, it is less affected by the shearing surface and the sample remolding method. From the regression analysis, no suitable statistical coefficients were obtained for the results of the internal friction angle. The occurrence of remolding in the process of preparing various types of soil samples is an inevitable phenomenon. Mostly, testing is done on remolding soil samples. As a result, the disturbance of the effects of remolding will be more important. In the remolded samples, the structure of the particles formed during a long process such as sedimentation will not be able to be regenerated. Finally, it will be necessary to consider the subject of investigating and applying the effects of disturbance in the selection of design parameters of structure foundations and also in the design of other earthen structures. Considering the diversity of clayey soils, it is recommended to conduct more tests on different types of clayey soils in different regions, in order to validate and develop the proposed relationships in this research.