

شناسایی و ارزیابی خصوصیات مکانیکی خاک‌های رمبنده

(مطالعه‌ی موردی منطقه‌ی شمال شرق ایران)

جعفر بلوری بزاز^{۱*}، محمدعلی معروف^۲

پذیرش مقاله: ۹۱/۸/۳

دریافت مقاله: ۹۱/۲/۱۳

چکیده

خاک‌های رمبنده در صورت اشباع شدن بدون آنکه تغییری در تنش‌های اعمالی ایجاد کنند و یا تحت اثر ارتعاش قرار گیرند، نشست زیادی می‌کنند و ممکن است به پی، جاده، خطوط ریلی، سدها، خطوط لوله و یا دیگر سازه‌ها خسارت وارد آورند. خاک‌های رمبنده در بسیاری از مناطق جهان به صورت پراکنده، و در ایران بیشتر در مناطق مرکزی و شرقی مشاهده می‌شوند. در تحقیق حاضر، خاک محدوده‌ی شمال شرق شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مقاومت پایین خاک این منطقه هنگام اشباع شدن، به نظر می‌رسد که خاک محل پروژه مستعد رمبندگی باشد. علاوه بر این، با عنایت به احداث سازه‌های ریلی و ساختمان در محل، ممکن است در اثر ارتعاش ناشی از عبور قطار و افزایش رطوبت، نشست زیادی به خاک تحمیل شود و همین امر مشکلاتی برای سازه‌های ریلی و ساختمان‌های موجود ایجاد کند. در همین راستا تعیین میزان رمبندگی خاک ضروری می‌نمود. به این منظور، ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس جهت تعیین میزان رمبندگی، معیارهای مختلف رمبندگی بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده نشان داد که خاک به افزایش رطوبت حساس بوده است و در صورت اشباع شدن، پارامترهای مقاومتی آن کاهش می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر پتانسیل رمبندگی، تعدادی آزمایش برجا انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نیز نشان می‌دهد که خاک محل به افزایش رطوبت و رمبنده بودن حساس است و می‌تواند برای خطوط ریلی و سازه‌های احداثی در محل مشکل ایجاد کند.

کلید واژه‌ها: آزمایش‌های صحرایی، پتانسیل رمبندگی، خاک رمبنده، معیار رمبندگی

۱. دانشیار دانشکده‌ی مهندسی، گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد، bolouri@ferdowsi.um.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

خاک‌های رمبنده معمولاً دارای تخلخل زیاد بوده و پیوند بین ذرات آنها ضعیف است. این خاک‌ها دارای بافت سست بوده و در صورت افزایش رطوبت، نشست زیادی می‌کنند و ظرفیت باربری آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد. آنچه سبب پایداری تماس بین ذرات و استحکام بیشتر ساختار خاک می‌شود وجود مکش در خاک است، بنابراین افزایش تنش مؤثر در خاک با مکش زیاد، تغییرات حجمی کمی خواهد داشت. کاهش مکش خاک به هنگام مرطوب شدن خاک، منجر به رمبندگی آن می‌شود (Vilar et al., 2011 و Huat et al., 2008). این خاک‌ها اغلب از رسوبات جوان ته نشین شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل شده‌اند، این نهشته‌ها شامل ۱- مواد انباشته شده در اثر نیروی ثقل در پای دامنه‌ها (نهشته‌های واریزه‌ای) ۲- انباشته شدن رسوبات در بستر رودها و یا مسیل‌ها (آبرفت) ۳- نهشته‌های بادی ناشی از نشست غبار، سیلت و ماسه‌ی ریزدانه (بادرفت) می‌باشند. این خاک‌ها دارای وزن مخصوص خشک کم بوده و اغلب از نوع لس، خاک‌های ریزدانه سیلتی (ML)، رسی سیلتی (CL-ML) و رس با پلاستیسیته پایین می‌باشند. نشست ناشی از مرطوب شدن این‌گونه خاک‌ها در بعضی موارد بیش از یک متر گزارش شده است (Scheffe, 2005). خاک‌های رمبنده که از خود خاصیت فرو ریزی نشان می‌دهند دارای وزن مخصوص پایین، تخلخل بالا (بیش از ۴۰ درصد)، درجه اشباع پایین (کمتر از ۶۰ درصد)، میزان بالای لای (بیش از ۳۰ درصد)، حد روانی کم، حساسیت در برابر تغییرات رطوبت و نرم شدگی سریع در آب هستند.

نهشته‌های سیلتی در مناطق با شرایط آب و هوایی خشک، مستعد کاهش حجم قابل ملاحظه یا رمبندگی در هنگام اشباع شدن هستند. نشست سازه در اثر رمبندگی به عوامل زیر وابسته است:

- میزان پتانسیل رمبندگی خاک بستر
- عمق لایه خاک رمبنده
- نحوه اشباع شدن، درجه اشباع و عمق اشباع
- دانه‌بندی و چگونگی زهکشی سایت

- میزان بار بر روی پی ساختمان و عمق تأثیر آن
- حساسیت سازه به نشست و نشست‌های نسبی

برای پیش‌بینی نشست ناشی از رمبندگی باید به چند عامل مانند میزان رطوبت اولیه، وسعت و عمق مرطوب شدن، تغییرات شرایط بارگذاری و در صورت تعیین رمبندگی با آزمون‌های آزمایشگاهی به دست‌خوردگی نمونه توجه کرد (Pawlak, 1998). بیشترین میزان رمبندگی هنگامی رخ خواهد داد که لایه خاک در اثر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی اشباع شود. میزان نشست معمولاً با در نظر گرفتن پتانسیل رمبندگی و عمق مرطوب شدگی محاسبه می‌شود با این حال با توجه به این‌که اغلب، پتانسیل رمبندگی تحت تنش 200 kPa اندازه‌گیری می‌شود (ASTM D5333)، در صورت عمق زیاد خاک، نباید اثرات کاهش تنش در عمق را از نظر دور داشت (Jenning and knight, 1975). نشست لرزه‌ای خاک‌های رمبنده همانند رمبندگی ناشی از ساختار نیمه پایدار خاک‌ها می‌باشد. اصولاً رمبندگی از کاهش مکش ناشی شده در حالی‌که نشست لرزه‌ای به وسیله‌ی گسیختگی برشی حین بارهای دینامیکی اتفاق می‌افتد، گرچه در هر دو حالت نتیجه‌ی ریزش، تغییر ساختار شبکه‌ای منافذ می‌باشد (Yuan, 2009). وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت، از عوامل مؤثر در نشست لرزه‌ای لس‌ها می‌باشد. تحت بار دینامیکی یکسان لس‌های با وزن مخصوص خشک بیشتر، نشست کمتری خواهند داشت، همچنین در درصد رطوبت کم، اصطکاک بین ذرات زیاد بوده و برای لس‌های با درصد رطوبت کمتر از حد انقباض، نشست ناشی از بارهای دینامیکی ناچیز خواهد بود (Yuan, 2009).

درصد رطوبت اثر متفاوتی بر دو پدیده‌ی رمبندگی و نشست لرزه‌ای دارد. هنگامی‌که درصد رطوبت لس‌ها از حد انقباض (SL) کمتر باشد نشست لرزه‌ای رخ نخواهد داد. با این حال رمبندگی به حداکثر می‌رسد. همچنین هنگامی‌که درصد رطوبت لس‌ها به حد روانی (LL) برسد رمبندگی کاهش یافته و نشست لرزه‌ای افزایش می‌یابد. باید توجه داشت نشست لرزه‌ای این‌گونه خاک‌ها از نشست رمبندگی آن‌ها کمتر است (Yuan and Wang, 2008).

از حساسیت در برابر تغییرات رطوبت، تخلخل بیش از ۴۰ درصد، درجه اشباع شدگی کمتر از ۶۰ درصد و میزان لای بالا می‌باشد.

۲-۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

محققین زیادی رمبندگی خاک را با آزمون‌های آزمایشگاهی مانند آزمایش تحکیم و روش‌های ژئوفیزیکی بررسی کرده‌اند. تحقیقات بعضی از محققین به صورت آیین‌نامه و یا معیار درآمده است. بخش‌های زیر تعدادی از این آزمون‌ها را که در بین مهندسين رواج بیشتری دارد مورد بررسی قرار داده است.

۲-۲-۱. معیار *Densiov*

Densiov از نسبت e/e_L برای تعیین رمبندگی بودن خاک استفاده کرده است (Densiov, 1964). در این رابطه e_L و e به ترتیب نسبت تخلخل در حالت حد روانی و حالت طبیعی است. براساس این معیار هرگاه نسبت e/e_L بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد خاک غیررمبندگی و در صورتی که بین ۰/۷۵ تا ۱/۵ باشد خاک مستعد رمبندگی و اگر بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد خاک بسیار رمبندگی خواهد بود.

۲-۲-۲. معیار آیین‌نامه ساختمانی روسیه

آیین‌نامه روسیه رابطه ۱ را برای ارزیابی رمبندگی خاک مطرح نموده است.

$$L = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \quad (1)$$

در این رابطه e_0 و e_L به ترتیب نسبت تخلخل در حالت رطوبت طبیعی و در رطوبت حد مایع است. براساس این آیین‌نامه در صورتی که درجه اشباع طبیعی خاک کمتر از ۶۰ درصد بوده و $L > 0.1$ باشد، خاک رمبندگی است (Abelev, 1964).

۲-۲-۳. معیار *Holtz and Hilf*

بر اساس این معیار در یک خاک بادرفت با نسبت تخلخل بالا، در صورتی که میزان رطوبت آن در حالت اشباع، بیش از میزان رطوبت آن در حالت حد مایع باشد، استعداد رمبندگی وجود دارد (Holtz and Hilf, 1961). به عبارتی:

$$\gamma_d \leq \frac{G_s \times \gamma_w}{1 + e_0} \quad \text{یا} \quad \gamma_d \leq \frac{G_s \times \gamma_w}{1 + (LL \times G_s)} \quad W_{sat} > LL \quad (2)$$

در این رابطه W_{sat} رطوبت اشباع، G_s وزن مخصوص ویژه، γ_d

محققین مختلف معیارهای متفاوتی را به منظور معرفی خاک‌های رمبندگی به عنوان معیار رمبندگی ارائه کرده‌اند. بعضی از این معیارها بر اساس مشخصات ساختاری و زمین‌شناسی، مانند نوع خاک، وزن مخصوص و یا میزان رس بوده است، حال آنکه سایر معیارها بر اساس نتایج آزمایش‌های خاص بیان می‌شوند. جزئیات این معیارها در بخش بعدی مورد بحث واقع شده‌اند.

۲. معیارهای رمبندگی

همان‌گونه که بیان شد معیارهای رمبندگی بر اساس ساختار خاک و یا آزمایش‌های ویژه تعیین می‌گردند که شرح آن در زیر آمده است:

۲-۱. ساختار خاک

خاک‌های رمبندگی اغلب شامل رسوبات بادی و یا رسوبات ته‌نشین شده کناره رودخانه‌ها بوده و ساختار لایه‌ای و سست دارند. این خاک‌ها اغلب شامل لس، ماسه لای‌دار، لای ماسه‌دار، سیلت، رس سیلتی و رس با پلاستیسیته‌ی پایین می‌باشند. میزان رس و ماسه بر رمبندگی خاک‌ها مؤثر است. افزایش میزان رس تا مقدار معینی سبب افزایش پتانسیل رمبندگی و پس از آن سبب کاهش میزان رمبندگی خواهد شد (Yuan and Wang, 2008). Bull (1964) در تحقیقات خود دریافت هنگامی که درصد رس نهشته‌های بادی حدود ۱۲ درصد است، حداکثر رمبندگی رخ خواهد داد. با کاهش درصد رس، خاک تحت بار وارده متراکم شده و با افزایش آن باعث مقاومت خاک در برابر تراکم خواهد شد. (Clevenger 1959) بر اساس وزن مخصوص خشک، خاک‌های با دانسیته خشک کمتر از 1.28 g/cm^3 را مستعد نشست زیاد و با دانسیته بیشتر از 1.44 g/cm^3 دارای نشست کم ارزیابی نمود. این معیار در مورد بسیاری از خاک‌ها که در حالت‌های تنش و شرایط رطوبتی ویژه پایدارند محافظه‌کارانه است (Lim and Miller, 2004). به طور کلی خاک‌های با وزن مخصوص کمتر از 16 kN/m^3 که به طور پیوسته و یا فصلی اشباع می‌شوند مستعد رمبندگی می‌باشند (Huat et al., 2008). ویژگی‌های دیگر خاک‌های رمبندگی عبارت

وزن مخصوص خشک و LL حد روانی خاک است.

۲-۲-۴. معیار Abelev

Abelev ضریب رمبندگی، δ_s را برای ارزیابی رمبندگی استفاده کرد (Abelev, 1964):

$$\delta_s \quad (۳)$$

در این رابطه Δe کاهش نسبت تخلخل در حین اشباع شدن و e_1 نسبت تخلخل خاک قبل از مرطوب شدن می باشد. بر اساس این معیار اگر δ_s بزرگتر از ۲٪ باشد خاک رمبنده محسوب می شود.

۲-۲-۵. معیار Jenning and Knight

این دو محقق آزمایش تحکیم مضاعف را برای ارزیابی شاخص رمبندگی خاک تکمیل کرده و به کار بردند. روش انجام آزمایش تحکیم مضاعف به این صورت است که آزمایش تحکیم تحت بارگذاری یکسان بر روی دو نمونه، یکی با رطوبت طبیعی و دیگری با رطوبت اشباع انجام می شود. این محققین این آزمایش را تکمیل کرده و آن را به صورت زیر پیشنهاد کردند. در این روش یک نمونه دست نخورده با رطوبت طبیعی در دستگاه تحکیم قرار داده شده، سپس نمونه تا تنش مورد نظر به صورت پله‌ای بارگذاری شده و تحت همان بار اشباع می گردد. در اثر اشباع نمونه، خاک نشست کرده و کرنش ناشی از آن محاسبه خواهد شد. Feda بر اساس نتایج آزمون‌های فوق ضریب رمبندگی C_{col} را به شکل رابطه ۴ ارائه کرد (Jenning and Knight, 1975):

$$C_{col} = \frac{\Delta h \times 100}{h} \quad (۴) \quad \text{یا} \quad C$$

در این رابطه h و Δh به ترتیب ارتفاع قبل از غرقاب کردن و تغییر در ارتفاع نمونه در اثر اشباع شدن نمونه است. جدول ۲ شاخصی از شدت رمبندگی را ارائه می دهد.

۲-۲-۷. معیار ASTM

به منظور اندازه‌گیری قابلیت رمبندگی، آزمایش تحکیم بر اساس پیشنهاد ASTM D5333 انجام می گیرد به گونه‌ای که در این روش پس از آماده‌سازی نمونه دست نخورده (آزمایش تحکیم، ASTM D2435)، تنش قائم تا ۲۰۰ کیلو پاسکال به صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده و با آب مقطر غرقاب شده و

یک روز به همان حالت گذاشته می شود. سپس آزمایش تا رسیدن به بارگذاری حداکثر ادامه یافته و در طی انجام آزمایش تغییر شکل‌ها در هر مرحله ثبت می گردد. شاخص فرو ریزشی، I_e با رابطه ۵ تعریف می شود:

$$I_e \quad (۵)$$

که در آن Δe تغییر در نسبت تخلخل نمونه در اثر اشباع شدن و e_0 نسبت تخلخل نمونه قبل از غرقاب کردن است. بر اساس این آیین‌نامه جدول ۲ شاخصی از شدت رمبندگی را ارائه می دهد. این معیار از معیارهای مرسوم در تحقیقات بوده و اشخاصی نظیر (Houston 1996) و (Jotisankasa et al. 2007) از این معیار استفاده کرده‌اند.

جدول ۲. شدت رمبندگی بر اساس آیین‌نامه ASTM

شاخص رمبندگی (I_e) %	شدت رمبندگی
۰	غیر رمبنده
۰/۱ - ۲	اندک
۲/۱ - ۶	متوسط
۶/۱ - ۱۰	زیاد
> ۱۰	شدید

علاوه بر معیارهای فوق، یک رابطه بین حد روانی و وزن مخصوص خشک خاک (Gibbs and Bara, 1962) و نیز رابطه‌ای بر اساس رطوبت طبیعی، درجه اشباع و حد خمیری خاک ارائه شده است (Feda, 1960). همچنین (Feda 1988) و (Reznik 2000) روابطی بر اساس نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی و تحکیم مضاعف پیشنهاد کرده‌اند. روش آزمایش تحکیم مضاعف توسط هاستون و همکاران مجدداً اصلاح شده و رابطه جدید جهت تخمین پتانسیل رمبندگی پیشنهاد شد (Houston, 1996; Houston et al., 1988).

(Lin and Wong 1964) با مطالعه بر روی خاک‌های رمبنده چین، رمبندگی این‌گونه خاک‌ها را تحت اثر وزن خودشان بررسی کرده‌اند. (Hymann 2000) و (Rust et al. 2005) آزمایشی برای اندازه‌گیری رفتار رمبندگی خاک در دستگاه سه محوری تشریح کرده‌اند. (Francisca 2007) با انجام آزمایش‌های تحکیم مضاعف و نفوذ استاندارد بر روی لس‌های سیلتی، به منظور تخمین شاخص رمبندگی، رابطه‌ای بر اساس عدد نفوذ

توجه به مسئله‌دار بودن خاک این منطقه تحقیق حاضر روی نکات زیر متمرکز شده است:

- تعیین خواص مکانیکی خاک
- بررسی پتانسیل رمبندگی
- تأثیر رمبندگی بر پارامترهای مقاومتی

۳-۱. برنامه آزمایش‌ها انجام شده

به منظور بررسی خواص مکانیکی خاک‌های رمبند منطقه، آزمایش‌های متعددی روی نمونه‌ها انجام گرفت. این آزمایش‌ها را که تعداد و شرح آنها در جدول ۳ آمده، می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

الف: آزمایش‌های اولیه شامل تعیین دانه‌بندی، وزن مخصوص، درصد رطوبت و حدود آتربرگ

ب: آزمایش‌های تعیین رمبندگی بر اساس معیارهای بیان شده در بخش‌های قبل

پ: آزمایش‌های آزمایشگاهی جهت تعیین پارامترهای مقاومتی مانند تراکم، CBR، تک‌محوری، سه‌محوری، برش مستقیم و تحکیم

ت: آزمایش‌ها صحرایی شامل نفوذ استاندارد (SPT)، بارگذاری صفحه (PLT) و CBR در محل

جدول ۳. آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک محل

تعداد نمونه	نوع آزمایش	تعداد نمونه	نوع آزمایش	تعداد نمونه	نوع آزمایش
۸	§ برش مستقیم	۲	CBR*§	۲۸	دانه‌بندی و درصد رطوبت
۱۰	SPT نفوذ استاندارد	۱۵	تک محوری §	۲۵	حدود آتربرگ
۶	# بارگذاری صفحه	۲۱	تحکیم §	۲۷	وزن مخصوص
۷	# درمحل CBR	۷	سه محوری §CU	۲	تراکم

(§) نمونه مورد آزمایش دست نخورده و با رطوبت طبیعی بوده است.
 (#) آزمایش‌ها در دو حالت با رطوبت طبیعی و اشباع انجام شده است.

۳-۲. مشخصات فیزیکی خاک محل پروژه

خاک مورد مطالعه از نوع خاک‌های ریزدانه سیلتی (ML)، رسی سیلتی (CL-ML) و رس با پلاستیسیته‌ی پایین (CL) بوده و

استاندارد (N) بیان کرده است. همچنین یک روش تحلیلی جدید، خصوصیات مکانیکی خاک‌های رمبند را بر اساس نسبت منافذ خاک و درصد رطوبت خاک پیشنهاد کرده است (Reznik, 2007).

Lim and Miller (2004) با استفاده از نتایج آزمایش‌های تحکیم یک بعدی بر روی خاکریزهای متراکم شده، شاخص رمبندگی را طبق رابطه‌ای از درصد رطوبت تراکم (w)، وزن مخصوص خشک خاک (γ_d)، شاخص خمیری (PI) و درصد ذرات رسی (C) به دست آورده‌اند.

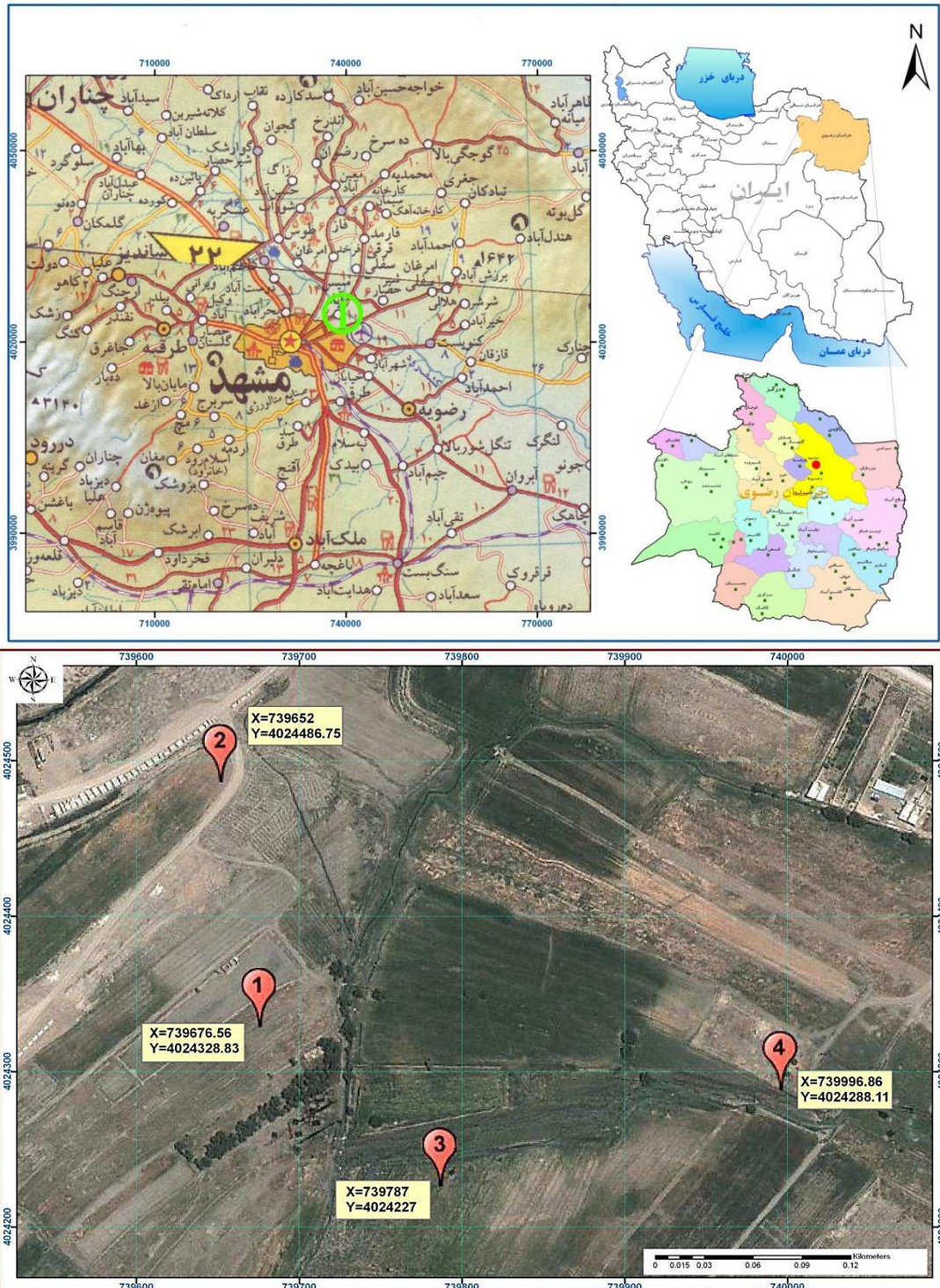
Delollo (2011) خاک‌های رمبند را به وسیله‌ی روش‌های ژئوفیزیکی و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک شناسایی کرده است. در این روش مقادیر مقاومت ویژه‌ی بالا نشانگر رفتار رمبندگی ناحیه می‌باشد. این روش برای شناسایی اولیه خاک‌های رمبند بسیار مفید است. براساس مطالعات Yuan and Wang (2008) میزان نشست خاک‌های رمبند ناشی از بارهای دینامیکی را می‌توان با قرار دادن نمونه تحت باری با ۱۰ سیکل و فرکانس 1HZ و اندازه‌گیری نشست نمونه قبل و بعد از ارتعاش به دست آورد.

۲. اهداف تحقیق حاضر

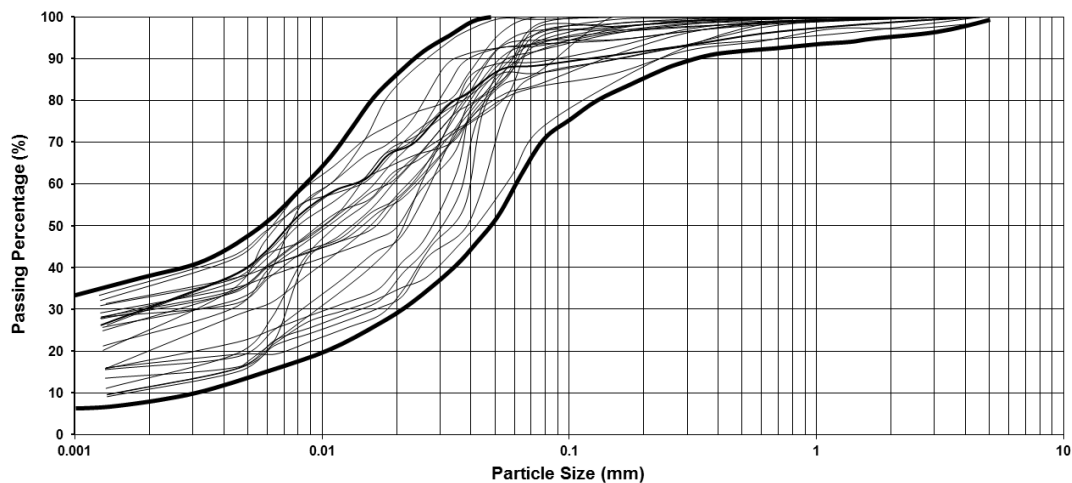
منطقه مورد مطالعه در ناحیه گرم و خشک و در حاشیه یک رودخانه‌ی فصلی در شمال شرق مشهد قرار گرفته است. با انجام بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی خاک گمانه‌های حفر شده، مشخص می‌شود بخشی از خاک منطقه بر اثر رسوب‌گذاری در طی سالیان متمادی شکل گرفته است. از طرف دیگر زمین‌های این ناحیه کشاورزی بوده و فاضلاب‌های شهری در این منطقه دفع می‌شده است. انحلال نمک‌های موجود در خاک بر اثر جاری شدن فاضلاب می‌تواند عامل متخلخل شدن ساختار خاک باشد. با توجه به احداث سازه‌های ریلی و احداث ساختمان در نزدیکی پروژه، ارتعاش ناشی از عبور قطار و یا افزایش رطوبت خاک، می‌تواند نشست زیادی را به سازه‌های ریلی و ساختمان‌های مجاور تحمیل کند. با

که پس از دانه‌بندی، آزمایش‌های مورد نظر روی آن‌ها انجام پذیرفت. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه و محل گمانه‌ها را نشان می‌دهد.

دارای وزن مخصوص خشک در حدود 1.5 g/cm^3 است. تعداد ۲۸ نمونه دست‌خورده و ۵۷ نمونه دست‌نخورده (نمونه‌گیری با استوانه‌ی جدار نازک) از چهار نقطه منطقه مورد نظر گرفته شد.



شکل ۱. محدوده‌ی مورد مطالعه و مختصات محل گمانه‌های حفر شده



شکل ۲. محدوده دانه‌بندی کل نمونه‌های مورد مطالعه

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه

شماره گمانه	شماره نمونه	نوع خاک	درصد عبوری از الک ۲۰۰	LL (%)	PL (%)	W (%)	γ_d (g/cm ³)	آزمایش برش		سه محوری		تحکیم		مقاومت تک محوری (kg/cm ²)
								C (kg/cm ²)	ϕ (deg)	C (kg/cm ²)	ϕ (deg)	Cc	Cs	
۱	۱	CL	۹۲	۲۲/۸	۱۰	۱۵/۷	۱/۵۲	-	-	-	-	۰/۲۲	۰/۰۱۵	۰/۶۵
	۲	CL	۹۷/۹	۳۱/۵	۸	۲۳/۲	۱/۶	۰/۳۱	۲۴	-	-	۰/۱	۰/۰۱۶	۰/۳۷
	۳	ML	۹۶/۱	۳۲/۲	-	۱۶/۸	۱/۵۳	۰/۳۱	۲۷	-	-	۰/۱۲	۰/۰۲۲	۰/۶۲
	۴	ML	۸۹/۲	۲۴/۱	-	۱۵/۹	۱/۵۸	-	-	-	-	۰/۱۳	۰/۰۱۸	
۲	۵	CL	۹۴/۴	۲۵/۴	۷/۴	۳/۸	۱/۵۴	-	-	-	-	۰/۲۴	۰/۰۱۵	۱/۷۶
	۶	CL	۹۸	۳۰/۴	۹/۵	۱۹/۴	۱/۵۲	۰/۵۴	۷	-	-	۰/۱۱	۰/۰۱۵	۰/۴۶
	۷	ML	۵۷/۱	-	-	۱۷/۵	۱/۴۸	-	-	-	-	۰/۱۸	۰/۰۱۵	۰/۹۷
	۸	CL - ML	۸۷	۲۴	۶	۱۳/۸	۱/۵۳	۰/۲۵	۲۸	-	-	۰/۱۹	۰/۰۱۹	۰/۸۵
	۹	CL	۹۴/۴	۲۸/۰۳	۷/۷	۲۵/۹	۱/۵۰	-	-	۰/۵۸	۱۴	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۵۹
۳	۱۰	ML	۸۹/۳	۲۰/۹	-	۵/۲	۱/۴۶	۰/۰۷	۲۰	۰/۱۵	۲۰	۰/۲۳	۰/۰۳۲	۱/۵۸
	۱۱	ML	۹۸/۱	۲۴/۱	-	۱۸/۹	۱/۵۲	-	-	-	-	۰/۱۳	۰/۰۱۷	۰/۶۲
	۱۲	ML	۹۰/۵	۲۳/۲	-	۲۳/۶	۱/۵۵	-	-	-	-	۰/۱۱	۰/۰۱۳	
	۱۳	ML	۹۰/۴	۲۳/۲	-	۱۸/۳	۱/۵۵	۰/۰۵	۲۲	۰/۳	۱۹	۰/۲۱	۰/۰۱۶	۰/۸۹
	۱۴	ML	۹۴/۶	۲۵/۲	-	۲۳/۲	۱/۵۴	-	-	-	-	۰/۲۳	۰/۰۱۹	
۴	۱۵	ML	۸۷/۴	۲۱/۲	-	۱۲/۹	۱/۴۹	-	-	۰/۱۸	۲۴	-	-	۱/۱۷
	۱۶	CL-ML	۸۳/۸	۲۴/۲	۶/۷	۱۱/۸	۱/۵۶	-	-	۰/۱۲	۱۴	۰/۳	۰/۰۱۱	
	۱۷	CL	۹۱/۹	۲۴/۱	۷/۱	۱۴/۸	۱/۵۱	۰/۲۵	۲۸	۰/۲۶	۱۳	-	-	۰/۸۱
	۱۸	ML	۹۴/۲	۲۳/۹	۳	۱۴/۹	۱/۴۹	۰/۳۸	۲۲	۰/۱۲	۲۳	۰/۰۸	۰/۰۰۷	۱/۰۳

CL است. درصد رطوبت نمونه‌ها بین ۵ تا ۲۶ درصد متغیر بوده و حد روانی آنها بین ۲۰ تا ۳۱ درصد و حد خمیری آن بین ۳ تا ۱۰ درصد است.

مقدار ذرات رسی خاک (کوچک‌تر از 0.005 mm) بین ۱۰ تا ۳۵ درصد و میزان ذرات کوچک‌تر از 0.075 mm (رد شده از الک نمره ۲۰۰) به طور میانگین حدود ۸۵ درصد است. همچنین

به منظور بررسی مشخصات خاک، آزمایش‌های متعددی در محل و در آزمایشگاه بر روی خاک انجام گرفته که بیانگر استعداد رمبندگی خاک محل می‌باشد. شکل ۲ محدوده دانه‌بندی کل نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به دانه‌بندی خاک می‌توان گفت خاک مورد مطالعه از نوع خاک ریزدانه سیلتی ML، رسی سیلتی CL-ML و رس با پلاستیسیته پایین

وزن مخصوص خشک میانگین نمونه‌ها حدود 1.5 g/cm^3 می‌باشد. مشخصات اولیه مکانیکی کلیه نمونه‌های گرفته شده در جدول ۴ و نتایج معیارهای رمبندگی در جدول ۵ آمده است.

۳-۳. بررسی پتانسیل رمبندگی خاک محل پروژه

از میان معیارهای بیان شده معیارهای دنیسف، هولتز و هیلف، آیین‌نامه روسیه و آیین‌نامه ASTM که بیشتر در میان مهندسیین متداول است (Rafie et al., 2008)، جهت ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک مورد مطالعه انتخاب شدند. جدول ۵ خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های با معیارهای فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۵. نتایج رمبندگی نمونه‌ها بر اساس معیارهای دنیسف، هولتز و هیلف، آیین‌نامه روسیه و آیین‌نامه ASTM

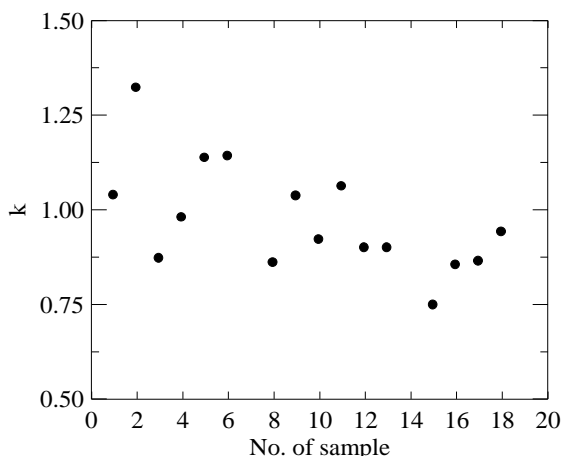
شماره نمونه	نسبت تخلخل (e_0)	دنیسف (K)	آیین‌نامه روسیه (L)	هولتز و هیلف (W_{sat})	ASTM (شاخص رمبندگی، I_e)
۱	۰/۸	۱/۰۴	-۰/۰۱۳	۲۳/۵	۲/۱۱
۲	۰/۷۶	۱/۳۲	-۰/۰۲۵	۳۳	۱/۱۸
۳	۰/۸۱	۰/۸۷	۰/۰۵۴	۲۴/۷	۰/۸۳
۴	۰/۸۸	۰/۹۸	۰/۰۰۹	۲۵/۲	۰/۶۸
۵	۰/۸۲	۱/۱۴	-۰/۰۵۱	۲۶/۲	۶/۵۳
۶	۰/۷۳	۱/۱۴	-۰/۰۵۸	۳۱/۶	۱/۱۴
۷	۰/۸۲			۲۷/۸	۲/۳۹
۸	۰/۹۶	۰/۸۶	۰/۰۶	۲۵	۱/۰۲
۹	۰/۷۷	۱/۰۳	-۰/۰۱۵	۲۹/۱	۱/۷۵
۱۰	۰/۹	۰/۹۲	۰/۰۳	۲۱/۶	۷/۳۶
۱۱	۰/۷۲	۱/۰۶	-۰/۰۲۳	۲۵/۴	۴/۱۰
۱۲	۰/۷۸	۰/۹	۰/۰۴۲	۲۴/۸	۲/۵۴
۱۳	۰/۷۴	۰/۹	۰/۰۴۲	۲۴/۵	۱/۸۰
۱۴	۰/۷۶				۱/۵۱
۱۵		۰/۷۵	۰/۱۰۹	۲۲	۳/۸۵
۱۶	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۰۶۴	۲۵/۶	۷/۲۶
۱۷	۰/۷۵	۰/۸۶	۰/۰۵۹	۲۵/۲	۵/۳
۱۸	۰/۸۶	۰/۹۴	۰/۰۲۴	۲۴/۷	۱/۲۷

۳-۳-۱. معیار Denisov

بر اساس این معیار نسبت تخلخل در حالت طبیعی و نسبت تخلخل در حد روانی، $k = \frac{e}{e_L}$ به دست می‌آید (بند ۲-۱-۲). نتیجه آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های خاک منطقه که در شکل ۳ نشان داده شده است بیانگر این نکته است که اکثر نمونه‌ها در محدوده‌ی مستعد رمبندگی قرار دارند.

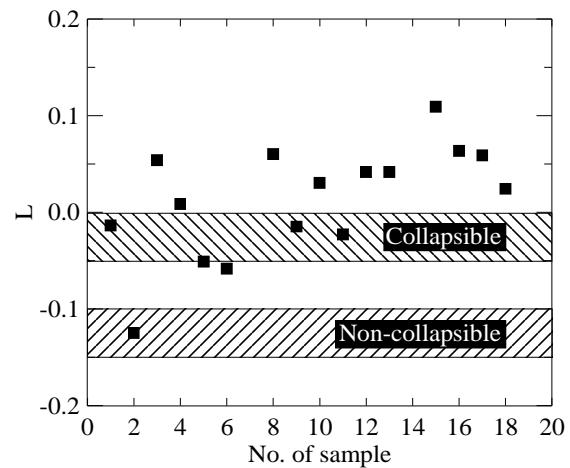
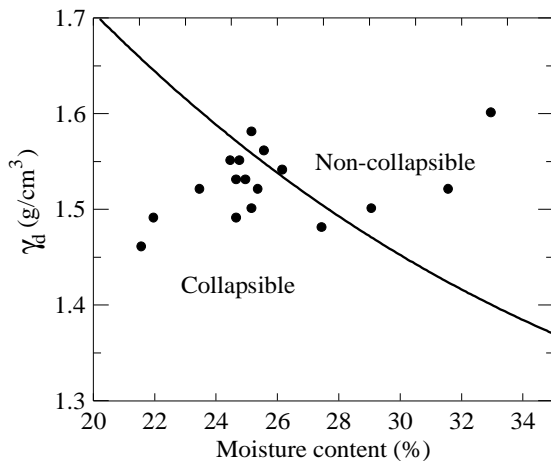
۳-۳-۲. آیین‌نامه ساختمانی روسیه

پتانسیل رمبندگی برای نمونه‌هایی از خاک منطقه بر اساس آیین‌نامه روسیه ارزیابی شده که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. یادآوری می‌شود نمونه‌های با درجه اشباع بیش از ۶۰ درصد، حذف شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد اغلب نمونه‌ها دارای پتانسیل رمبندگی هستند.



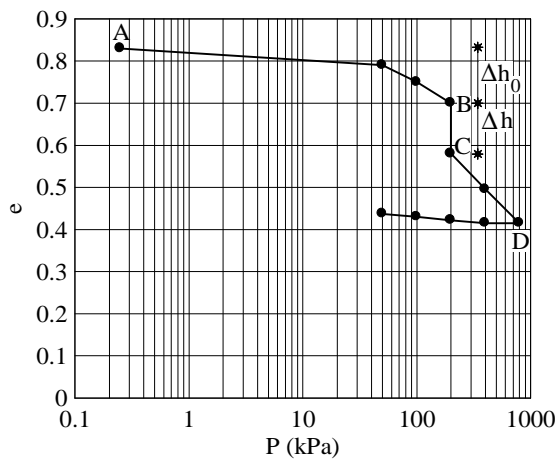
شکل ۳. ارزیابی پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Denisov (1964)

رمبندگی کم، متوسط و زیاد است. شکل ۷ شاخص رمبندگی را بر اساس شماره‌ی نمونه نشان می‌دهد.

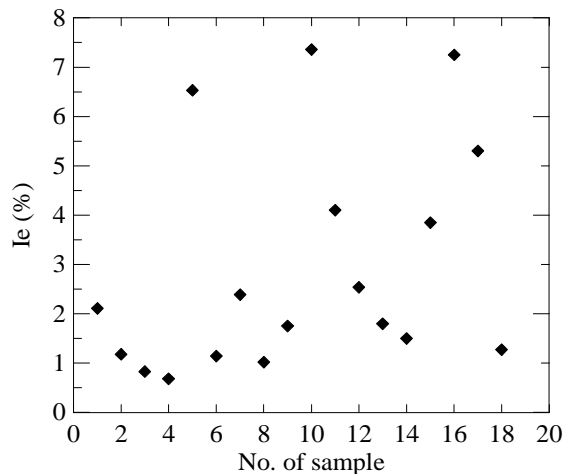


شکل ۴. پتانسیل رمبندگی بر اساس آیین نامه روسیه (Abelev, 1964)

شکل ۵. پتانسیل رمبندگی بر اساس پیشنهاد Holtz (1961) and Hilf



شکل ۶. نمودار تحکیم یکی از نمونه‌ها (ASTM D5333)



شکل ۷. تغییرات شاخص رمبندگی، I_e بر اساس معیار ASTM

۳-۳-۳. معیار Holtz and Hilf

به منظور ارزیابی پتانسیل رمبندگی بر اساس این معیار رطوبت اشباع، وزن ویژه خاک، وزن مخصوص خشک و حد روانی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. اگر وزن مخصوص خشک خاک در محل مقداری باشد که رطوبت خاک در شرایط اشباع بزرگتر از حد روانی خاک باشد، مقاومت برشی خاک ناچیز بوده و ساختار خاک در صورت اعمال بار فرو خواهد ریخت. این شرایط هنگامی اتفاق می‌افتد که نقاط نمودار، زیرخطی که رطوبت اشباع برابر با حد روانی خاک است، قرار گیرد. شکل ۵ که پتانسیل رمبندگی را بر اساس معیار مطالعات هولتز و هیلف نشان می‌دهد بیانگر مستعد رمبندگی بودن نمونه‌ها می‌باشد.

۳-۳-۴. معیار ASTM

شکل ۶ رفتار یکی از نمونه‌ها را که در آزمایش تحکیم (ASTM D5333-03) انجام شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش رطوبت نمونه (قبل از اشباع)، نشست افزایش یافته (Δh_0) و میزان نشست (پس از اشباع کردن نمونه و بدون اعمال تنش) به میزان (Δh) افزایش خواهد یافت که این امر سبب کاهش شاخص رمبندگی خواهد شد. بر اساس این معیار شاخص رمبندگی (I_e) خاک محل بین ۰/۱ تا ۲ و بین ۲/۱ تا ۶ و بین ۶/۱ تا ۱۰ بوده که به ترتیب بیانگر

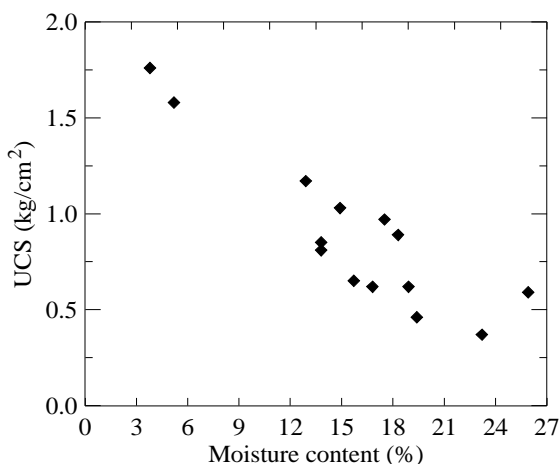
رفتار رمبندگی خاک، قادر به تخمین نشست آن در اثر رمبندگی نیز می‌باشند. با این حال باید در این معیارها تأثیر رطوبت اولیه خاک در میزان رمبندگی نیز مد نظر قرار گیرد.

۴. اثر رمبندگی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

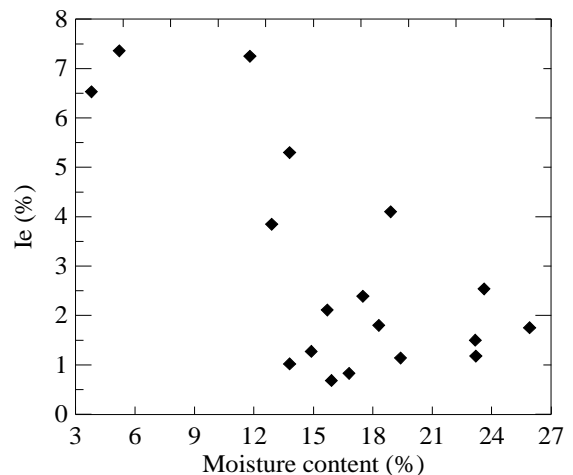
جهت انجام آزمون‌های دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود آتربرگ، تراکم و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه‌برداری به صورت دست‌خورده انجام گرفت. سایر آزمایش‌های انجام شده شامل تحکیم، برش مستقیم، سه محوری و تک محوری بر روی نمونه‌های دست‌نخورده انجام گرفت. به علت ساختار باز و ریزی بودن این گونه خاک‌ها نمونه‌گیری دست‌نخورده بسیار مشکل می‌باشد. در ادامه، نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرائی ارائه گردیده است.

۴-۱. مقاومت تک‌محوری

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D2166 روی نمونه‌های استوانه‌ای دست‌نخورده به قطر ۷۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر انجام شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش که در شکل ۹ نشان داده شده است بیانگر ضعیف بودن ساختار خاک است. مقادیر مقاومت تک‌محوری با افزایش درصد رطوبت کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت در اثر افزایش رطوبت به ویژه در رطوبت‌های بالا یکی از مشخصات خاک‌های رمبنده است.



شکل ۹. تغییرات مقاومت تک‌محوری در برابر تغییرات درصد رطوبت



شکل ۸. تغییرات شاخص رمبندگی، I_e با رطوبت اولیه خاک نتایج آزمایش‌ها بیانگر این نکته است که با افزایش نسبت تخلخل و کاهش وزن مخصوص خشک، پتانسیل رمبندگی افزایش می‌یابد. درصد رطوبت اولیه خاک نیز پدیده رمبندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به گونه‌ای که با افزایش درصد رطوبت (به ویژه در محدوده ۵ تا ۷ درصد) پتانسیل رمبندگی کاهش می‌یابد (Soliman, 2010). نتایج این تحقیق که در شکل ۸ نشان داده شده است نیز این موضوع را تأیید می‌کند. به عبارتی با افزایش درصد رطوبت اولیه، شاخص رمبندگی (I_e) کاهش می‌یابد. افزایش درصد رطوبت خاک‌های رمبنده باعث ضعیف شدن پیوند بین ذرات شده و با دو مکانیسم افزایش تغییر شکل عمودی در حین بارگذاری یا فروریختن ساختار خاک موجب تغییر رفتار آن می‌شود (Francisca, 2007).

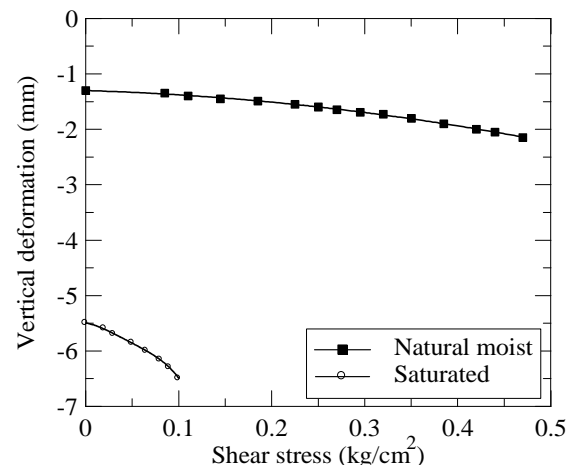
۳-۴. مقایسه معیارهای رمبندگی

بر اساس مطالعات Santaga معیارهای موجود به منظور ارزیابی پتانسیل به طور کامل قادر به ارزیابی رفتار خاک‌های رمبنده نبوده و هر کدام بخشی از خواص این خاک‌ها را مشخص می‌نمایند. با این حال آزمایش تحکیم مضاعف یک روش مؤثر به منظور ارزیابی رمبندگی است (Santaga, 2011). بر اساس مطالعات حاضر معیار هولتز و هیلف، معیار دنیسف و آیین‌نامه‌ی روسیه به صورت کیفی میزان رمبندگی را بیان کرده و قادر به اندازه‌گیری میزان نشست در اثر رمبندگی نیستند. معیارهای Jennings and Knight و ASTM با توجه به انجام آزمایش تحکیم در بین این معیارها علاوه بر ارزیابی

۲-۴. مقاومت برشی

به منظور تعیین پارامترهای مقاومتی، آزمایش‌های برش مستقیم (ASTM D3080) روی نمونه‌های بازسازی شده به ابعاد 30×100×100 mm و آزمایش سه‌محوری CU روی نمونه‌های دست‌نخورده انجام شده است (ASTM D2850). طی فرایند رمبندگی خاک خصوصیات آن نظیر پیوند بین ذرات، مقاومت برشی، نفوذپذیری و چگالی به شدت کاهش خواهد یافت. براساس مطالعات انجام شده مقاومت برشی خاک در حالت اشباع حدود ۱۶ درصد حالت خشک آن است. (Nishimura et al., 2008). کاهش پارامترهای برشی خاک به ویژه چسبندگی آن در اثر افزایش رطوبت ناشی از کاهش مکش در خاک بوده و نشانگر وابستگی شدید به ماتریس مکش می‌باشد (Huat et al., 2008).

جهت بررسی تغییر شکل‌های ناشی از تحکیم نمونه تحت تنش عمودی یکسان در آزمایش برش مستقیم، چندین نمونه در دو حالت رطوبت طبیعی و حالت اشباع مورد آزمون قرار گرفتند. به این منظور پس از قرار دادن نمونه دست‌خورده در دستگاه برش و اعمال تنش عمودی، نمونه اشباع شده و تغییر شکل قائم آن تحت اثر تنش عمودی اعمال شده اندازه‌گیری شد. بر این اساس شاخص رمبندگی در تنش عمودی 100 kPa بیش از ۲۰ درصد بوده و مقاومت برشی در حالت اشباع کمتر از ۲۰ درصد مقاومت برشی در حالت رطوبت طبیعی است.



شکل ۱۰. رفتار دو نمونه خاک با رطوبت اشباع و رطوبت طبیعی در آزمایش برش مستقیم

شکل ۱۰ نمونه‌ای از تغییر شکل قائم را در برابر تغییرات تنش برشی تحت تنش عمودی 1 kg/cm^2 نشان می‌دهد.

۳-۴. آزمایش‌های صحرایی

خاک‌های ریزدانه موجود در محل پروژه عموماً از نوع رس با پلاستیسیته پایین و لای با حد روانی کم می‌باشد که به دست‌خوردگی حساس بوده و انتظار می‌رود نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه آزمایشگاهی آن متفاوت با نتایج آزمایش‌های برجا باشد. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی وضعیت خاک ریزدانه موجود در محل پروژه را از نظر توان باربری و پایداری در مقابل تغییرات رطوبت، به‌طور کلی نامناسب معرفی می‌کند. با فرض وجود این شرایط، لزوماً می‌بایست در خصوص تعویض خاک به ضخامت زیاد، اجرای پی‌های با ابعاد بزرگ و یا روش‌های دیگر اقدام نمود که هزینه قابل توجهی برای پروژه در برخواهد داشت. بر این اساس به منظور ارزیابی دقیق‌تر مشخصات مکانیکی خاک محل، آزمایش‌های برجا شامل آزمایش بارگذاری صفحه، SPT و CBR صحرایی در عمق‌ها و رطوبت‌های متفاوت و در حالت اشباع انجام گرفته تا بتوان اثرات رطوبت بر خاک را نیز ارزیابی کرد. شرح این آزمایش‌ها در زیر آمده است.

۳-۴-۱. آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

با استفاده از آزمون نفوذ استاندارد (SPT) می‌توان ویژگی‌هایی نظیر ساختار، مقاومت و شکل‌پذیری خاک را تخمین زده و نیز رمبندگی لس‌ها را ارزیابی نمود (Francisca, 2007). بر پایه این مطالعات با افزایش عدد نفوذ N ، شاخص رمبندگی (δ_r) کاهش یافته که می‌توان آن را از رابطه‌ی زیر تخمین زد:

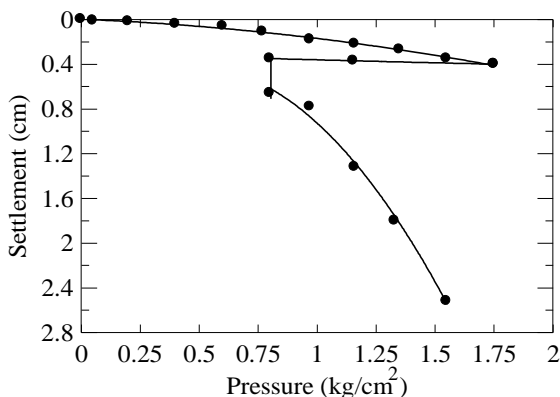
$$\delta_r = \delta_0 \times e^{-0.13N} \quad (6)$$

در این رابطه، δ_0 به میزان سطح تنش وابسته بوده و برای سربار $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$ برابر $\delta = 12\%$ می‌باشد. در تحقیق حاضر، آزمایش SPT بر اساس آیین‌نامه ASTM D1586 در ۵ گمانه و در اعماق ۱ و ۳ متری انجام شده است. عدد SPT خاک محل در محدوده ۴ تا ۳۳ است. شکل ۱۱ تغییرات عدد SPT را در برابر تغییرات درصد رطوبت نشان می‌دهد. میزان رطوبت در

خاک محل به افزایش رطوبت حساس بوده و با افزایش رطوبت نسبت باربری آن کاهش می‌یابد.

۳-۳-۴. آزمایش بارگذاری صفحه (PLT)

برای ارزیابی دقیق رفتار خاک در مقابل بارهای وارده و تعیین ضریب تغییر شکل خاک و برآورد مقدار نشست، آزمایش بارگذاری صفحه در محل (Plate Load Test) در دو حالت رطوبت طبیعی و نیز رطوبت اشباع انجام شده است. در هر دو حالت به منظور حذف اثرات دست‌خوردگی، ابتدا تنش عمودی تا 0.6 kg/cm^2 افزایش یافته و سپس تا تنش 0.1 kg/cm^2 باربرداری شده است. در حالت اشباع بارگذاری تا تنش 1.8 kg/cm^2 ادامه یافته و ضریب تغییر شکل خاک، E_{v2} محاسبه شده است. در آزمایش‌های انجام شده با رطوبت طبیعی پس از بارگذاری ثانویه، تنش تا مقدار 0.8 kg/cm^2 باربرداری شده و ضریب تغییر شکل برای باربرداری، E_{v2} محاسبه شده است. سپس در این تنش، تغییر شکل نمونه در اثر اشباع شدن اندازه‌گیری شده است (شکل ۱۲). نتایج این آزمایش‌ها نیز رمبنده بودن خاک را تأیید می‌نماید. شکل ۱۳ نمودار تنش-نشست را برای یکی از نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود خاک در تنش 0.8 kg/cm^2 اشباع شده و میزان نشست ناشی از رمبندگی در این تنش در حدود ۱۱ درصد نشست خاک اشباع تا تنش 1.6 kg/cm^2 است.

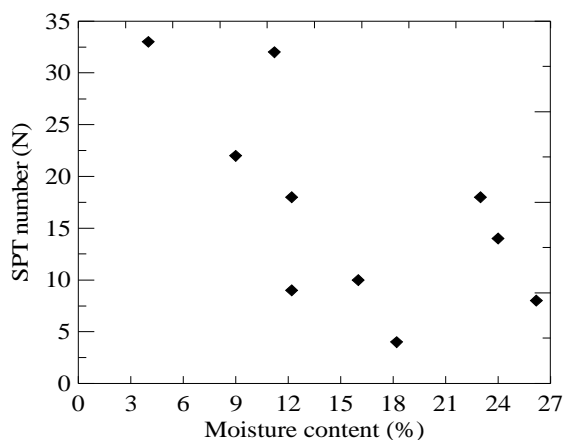


شکل ۱۳. تغییرات تنش-نشست در آزمایش بارگذاری صفحه

در محل برای یکی از نمونه‌ها

در آزمایش اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی در محل با آزمایش بارگذاری صفحه، نشست خاک در اثر اشباع شدن به فشار زیر

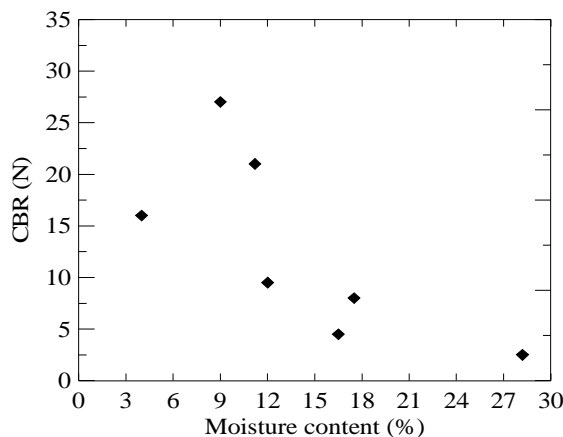
خاک‌های ریزدانه به ویژه در خاک‌های رمبنده بر عدد نفوذ استاندارد تأثیرگذار بوده و با افزایش رطوبت، عدد نفوذ استاندارد کاهش می‌یابد. لذا آزمایش‌های نفوذ برای خاک‌های رمبنده‌ای که در آن‌ها تغییرات قابل ملاحظه رطوبت نسبت به زمان انجام آزمایش انتظار نمی‌رود، مفیدتر خواهد بود.



شکل ۱۱. تغییرات عدد SPT در برابر تغییرات درصد رطوبت

۳-۳-۴. آزمایش CBR در محل

آزمایش CBR صحرائی طبق استاندارد ASTM D4429 انجام شده است. این آزمایش در رطوبت‌های متفاوت و در حالت اشباع انجام گرفته تا بتوان علاوه بر اندازه‌گیری نسبت باربری کالیفرنیا در محل، اثرات رطوبت بر خاک را نیز ارزیابی کرد. نتایج این آزمایش صحرائی در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار CBR در محل نسبت به نتایج آزمایشگاه اندکی افزایش یافته اما با این حال ناچیز می‌باشد.



شکل ۱۲. مقادیر CBR صحرائی در رطوبت‌های مختلف

همچنین با افزایش درصد رطوبت، مقدار CBR در محل به شدت کاهش یافته که این امر نشانگر این واقعیت است که

می‌دهد، با این حال نمونه‌های دست‌نخورده نیز نتایج ضعیف‌تری را از آزمایش‌های در محل نشان می‌دهند.

- نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه (به ویژه نتایج آزمایش‌های CBR اشباع و تحکیم) نشان می‌دهد که خاک به افزایش رطوبت حساس بوده و در صورت اشباع شدن مقاومت آن کاهش یافته و نشست اضافی قابل توجهی را در مدت زمان کوتاه متحمل خواهد شد. بنابراین می‌توان این خاک را دارای پتانسیل رمبندگی متوسط تا زیاد این خاک (Collapsible) دانست.

- نتایج آزمایش‌های انجام شده صحرایی (که فقط در چند نقطه محدود انجام شد)، شرایط بهتری را برای خاک تصویر می‌نماید. این موضوع نشان می‌دهد که خاک به دست‌خوردگی به شدت حساس است. با این وجود این آزمایش‌ها نیز نشانگر رمبندگی بودن خاک محل می‌باشند.

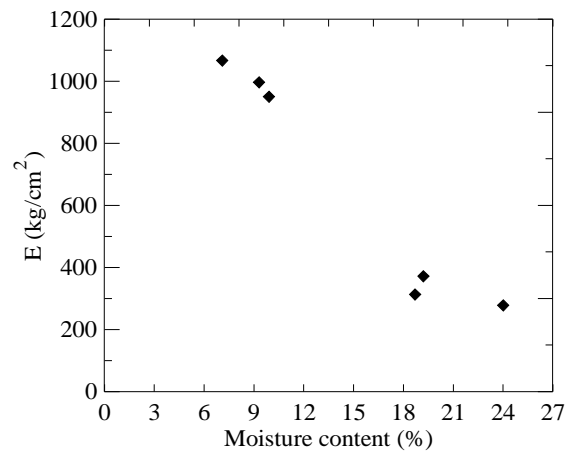
- استفاده از آزمایش تحکیم مضاعف و نیز آزمایش تحکیم به عنوان روشی مناسب به منظور ارزیابی رمبندگی پیشنهاد می‌شود، با این حال در این روش‌ها میزان رمبندگی خاک به رطوبت اولیه خاک وابسته است و باید تأثیر رطوبت اولیه در شاخص رمبندگی لحاظ شود.

- میزان نشست سازه‌های احداثی در اثر رمبندگی به عوامل متعددی از جمله رطوبت اولیه خاک وابسته است و در صورتی‌که سازه بر روی خاک با رطوبت کم ساخته شود، در صورت اشباع شدن خاک و ارتعاش ناشی از عبور قطار، سازه نشست زیادی را متحمل خواهد شد. بنابراین ساخت هرگونه سازه مخصوصاً سازه‌های حساس مانند سازه‌های ریلی، مستلزم اصلاح و بهسازی خاک محل است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مساعدت و مشاوره جناب آقای مهندس قانع مدیر بخش ژئوتکنیک شرکت مهندسی مشاور آب پوی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

صفحه بارگذاری و ابعاد آن در هنگام اشباع شدن وابسته بوده و با افزایش فشار و ابعاد صفحه، افزایش می‌یابد (Day, 1996). در مطالعه‌ی حاضر با در نظر گرفتن ظرفیت باربری خاک در حدود تنش 0.8 kg/cm^2 محل آزمایش در این تنش اشباع شده و بارگذاری تا تنش ۲ برابر آن (1.6 kg/cm^2) ادامه یافته است. شکل ۱۴ تغییرات مدول تغییر شکل در برابر درصد رطوبت را نشان می‌دهد. همچنین خلاصه نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۴. تغییرات ضریب تغییر شکل در برابر درصد رطوبت

جدول ۶. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در محل

گمانه	عمق (m)	مدول تغییر شکل، E (kg/cm ²)		درصد رطوبت	S (cm)	
		Loading	Unloading			
۱	۱	۳۷۱		۱۹/۲		
	۱/۵	۲۷۸		۲۴		
۳	۲	۱۰۶۶	۲۲۲۴	۷/۱	۰/۱۷	۸/۷
۴	۱	۹۵۰	۵۰۰۴	۹/۹	۰/۱۲	۵/۸
	۱/۵	۹۹۶	۵۸۸۴	۹/۳	۰/۲۸	۱۱/۳
	۲	۳۱۳		۱۸/۷		

در جدول فوق S میزان نشست در اثر اشباع شدن خاک (تحت تنش 0.8 kg/cm^2) و δ_s نسبت نشست (%) ناشی از اشباع شدن خاک در تنش 0.8 kg/cm^2 به نشست کل خاک اشباع تا تنش 1.6 kg/cm^2 است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- با توجه به سست بودن نمونه‌های دست‌خورده (بازسازی شده) نتایج ضعیف‌تری را از نمونه‌های دست‌نخورده نشان

منابع

- رفیعی، ب.، ۱۳۸۷. تثبیت خاک‌های رمبنده با تزریق - مطالعه‌ی موردی راه‌آهن سمنان - تهران. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمينی، قزوین.
- گودرزی، ا. ر.، اوحدی، و. ر.، ۱۳۸۶. تأثیر توام انحلال نمک‌های کربناتی یا سولفاتی و قابلیت رمبندگی بر تشدید شکل‌گیری فروچاله‌ها. مجله دانشکده فنی، جلد ۴، شماره ۳.
- Benatti, J.C.B., Miguel, M.G., Rodrigues, R.A., Vilar, O.M., 2011. Collapsibility study for tropical soil profile using oedometric tests with controlled suction. In: Alonso, E., Gens, A. (Eds.), *Unsaturated Soils.*, Taylor & Francis Group, London, PP.193-198.
- Das, B.M., 1990. *Principles of Foundation Engineering*, 2nd Edition, PWS-Kent PubT Co.
- Day, R.W., 1996. Discussion: Down-Hole Collapse Test System. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 122: 869 – 872.
- Feda, J., 1988. Collapse of loess upon wetting. *Engineering Geology*, 25: 263-269.
- Francisca, F.M., 2007. Evaluating the Constrained Modulus and Collapsibility of Loess from Standard Penetration Test. *International Journal of Geomechanics*, 7(4): 307–310.
- White, J.L., Greenman, C., 2008. *Collapsible Soils in Colorado*. Engineering Geology, Colorado Geological Survey Publication EG-14.
- Huat, B.B.K., AL Aziz, A., Faisal, H.A., Azmi, N.A., 2008. Effect of Wetting on Collapsibility and Shear Strength of Tropical Residual Soils. *Ele. Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 13(Bund. G): 1-14.
- Jennings, J.E., Knight, K., 1975. A Guide to construction or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. 6th Regional Conference for Africa On Soil Menchanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa, PP. 99-105.
- Lim, Y.Y., Miller, G.A., 2004. Wetting-Induced Compression of Compacted Oklahoma Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 130(10): 1014–1023.
- Lin, Z.G., Wang, S.J., 1988. Collapsibility and deformation characteristics of deep-seated loess in China. *Engineering Geology*, 25: 271-282.
- Lollo, J. A., Rodrigues, R.A., Elis, V. R., Prado, R., 2011. Use of electrical resistivity to identify collapsible soils in Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environments*, 70: 299–307.
- Madhyannapu, R.S., Madhira, R.M., Anand, J.P. Ghosh, A., 2008. Compressibility and collapsibility characteristics of sedimented fly ash beds. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 20(6): 401-409.
- Rafie, B.M.A., Ziaie Moayed, R., Esmaeli, M., 2008. Evaluation of soil collapsibility potential: A case study of Semnan railway station. *Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 13(Bund. G): 1-6.
- Reznik, Y.M., 2000. Engineering approach to interpretation of oedometer tests performed on collapsible soils. *Engineering Geology*, 57: 205–213.
- Reznik, Y. M., 2007. Influence of physical properties on deformation characteristics of collapsible soils. *Engineering Geology*, Vol. 92, pp. 27-37.
- Rodrigues, R.A., Elis, V.R., Prado, R., Lollo, J.A., 2006. Laboratory tests and applied geophysical investigations in collapsible soil horizon definition. *The Geological Society of London. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*, Paper No. 115.
- Rust, E., Ben, H.G., 2010. Collapsible soils an overview. *Civil Engineering: Magazine of the South African Institution of Civil Engineering*, 18(2): 14-17.
- Santagata, M.C., 2011. Identification and Behavior of Collapsible Soils. Joint Transportation Research Program, Technical Report Series, Indiana Department of Transportation, ReportNo.765.463.1521. SPR-3109.
- Scheffe, K.F., 2005. Collapsible soils in the Rio Grande valley of central New Mexico. *Geological Society of America(GSA)*, 37(7): 327.
- Soliman S.h., 2010. Performance of Reinforced Collapsible Soils. PhD thesis, Civil Eng. Dept., Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
- Pawlak, S.L., 1998. Evaluation, Design and Mitigation, Collapsible Soil Sites in Western Colorado. Colorado Geological Survey, Geologic Hazards and Engineering Practices in Western Colorado, Glenwood Springs, Colorado.
- Williams, T., Rollins, K.M., 1991. Collapsible Soil Hazard for the Cedar City, Utahu Area. Contract report T91-10, UTAHU geological survey.
- Yuan, Z.X., Wang, L.M., 2009. Collapsibility and seismic settlement of loess. *Engineering Geology*, 105:119–123.
- Yuanqing, Z., Zhenghan, C.H., 2009. New method of studying collapsibility of loess. *Front. Archit. Civ. Eng. China*, 3(3): 305–311