

اثر دما بر ترک خوردگی سطحی خاک رس با خشک شدن

رضا پورحسینی*، میترا موسوی، نغمه نصیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۰ مهر ۱۳۹۳
بازنگری: ۲۹ دی ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

ترک خشکی
دما
خاک رسی
انقباض خاک

چکیده: ترک خوردگی انقباضی ناشی از خشک شدن خاک‌های رسی به شدت بر ضریب نفوذپذیری توده خاک تاثیرگذار است. این پدیده در مهندسی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی مورد توجه می‌باشد و می‌تواند به یکپارچگی سازه‌ها خسارت وارد نماید. در بررسی اثرات خشکی بر سازه‌ها شناخت فرآیند ترک خوردگی خاک ضروری است. در تحقیق حاضر، رفتار ترک خوردگی ناشی از خشک شدن در دماهای مختلف به صورت آزمایشگاهی بر روی لایه نازک خاک رس اشباع شده با رطوبت اولیه در حدود ۶۰٪ (۱/۵ برابر حد روانی خاک) بررسی شد. در آزمایش‌ها از نمونه خاک رس معدن شهر آباد در استان فارس استفاده شد. بر پایه نتایج آزمایش نمونه‌ها، با افزایش دما درصد رطوبت مربوط به شروع اولین ترک ناشی از خشک شدن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درجه حرارت تعداد نهایی ترک‌های انقباضی در سطح نمونه کاهش می‌یابد که این موضوع را می‌توان به کاهش کشش سطحی آب و تمرکزگرایی حفرات خاک مرتبط دانست. با بالا رفتن دما، عرض بازشدگی ترک کمتر خواهد شد.

۱- مقدمه

کانی‌های رسی به گروه‌های اصلی کائولینیت، هالوئیزیت، ایلیت و مونتورینیت تقسیم می‌شوند. ساختار ویژه مونتورینیت می‌تواند در مقایسه با کانی‌های دیگر مقدار زیادی آب را جذب و خاک را متورم نماید. خاک رس ماده‌ای پیچیده و با رفتار ترک خوردگی انقباضی می‌باشد که از عواملی مانند: نوع کانی، دما، رطوبت محیط اطراف، ضخامت لایه، درصد رس، شرایط مرزی، دامنه خمیری (PI) و در صد ذرات کلوئیدی تبعیت می‌کند.

ترک خوردگی عاملی است که می‌تواند عملکرد ژئوتکنیکی توده‌های ریز دانه را به طور قابل توجهی تغییر دهد و در مواردی به سازه‌های روی آن نیز خسارت وارد کند. ترک خوردگی خواص سطحی خاک و الگوهای نفوذ و تبخیر آب را تغییر می‌دهد. با خشک شدن یک خاک رسی و اتلاف آب در اثر تبخیر، انقباض و سپس ترک خوردگی در سطح خاک رخ می‌دهد. توسعه ترک‌ها در خاک رسی به دلیل انقباض ناشی از خشک شدن پدیده‌ای طبیعی است. در حوزه‌های زمین‌شناسی مهندسی، محیط زیست و ژئوتکنیک، خاک‌های سرشار از رس به طور گسترده در ساخت پرده‌های آب‌بند، پوشش‌های دفن پسماند و سد‌های ذخیره‌ای با هدایت هیدرولیکی پایین بکار می‌روند. ترک خوردگی در این سازه‌ها از عوامل کنترل کننده خواص هیدرولیکی می‌باشد. مطالعات انجام شده بر روی ترک ناشی از خشک شدن گسترده نبوده و می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط کرت^۱ و هایگاشی^۲

(۱۹۶۰)، موریس و همکاران^۳ (۱۹۹۲)، کدیکارا و همکاران^۴ (۲۰۰۰)، ریحانی و همکاران^۵ (۲۰۰۷)، اشاره نمود.

مطالعات صورت گرفته در سال ۲۰۰۱ مشخص نمود که هدایت هیدرولیکی پوشش‌های رسی ترک خورده تقریباً به ۵۰۰ برابر حالت ترک نخورده افزایش می‌یابد. به علاوه ترک‌های ناشی از انقباض نواحی ضعیف را در خاک تشکیل می‌دهند که مقاومت مکانیکی و ظرفیت باربری کمتری دارند و تراکم‌پذیری آن‌ها قابل توجه می‌باشد [۱]. انقباض خاک‌های ریزدانه در نتیجه اتلاف آب در اثر تبخیر پدید می‌آید، در صورتی که خشک شدن از سطح شروع و به عمق خاک گسترش یابد، سطح خشک شده خاک منقبض شده و باعث ایجاد تنش کششی در سطح می‌گردد. اگر انقباض با محدودیت همراه باشد، زمانی که تنش کششی در داخل خاک از مقاومت کششی تجاوز می‌کند ترک بوجود می‌آید [۲]. عامل این محدودیت‌ها عبارتند از: شرایط مرزها مانند اصطکاک در جدارها، تمرکز تنش و یا تغییر در بافت خاک. در بررسی ترک خوردگی‌ها، استفاده از تنش‌های کل معرفی شده توسط بیوت^۳ سبب ساده‌سازی معادلات انرژی بدست آمده از مکانیک شکست خطی می‌شود، این تنش‌های کل در پدیده‌ی خشکیدگی به صورت کششی عمل می‌کنند. عامل کنترل کننده برای کل فرآیند ترک خوردگی علاوه بر مدول یانگ، نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی در یک ترک است که به صورت آزمایشگاهی تعیین می‌شود [۳].

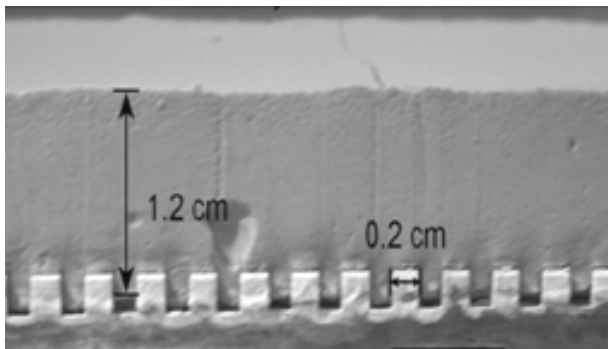
3 Morris et al.
4 Kodikara et al.
5 Rayhani et al.
6 Biot theory

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r_porhoseini@yazd.ac.ir

1 Corte
2 Higashi

۳- شرایط انجام آزمایش خشک شدگی خاک

آزمایش خشک شدگی بر روی نمونه‌های خاک در قالب‌هایی از جنس تفلون به ابعاد خالص (۵ cm × ۳۰ cm) و عمق ۱/۲ cm و با درز بندی گوشه‌ها انجام شد. شیارهای عرضی باریک و موازی در کف قالب با عرض ۲ mm، برای نمونه خاک در راستای طولی محدودیت جابه‌جایی می‌نماید. با این اقدام شرایط ایجاد ترک‌های سطحی (لایه نازک خاک) مدل می‌شود. شکل ۱ شیارهای ایجاد شده در کف قالب را نشان می‌دهد. بدون محدودیت در مرزهای نمونه خاک، انقباض به صورت آزاد خواهد بود و ترک در نمونه ایجاد نمی‌شود. به منظور جلوگیری از چسبندگی خاک به سطح دیواره‌های قالب تنها این سطوح با گریس آغشته شد.



شکل ۱: شیارهای عرضی در کف قالب

Fig. 1. Lateral grooves in mold base

نمونه خاک به صورت مکانیکی از روی الک شماره ۴۰ (۴۲۵ μm) گذرانده شد که با روش پیشنهاد شده در استاندارد استرالیا (AS1289.1(1991)) برای تهیه نمونه خاک دست‌خورده مطابقت دارد. نمونه‌ها با درصد رطوبت نزدیک به ۶۰٪ (تقریباً ۱/۵ برابر حد روانی) تهیه شده‌اند. مراحل تهیه نمونه‌های اشباع به شرح زیر انجام پذیرفت، خاک خشک به صورت پودر با آب مقطر ترکیب شده است. مخلوط حاصل سپس به مدت ۲ دقیقه به شدت مخلوط و لرزانده شده تا حباب‌های هوای آن خارج شود. این آماده‌سازی، حالت اشباع ابتدایی را تضمین می‌کند.

پس از آماده‌سازی، نمونه خاک حداقل به مدت ۲۴ ساعت در یک محیط بسته نگهداری شد تا کاملاً همگن شود. این روش آماده‌سازی به خاک امکان می‌دهد تا حد ممکن به حالت اشباع و یکنواختی نزدیک شده و از تشکیل هر گونه ساختار ابتدایی در خاک جلوگیری نمود.

در هر آزمایش به طور هم‌زمان چندین قالب مستطیلی با ابعاد یکسان استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت کاملاً تحکیم نیافته آماده سازی شده‌اند. تعدادی از نمونه‌ها برای مشاهده شروع ترک و پیشرفت تدریجی ترک و تعدادی دیگر برای اندازه‌گیری درصد رطوبت در طول خشک شدن در نظر گرفته شد. وزن نمونه‌ها برای ثبت مقدار آب از دست رفته در فواصل زمانی مختلف، اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها در محفظه‌ای مجهز به وسایل تنظیم دما اجرا شد. آزمایش‌ها بر روی لایه نازک خاک اشباع در

ترک خوردگی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر ضخامت نمونه و خواص چسبندگی خاک قرار دارد که تجزیه و تحلیل‌های حاصل از روش مدل‌سازی المان گسسته^۱ با نتایج تجربی در این مورد سازگاری دارد [۴].

با وجود پیشرفت در مدل‌سازی عددی نتیجه‌گیری در رابطه با توسعه ترک نیاز به بررسی آزمایشگاهی و میدانی دارد. در مطالعه حاضر بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی لایه‌ی نازک خاک رُسی به منظور تعیین رفتار خاک‌های ریزدانه در اثر خشک شدن در شرایط دمایی مختلف انجام شده است. با این مطالعات آزمایشگاهی تأثیر دما بر تشکیل و توسعه ترک در خاک رُسی در حین خشک شدن بررسی می‌شود.

۲- مشخصات خاک مصرفی

در آزمایش‌ها از خاک رُسی معدنی واقع در منطقه شهر آباده در استان فارس که در صنعت کاشی‌سازی به‌کار می‌رود، استفاده شده است. بر روی این نمونه خاک آزمایش‌هایی به منظور شناسایی مشخصات فیزیکی انجام گرفت. نتایج تعیین ترکیبات این خاک با آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) در جدول ۱ آمده است. در جدول ۲ خصوصیات فیزیکی نمونه خاک مورد آزمایش داده شده است. با انجام آزمایش سه محوری تحکیم نشده-زهکشی نشده بر روی نمونه‌ی از خاک با رطوبت ۲۷ درصد مقاومت چسبندگی زهکشی نشده، c_u تعیین شد، $(\theta_u=0)$. این خاک در رده CL از سیستم طبقه بندی متحد قرار می‌گیرد.

جدول ۱: ترکیبات خاک رس مورد استفاده در آزمایش XRD

Table 1. Chemical compound of clay soil sample

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO
درصد	۵۳/۳۵	۲۶/۵۸	۷/۹۰	۱/۲۲	۰/۳۹
ترکیب	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
درصد	۰/۲۸	۰/۹۸	۱/۵۷	<۰/۰۲	۰/۲۲

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی خاک مورد آزمایش

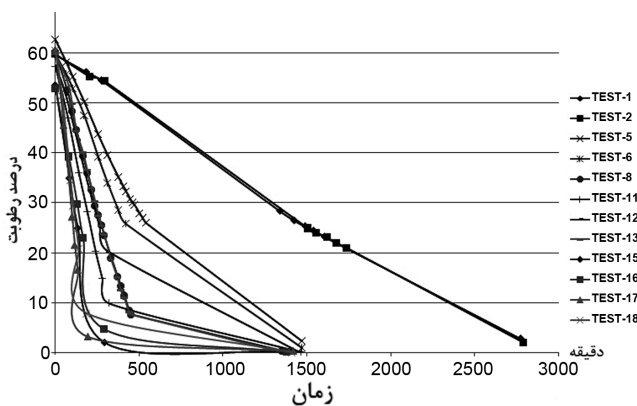
Table 2. Physical properties of clay soil sample

کمیت فیزیکی	مقدار	استاندارد آزمایش
حد روانی (درصد)	۴۰	ASTM D 4318
حد خمیری (درصد)	۲۴	ASTM D 4318
نشانه خمیری (درصد)	۱۶	-
حد انقباض (درصد)	۱۵	ASTM D 427
رطوبت بهینه (درصد)	۱۹/۳	ASTM D 1557
دانسیته بیشینه (kN/m ³)	۱۷/۱	
چگالی، G _s	۲/۷۳	ASTM D 548
cu (kPa)	۱۵/۷	ASTM D 2850

1 Discrete element modeling

سطح باز نمونه خاک و ضخامت آن وابسته است. در دمای بالا، سرعت حرکت مولکولی و انرژی جنبشی آب بالا می‌رود و ویسکوزیته، کشش سطحی آب و ظرفیت نگهداری آب توسط خاک پایین می‌آید. بنابراین، مولکول‌های آب موجود در خاک در دمای بالاتر آسان‌تر به اتمسفر رها می‌شوند، در نتیجه سرعت اتلاف آب بیشتر می‌شود [۵]. با این وجود، در این بررسی دما نمی‌تواند به عنوان متغیر منحصر به فرد تنظیم سرعت تبخیر آب مورد توجه باشد. بر طبق قانون کلین، اثر یک دمای بالا مشابه محیطی با رطوبت نسبی پایین می‌باشد. به عبارت دیگر، در دمای بالا، گرادیان رطوبت نسبی بین سطح خاک و هوای روی لایه (گرادیان فشار بخار سطح مشترک خاک-هوا) افزایش می‌یابد، به این مفهوم که سرعت تبخیر بیشتری در دمای بالاتر مشاهده می‌شود. شکل ۲ کاهش درصد رطوبت نمونه خاک با زمان را در طول خشک شدن نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ نیز مشخص است با افزایش دما شیب نمودار (سرعت تبخیر) افزایش می‌یابد. درصد رطوبت خاک در ابتدا به صورت خطی با زمان کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده سرعت تبخیر تقریباً ثابت و تابعی از دما می‌باشد. با گذر از مرحله اول، سرعت تبخیر کاهش یافته و در نهایت به صفر نزدیک می‌شود. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی تقریباً ۹۰ درصد ترک خوردگی‌ها در مرحله سرعت ثابت تبخیر آب رخ می‌دهند، در شرایطی که نمونه‌ها همچنان اشباع هستند. این مشاهده با نتایج آزمایش‌های ویلسون^۱ و همکاران (۱۹۹۰) برای سه نمونه خاک متفاوت سازگاری دارد. با عبور از مرحله اول تبخیر، کاهش شدت تبخیر را می‌توان با سه عامل شرح داد [۶]:

- (۱) کاهش آب موجود در نمونه‌های خاک با زمان،
- (۲) گسترش مکش ماتریکی، مولکول‌های آب را محدود کرده و از ورود به اتمسفر باز می‌دارد،
- (۳) کاهش گرادیان فشار بخار بین سطح مشترک خاک-هوا.



شکل ۲: کاهش درصد رطوبت خاک با گذشت زمان در نمونه‌ها

Fig. 2. Reduction of soil water content versus time

دماهای ۲۷، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۱۰°C انجام پذیرفت. نمونه‌ها با دمای اولیه ۲۷ درجه سانتیگراد در محفظه آزمایش با دمای ثابت قرار گرفتند و وضعیت نمونه با گذشت زمان ثبت شد.

۴- نتایج آزمایش

اثر دما بر خشک شدن خاک، در آزمایش‌هایی با دماهای مختلف بر روی نمونه‌ها در قالب‌هایی با ابعاد $30 \times 5 \times 1/2$ cm بررسی شد، مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است. در حین خشک‌شدگی محدودشده، تغییرات رطوبت با وزن کردن پیوسته نمونه (با دقت ۰/۱ grf) ثبت شد. براساس مشاهدات آزمایشگاهی، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدگی بستگی به ضخامت نمونه‌ها و وضعیت آب و هوای محل خشک شدن دارد.

جدول ۳: مقادیر درصد رطوبت اولیه و دما برای نمونه‌های آزمایش

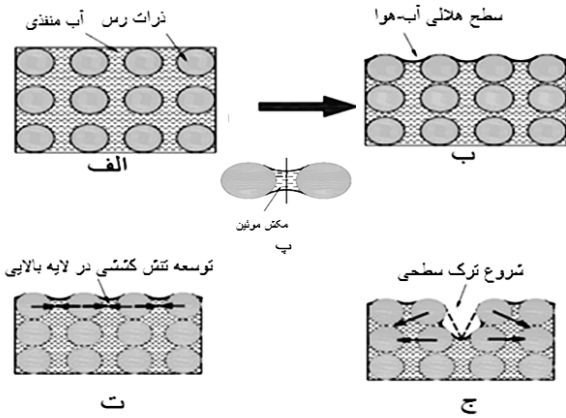
Table 3. Initial water content and test temperature for specimens

وزن نمونه grf	رطوبت اولیه %	دمای آزمایش (C°)	کد
۳۱۶/۷	۵۹/۶	۲۷	TEST-1
۳۱۳/۷	۵۹/۸	۲۷	TEST-2
۳۱۷/۹	۵۹/۷	۲۷	TEST-3
۳۱۳/۷	۵۹/۹	۲۷	TEST-4
۳۱۵/۶	۶۲/۷	۴۰	TEST-5
۳۱۲/۶	۵۹/۸	۴۰	TEST-6
۳۱۸/۲	۶۰/۱	۶۰	TEST-7
۳۲۱/۸	۵۷/۳	۶۰	TEST-8
۳۱۶/۷	۵۷/۵	۶۰	TEST-9
۳۱۶/۷	۵۹/۸	۶۰	TEST-10
۳۱۴/۵	۶۰/۰	۶۰	TEST-11
۳۲۱/۲	۵۷/۸	۶۰	TEST-12
۳۰۸/۵	۶۱/۴	۶۰	TEST-13
۳۱۶/۲	۵۷/۲	۶۰	TEST-14
۳۳۴/۰	۵۳/۶	۸۰	TEST-15
۳۲۶/۵	۵۲/۹	۸۰	TEST-16
۳۲۱/۲	۶۰/۶	۱۱۰	TEST-17
۳۱۳/۰	۶۰/۵	۱۱۰	TEST-18

۴-۱- سرعت تبخیر آب

سرعت تبخیر آب از خاک به عوامل مختلفی مثل دما، رطوبت نسبی محیط، سرعت باد، تابش نور خورشید، مکش منفذی خاک، غلظت نمک،

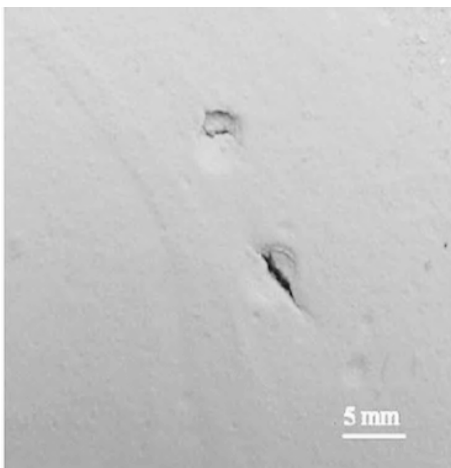
طی این فرآیند خاک اشباع می‌شود، شکل (۴-ت). زمانی که نیروی کششی از مقاومت کششی لایه‌های سطحی رُس فراتر رود ترک خوردگی در سطح رخ می‌دهد، مطابق شکل (۴-ج) [۹].



شکل ۴: مراحل تبخیر آب و تشکیل ترک

Fig. 4. Water evaporation steps and cracking

مقاومت پیوند بین ذرات خاک متفاوت می‌باشد، ترک خوردگی‌ها معمولاً در قسمت‌هایی از سطح که دارای عیب و نقص (ناهنجاری) هستند راه‌اندازی می‌شوند. شکل ۵ نمونه‌ای از این پدیده را نمایش می‌دهد.

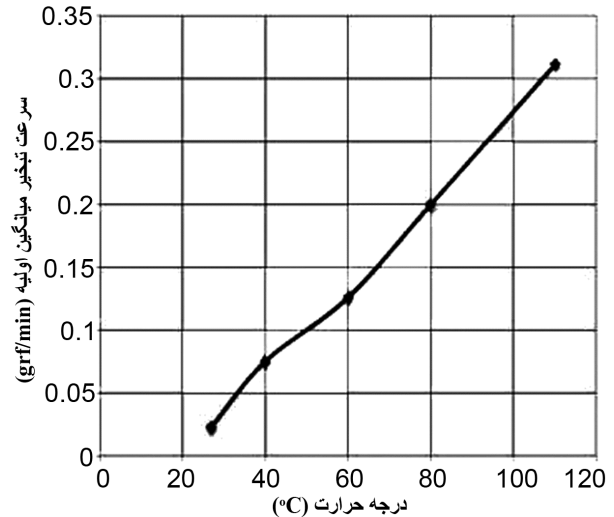


شکل ۵: تأثیر ناهمگنی مقاومت خاک در شروع ترک

Fig. 5. Effect of soil heterogeneity on crack initiation

با افزایش ضخامت لایه خاک، رطوبت خاک در شروع ترک افزایش می‌یابد. یافتن یک روش مناسب برای کنترل تغییرات واقعی درصد رطوبت در لایه‌های بالایی دشوار می‌باشد. علاوه بر این تعیین فصل مشترک بین لایه‌های بالایی و پایینی به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد، زیرا در مقیاس

به‌منظور محاسبه سرعت تبخیر اولیه، شیب متوسط منحنی درصد رطوبت-زمان در مرحله اولیه تبخیر از شکل ۲ محاسبه شد. نمودار سرعت تبخیر میانگین با دما در شکل ۳ نشان داده شده است. سرعت میانگین تبخیر اولیه نمونه‌ها در دماهای ۲۷، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۱۰°C به ترتیب برابر ۰/۰۲۳، ۰/۰۷۵، ۰/۱۲۶، ۰/۲۰۰ و ۰/۳۱۸ (grf/min) می‌باشد. وزن خشک



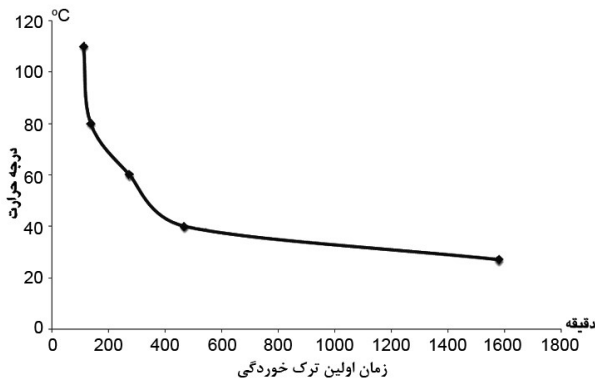
شکل ۳: تغییر سرعت میانگین تبخیر اولیه با دما

Fig. 3. Effect of temperature on evaporation rate

۴-۲ اثر دما بر رفتار ترک خشک شدگی

ترک‌های خشک‌شدگی، معمولاً با مکش خاک و مقاومت کششی کنترل می‌شود. در پژوهش‌های انجام شده اثر دما بر مقاومت برشی و فشاری خاک بررسی شده در حالی که اثر دما بر مقاومت کششی مورد مطالعه قرار نگرفته است. تحقیقات پیشین نشان می‌دهند که مقاومت برشی و فشاری خاک به طور معمول با افزایش دما کاهش می‌یابد. با افزایش دما، کاهش مقاومت کششی خاک نیز مورد انتظار است. وضعیت دمای بالا با افزایش سرعت تبخیر، مکش را بیش از حد انتظار افزایش می‌دهد و در مدت کوتاهی تنش کششی ایجاد شده می‌تواند از مقاومت کششی خاک تجاوز کند [۷،۸].

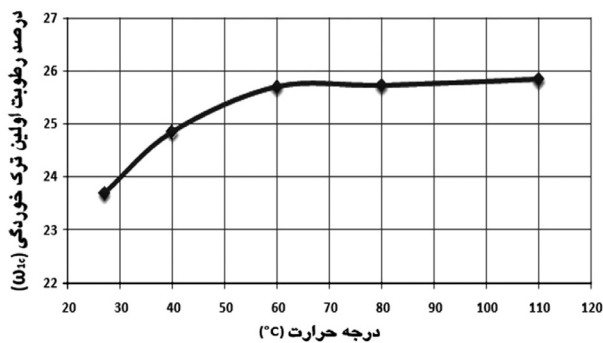
شکل ۴ مراحل تدریجی تبخیر آب و تشکیل ترک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-الف) زمانی که لایه رُسی کاملاً اشباع و همگن در معرض حرارت قرار گیرد، تبخیر آب از سطح لایه آغاز می‌گردد. به تدریج بین ذرات رس سطح هلالی آب-هوا شکل می‌گیرد، شکل (۴-ب). سپس مکش موئین در لایه‌های بالایی توسعه می‌یابد، شکل (۴-پ). در نتیجه تبخیر آب انحنای سطح هلالی آب موئین افزایش می‌یابد که همراه با افزایش مکش موئین و تنش مؤثر بین ذرات رُس می‌باشد، در نتیجه لایه رُس تحکیم یافته و فشرده می‌شود و حجم خاک به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با توسعه مکش موئین، نیروی کششی در مجاورت ذرات ایجاد می‌گردد و در



شکل ۶: رابطه بین زمان اولین ترک خوردگی و دما

Fig. 6. Effect of temperature on crack initiation time

با افزایش دما ترک خشکیدگی در لایه‌های سطحی شروع می‌شود ولی به علت نفوذپذیری کم خاک‌های رُسی فقط مقدار کمی آب از لایه‌های پایین‌تر به سطح، پیش از ایجاد ترک، انتقال می‌یابد. با افزایش دما مقاومت کششی خاک نیز کاهش یافته و ترک خوردگی در مکش کمتر و یا درصد رطوبت بیشتر اتفاق می‌افتد که می‌تواند دلیلی بر افزایش رطوبت اولین ترک خوردگی با افزایش دما باشد. در شکل ۷ منحنی تغییرات W_{1c} با دما نشان داده شده است. براساس نتایج آزمایش‌ها، مقدار W_{1c} با افزایش دما تا 60°C کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر دما تغییر محسوسی ندارد.



شکل ۷: تغییرات W_{1c} با دما

Fig. 7. Variation of w_{1c} Versus temperature

۳-۴- کرنش نمونه‌ها در دوره خشک شدگی

اندازه‌گیری مولفه‌های کرنش نمونه‌ها به دلیل قوام کم توده اشباع خاک دشوار می‌باشد. استفاده از فنون تصویربرداری نیز با توجه به شکل و ابعاد نمونه مشکل می‌باشد. در اینجا برای اندازه‌گیری تغییرات کرنش متوسط نمونه (در سه امتداد) نسبت به زمان از کوئیس با دقت 0.01 میلی‌متر استفاده شد. با توجه به ابعاد نمونه‌ها دقت اندازه‌گیری انتخاب شده مناسب می‌باشد. شکل ۸ نمای از نمونه خاک برای محاسبه کرنش متوسط را نمایش می‌دهد که l و h ابعاد اولیه نمونه قبل از شروع آزمایش می‌باشند. کرنش‌های طولی، ϵ_l ، عرضی، ϵ_b ، قائم، ϵ_h و کرنش حجمی، ϵ_v ، با استفاده از روابط

میکروسکوپی ضخامت لایه‌های بالایی در شروع ترک خوردگی تنها از چندین لایه رُسی تشکیل شده است. بنابراین برای تعیین رطوبت اولین ترک خوردگی با یک دقت قابل قبول، ساده‌ترین اقدام کاهش ضخامت نمونه است. چنانچه نمونه‌ها به اندازه کافی نازک باشند توزیع رطوبت نسبی یکنواخت در دوره خشک شدن را می‌توان انتظار داشت. به دلیل اشکالات موجود در تعیین رطوبت اولین ترک خوردگی، مقدار آن با درصد رطوبت متوسط نمونه با ضخامت 12 mm اندازه‌گیری شد. مقادیر رطوبت خاک (W_{1c}) و زمان شروع اولین ترک برای آزمایش‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است.

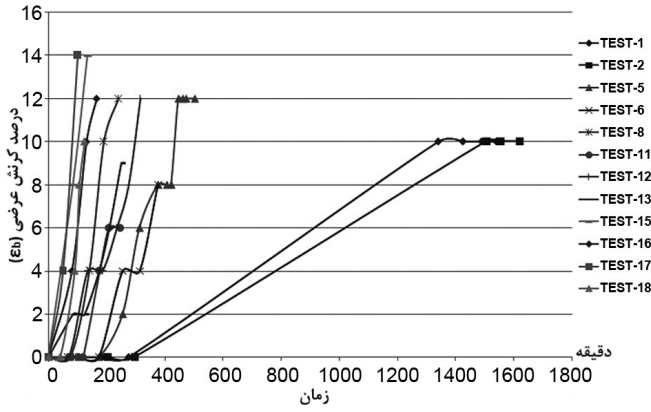
جدول ۴: درصد رطوبت و زمان اولین ترک خوردگی برای نمونه‌ها

Table 4. Water content and first cracking duration

کد	درصد رطوبت W_{1c}	زمان شروع ترک (دقیقه)
TEST-1	۲۴/۴	۱۵۴۰
TEST-2	۲۳/۰	۱۶۲۰
TEST-3	-	-
TEST-4	-	-
TEST-5	۲۸/۸	۵۰۳
TEST-6	۲۴/۹	۴۳۵
TEST-7	۲۳/۵	۲۹۱
TEST-8	۲۰/۲	۲۴۰
TEST-9	۲۰/۳	۳۰۸
TEST-10	۳۰/۲	۲۳۷
TEST-11	۲۸/۷	۲۴۷
TEST-12	۲۴/۶	۳۱۵
TEST-13	۲۹/۳	۲۵۱
TEST-14	۲۱/۸	۳۰۸
TEST-15	۲۶/۸	۱۲۴
TEST-16	۲۴/۶	۱۵۰
TEST-17	۲۷/۱	۱۰۰
TEST-18	۲۴/۶	۱۲۴

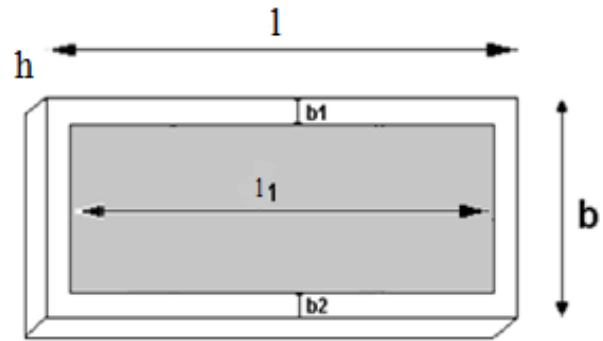
نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴ نشان می‌دهند که با افزایش دما از 27°C به 40°C مدت زمان لازم برای شروع ترک خوردگی تقریباً ۳ برابر کاهش می‌یابد. شکل ۶ رابطه بین زمان اولین ترک خوردگی و دما را به شکل یک تابع نمایی نشان می‌دهد.

۱ تا ۴ محاسبه شده است.



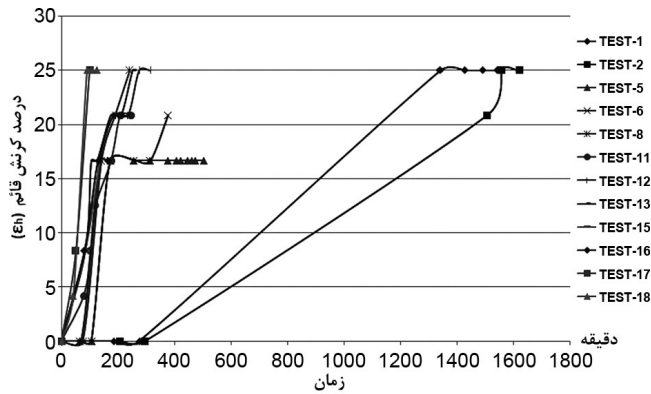
شکل ۱۰: تغییرات کرنش عرضی با گذشت زمان

Fig. 10. Lateral strain versus time



شکل ۸: ابعاد نمونه خاک در محاسبه کرنش

Fig. 8. Dimensions used for calculation of strains



شکل ۱۱: تغییرات کرنش قائم با گذشت زمان

Fig. 11. Vertical strain versus time

$$\varepsilon_l = \Delta l / l \times 100 \quad (1)$$

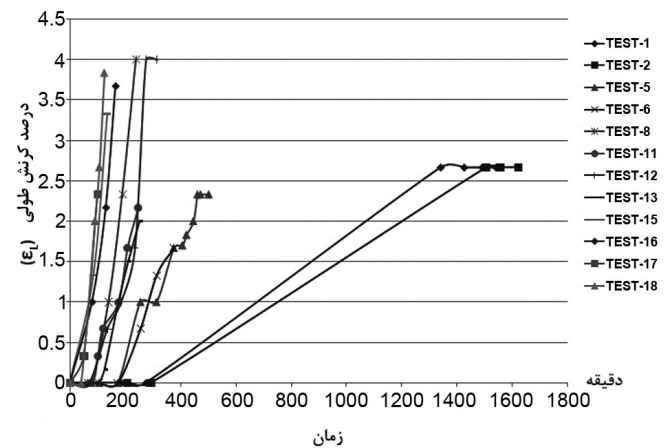
$$\varepsilon_b = \Delta b / b \times 100 \quad (2)$$

$$\varepsilon_h = \Delta h / h \times 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_l + \varepsilon_b + \varepsilon_h \quad (4)$$

که $\Delta l = l - l_1$: تغییر طول نمونه، $\Delta b = b_1 - b_2$: تغییر عرض نمونه و $\Delta h = h - h_1$: تغییر ضخامت نمونه می باشند.

شکل های ۹ تا ۱۲ به ترتیب تغییرات کرنش های طولی، عرضی، قائم و حجمی با گذشت زمان را برای نمونه ها نشان می دهند.



شکل ۹: تغییرات کرنش محوری با گذشت زمان

Fig. 9. Longitudinal strain versus time

همانطور که در شکل های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است، در تمام آزمایش ها کرنش قائم و کرنش طولی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارند. نمودار تغییرات رطوبت و کرنش با زمان برای میانگین دو نمونه (TEST-8) و (TEST-12) به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ رسم شده است.

گردد و شکل‌های مختلف ترک‌خوردگی را ایجاد کند.

۵- رشد ترک‌ها

تکامل تدریجی الگوی ترک‌خوردگی در سطح نمونه‌ها با کاهش درصد رطوبت در شکل ۱۴ نشان داده شده است، به طور کلی ترک‌خوردگی در سه مرحله رخ می‌دهد:

(۱) ترک‌خوردگی به طور مستقل از لبه‌ها آغاز می‌شود و به طرف مرکز نمونه‌ها گسترش می‌یابد که این وضعیت در شکل (۱۴ الف-پ) نشان داده شده است. نمونه‌ها در آغاز ترک‌خوردگی همچنان اشباع می‌باشند. بعد از اینکه ترک‌ها توسط یکدیگر از وسط قطع شدند، این فرآیند در مرحله اول پایان می‌یابد. ترک‌خوردگی‌های مستقل اولیه به عنوان نخستین ترک‌خوردگی می‌توانند در پایان خشک شدن مطابق با شکل (۱۴-خ) پهن‌ترین ترک‌خوردگی را تشکیل دهند.

(۲) با توجه به شکل (۱۴ ب-ج) ترک‌خوردگی‌های بعدی (ثانویه) زمانی آغاز می‌گردد که ترک‌خوردگی اولیه وجود داشته باشد. تعداد زیادی ترک‌خوردگی نازک و متقاطع تشکیل می‌شود و سطح نمونه به چند ضلعی‌های به هم پیوسته شکافته می‌شود. در برخی موارد چند ضلعی‌های به هم پیوسته بزرگ دوباره به قسمت‌های نسبتاً کوچک شکافته می‌شوند که در شکل (۱۴-ت، ج) نشان داده شده است.

(۳) در جریان خشک شدن ساختار هندسی شبکه ترک‌ها تثبیت می‌شود و ترک جدیدی ایجاد نمی‌گردد. این مرحله به طور عمده شامل گسترش ترک‌های موجود می‌باشد که این موضوع در شکل (۱۴ ج-خ) قابل مشاهده است.

ترک‌های ایجاد شده در مرحله ۲ و ۳ تحت عنوان زیر ترک معرفی شده‌اند [۹].

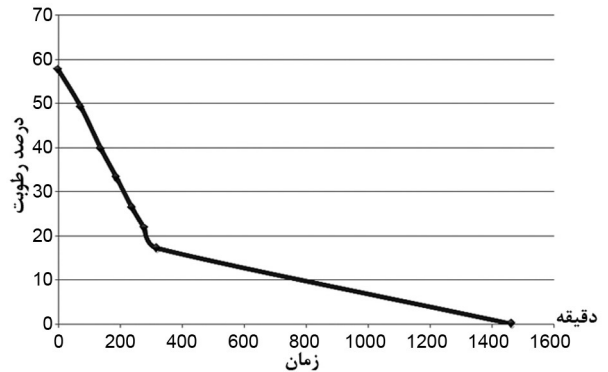
مشاهدات دقیق الگوی ترک‌خوردگی در پایان خشک شدن نشان می‌دهد که شبکه ترک‌ها از سه مدل تشکیل شده است:

(۱) سه‌گوش، (۲) چهارگوش، (۳) پنج‌گوش.

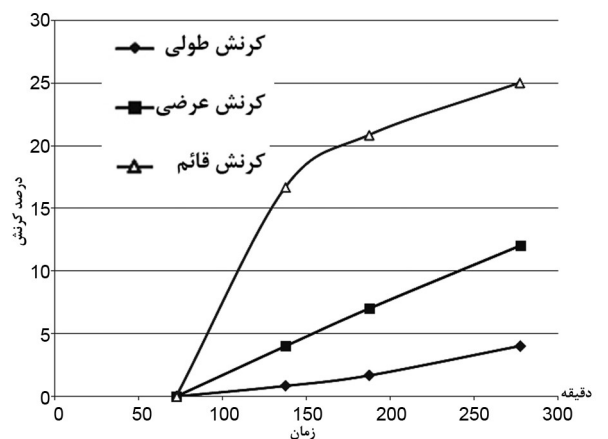
زاویه تقاطع ترک‌خوردگی‌ها به طور عمده برابر ۹۰ درجه می‌باشد. نقاط تقاطع ترک‌خوردگی‌ها عموماً به شکل (I) و (+) می‌باشند [۱۰، ۲].

طبق مشاهدات آزمایشگاهی در این مطالعه، اغلب ترک‌ها از یک لبه آغاز شده و تقریباً پس از ۸ تا ۱۰ دقیقه به لبه دیگر می‌رسند و سپس عرض باز شدگی آن افزایش می‌یابد. حدوداً ۲۰ دقیقه پس از آغاز ترک‌خوردگی رشد ترک‌ها کامل و ابعاد آن ثابت می‌شود. در شکل ۱۵ رشد یک ترک با گذشت زمان نشان داده شده است. عرض باز شدگی ترک‌ها در زمانی که رشد ترک‌ها کامل شده‌اند در جدول ۵ آمده است.

داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهند با افزایش دما عرض باز شدگی اولین ترک‌ها و نیز تعداد نهایی ترک‌های ایجاد شده در نمونه کاهش می‌یابند که دلیل آن را می‌توان به کاهش کشش سطحی آب و تمرکز گرایی حفرات نسبت داد.



شکل ۱۲: کاهش رطوبت با زمان (میانگین آزمایش‌های ۸ و ۱۲)
Fig. 12. water content reduction versus time (average of test-8 and test12 results)



شکل ۱۳: تغییر کرنش با زمان (میانگین آزمایش‌های ۸ و ۱۲)
Fig. 13. Variation of Strain magnitude versus time (average of test-8 and test12 results)

مقایسه کرنش‌های افقی (طولی و عرضی) و قائم در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که برای محدوده $W < 40\%$ حد روانی خاک نیز برابر با ۴۰ درصد است) مقدار کرنش انقباضی در راستای قائم بیشتر از کرنش‌های افقی است. در محدوده رطوبت کمتر از ۴۰ درصد، آهنگ رشد کرنش قائم کاهش می‌یابد و آهنگ رشد کرنش‌های افقی تقریباً ثابت می‌ماند. در رابطه با اختلاف بین کرنش‌های افقی و قائم می‌توان فرضیه‌های مختلفی را مطرح کرد. یک فرضیه این است که در فرآیند تبخیر پیش از رسیدن به مقدار حد روانی، خاک به صورت سوسپانسیونی در مایع است که در آن ته‌نشینی ثقلی و تحکیم پس از آن چشم‌گیر می‌باشد. این رفتار در محلول‌های در حال خشک‌شدگی دیده می‌شود.

علاوه بر این، کرت و هایگاشی (۱۹۶۰) اختلاف بین مؤلفه‌های افقی و قائم کرنش را مشاهده کردند و آن را به نقش چسبندگی لایه آب بین نمونه و زیر صفحه (علی‌رغم کاربرد یک پوشش ضد آب) نسبت دادند. به طور کلی چسبندگی متفاوت نمونه‌ها می‌تواند باعث توسعه کرنش و تنش کششی

۶- نتیجه گیری

پدیده ترک خوردگی سطحی بر روی لایه نازک خاک رُس به طور آزمایشگاهی مدل سازی و اثر دما در محدوده $110^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ بر انقباض لایه رُسی بررسی گردید. نسبت رطوبت اولیه نمونه‌ها نزدیک به مقدار $60\% (1/5)$ برابر حد روانی خاک) تنظیم شد. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل شده است:

الگوی ترک خوردگی سطحی ناشی از شرایط مرزی محدودکننده کرنش‌های انقباضی و یا گرادیان رطوبتی در عمق نمونه خاک (اثر دما) است. با دمای ثابت دو مرحله زمانی پیاپی در اتلاف آب می‌تواند شناسایی شود: ۱- تبخیر سریع و با سرعت ثابت و ۲- تبخیر با سرعت بسیار کندتر نسبت به مرحله ۱ و با روند کاهشی با زمان.

تبخیر آب با افزایش دما شدت می‌یابد. سرعت تبخیر مرحله ۱ در دماهای ۲۷، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و 110°C به ترتیب با نسبت‌های ۱، ۳/۳، ۵/۵، ۹/۴ و ۱۳/۸ تغییر می‌کند.

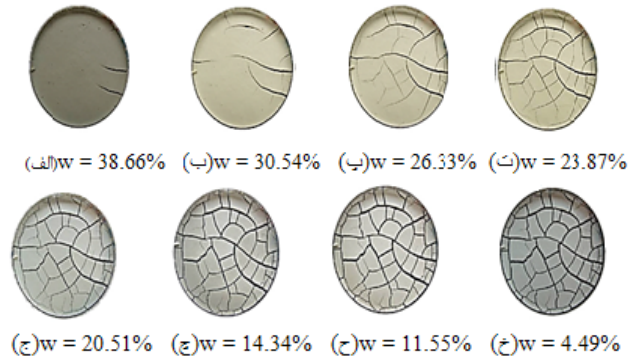
درصد رطوبت در شروع اولین ترک خوردگی (W_{1C}) به طور متوسط برای کل ضخامت خاک تعیین گردید. برای نمونه خاک مورد آزمایش با افزایش دما از ۲۵ به 60°C مقدار W_{1C} از ۳۳/۶ به ۲۵/۷ درصد افزایش یافت.

در تمام آزمایش‌ها و دماهای مختلف، با خشک شدن تدریجی و کاهش رطوبت خاک کرنش قائم و کرنش طولی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارند.

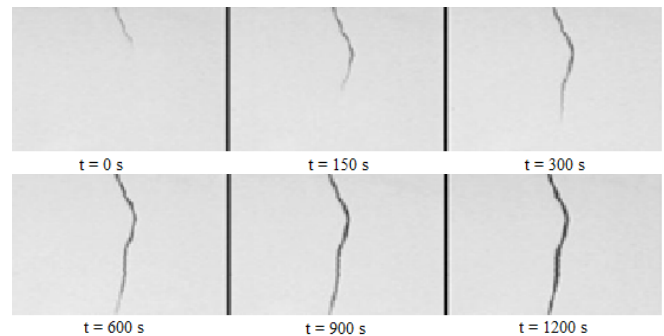
با افزایش دمای خشک کردن از ۶۰ به 110°C تعداد ترک‌ها در طول نمونه و نیز بازشدگی دهانه اولین ترک کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] B.A. Albrecht, C.H. Benson, Effect of desiccation on compacted natural clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(1) (2001) 67-75.
- [2] A. Corte, A. Higashi, Experimental Research on Desiccation Cracks in Soil-Research Report 66, in, Wilmette, Illinois: US Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, 1960.
- [3] H. Peron, L. Laloui, L.-B. Hu, T. Hueckel, Formation of drying crack patterns in soils: a deterministic approach, Acta Geotechnica, 8(2) (2013) 215-221.
- [4] J. Sima, M. Jiang, C. Zhou, Numerical simulation of desiccation cracking in a thin clay layer using 3D discrete element modeling, Computers and Geotechnics, 56 (2014) 168-180.
- [5] A.-M. Tang, Y.-J. Cui, Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay, Canadian Geotechnical Journal, 42(1) (2005) 287-296.



شکل ۱۴: الگوی پیشرفت ترک خوردگی در سطح با کاهش رطوبت
Fig. 14. Propagation of surficial crack with water content reduction



شکل ۱۵: رشد یک ترک با گذشت زمان
Fig. 15. A crack growing with time

جدول ۵: عرض بازشدگی ترک‌ها در مراحل مختلف ترک خوردگی
Table 5. Opening of cracks in cracking stages

کد	دمای آزمایش $^{\circ}\text{C}$	بازشدگی ترک (mm)		
		اولین ترک	دومین ترک	سومین ترک
TEST-8	۶۰	۶	۱/۵	۱
TEST-12	۶۰	۴	۲	۱
TEST-17	۱۱۰	۴	۳	-
TEST-18	۱۱۰	۳	۲	۱

- [9] C.-S. Tang, B. Shi, C. Liu, W.-B. Suo, L. Gao, Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer, *Applied Clay Science*, 52(1) (2011) 69-77.
- [10] C.-S. Tang, Y.-J. Cui, A.-M. Tang, B. Shi, Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils, *Engineering Geology*, 114(3) (2010) 261-266.
- [6] G.W. Wilson, D. Fredlund, S. Barbour, Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation, *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2) (1994) 151-161.
- [7] A.-M. Tang, Y.-J. Cui, Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1) (2005) 287-296.
- [8] M. Kayyal, Effect of the moisture evaporative stages on the development of shrinkage cracks in soil, in: *Proceedings of First International Conference on Unsaturated Soils*, sn, 1995, pp. 373-379.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Pourhosseini, M. Mossavi, N. Nassiri, "Influence of Temperature on Desiccation Cracking of Clay Soil", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 525-534.

DOI: 10.22060/ceej.2016.711



