ارائه روشی ساده شده برای پردازش تصویر دیجیتالی به‌منظور تعیین شاخص شدت ترک در خاک‌های رسی متراکم‌شده

محمدعلی عبدلی: دانشگاه تهران،
ادوین صفری: دانشگاه کوئینز، کینگستون، اونتاریو، کانادا
*مهدی جلیلی قاضی‌زاده، بهروز گتمیری: دانشگاه تهران

تاریخ: دریافت ۹۰/۳/۳ پذیرش ۹۱/۱/۳۰

چکیده

ترک‌خوردگی در لاینرهای خاکی از پدیده‌های متداول در محل‌های دفن پسماند است که بر عمل‌کرد لاینرها به‌شدت تأثیر می‌گذارد. هدف اصلی این تحقیق، ارائهٔ روشی ساده و قابل اجرا بر پایهٔ پردازش تصویر، به‌منظور شناسایی و تحلیل ترک‌های ایجاد شده در سطح لاینرهای خاکی در مقیاس آزمایشگاهی است. با استفاده از نرم‌افزار Matlab برنامه‌ای برای شناسایی ترک و تعیین شاخص شدت ترک تدوین شد. بر اساس نتایج اولیه این برنامه، پارامتر حد آستانه که معرف حساسیت برنامه در شناسایی تقابل رنگ‌هاست، به‌عنوان مهم‌ترین عامل در تشخیص صحیح ترک‌های موجود در سطح خاک معرفی شد و واسنجی برنامه بر اساس این پارامتر در دستور کار قرار گرفت. بدین منظور پایلوت آزمایشگاهی بررسی رفتار ترک طراحی و ساخته شد و سه نمونهٔ مختلف خاک رسی، هر کدام با پوشش و بدون پوشش ژئوتکستایل، به‌مدت ۱۰ ماه در معرض شرایط جوی قرار گرفت. پس از ثبت تغییرات الگوی ترک‌های سطحی با استفاده از دوربین دیجیتال و در بازه‌های زمانی مشخص، ۲۰ درصد از تصاویر با شدت‌های مختلف ترک انتخاب در واسنجی برنامه استفاده شد. در این فرایند با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ و تکنیک روی‌هم‌گذاری، ضریب کالیبراسیون ترک‌یابی تعیین و به برنامه اضافه شد و با استفاده از برنامه کالیبره‌شده، شاخص شدت ترک در همهٔ تصاویر محاسبه شد. هم‌چنین دقت برنامه در تعیین شاخص شدت ترک بررسی شد که نتایج این صحت‌سنجی، حاکی از عمل‌کرد مناسب برنامهٔ پیشنهادی در تعیین شاخص شدت ترک در سطح خاک‌های رسی متراکم‌شده است.

واژه‌های کلیدی: لاینر رسی، آنالیز تصویری، نرم‌افزار Matlab، ترک‌های خشک‌شدگی

*نویسنده مسئول mjalili@ut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

مقدمه

ترک‌های ناشی از خشک‌شدگی در تاسیسات خاکی از مباحث مهم در مهندسی ژئوتکنیک است [۱]. این ترک‌ها با ایجاد مسیرهای نفوذ آب در خاک، منجر به افزایش قابل توجه هدایت هیدرولیکی و فشار آب منفذی در خاک شده و در نهایت مقاومت برشی خاک را کاهش می‌دهد. این مسئله باعث کاهش ایمنی سازه‌های طبیعی و انسان‌ساخت موجود بر روی خاک می‌شود [۲]. از جمله مهم‌ترین تأسیساتی که عمل‌کرد آن به‌شدت تحت تأثیر شکل‌گیری و گسترش این ترک‌ها قرار می‌گیرد، سیستم لاینینگ خاکی است که در کف خاکچال‌ها کارگذاری می‌شود تا از نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی جلوگیری کند [۳]، [٤]. از آن‌جاکه در میان انواع مختلف لاینرها، لاینر رسی متراکم‌شده به‌دلیل هزینهٔ نسبتاً پایین، دوام زیاد، توانایی بالا در جذب آلاینده‌ها و سایر ویژگی‌های مناسب، اغلب به‌عنوان سیستم لاینینگ خاکچال‌ها استفاده می‌شود [۵]، [٦]، بررسی ترک‌های ناشی از خشک‌شدگی در اثر قرار گرفتن این نوع لاینرها در معرض شرایط جوی و اثرات آن بر هدایت هیدرولیکی آن‌ها اهمیت زیادی دارد. به‌طور کلی پس از اجرای لاینرهای خاکی، ممکن است تا مدت زیادی پسماند و حتی لایهٔ زه‌کش شیرابه متشکل از شن و ماسهٔ درشت‌دانه بر روی لاینر قرار نگیرد. این زمان بسته به طراحی محل دفن می‌تواند از چندین ماه تا چندین سال متفاوت باشد. در این بازهٔ زمانی لاینر خاکی مستقیماً در معرض شرایط جوی قرار می‌گیرد و تا زمان قرارگیری زباله بر روی آن، چرخه‌های دمایی روزانه و فصلی منجر به خشک‌شدگی چشم‌گیر در لاینر خاکی می‌شود که به‌تبع آن ترک‌های خشک‌شدگی در لاینر به‌وجود می‌آید [۷]. این ترک‌ها ضخامت مؤثر لاینر را کاهش می‌دهد و منجر به افزایش جریان شیرابه به سمت آب‌های زیرزمینی و هم‌چنین پایین آمدن راندمان لاینر در به تأخیر انداختن حرکت شیرابه می‌شوند [۸]. این مسئله مهم‌ترین دغدغه در طراحی و ساخت لاینرهای محل دفن، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک است [۹].

پژوهش‌های مختلفی در خصوص تأثیرات سوء ترک‌های ناشی از خشک‌شدگی بر عمل‌کرد لاینرهای خاکی انجام شده که در این خصوص افزایش چشم‌گیر نفوذپذیری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

لاینرهای رسی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عمل‌کرد لاینرها در بسیاری از پژوهش‌ها گزارش شده است [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]، [۱۵]، [۱٦]. کاهش مقاومت کلی و پایداری فیزیکی لاینرها نیز یکی دیگر از تأثیرات ترک‌های ناشی از خشک‌شدگی بر عمل‌کرد لاینرهای خاکی است [٤]، [۱۷].

در خصوص عوامل مؤثر در ترک‌خوردگی لاینرهای رسی متراکم‌شده نیز تحقیقات متعددی انجام شده است. عواملی نظیر نوع و میزان کانی‌های رس در ساختار خاک [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، مشخصات الاستیک خاک نظیر شاخص خمیری و حد انقباض [٤]، [۹]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، دانه‌بندی خاک [۲۳]، [۲٤]، [۲۵]، [۲٦]، [۲۷]، دمای محیط [٤]، [۲۸]، شرایط تراکم نظیر درصد رطوبت در حین تراکم و انرژی تراکم [۱۱]، [۱۷]، [۲٤]، [۲۷]، [۲۹]، و نحوهٔ خشک‌شدگی و سیکل‌های خشک‌شدگی/ترشدگی [٤]، [۱۲]، [۲۳]، [۳۰]، [۳۱]. از مهم‌ترین مواردی است که محققان مختلف بررسی کرده‌اند.

نگاهی گذرا به پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که پارامترهای متعددی بر شکل‌گیری و گسترش ترک در لاینرهای خاکی تأثیرمی‌گذارند و در صورت ایجاد ترک در این لاینرها، عمل‌کرد هیدرولیکی لاینر با افت شدیدی همراه خواهد بود. بنا بر این شناسایی فرایند ترک‌خوردگی و بررسی راه‌کارهای جلوگیری از این پدیده اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. به‌منظور درک بهتر در رابطه با تأثیر پارامترهای مختلف بر ترک‌خوردگی لاینر، روش اندازه‌گیری ترک-های حاصل و نحوهٔ آنالیز آن در آزمایش‌هایی با مقیاس‌های مختلف بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق ضمن معرفی همهٔ روش‌های به‌کار رفته برای اندازه‌گیری و آنالیز ترک و بیان مزایا و معایب هر کدام، روشی ساده و قابل استفاده برای کمی‌سازی ترک‌های شکل‌گرفته بر روی لاینرهای رسی متراکم‌شده ارائه شده است و در یک پایلوت آزمایشگاهی، روش پیشنهادی واسنجی و نتایج به‌دست آمده بررسی شده است.

روش‌های اندازه‌گیری و آنالیز ترک

روش مناسب اندازه‌گیری ترک، روشی است که علاوه بر دقت بالا و قابلیت استفاده در شرایط مختلف، بتوان نتایج حاصل از آن را به شکل مطلوبی آنالیز کرد. مهم‌ترین پارامترهایی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

که در بحث آنالیز ترک مدنظر قرار می‌گیرد، اندازهٔ ترک، شکل، محل، جهت و الگوی ترک است [۳۲].

به‌طور کلی هندسهٔ ترک‌ها در محل را می‌توان به دو شکل مستقیم و غیرمستقیم بررسی کرد [۲]. روش‌هایی که در آن ابعاد ترک به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود، شامل پیمایش خطی[۱] و برداشت پنجره‌ای[۲] است. در روش پیمایش خطی، اطلاعات ترک در طول یک خط جمع‌آوری می‌گردد [۳۳]، حال آن‌که در روش برداشت پنجره‌ای، ابتدا مجموعه‌ای از ترک‌ها در سطح خاک شناسایی شده و سپس میانگین پارامترهای هندسی مختلف ترک (نظیر طول، عرض، جهت و غیره) برای هر مجموعه تعیین می‌شود [۳٤]. در هر دو حالت ابعاد ترک به‌صورت دستی اندازه‌گیری می‌شود و از آن‌جاکه شکل نامنظم و هندسهٔ پیچیده ترک‌ها، مانع از اندازه‌گیری دقیق طول، عرض و عمق ترک می‌شود، اندازه‌گیری ابعاد ترک عموماً به‌طور تقریبی صورت می‌گیرد. روش‌های غیرمستقیمی نیز برای به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به درز و ترک وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی است [۲]. هم‌چنین ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم ابعاد ترک با دقت و هزینه‌های متفاوت توسعه یافته‌اند. ابزار ساده‌ای که اغلب در بازرسی‌های سازه‌ای برای اندازه‌گیری عرض ترک استفاده می‌شود، کارت مدرج است. در این کارت، مجموعه‌ای از خطوط با ضخامت‌های متفاوت قرار دارند که این خطوط به‌صورت دستی با ترک مقایسه می‌شوند تا بازشدگی آن را تخمین بزنند. هرچند این ابزار بسیار ارزان قیمت است، ولی نتایج آن مبتنی بر نظر شخصی است و دقت آن از ۰/۱± میلی‌متر پایین‌تر است [۳۵]. به‌طور معمول طول، عرض و عمق ترک در لاینرها به‌کمک ابزارهایی نظیر خط‌کش و سیم‌های نازک مدرج اندازه‌گیری می‌شود که این ابزار نیز دقت بالایی ندارد. هم‌چنین با توجه به شکل نامنظم ترک، استفاده از نخ برای اندازه‌گیری ابعاد ترک (به‌خصوص طول ترک) گزینهٔ مناسب‌تری نسبت به خط‌کش است [۳٦]. وقتی دقت بیش‌تری نیاز باشد، ابزار استفاده شده معمولاً شامل سنسورهای مکانیکی و الکتریکی است. عمل‌کرد ابزار مکانیکی بسیار ساده است، به‌طوری‌که در اطراف ترک و تـا حـد امکان نزدیک به آن، دو صفحهٔ فلزی روبروی هم (با امکان حرکت)

۱. scanline survey ۲. window sampling

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

قرار می‌گیرد و سپس فاصلهٔ بین دو صفحه با یک دستگاه قرائت اندازه‌گیری می‌شود که این اندازه‌گیری می‌تواند آنالوگ یا دیجیتال باشد. ریحانی و همکاران در سال ۲۰۰۸ از یک کولیس دیجیتال که نوعی ابزار مکانیکی محسوب می‌شود برای اندازه‌گیری ابعاد ترک استفاده کردند [۹]. دقت و هزینهٔ ابزار مکانیکی می‌تواند از ±۱ میلی‌متر (با هزینه چند ده دلار) تا ±۰/۰۰۱ میلی‌متر (با هزینه چند صد دلار) متفاوت باشد. معمولاً از ابزار مکانیکی در کارهای ساختمانی یا ارزیابی‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شود. در تست‌های آزمایشگاهی بیش‌تر از ابزار الکترونیکی استفاده می‌شود. اساس این ابزار بر این مبنا استوار است که فاصلهٔ بین دو نقطهٔ مبنا را بر پایهٔ تغییرات مقاومت الکتریکی ناشی از تغییر شکل اندازه‌گیری می‌کند. دقت این ابزار نیز ±۰/۰۰۱ میلی‌متر است [۳۵]. در هر حال ابزار مکانیکی و الکتریکی نقاط ضعفی دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ۱) به‌کارگیری صفحات فلزی و نصب دائم آن روی سازه ممکن است منجر به آسیب رساندن به سازه شود؛ ۲) هر سنسور صرفاً قادر به اندازه‌گیری ترک در جهت از پیش تعیین شده است؛ ۳) یک ترک مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه فرض می‌شود که جابه‌جایی در نقاط مبنا، متناظر با تغییر شکل ترک است. علاوه بر این، ابزارهای اندازه‌گیری الکتریکی شدیداً به دما وابسته‌اند به‌طوری که قبل از استفاده باید دقیقاً کالیبره شوند.

نکتهٔ مهم‌تر از ابزار اندازه‌گیری ترک، نحوهٔ آنالیز ترک است. زیرا به‌منظور جلوگیری از آثار سوء ترک‌خوردگی، مشخصات اندازه‌گیری شدهٔ ترک (به هر روشی)، باید به‌درستی تفسیر شوند تا راه‌کارهای مدیریتی متناسب برای کاهش یا کنترل آن‌ها اتخاذ گردد. لذا تعریف شاخص‌هایی در خصوص ارزیابی ترک‌خوردگی در لاینر اهمیت زیادی دارد. در این راستا اولین بار کلیپ[۱] و اولسن[۲] در سال ۱۹۸۵ در بررسی ترک‌ها، یک مقیاس را که از صفر تا چهار مدرج شده بود، برای اندازه‌گیری ترک‌ها ارائه کردند که به‌کمک آن شدت ترک بیان می‌شد. یک ترک با شدت صفر نشان‌دهندهٔ عدم وجود ترک و ترکی با شدت چهار نشان‌دهندهٔ ترکی با عرض بیش از ۲۰ میلی‌متر و عمق چشم‌گیر بود [۲۳]. در سال ۱۹۹۵ اولین بار مقدار ترک با شاخصی تحت عنوان "شاخص ترک" کمی‌سازی شد. شاخص ترک تعریف شده عبارت بود از

۱. Kleppe ۲. Olsen

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

نسبت مساحت مجموع ترک‌ها به مساحت کل سطح خاک که در این رابطه مساحت ترک برابر است با حاصل‌ضرب طول در عرض آن. در این محاسبات ترک‌هایی که عمق آن‌ها بیش از ۲ میلی‌متر است، در نظر گرفته می‌شود. هرچند این محققان روش تعیین طول و عرض ترک‌ها را مشخص نکرده‌اند، به‌نظر می‌رسد که این ابعاد به‌کمک خط‌کش اندازه‌گیری شده‌اند [۳۱]. ایراد این روش آن است که تأثیر شکل نامنظم ترک‌ها در تعیین شاخص ترک در نظر گرفته نمی‌شود. محققان دیگری نیز از این شاخص استفاده کرده‌اند با این تفاوت که برای اندازه‌گیری طول و عرض ترک‌ها برای محاسبهٔ این شاخص از روش "تصویرسازی[۱]" استفاده شده است در این روش ترک‌های با عمق بیش‌تر از ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند [۸]. در ادامه و با ورود نرم‌افزارهای جدید کامپیوتری و شروع دورهٔ دیجیتال، روش‌های دقیق‌تری برای کمی‌سازی ترک‌ها مورد استفاده قرار گرفت. می[۲] در سال ۱۹۹۵ و در ادامه میلر[۳] و همکاران در سال ۱۹۹۸ مفهوم شاخص ترک را تعمیم داده‌اند و شاخصی را با عنوان "شاخص شدت ترک (CIF)[۴]" برای اندازه‌گیری ترک‌های سطحی معرفی کردند [۳۷]، [۳۸]. طبق تعریف CIF عبارت است از نسبت مساحت ترک‌ها (A_c) به کل مساحت سطح خاک خشک‌شده (A_t). به‌منظور تعیین مقدار CIF با استفاده از یک دوربین دیجیتال، تصاویر مختلفی از سطح خاک برداشت شده و به‌کمک یک برنامه تحلیل تصاویر، مقادیر CIF محاسبه می‌شود. اساس محاسبهٔ ترک‌ها در این روش شدت فروزندگی رنگ‌ها است و در آن ترک‌ها در تصاویر برداشت شده از سطح خاک نسبت به مناطق ترک‌نخورده تیره‌تر ظاهر می‌شوند. با استفاده از این تقابل رنگ‌ها، ترک‌ها شناسایی شده و CIF محاسبه می‌شود [۳۹]. مهم‌ترین مزایای روش عکس‌برداری و آنالیز تصویری در اندازه‌گیری و تحلیل تغییرات ابعاد ترک عبارتند از: ۱) آنالیز تصویری روشی غیرتماسی است و فعالیت‌های انسانی و نصب تجهیزات، الگوی ترک را دچار دست‌خوردگی نمی‌کند؛ ۲) با انتخاب مقیاس مناسب در عکس‌برداری می‌توان به دقت دل‌خواه در آنالیز ترک دست یافت؛ ۳) قابلیت اندازه‌گیری ابعاد ترک در جهات مختلف را دارد؛ (٤) امکان جمع‌آوری همهٔ عکس‌ها و تحلیل‌های بعدی نیز در این روش وجود دارد.

---

۱. Sketching ۲. Mi ۳. Miller ۴. Crack Intensity Factor

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

با توجه به مزایای مختلف این روش نسبت به روش‌های قبلی، پژوهش‌های مختلفی در بارهٔ بررسی درز و ترک‌های ایجادشده بر روی لاینرهای خاکی با استفاده از این روش انجام شده است [۱۳]، [۲۶]، [۴۰]، [٤٦]. هم‌چنین محققان مختلف برنامه‌های متعدد تحلیل تصاویر را تهیه کرده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها شامل سیستم تحلیل تصویری ترک (CIAS)[۱] [٤] و تحلیل ترک بر پایه روش تصویری (IMCA)[۲] [۳۵] است. مبنای اصلی این برنامه‌ها ترک‌یابی بر اساس تغییر گرادیان در محتوای رادیومتریک اجزای تصویر و سپس تعیین مساحت ناحیهٔ ترک‌خورده است. یکی از پارامترهای مهمی که در برنامه‌های کامپیوتری شناسایی و تحلیل ترک اهمیت چشم‌گیری دارد، حد آستانه است که این حد، حساسیت برنامه در تشخیص قسمت‌های ترک‌خورده را مشخص می‌کند. در صورتی‌که این ضریب در برنامه به‌درستی محاسبه نشود، برنامه در شناسایی ترک‌ها دچار مشکل می‌شود و تعیین میزان شاخص CIF با خطای زیادی همراه خواهد بود. هرچند در بررسی‌های اخیر، تعیین حد آستانهٔ بهینه با تأکید بیش‌تری مورد توجه قرار گرفته است [۲]، [۲۸]، [٤٧]، هنوز در این باره راه‌کار مدونی ارائه نشده است. ضمن آن‌که علی‌رغم مزایای متعدد روش آنالیز تصویری، روش آنالیز ترک با استفاده از تصویر، روش تقریباً پیچیده‌ای است که به پارامترهای متعددی وابسته است و قبل از استفاده از آن، باید از کالیبره بودن برنامه اطمینان پیدا کرد. لذا ارائه روشی ساده در تعیین شاخص شدت ترک و نحوهٔ کالیبراسیون آن بر اساس حد آستانه بهینه اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

روش پیشنهادی آنالیز ترک

مرور روش‌های مختلف اندازه‌گیری ترک‌ها در مقیاس آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روش آنالیز تصاویر، بهترین و مؤثرترین روش پایش ترک است. در این روش با استفاده از یک دوربین دیجیتال در زمان‌های موردنظر از سطح خاک عکس‌برداری و تغییرات ترک ثبت می‌شود، سپس هر عکس به کمک برنامهٔ آنالیز تصاویر تحلیل می‌شود. در این تحقیق با استفاده

۱. Crack Image Analysis System
۲. Image-based Method for Crack Analysis

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

از نرم‌افزار (MATLAB)، برنامه‌ای نوشته شد که شامل پنج مرحله است:

۱. با استفاده از دستور "imread"، عکس به برنامه معرفی می‌شود (شکل ۱ الف). در این حالت هر تصویر به ماتریسی نسبت داده می‌شود که تعداد درایه‌های آن ماتریس متناظر با تعداد پیکسل‌های تصویر است و کمیت هر درایه بسته به محتوای رادیومتریک تصویر، بین صفر تا ۲۵٦ متغیر است.

۲. ابعاد ماتریس با دستور"size" محاسبه می‌شود. در همین قسمت با استفاده از دو زیردستور "si (1)" و "si (2)" به‌ترتیب تعداد سطرها و ستون‌های ماتریس تعیین می‌گردد.

۳- با استفاده از دستور "im2bw" فرایند دوتایی‌سازی[۱] انجام می‌شود. در این فرایند ابتدا درایه‌های ماتریس قبلی نرمال‌سازی شده و در محدودهٔ صفر تا یک قرار می‌گیرند. سپس برنامه بدون در نظر گرفتن مشخصات تصویر، مقدار ۰/۵ را به‌عنوان حد آستانه در نظر می‌گیرد. و در این حالت درایه‌های بزرگ‌تر از ۰/۵ به یک و درایه‌های کوچک‌تر از ۰/۵ به صفر تبدیل شده و یک ماتریس دوتایی[۲] با درایه‌های صفر و یک تشکیل می‌شود. به‌منظور مطابقت تصویر ایجاد شده با تصویر اصلی، تصویر متناظر با این ماتریس با فرمان "imshow" به کاربر نشان داده می‌شود (شکل ۱ ب). در این تصویر، نواحی سیاه نشان‌دهندهٔ شبکهٔ ترک و نواحی سفید بیان‌گر پس‌زمینهٔ خاک است.

٤. با به‌کارگیری حلقهٔ for-end تمامی درایه‌های ماتریس تولید شده بررسی می‌شود و تعداد درایه‌هایی که در فرایند دوتایی‌سازی عدد یک را به‌خود اختصاص داده‌اند، محاسبه می‌شوند.

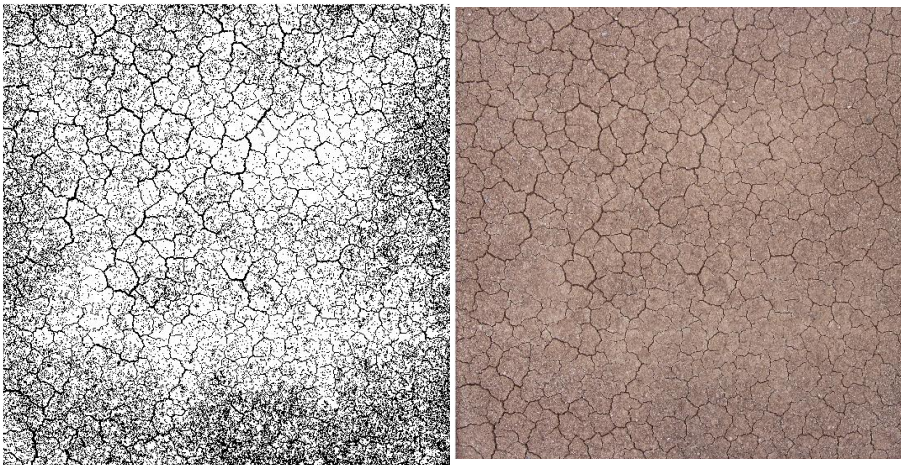
۵. با تقسیم مجموع داریه‌هایی که در ماتریس تولید شده عدد یک را به خود اختصاص داده‌اند و نشان‌گر مجموع سطح ترک‌خوردهٔ خاکند بر حاصل‌ضرب تعداد سطرها در تعداد ستون‌های ماتریس اولیه که در واقع معادل کل سطح نمونه‌اند، شاخص شدت ترک محاسبه می‌شود.

---

۱. Binarization ۲. binary

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]



الف) تصویر اصلی ب) تصویر ترک‌یابی‌شده

شکل ۱. نمونه‌ای از مرحلهٔ اول آنالیز تصویر برداشت شده از سطح خاک

چنان‌که در شکل مشخص است، علی‌رغم آن‌که برنامهٔ به‌کار رفته در تعیین مناطق ترک‌خورده به‌خوبی عمل می‌کند، وجود سنگ‌ریزه‌های کوچک و هم‌چنین زاویهٔ نور و سایهٔ حاصل باعث ایجاد عدم یک‌پارچگی در عکس و ظهور نقاط سیاه ناخواسته بر روی تصویر می‌شود. این نقاط که به نویزهای فلفل نمکی معروفند، نمایانگر وجود ترک در آن بخش از خاک نیستند، اما باعث می‌شوند میزان ترک‌خوردگی خاک بیش‌تر از مقدار واقعی محاسبه شود (شکل۱). به‌منظور رفع این نقیصه باید حد آستانه به‌گونه‌ای برای برنامه تعریف شود که حساسیت برنامه در تشخیص عدم یک‌نواختی محتوای رادیومتریک اجزای تصویر به‌شکل بهینه عمل کند. تعیین حد آستانهٔ بهینه از طریق انجام تست‌های آزمایشگاهی و واسنجی نتایج حاصل می‌شود.

نتایج کالیبراسیون آزمایشگاهی

۱. طراحی و ساخت پایلوت

به‌طور کلی در شبیه‌سازی به‌کمک مدلی فیزیکی تأثیر اندازهٔ ظرف مدل و نوع آن بر نتایجی که از مدل حاصل می‌شود بسیار حائز اهمیت است. یک طراحی اصولی و مناسب ابعاد ظرف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

مدل، این اجازه را به مدل می‌دهد که رفتار سیستم را تا حد امکان مانند شرایط واقعی شبیه‌سازی کند و اثر شرایط مرزی را به حداقل برساند. ابعاد پایلوت یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بررسی رفتار ترک است، زیرا ضخامت لایهٔ رس و شرایط مرزی بر رفتار ترک خوردگی تأثیر دارد [۲۸]. ازآن‌جاکه انتقال مایع در خاک عموماً توسط خلل و فرج‌های بزرگ و ترک‌ها کنترل می‌شود، مدل فیزیکی باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا بتواند ترک‌های بزرگ را تا حد امکان و همان‌گونه که در شرایط واقعی اتفاق می‌افتد در خود جای دهد. هرچند در برخی از پژوهش‌ها بررسی ترک‌ها، قطر نمونه بین ۱۰ تا ۳۰ و ارتفاع نمونه بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شده است [۵]، [۹]، از آن‌جا که در بسیاری از پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی، ابعاد ترک‌های طولی و عمقی ایجاد شده در خاک تا ۳۰ سانتی‌متر نیز گزارش شده است [٤٨]، [٤٩]، برای به‌حداقل رساندن اثرات شرایط مرزی و شبیه‌سازی هرچه بیش‌تر شرایط واقعی، ابعاد پایلوت در این تحقیق ۱×۱ متر انتخاب شد. همچنین بر اساس بررسی که بنسون[۱] و بوت‌ول[۲] در سال ۲۰۰۰ انجام دادند که در آن نسبت بهینهٔ ارتفاع به قطر پایلوت ۰/۵ گزارش شده است، ارتفاع پایلوت در این تحقیق با توجه به ابعاد انتخابی، ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد [۵۰].

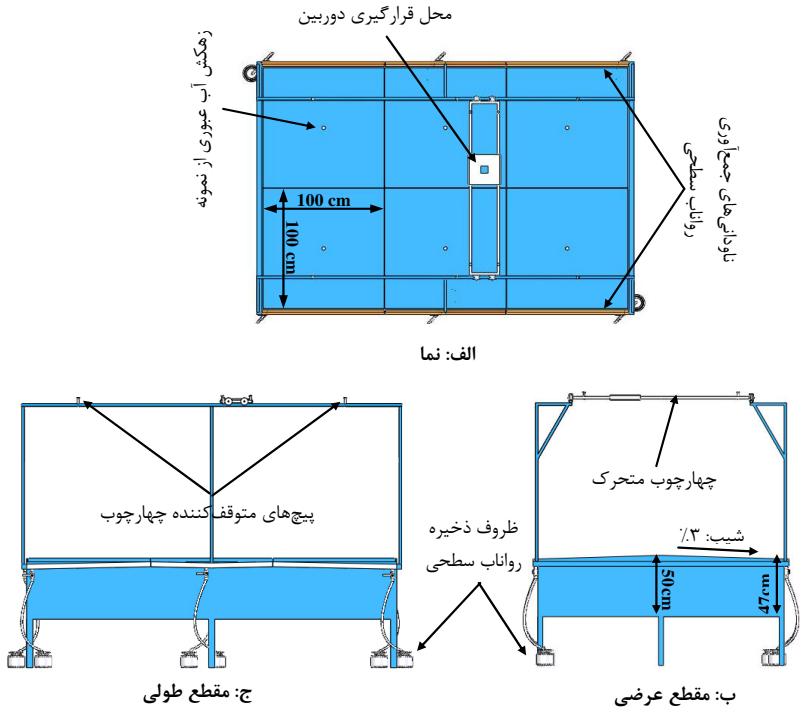
با توجه به تأثیرگذاری مشخصات خاک بر الگوی ترک‌خوردگی، به‌کارگیری پایلوتی که در آن بررسی هم‌زمان رفتار ترک بر روی چند نمونهٔ مختلف خاک امکان‌پذیر باشد، از نکات مهمی است که باید در طراحی و ساخت پایلوت به آن توجه شود. هم‌چنین بررسی تأثیرگذاری پوشش ژئوتکستایل در کاهش ترک‌خوردگی نمونه‌های خاکی به‌عنوان یکی دیگر از اهداف ساخت پایلوت مدنظر قرار گرفته است. در این تحقیق پایلوتی شامل شش سلول مجزا با مقطع مربع شکل به ابعاد یک متر در یک متر و ارتفاع ۰/۵ متر طراحی و ساخته شد. بدین‌ترتیب علاوه بر امکان بررسی هم‌زمان رفتار ترک در سه نمونهٔ مختلف خاک، می‌توان با استفاده از این پایلوت تأثیرگذاری پوشش ژئوتکستایل در هر نمونه را به‌کمک روش پیشنهادی آنالیز تصویر ارزیابی کرد. از آن‌جاکه برای آنالیز تصویری رفتار ترک در نمونه‌های مختلف، باید عکس‌برداری در زمان‌های مختلف و از نقطه‌ای ثابت انجام شود، ساختار نصب دوربین عکاسی در

۱. Benson ۲. Boatwell

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

ساخت پایلوت بسیار مهم است. بدین‌منظور پس از تعیین فاصلهٔ بهینهٔ دوربین از سطح خاک، یک چهارچوب غلطک‌دار بر روی پایه‌های متصل به بدنهٔ پایلوت قرار داده شد، به شکلی که این چهارچوب امکان حرکت بر روی نمونه‌های مختلف خاک را دارا باشد. هم‌چنین صفحه‌ای متحرک که محل قرارگیری دوربین است، به‌گونه‌ای بر روی چهارچوب تعبیه شد که امکان جابه‌جایی در جهت عمود بر حرکت چهارچوب را داشته باشد. بدین‌ترتیب امکان حرکت دوربین در دو راستای عمود بر هم و پوشش دادن همهٔ نمونه‌ها فراهم شد. موقعیت دقیق عکس‌برداری به‌کمک پیچ‌های متوقف‌کننده که بر روی چهارچوب و هم‌چنین پایه‌های اصلی نصب شده‌اند، تعیین می‌گردد. همچنین امکان جمع‌آوری رواناب‌های سطحی و ثبت میزان آب نفوذی از نمونه‌های خاک از جمله ویژگی‌های پایلوت طراحی شده است که جزئیات آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



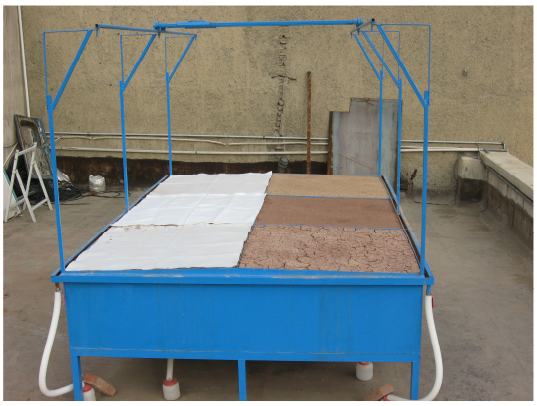
شکل ۲. جزئیات پایلوت طراحی شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور بررسی دقت روش پیشنهادی در شناسایی رفتار ترک‌خوردگی در شرایط مختلف، سه نمونهٔ مختلف خاک از محل‌های دفن پسماند ورامین، کهریزک و کرج که هر سه شرایط اولیهٔ ساخت لاینر را دارند، آزمایش شد. به‌منظور تعیین تأثیر پوشش ژئوتکستایل بر شدت ترک‌خوردگی، برای هر نمونه دو سلول در نظر گرفته شد. بدین‌ترتیب پایلوت مورد نظر شامل شش سلول است که هر نمونه در دو سلول قرار می‌گیرد (یکی بدون پوشش و دیگری با پوشش ژئوتکستایل). پس از قرارگیری لایهٔ پنج سانتی‌متری ماسه در کف هر سلول به‌عنوان لایهٔ زه‌کش، نمونه‌های مختلف رس در سلول‌های شش‌گانه، متراکم شدند و از ژئوتکستایل جداکننده به‌عنوان پوشش سه نمونه استفاده شد. همهٔ نمونه‌ها به‌مدت یک سال در معرض شرایط جوی قرار گرفتند و در بازه‌های مختلف زمانی برداشت تصویر از سطح هر نمونه به‌کمک دوربین دیجیتال (مدل Canon-PowerShot A570IS) انجام شد. پایلوت ساخته شده پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (در حین آزمایش) در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. پایلوت ساخته شده در حین آزمایش

۳. تعیین حد آستانه بهینه

همان‌گونه که ذکر شد، مهم‌ترین مشکل در آنالیز تصویری، عدم تشخیص درست ترک‌ها توسط برنامه است. با توجه به این‌که تشخیص ترک در ارتباط مستقیم با حد آستانهٔ تعریف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

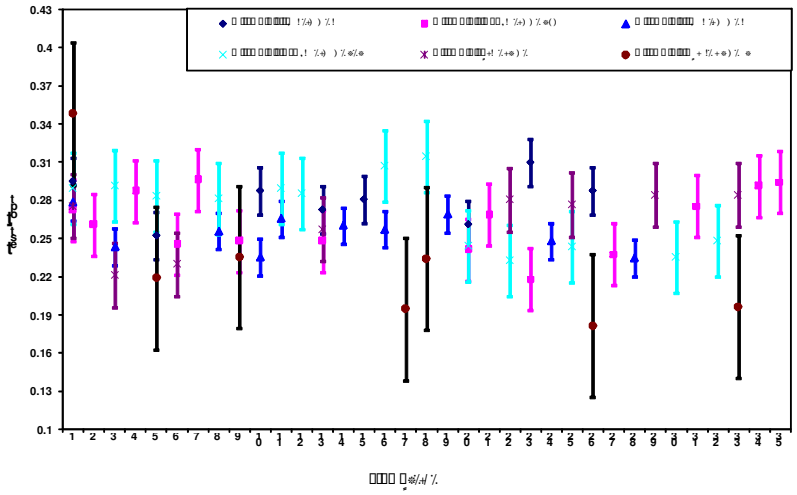
شده برای برنامه است، کالیبراسیون حد آستانه برای برنامهٔ پیشنهادی ضروری است. ازآنجاکه کل دورهٔ عکس‌برداری ۱۰ ماه طول کشیده است، به‌منظور کالیبراسیون برنامه، تصاویر برداشت شده در ٦ ماه اول استفاده شد. تعداد تصاویر برداشت شده در ٦ ماه اول آزمایش حدود ۳۰۰ عدد عکس است که ۲۰ درصد از این تصاویر به‌منظور استفاده در فرآیند کالیبراسیون انتخاب شد. بدین منظور سعی شده است تصاویر به‌گونه‌ای انتخاب شوند که بازهٔ مختلفی از شدت ترک را شامل شود و هم‌چنین زمان‌های مختلف برداشت تصاویر (از لحاظ میزان نور) در این تصاویر وجود داشته باشد. سپس با استفاده از دستور "graythresh" در مدول (image processing) نرم افزار MATLAB حد آستانه تشخیص ترک با نرم‌افزار MATLAB برای هر عکس تعیین شد. به‌منظور کالیبراسیون حد آستانه پیشنهادی توسط برنامه از تکنیک روی‌هم‌گذاری در نرم‌افزار فتوشاپ استفاده شد. بدین‌ترتیب که تصویر اصلی با تصاویر تولید شده با برنامه با حدود آستانهٔ مختلف روی‌هم‌گذاری شد تا بهترین حد آستانه برای تصاویر انتخابی به‌دست آید. سپس میانگین تفاضلات حد آستانه بهینه برای هر عکس با حد آستانه پیشنهادی برنامه در آن عکس محاسبه و به‌عنوان ضریب کالیبراسیون به برنامه معرفی شد. در شکل ٤ تفاوت حد آستانه ارائه شده با نرم‌افزار و حد آستانه بهینه برای تصاویر منتخب ارائه شده است.

چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، میزان حد آستانهٔ بهینه همواره کم‌تر از میزان حد آستانه‌ای است که برنامه مشخص می‌کند. مهم‌ترین دلیل این مسئله می‌تواند دقت زیاد تصاویر و هم‌چنین تفاوت در شدت نور در تصاویر مختلف باشد. هم‌چنین ناهمگنی خاک کوبیده شده و وجود سنگ‌ریزه‌ها باعث می‌شود که حد آستانه تشخیصی توسط برنامه بیش از اندازه باشد.

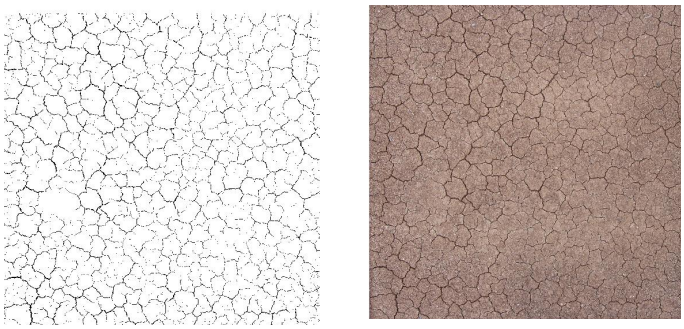
بر اساس نتایج به‌دست آمده، میانگین تفاضلات حد آستانهٔ بهینه و حد آستانه پیشنهادی برنامه برای تمامی نمونه‌ها و شدت‌های مختلف ترک، ۰/۲٦ است. با تعیین ضریب کالیبراسیون، این مقدار از حد آستانهٔ تشخیصی با نرم‌افزار کم شده و فرایند دوتایی‌سازی با کمک حد آستانهٔ جدید در برنامهٔ تحلیل ترک‌ها انجام شد. شکل ۵ عمل‌کرد برنامهٔ کالیبره شده را در تعیین ترک‌های سطحی خاک نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]



شکل ٤. تفاوت حد آستانه ارائه شده توسط برنامه و حد آستانهٔ بهینه برای نمونه‌های مختلف



الف) تصویر اصلی ب) تصویر ترک‌یابی‌شده

شکل ٥. ترک‌یابی تصویر با برنامهٔ کالیبره شده

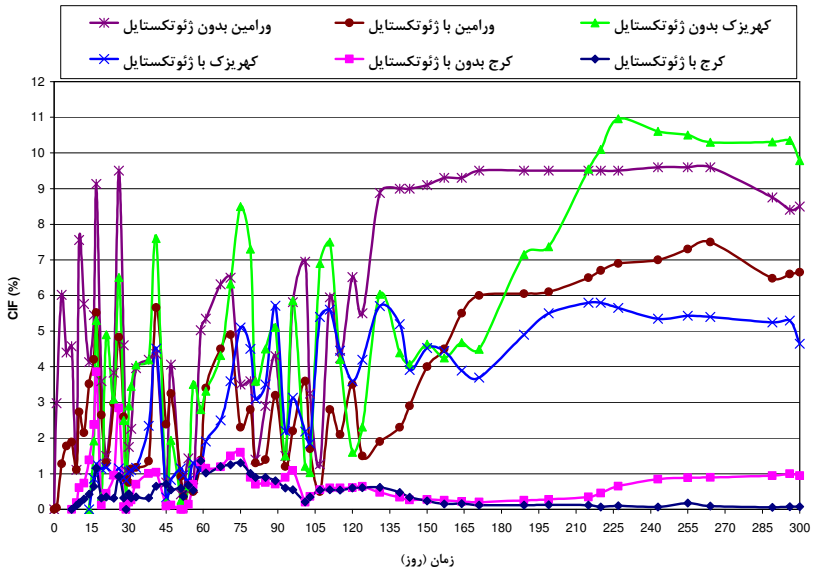
در ادامه تمامی عکس‌ها به‌کمک برنامه کالیبره شده تحلیل گردید و بر این اساس، تغییرات شاخص CIF برای نمونه‌های سه‌گانه خاک (با و بدون پوشش) نسبت به زمان تعیین گردید (شکل ٦).

چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر شش نمونه، مقدار شاخص CIF در ابتدا دارای رفتار نوسانی است که این مسئله ناشی از وقوع بارندگی در طی زمان و به‌تبع آن چرخه‌های خشک‌شدگی/ترشدگی خاک است. با پایان دورهٔ بارندگی، این شاخص افزایش یافته و در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

نهایت به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. ازآن‌جاکه بر اساس تئوری ترک‌خوردگی و هم‌چنین نتایج حاصل از سایر تحقیقات، چنین الگویی مورد انتظار است، می‌توان نتیجه گرفت کـه عمـل‌کـرد روش پیشنهادی در تعیین الگوی کلی ترک‌خوردگی در خاک‌های مختلف مناسب است.

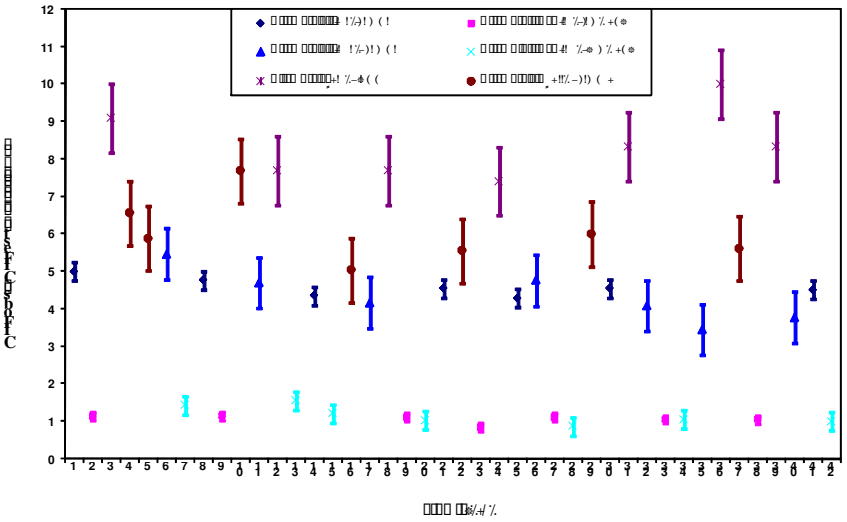


شکل ٦. تغییرات شاخص شدت ترک برای نمونه‌های مختلف با استفاده از روش پیشنهادی

در نهایت و به‌منظور تعیین دقت برنامهٔ کالیبره شـده در تعیـین شـاخص CIF، حـدود ۱۵ درصد از تصاویر (به‌جز تصاویری که در فرایند کالیبراسیون استفاده شد)، با شدت‌های مختلف ترک انتخاب و فرایند صحت‌سنجی بر روی آن‌ها انجام گردید. بدین‌منظور ابتدا هر تصـویر بـا مقادیر مختلف حد آستانهٔ ترک‌یابی‌شده و با استفاده از تکنیـک روی‌هـم‌گـذاری در نـرم‌افـزار فتوشاپ و تطبیق تصویر ترک‌یابی‌شده با تصویر اصلی، حد آستانهٔ بهینه برای هر تصویر تعیین شد. سپس شاخص شدت ترک با استفاده از حد آستانه بهینه برای هر تصویر تعیین شـد (CIF مشاهداتی) و با مقادیر به‌دست آمده از برنامهٔ کالیبره‌شده (CIF محاسباتی) مقایسه شد (شـکل ۷). نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که حداکثر تفاوت بین CIF محاسباتی و CIF مشاهداتی برای تمامی نمونه‌ها، ۱۰ درصد است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]



شکل ۷. تفاوت مقدار CIF محاسبه شده با استفاده از برنامه کالیبره‌شده نسبت به CIF مشاهداتی

جدول ۱ میانگین اختلاف بین CIF محاسباتی و CIF مشاهداتی را برای هر نمونه نشان می‌دهد. بر این اساس میانگین اختلاف بین شاخص شدت ترک محاسبه شده توسط برنامهٔ کالیبره‌شده و شاخص شدت ترک مشاهده شده برای همهٔ نمونه‌ها، ٤/٢ درصد است. هم‌چنین با توجه به شکل‌های ۵ و ۷، اختلاف بین این دو مقدار برای نمونه‌هایی که شاخص شدت ترک کم‌تری دارند (نمونهٔ کرج با پوشش ژئوتکستایل) بیش‌تر و برای نمونه‌های با ترک‌خوردگی بیش‌تر (نمونه‌های بدون پوشش ورامین و کهریزک)، دقت نتایج بیش‌تر است.

جدول ۱: میانگین اختلاف بین شاخص شدت ترک محاسباتی و مشاهداتی برای نمونه‌های مختلف

نمونه	با پوشش ژئوتکستایل	بدون پوشش ژئوتکستایل	میانگین کل
ورامین	٤/٥ ± ٠/٢	١ ± ٠/١	٤/٢ ± ٢/٦
کهریزک	٤/٣ ± ٠/٦	١/١ ± ٠/٢	
کرج	٨/٣ ± ٠/٩	٦ ± ٠/٨	

نتیجه‌گیری

یکی از فرایندهایی که قبل از شروع بهره‌برداری در لاینرهای رسی متراکم‌شده رخ می‌دهد، ایجاد ترک‌هایی است که تحت تأثیر عوامل مختلف در سطح لاینر به‌وجود آمده و در عمل‌کرد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

هیدرولیکی و ظرفیت باربری خاک تأثیر سوء دارد. به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و گسترش ترک‌ها در پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی و به‌تبع آن ارائهٔ راه‌کارهای مدیریتی، انتخاب روشی مناسب که بتواند به‌درستی هندسه ترک را تشریح کند از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در این پژوهش ضمن بررسی ابزارها و روش‌های متعدد اندازه‌گیری ابعاد ترک و هم‌چنین تکنیک‌های مختلف تحلیل ترک، آنالیز تصویری به‌عنوان بهترین روش برای اندازه‌گیری و تحلیل شدت ترک انتخاب شد. بر این اساس با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برنامه‌ای برای شناسایی ترک و تعیین شاخص شدت ترک تدوین گردید. بر اساس نتایج اولیهٔ این برنامه، پارامتر حد آستانه که معرف حساسیت برنامه در شناسایی تقابل رنگ‌هاست، به‌عنوان مهم‌ترین عامل در تشخیص صحیح ترک‌های موجود در سطح خاک شناسایی شد و کالیبراسیون برنامه بر اساس این پارامتر در دستور کار قرار گرفت. بدین‌منظور، پایلوت آزمایشگاهی بررسی رفتار ترک در تقابل با شرایط جوی طراحی و ساخته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ و تکنیک روی‌هم‌گذاری، تفاوت حد آستانهٔ بهینه با حد آستانهٔ معرفی شده توسط برنامه تعیین و به‌عنوان ضریب کالیبراسیون ترک‌یابی به برنامه اضافه شد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی برنامهٔ پیشنهادی حاکی از عمل‌کرد مناسب این برنامه در تعیین شاخص شدت ترک در سطح خاک است و با توجه به سادگی و قابلیت اجرای این روش در مقیاس آزمایشگاهی، می‌توان از آن در بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر شکل‌گیری و گسترش ترک در سطح لاینرهای خاکی استفاده کرد.

قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران که این پژوهش با استفاده از اعتبارات آن شورا انجام شده است تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Peron, H., Delenne, J. Y., Laloui, L., El Youssoufi, M. S., "Discrete element modeling of drying shrinkage and cracking of soils", Computers and Geotechnics 36 (2009) 61-69.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

2. Li, J. H., Zhang, L.M., "Geometric parameters and REV of a crack network in soil", Computers and Geotechnics 37 (2010) 466-475.

3. Murray, H.H., "Traditional and anew applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview", Applied Clay Science 17 (2000) 207-221.

4. Tang, C. S., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., Wang, B., "Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils", Engineering Geology 101(2008) 204-217.

5. Kalkan, E., "Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils", Applied Clay Science 43 (2009) 296-302.

6. Sivrikaya, O., "Models of compacted fine-grained soils used as mineral liner for solid waste", Environ Geology 53 (2008)1585-1595.

7. Mal, D., Sinha, S., Middya, T. R., Tarafdar, S., "Desiccation crack patterns in drying laponite gel formed in an electrostatic field", Applied Clay Science 39 (2008) 106-111.

8. Hewitt, P. J., Philip, L. K., "Problems of clay desiccation in composite lining systems", Engineering Geology 53 (1999) 107-113.

9. Rayhani, M. H. T., Yanful, E. K. Fakher, A., "Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils", Engineering Geology 97 (2008) 25-31.

10. Phifer, M., Boles, D., Drumm, E., Wilson, G. V., "Comparative response of two barrier soils to post compaction water content variations", ASCE GSP 46 (1995) 591-608.

11. Albrecht, B. A., "Effect of desiccation on compacted clays", MSc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, WI (1996).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

12. Omidi, G. H., Thomas, J. C., Brown, K. W., "Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner. In: Water Air and Soil Pollution", vol. 89. Kluwer Academic Publishers, Netherlands (1996) 91-103.
13. Albrecht, B. A., Benson, C. H., "Effect of desiccation on compacted natural clay", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127 (1) (2001)67-75.
14. Brian, A. A., Benson, C. H., "Effect of desiccation on compacted natural clays", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127 (2001) 67-75.
15. Albright,W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. C., Tyler, S. W., Rock, S. A., "Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 132 (2006) 1393-1403.
16. Rayhani, M. H. T., Yanful, E. K., Fakher, A., "Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran", Canadian Geotechnical Journal 44 (2007) 276-283.
17. Inci, G., "Numerical Modeling of Desiccation Cracking in Compacted Soils", The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India (2008).
18. Holtz, R. D., Kovacs, W. D., "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ (1981).
19. Mitchell, J. K., "Fundamentals of Soil Behavior", Wiley, New York (1993).
20. Daniel, D. E., "Design and construction of RCRA/CERCLA final covers", Soils Used in Cover Systems EPA/625/4-91/025 (1991).
21. Morris, P. H., Graham, J., Williams, D. J., "Cracking in drying soils", Canadian Geotechnical Journal 29 (1992) 263-277.
22. Othman, M. A., Benson, C. H., Chamberlain, E. J., Zimmie, T. F., "Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity in compacted clays caused by

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

freeze–thaw", In: Daniel, D. E., Trautwein, S. J. (Eds.), Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142. Philadelphia (1994) 227-253.

23. Kleppe, J. H., Olson, R. E., "Dessication cracking of soil barriers", In: Johnson, A. I., Frobel, R. K., Cavalli, N. J., Pettersson, C. B. (Eds.), Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874. ASTM,West Conshohocken (1985) 263-275.
24. Daniel, D. E., Wu, Y. K., "Compacted clay liners and covers for arid sites", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 119 (2) (1993) 223-237.
25. Eigenbrod, K. D., "Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and the permeabilities of soft fine-grained soils", Canadian Geotechnical Journal 33 (1996)529-537.
26. Yessiler, N., Miller, C. J., Inci, G., Yaldo, K., "Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils", Engineering Geology 57 (2000) 105-121.
27. Osinubi, K. J., Nwaiwu, C. M. O., "Desiccation-induced Shrinkage in Compacted Lateritic Soils", Geotech Geol Eng 26 (2008) 603-611.
28. Tang, C. S., Cui, Y. J., Tang, A. M., Shi, B., "Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils", Engineering Geology 114 (2010) 261-266.
29. Tay, Y. Y., Stewart, D. I., Cousens, T. W., "Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liner", Engineering Geology 60 (2001) 263-274.
30. Al-Homoud, A. S., Basma, A. A., Husein Malkawi, A. I., Al-Bashabsheh, M. A., "Cyclic Swelling Behavior of Clays. Journal of Geotechnical Engineering", ASCE, 121 (7) (1995)562-565.
31. Al-Wahab, R. M., El-Kedrah, M. A., "Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in compacted clay", ASCE Geotechnical Special Publ. 46 (1995)791-806.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

32. Hellan, K., "Introduction to Fracture Mechanics. McGraw-Hill Book Company", New York (1984).

33. Priest, S. D., Hudson. J. A., "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys", Int J Rock Mech Min Sci Geomech 18 (1981) 183-97.

34. Priest, S. D., "Discontinuity analysis for rock engineering", London: Chapman & Hall (1993).

35. Barazzetti, L., Scaioni, M., "Crack measurement: Development, testing and applications of an automatic image-based algorithm", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (2009) 285-296.

36. Dasog, G. S., Shashidhara, G. B., "Dimension and volume of cracks in a Vertisol under different crop covers", Soil Sci. 156 (1993) 424-428.

37. Mi, H., "Kinematic wave formulation for flow through macroporous soil", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Wayne State University, Detroit, MI (1995).

38. Miller, C. J., Mi, H., Yesiller, N., "Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners", Journal of the American Water Resources Association (AWRA) 34 (3) (1998) 677-686.

39. Velde, B., "Structure of surface cracks in soil and muds", Geoderma 93 (1999)101-112.

40. Wijeyesekera, D. C., Papadopoulou, M. C., "Cracking in clays with an image analysis perspective", Clay Science for Engineering, Adachi & Fukue (eds.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 175 9 (2001) 437-482.

41. Velde, B., "Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil", La Touche (Vienne) France. Geoderma, 99 (3) (2001) 261-276.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]

42. Lecocq, N., Vandewalle, N., "Dynamics of crack opening in a one-dimensional desiccation experiment", Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 321 (3) (2003) 431-441.

43. Vogel, H. J., Hofmann, H., Roth, K. "Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results, and morphological quantification", Geoderma 125 (2005a) 203-211.

44. Vogel, H. J., Hofmann, H., Leopold, A., Roth, K., "Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation", Geoderma 125 (2005b) 213-223.

45. Peng, X., Horn, R., Peth, S., Smucker, A., "Quantification of soil shrinkage in 2D by digital image processing of soil surface", Soil & Tillage Research, 91 (1) (2006) 173-180.

46. Bisschop, J., "Size and boundary effects on desiccation cracking in hardened cement paste", Int J Fract 154 (2008) 211-224.

47. Greve, A., Andersen, M. S., Acworth, R. I., "Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil", Journal of Hydrology (ARTICLE IN PRESS) (2010).

48. Basnett, C., Bruner, R., "Clay desiccation of a single-composite liner system", Geosynthetics ’93 Conference, Vancouver (1993) 1329-1340.

49. Miller, C.J., Mishra, M., "Modeling of leakage through cracked clay liners, I: state of the art", Water Resources Bulletin, AWRA 25 (3) (1989) 551-555.

50. Benson, C., Boutwell, G., "Compaction condition and scale depended hydraulic conductivity of compacted clay liners, constructing and controlling compaction of earth fills", University of Wisconsin, Madison (2000).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.3.8]