

## بررسی مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌های رمبنده دشت ورامین در حالت‌های

### دست نخورده، بازسازی شده و بهسازی شده

مرتضی هاشمی\*؛ حسین محمودیان؛ رسول اجل لویان<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۱۷

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۰۵

#### چکیده

گسیختگی‌های کششی مانند ترک‌های کششی بالای دامنه‌های خاکی ناپایدار، شکاف‌های سطح زمین، ترک‌های کششی بدنه سدهای خاکی و هر نوع گسیختگی دیگری در توده‌های خاک که از تنش‌های کششی ناشی می‌شود، از پدیده‌های مهم زمین‌شناسی مهندسی به حساب می‌آیند. مطالعه و شناخت مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌ها، می‌تواند سهم قابل توجهی در شناخت و پیشگیری از پدیده‌های ناشی از گسیختگی‌های کششی در خاک داشته باشد. خاک‌های رمبنده حاشیه دشت ورامین از جمله خاک‌هایی هستند که در اثر تنش‌های کششی ناشی از نشست زمین در دشت ورامین، در معرض گسیختگی کششی و تشکیل شکاف‌های سطح زمین قرار دارند. بنابراین در تحقیق حاضر ویژگی‌های مقاومت و تغییر شکل کششی این خاک‌ها در حالت‌های دست‌نخورده، بازسازی شده و بهسازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد هنگامی که خاک‌های رمبنده در حالت دست‌نخورده تحت تنش کششی مستقیم قرار می‌گیرند، مقاومت کمی از خود نشان داده و در کشش به صورت شکننده رفتار می‌کنند. خاک‌های بازسازی شده در مقایسه با خاک دست‌نخورده، مقاومت کششی بسیار کمتری دارند و در کشش بسیار نرم رفتار کرده و به راحتی گسیخته می‌شوند. خاک‌های بهسازی شده در مقایسه با خاک‌های دست‌نخورده، مقاومت کششی بیشتری دارند و تحت تنش‌های کششی شکل‌پذیرتر رفتار کرده و تغییر شکل کششی بیشتری را قبل از گسیختگی تحمل می‌کنند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بهسازی خاک‌های رمبنده با استفاده از مواد افزودنی تثبیت‌کننده و سپس تراکم خاک، روش مناسبی برای تقویت این خاک‌ها در مقابل تنش‌های کششی و بهبود عملکرد آن‌ها در کشش است.

**کلید واژه‌ها:** خاک رمبنده، مقاومت کششی، کرنش گسیختگی کششی، شکنندگی، شکل‌پذیری

۱. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان [m-hashemi@sci.ui.ac.ir](mailto:m-hashemi@sci.ui.ac.ir)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۳. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

خاک‌های رمبنده از جمله خاک‌های مساله‌داری هستند که در حالت خشک از مقاومت و استحکام خوبی برخوردارند اما با افزایش رطوبت و رسیدن به حالت اشباع، دچار فروریزش می‌شوند. این پدیده به علت ساختار متخلخل و نیمه پایدار این خاک‌ها است که در آن دانه‌های درشت تر توسط ذرات ریزتر به صورت ناپایدار و با یک بافت لانه زنبوری سیمانی شده اند که با افزایش رطوبت و اشباع شدن خاک، اتصال بین ذرات و سیمان از بین رفته و ساختار خاک فرو می‌ریزد (Li et al., 2016). این نوع خاک‌ها معمولاً متشکل از نهشته‌های بادرستی لس هستند و در مناطق خشک و نیمه خشک مانند بخش‌های زیادی از ایران گسترش دارند (فریدونی، ۱۳۹۰). رمبندگی خاک معمولاً با پدیده‌های مخاطره آمیزی مانند زمین‌لغزش (Luo et al., 2018; Xu et al., 2018; Peng et al., 2019) و تشکیل شکاف در سطح زمین (Nikbakhti et al., 2018) همراه است. در این پدیده‌ها به دلیل اینکه خاک‌های رمبنده تحت تاثیر تنش‌های کششی قرار می‌گیرند، مقاومت کششی خاک نقش بسزایی در تسهیل و بروز این پدیده‌ها دارد (Li, 2018). در بررسی‌های ژئوتکنیک، مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت تراکمی و مقاومت برشی خاک، معمولاً صفر و یا مقدار بسیار کمی در نظر گرفته می‌شود. این امر به این دلیل است که مقدار مقاومت کششی خاک‌ها بسیار کم بوده و اندازه‌گیری این مقدار کم، با تجهیزات معمول به سادگی میسر نیست (Vanicek, 2013). اما مقاومت کششی در مواردی که خاک با گسیختگی‌های کششی مانند ترک‌های کششی دامنه‌های ناپایدار، ترک‌های کششی بدنه سدهای خاکی، ترک‌های کششی در گودبرداری‌ها، خاکریز راه‌ها و دامنه رودخانه‌ها و شکاف‌های سطح زمین مواجه است، از اهمیت زیادی برخوردار است (Kim et al., 2012, He et al. 2018). این پدیده‌ها از اهمیت زیادی در زمین‌شناسی مهندسی برخوردارند و بنابراین بررسی مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌ها در مقابل نیروهای کششی وارد به آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. بر خلاف مقاومت برشی خاک که ناشی از اصطکاک و چسبندگی بین ذرات است،

مقاومت کششی چندان تحت تاثیر اصطکاک ذرات خاک نیست و بیشتر توسط چسبندگی بین ذرات به وجود می‌آید (Goulding, 2006). بنابراین خاک‌های دانه‌ای که فاقد سیمان شدگی و یا فاقد بخش ریزدانه چسبنده هستند، مقاومت کششی بسیار کمی دارند (Lu et al., 2007). بر اساس مطالعات سان و همکاران (Sun et al., 2009) بر روی خصوصیات کششی خاک‌های لسی کشور چین، مشخص گردید مقاومت کششی کم، ساختار سست و پتانسیل رمبندگی این خاک‌ها عوامل اصلی تشکیل شکاف‌های زمین در مناطق لسی کشور چین هستند. این محققین نشان دادند که لس‌های رمبنده در حالت دست نخورده دارای مقاومت کششی بسیار کمی هستند و زمانی که در معرض تنش‌های کششی قرار می‌گیرند، پس از یک کرنش کششی کوچک دچار گسیختگی می‌شوند. سان و همکاران (Sun et al., 2016) خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت کششی لس‌های درزه‌دار (Fractured loess) غرب چین را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین مقاومت کششی تک محوری لس را در حالت‌های مختلف جهت‌یابی سطح ناپیوستگی با محور بارگذاری کششی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان داد، در منحنی تنش-کرنش کششی این خاک‌ها، نقطه تنش حداکثر مشخصی مشاهده نمی‌شود. شکست کششی بدون نشانه‌های قبلی و به صورت ناگهانی رخ می‌دهد که نشان دهنده شکننده بودن گسیختگی کششی است. با افزایش زاویه بین سطح ناپیوستگی و محور بارگذاری کششی، مقاومت کششی افزایش و با کاهش آن کاهش می‌یابد. نتایج این محققین نشان داد که مقاومت کششی لس‌های درزه‌دار با مقاومت کششی لس‌های بکر و بدون درزه متفاوت است به نحوی که در لس‌های درزه دار، گسیختگی کششی در امتداد یکی از سطوح ناپیوستگی رخ می‌دهد در صورتیکه در لس‌های بکر، سطح شکست عمود بر محور بارگذاری کششی است. در نهایت این محققین نتیجه گیری کردند، سطوح درزه و شکستگی درون لس‌ها یکی از عوامل اصلی در بروز ناپایداری‌ها و گسیختگی‌های مشاهده شده در لس‌های غرب چین مانند شکاف زمین و زمین‌لغزش

شده و مقاومت کششی به صورت ناگهانی افت می‌کند (Wang et al., 2019).

تمامی مطالب بیان شده نشان دهنده اهمیت مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌های لسی است. این اهمیت زمانی افزایش می‌یابد که این خاک‌ها تحت تاثیر تنش‌های کششی قرار می‌گیرند و گسیختگی‌های کششی موجب بروز ناپایداری در آن‌ها می‌شود. کشور ایران نیز از جمله کشورهایی است که رسوبات لسی رمبنده در بخش‌های زیادی از آن گسترده شده‌اند و تاکنون مطالعات زمین‌شناسی مهندسی زیادی بر روی این خاک‌ها در ایران انجام شده است (کمک پناه، ۱۳۸۶؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۰؛ حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۰؛ معروف و بلوری بزاز، ۱۳۹۳؛ Nikbakhti et al., 2018). اما در مطالعات گذشته، ویژگی‌های مرتبط با مقاومت و تغییر شکل‌پذیری کششی این خاک‌های مساله‌دار مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌های رمبنده دشت ورامین در حالت‌های دست نخورده، بازسازی شده و بهسازی شده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

#### ۱. مواد و روش‌ها

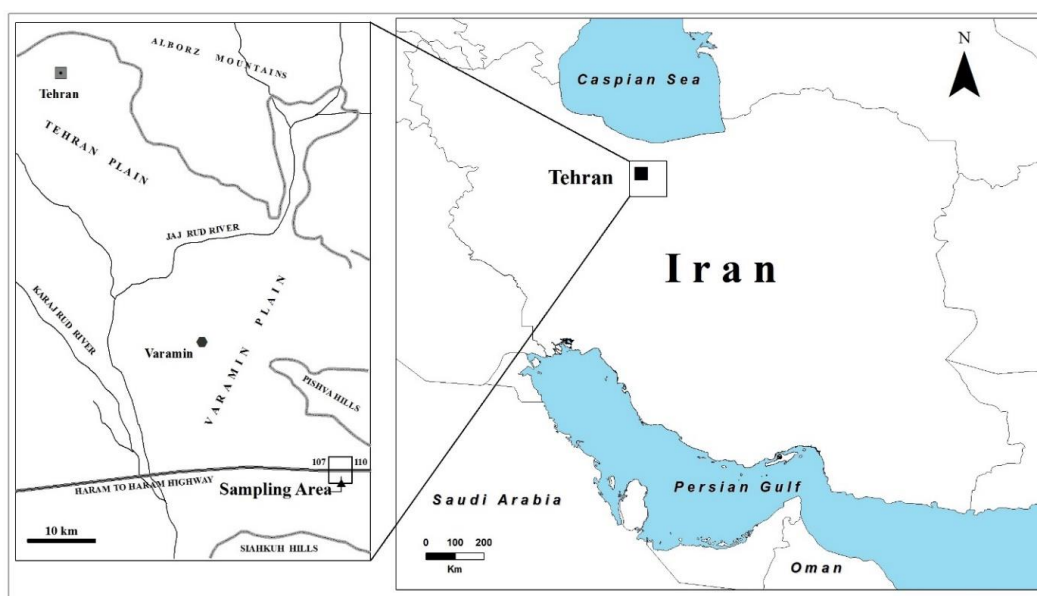
##### ۱-۲. خاک مورد مطالعه

خاک مورد مطالعه در تحقیق حاضر از حاشیه جنوب شرقی دشت ورامین تهیه شده است (شکل ۱). این محدوده دارای خاک رمبنده است و در معرض تشکیل و توسعه شکاف‌های زمین قرار دارد (شکل ۲). ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی این خاک‌های مساله‌دار و همچنین عوامل موثر و مکانیسم‌های تشکیل شکاف‌های زمین در این محدوده به صورت کامل توسط نیک‌بختی و همکاران (Nikbakhti et al., 2018) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات این محققین، خاک‌های این محدوده دارای پتانسیل رمبندگی شدید هستند و ترکیبی از عوامل، شامل رمبندگی خاک، تجمع آب‌های سطحی و تنش‌های کششی ناشی از نشست زمین در دشت ورامین موجب تشکیل و توسعه شکاف‌های بزرگ در سطح زمین شده است. پائین رفتن سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت‌های بی‌رویه، باعث نشست زمین در دشت ورامین

است. لی (Li, 2018) مقاومت کششی و مقاومت برشی لس مالان در چین را مورد بررسی و بازنگری قرار داده است. مقاومت کششی لس مالان با توجه به درصد رطوبت، دانسیته خشک، اندازه نمونه، روش انجام آزمایش و نرخ اعمال تنش کششی، بین ۱۰ تا ۱۶۰ کیلوپاسکال در تغییر است. مقاومت کششی این لس با افزایش درصد رطوبت کاهش و با افزایش دانسیته خشک، افزایش می‌یابد. دانسیته خشک تاثیر بیشتری به نسبت درصد رطوبت در مقاومت کششی لس مالان دارد. اختلاف قابل توجهی بین مقاومت کششی لس مالان در حالت دست نخورده و حالت دست نخورده وجود دارد که نشان دهنده تاثیر قابل توجه ساختار سیمان شده خاک لس در مقاومت آن است. در درصد رطوبت و دانسیته خشک یکسان، مقاومت کششی نمونه‌های دست نخورده به میزان ۵۰ درصد از مقاومت کششی نمونه‌های دست نخورده بیشتر است. با افزایش رطوبت، اختلاف مقاومت لس دست نخورده و دست نخورده کاهش می‌یابد. رطوبت با حذف تاثیر ساختار سیمان شده خاک باعث کاهش مقاومت کششی نمونه‌های دست نخورده و نزدیک شدن آن به مقاومت کششی نمونه‌های دست نخورده می‌شود. لی (Li, 2018) این پدیده را عامل وقوع بسیاری از ناپایداری‌های لس مالان در زمان بارندگی‌ها در تابستان معرفی می‌کند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2019) تغییرات مقاومت کششی و میکروساختار لس در اثر ارتعاش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ارتعاش سبب کاهش مقاومت و شکل‌پذیری (Ductility) کششی خاک لس می‌شود. این پدیده در اثر از بین رفتن مقاومت اتصالی بین دانه‌ها در نتیجه شکست سیمان رسی بین ذرات درشت‌تر رخ می‌دهد. در طول آزمایش‌های کشش، ساختار خاک دچار تغییر در دو فاز مشخص شامل فاز کشیدگی و فاز گسیختگی می‌شود. در فاز کشیدگی، تغییر شکل‌های کششی در حالی رخ می‌دهد که تماس بین ذرات خاک تغییر قابل توجهی نمی‌کند. در فاز گسیختگی، سیمان‌شدگی‌های ضعیف در اثر مقاومت در مقابل نیروی کششی شکسته شده و به محض تشکیل یک ترک سراسری، نمونه به دو بخش تقسیم

بنابراین مطالعه ویژگی‌های مقاومت کششی این خاک‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در تحقیق حاضر سه نمونه خاک، هر کدام به دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده از محل دیواره شکاف‌ها و همچنین ترانسه‌های مصنوعی تهیه شد (شکل ۳). همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌گیری دست‌نخورده به روش تهیه نمونه مونولیت با استفاده از جعبه‌های چوبی با اندازه  $30 \times 30 \times 30$  سانتی‌متر انجام شد. ویژگی‌های شاخص خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

شده است. سطح آب زیرزمینی در دشت ورامین در بازه بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۸ در حدود ۱۳ متر افت داشته است (Motagh et al., 2008). بر اساس مطالعات متاق و همکاران (Motagh et al., 2008) دشت ورامین در یک دوره ۱۴۰ روزه بین 13 Jun 2004 تا 31 Oct 2004 در حدود ۹ سانتی‌متر نشست زمین را تجربه کرده است. این مقدار نشان دهنده نرخ فرونشست زمین به میزان ۲۳ سانتی‌متر در سال در دشت ورامین است. از آنجا که شکاف‌های زمین در دسته گسیختگی‌های کششی قرار دارند (Xu et al. 2015; Peng et al. 2019)،



شکل ۱. نقشه محدوده نمونه برداری در حاشیه جنوب شرقی دشت ورامین



شکل ۲. شکاف زمین با طول بیش از ۵۰۰ متر که اخیراً در محدوده حاشیه دشت ورامین ایجاد شده است

صورت مداوم اندازه گیری شد تا نتیجه برش خاک به شکل استوانه نزدیک باشد. نسبت طول به قطر نمونه‌های تهیه شده، بیش از ۲ بوده است (Li, 2018). از نمونه‌های دست‌نخورده تهیه شده با این روش، برای انجام آزمایش‌های مقاومت کششی تک محوری و مقاومت تراکمی تک محوری استفاده شد. بر اساس مطالعات اوشار و همکاران (Avsar et al., 2015)، نمونه‌های تهیه شده با این روش، در آزمایش‌های مقاومتی نتایج قابل قبولی ارائه می‌کنند.



شکل ۴. نمونه‌های دست نخورده استوانه‌ای شکل خاک ۱ که به روش برش دستی تهیه شده‌اند

### ۲-۳. آماده سازی نمونه‌های بازسازی شده

بخش زیادی از آزمایش‌های این تحقیق بر روی نمونه‌های بازسازی شده و بهسازی شده انجام شده است. به منظور تهیه نمونه‌های بازسازی شده در ابتدا تراکم ماکزیمم ( $g_{max}$ ) و رطوبت بهینه ( $w_o$ ) هر خاک توسط آزمایش پروکتور استاندارد (ASTM D698 2007) تعیین گردید و سپس برای هر خاک مورد مطالعه نمونه‌هایی با تراکم ۹۵ و ۱۰۰ درصد تراکم ماکزیمم تهیه گردید. برای تراکم نمونه‌ها، خاک در درون یک قالب استوانه‌ای فلزی با قابلیت تقسیم شدن به دو بخش در جهت طول استوانه (split-mold) با قطر داخلی ۳۸ میلی‌متر ریخته شد. در ادامه، دو قطعه استوانه‌ای پلاستیکی با قطر ۳۸ میلی‌متر در بالا و پائین خاک در درون قالب فلزی قرار داده شد و سپس این مجموعه در زیر دستگاه آزمایش CBR قرار داده شد و خاک درون قالب با نیروی استاتیکی دستگاه تا رسیدن به دانسیته مورد نظر، متراکم گردید (شکل ۵الف). نرخ تراکم



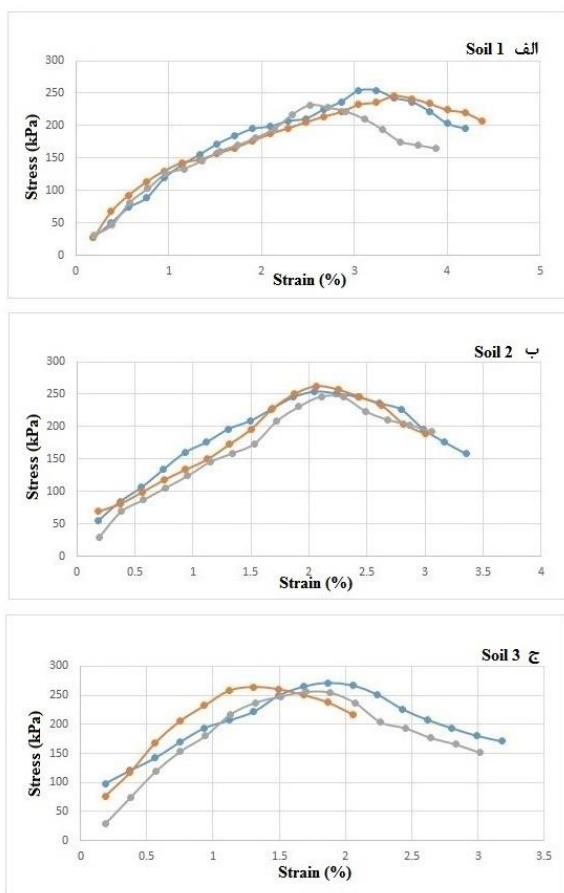
شکل ۳. نمونه‌برداری دست‌خورده (الف) و دست‌نخورده (ب) و (ج) از خاک‌های رمنده دشت ورامین

### جدول ۱. ویژگی‌های شاخص خاک‌های مورد مطالعه

Soil Properties	Soil 1	Soil 2	Soil 3
Sand (%)	26.7	19.8	12.2
Silt and clay (%)	73.3	80.2	87.8
Liquid limit (%)	27.5	24.5	24
Plasticity Index (%)	6	4.5	6.5
Specific gravity of particles	2.65	2.64	2.53
Natural unit weight ( $kN/m^3$ )	13.24	14.12	14.53
Maximum dry unit weight ( $kN/m^3$ )	17.85	18.57	19.12
Optimum moisture content (%)	16.5	11.5	8.8
Soil classification (USCS)	ML	ML	ML

### ۲-۲. آماده سازی نمونه‌های دست‌نخورده

به دلیل ساختار غیریکنواخت و ضعیف خاک‌های لسی، تهیه نمونه‌های استوانه‌ای دست‌نخورده به روش‌های مرسوم مغزه-گیری ماشینی از این خاک‌ها بسیار مشکل است. بنابراین برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای دست‌نخورده از خاک مورد مطالعه از روش پیشنهادی اوشار و همکاران (Avsar et al., 2015) استفاده شد. در این روش با استفاده از برش دستی، نمونه‌های خاک به شکل استوانه بریده و تراش داده شد (شکل ۴). برای این منظور در ابتدا بلوک‌های مونولیت خاک به بلوک‌های کوچکتر تقسیم شد و سپس با برش و تراش بلوک‌های کوچکتر، یک نمونه استوانه‌ای از خاک تهیه شد. در طول تراش دادن خاک، طول و قطر نمونه‌ها در بخش‌های مختلف به

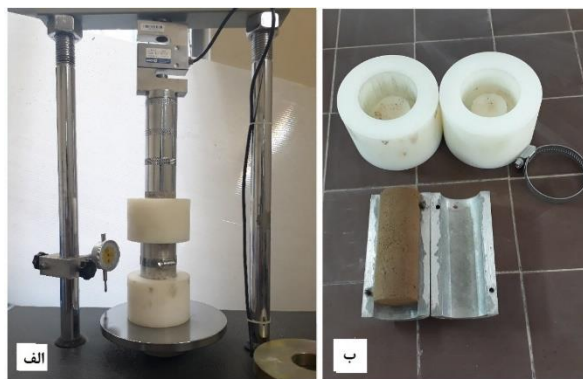


شکل ۶. نتایج آزمایش‌های تراکمی تک محوری بر روی سه نمونه بازسازی شده از هر خاک، الف خاک ۱، ب خاک ۲ و ج خاک ۳

#### ۲-۴. آماده سازی نمونه‌های بهسازی شده

در این تحقیق ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری خاک رمبنده بهسازی شده نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور مواد افزودنی سیلیکا و آلومینا به صورت پودر با درصد‌های مختلف وزنی مطابق با روش پیشنهادی کوی و همکاران (Cui et al., 2018) به خاک‌های مورد مطالعه افزوده شده و سپس مخلوط خاک و ماده افزودنی تا رسیدن به ۹۵ درصد تراکم ماکزیمم به روش ذکر شده در بخش ۲-۳ مترکم گردیده و نمونه‌های استوانه‌ای خاک بهسازی شده تهیه شده است. پودر آلومینای مورد استفاده دارای ترکیب شیمیایی  $Al_2O_3$ ، درجه خلوص بیش از ۹۹ درصد، وزن مخصوص ۳/۹ و رنگ سفید است. پودر سیلیکا نیز دارای ترکیب شیمیایی

استاتیکی معادل ۱ میلی‌متر بر دقیقه و حداکثر بار استاتیکی به کار رفته معادل ۹۰ کیلوگرم بوده است. نمونه‌های تهیه شده با این روش دارای ساختار همگن و یکنواخت (شکل ۵ب) و کیفیت بالایی هستند که برای انجام آزمایش‌های مقاومتی مناسبند (Kafodaya and Okonta, 2018a, b). برای کنترل کیفیت نمونه‌های تهیه شده، برای هر خاک ۳ نمونه تهیه شده و آزمایش تراکمی تک محوری بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودار تنش-کرنش حداقل دو نمونه از سه نمونه مورد آزمایش برای هر خاک تا حدود زیادی بر روی یکدیگر منطبق می‌شود که این امر نشان دهنده ساختار مشابه نمونه‌های تهیه شده برای هر خاک و تاثیر حداقلی روش نمونه‌سازی بر نتایج است. شایان ذکر است که نمونه‌های تهیه شده دارای قطر ۳۸ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ بودند که برای انجام آزمایش مقاومت کششی تک محوری و آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۵. نمونه‌سازی با تراکم استاتیکی (الف) و تهیه نمونه‌های بازسازی شده با ساختار یکنواخت و همگن (ب)



مماسی تعیین شد. در نهایت با در اختیار داشتن پارامترهای فوق، ویژگی‌های مقاومت و تغییر شکل کششی نمونه‌های مورد مطالعه در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. برای هر نمونه حداقل دو آزمایش انجام شده است و مقدار میانگین، به عنوان مقاومت کششی خاک مورد آزمایش گزارش شده است.



شکل ۷. سیستم توسعه داده شده برای انجام آزمایش مقاومت کششی تک محوری مستقیم

آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری نیز مطابق با استاندارد (ASTM D2166 (2007) انجام شد. در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳۸ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ در درون یک دستگاه بارگذاری قرار داده شد. این آزمایش به روش کرنش کنترل انجام شد، به این صورت که نیرو به نحوی بر نمونه‌های مورد آزمایش اعمال شده که یک کرنش ثابت با نرخ ۱٪ بر دقیقه در نمونه ایجاد شود. در طول انجام آزمایش مقادیر نیرو و تغییر شکل در بازه‌های زمانی مناسب، به نحوی که امکان ترسیم نمودار تنش کرنش فراهم باشد، ثبت گردید. در نهایت

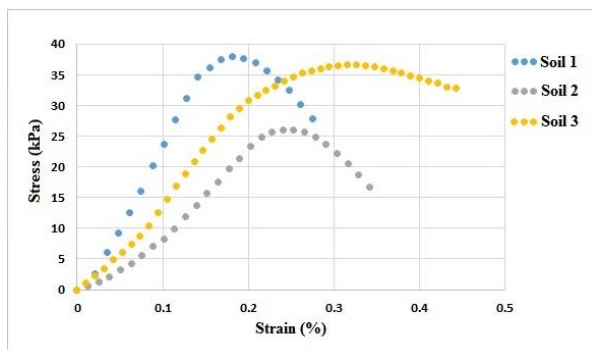
$\text{SiO}_2$ ، درجه خلوص بیش از ۹۵ درصد، وزن مخصوص ۲/۴ و رنگ سفید است. در این تحقیق با بهسازی خاک‌ها، امکان بررسی مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌های رمبنده دشت ورامین در حالت بهسازی شده و مقایسه آن با مقاومت و تغییر شکل کششی این خاک در دو حالت دست نخورده و بازسازی شده فراهم گردید.

#### ۲-۵. آزمایش‌های مقاومتی و تغییر شکل پذیری

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی مقاومت و تغییر شکل پذیری خاک‌های رمبنده در حالت‌های مختلف است. برای این منظور آزمایش‌های مقاومت کششی تک محوری و آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری بر روی نمونه‌های دست نخورده (بخش ۲-۲)، نمونه‌های بازسازی شده (بخش ۲-۳) و نمونه‌های بهسازی شده (بخش ۲-۴) انجام شده است.

برای انجام آزمایش مقاومت کششی تک محوری، یک سیستم کششی که بر روی دستگاه سه محوری خاک تعبیه می‌شود توسعه داده شد (شکل ۷). محفظه کششی شامل دو صفحه بالایی و پائینی است که نمونه استوانه‌ای با استفاده از چسب اپوکسی بین این دو صفحه متصل می‌شود. صفحه بالایی به لودسل دستگاه و صفحه پائینی به صفحه انتقال بار دستگاه سه محوری متصل می‌شود. با حرکت رو به پایین صفحه بارگذاری دستگاه، نمونه تحت کشش تک محوری مستقیم قرار می‌گیرد. در طول انجام آزمایش، نیرو، تغییر شکل و زمان به صورت خودکار توسط سنسورهای مربوطه و دیتالاگر دستگاه سه محوری ثبت می‌شود. شایان ذکر است که این آزمایش به صورت کرنش کنترل انجام شده و بر اساس توصیه لی (Li, 2018) نرخ اعمال تغییر شکل برابر با ۰/۲۴ میلی‌متر بر دقیقه و نسبت طول به قطر نمونه‌ها بیشتر از ۲ انتخاب شده است. با محاسبه تنش و تغییر شکل‌های کششی، نمودار تنش-کرنش کششی برای نمونه‌های مورد آزمایش ترسیم شده است. با ترسیم نمودار تنش کرنش، پارامترهای مقاومت کششی مستقیم، کرنش گسیختگی کششی و مدول الاستیسیته کششی از روی نمودار تعیین و محاسبه شدند. مدول الاستیسیته کششی که نشان دهنده نسبت تغییر تنش به تغییر کرنش کششی است، به روش

تنش‌های کششی قرار گیرند، دچار گسیختگی کششی شکننده می‌شوند.



شکل ۸. منحنی‌های تنش-کرنش کششی یک نمونه معدل از هر یک از خاک‌های مورد مطالعه در حالت دست‌نخورده

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم خاک‌های مورد مطالعه، سطح شکست و زاویه آن نسبت به راستای اعمال نیروی کششی است. در اکثر نمونه‌های دست‌نخورده مورد مطالعه، سطح شکست به صورت مایل و با زاویه‌ای بین ۳۰ تا ۶۰ درجه نسبت به راستای نیروی کششی ایجاد گردید. این سطح شکست به صورت یک سطح مضرس و ناهموار است (شکل ۹). با توجه به اینکه نمونه‌های دست‌نخورده تهیه شده برای انجام آزمایش کشش فاقد درز و شکاف مشخص بودند، می‌توان نتیجه گرفت که جهت‌یابی سطح گسیختگی تحت تاثیر درزه و شکستگی‌های قبلی نبوده (Sun et al. 2016) و تحت تاثیر ساختار کلی خاک و شرایط انجام آزمایش است (He et al. 2018). همچنین روند تشکیل صفحه شکستگی در نمونه‌های مورد مطالعه به دو حالت مختلف بود. در یک حالت یک ناحیه متشکل از چندین شکستگی (Fracture zone) تشکیل می‌شود (شکل ۹ الف) که شکستگی‌های این ناحیه کم‌کم توسعه یافته و نهایتاً نمونه در امتداد یکی از آن‌ها به دو قسمت تقسیم می‌شود. در حالت دوم، از ابتدا تا انتهای تشکیل شکستگی، فقط یک شکستگی مجزا مشاهده می‌گردد که این شکستگی نیز کم‌کم توسعه یافته و تمام عرض نمونه را قطع می‌کند (شکل ۹ ب). نوع شکستگی منفرد یا ناحیه‌ای تابع ویژگی‌های مختلف خاک از جمله ساختار خاک و درصد رطوبت آن است (He et al. 2018).

با محاسبه مقادیر تنش تراکمی و کرنش محوری متناظر، نمودار تنش کرنش برای هر نمونه ترسیم شد. در هر آزمایش سه نمونه به کار گرفته شد و میانگین نتایج به عنوان مقاومت تراکمی تک محوری گزارش گردید.

### ۳. نتایج

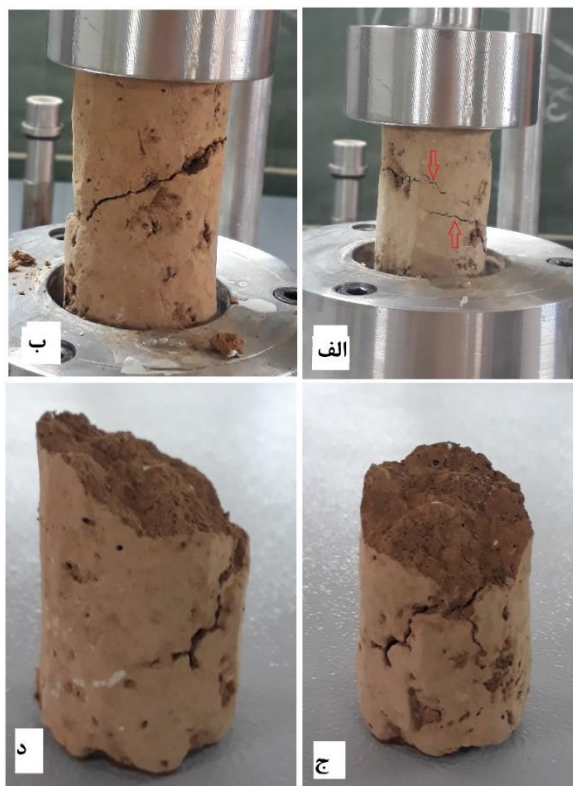
#### ۳-۱. مقاومت و رفتار کششی نمونه‌های دست‌نخورده

منحنی‌های تنش-کرنش کششی یک نمونه معدل از هر یک از خاک‌های مورد مطالعه در حالت دست‌نخورده در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقاومت کششی تک محوری خاک ۱، خاک ۲ و خاک ۳ در حالت دست‌نخورده به ترتیب در حدود ۳۸، ۲۶ و ۳۶ کیلوپاسکال است. نکته قابل توجه در مورد رفتار کششی خاک-های مورد مطالعه، کرنش گسیختگی کم آن‌ها است. این کرنش برای خاک ۱، خاک ۲ و خاک ۳ به ترتیب در حدود ۰/۱۸، ۰/۲۴ و ۰/۳۳ درصد است. در حین انجام آزمایش کشش، نمونه‌های خاک در ابتدا در مقابل تغییر شکل کششی مقاومت کرده و تنش کششی با نرخ زیادی افزایش می‌یابد. بعد از مقدار کمی کرنش کششی، برخی ترک‌های کششی روی نمونه پدیدار می‌شود (شکل ۹ الف). همزمان با تشکیل ترک‌های کششی، تنش کششی به شدت کاهش و کرنش کششی افزایش می‌یابد. با ادامه کرنش کششی، ترک‌های ایجاد شده به هم می‌پیوندند و یک سطح گسیختگی واحد ایجاد می‌شود و نمونه به دو بخش مجزا تقسیم شده و تنش کششی به صفر می‌رسد. در هنگام تغییر شکل کششی، هیچگونه کوتاه‌شدگی در جهت قطر نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. علیرغم کم بودن مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها، به دلیل کرنش‌های کششی بسیار کم در طول تغییر شکل، مقادیر مدول الاستیسیته کششی نمونه‌های دست‌نخورده قابل توجه است. مدول الاستیسیته کششی خاک ۱، خاک ۲ و خاک ۳ به ترتیب در حدود ۲۱/۸، ۱۶/۳ و ۱۹/۱ مگاپاسکال است. این مقادیر نشان دهنده قابلیت کم تغییر شکل خاک‌های ربنده مورد مطالعه در مقابل تنش‌های کششی است و به دلیل کم بودن مقاومت کششی، در صورتی که این خاک‌ها تحت



در دانسیته حداکثر دارای مقاومت کششی ۱۸ کیلوپاسکال و مدول الاستیسیته ۵/۲ مگاپاسکال است. کرنش گسیختگی در این شرایط ۰/۴۵ درصد است.

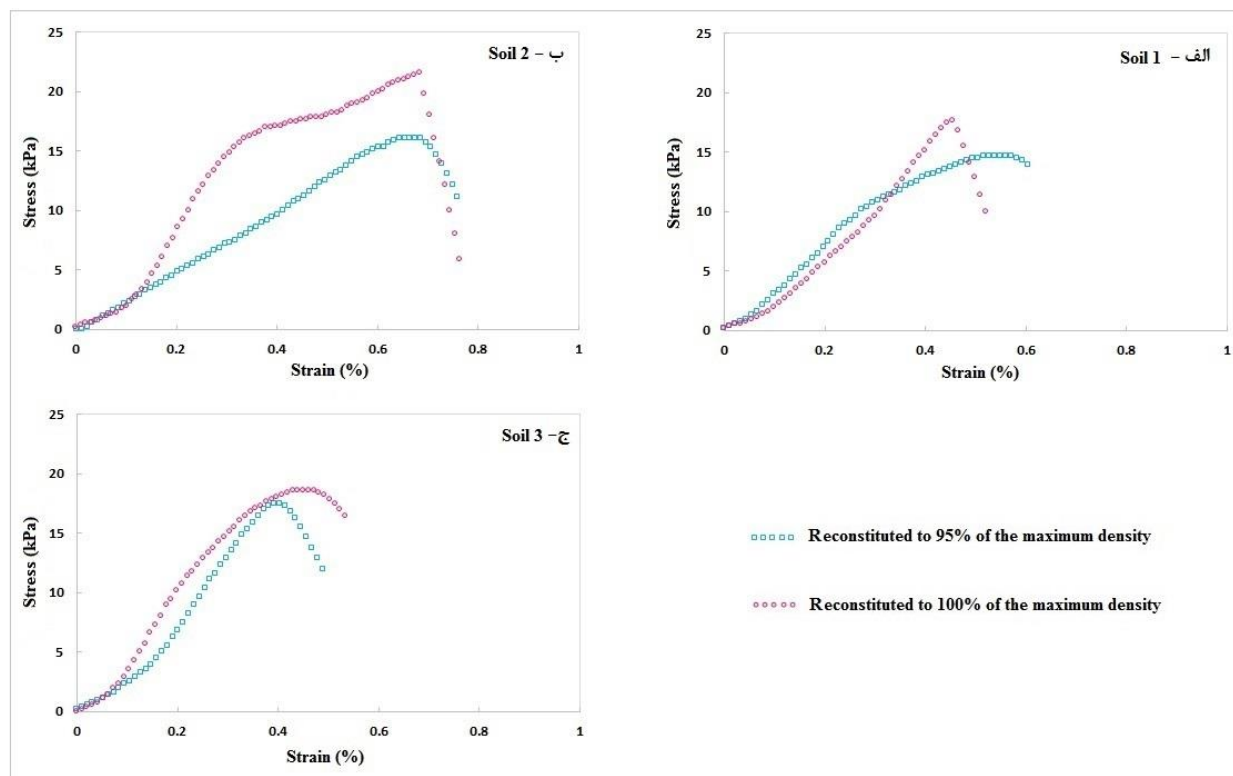
خاک ۲ در شرایط بازسازی شده در دانسیته ۹۵ درصد دارای مقاومت کششی ۱۶ کیلوپاسکال و کرنش گسیختگی ۰/۶۶ درصد است. مدول الاستیسیته این خاک در حالت بازسازی شده در حدود ۲/۵ مگاپاسکال است. این خاک در دانسیته حداکثر دارای مقاومت کششی ۲۲ کیلوپاسکال و مدول الاستیسیته ۴/۲ مگاپاسکال است. کرنش گسیختگی در این شرایط ۰/۶۷ درصد است (شکل ۱۰ ب). خاک ۳ بازسازی شده در ۹۵ درصد دانسیته حداکثر، دارای مقاومت کششی تک محوری ۱۸ کیلوپاسکال، کرنش گسیختگی ۰/۴ درصد و مدول الاستیسیته کششی ۶/۳ مگاپاسکال است. این در صورتی است که خاک ۳ در دانسیته حداکثر دارای مقاومت کششی تک محوری ۱۹ کیلوپاسکال، مدول الاستیسیته ۷ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی ۰/۴۵ درصد است (شکل ۱۰ ج). مقادیر مقاومت کششی تک محوری، کرنش گسیختگی و مدول الاستیسیته کششی نشان می‌دهد نمونه‌های بازسازی شده هر سه خاک مورد مطالعه، به طور کلی در مواجهه با تنش‌های کششی، ضعیف و شکل‌پذیر رفتار می‌کنند. با افزایش دانسیته خاک بهسازی شده، مقاومت کششی تک محوری و مدول الاستیسیته کششی تا حدودی افزایش می‌یابند. کرنش گسیختگی با افزایش دانسیته در خاک ۱ کاهش و در خاک‌های ۲ و ۳ افزایش یافته است. شایان ذکر است که در همه نمونه‌های بازسازی شده، سطح شکست به صورت تقریباً عمود بر محور نیروی کششی تشکیل می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۹. شکست نمونه‌های دست نخورده در کشش. الف و ب) زاویه ۳۰ تا ۶۰ درجه سطح شکست نسبت به محور بارگذاری، ج و د) سطح مضرس و ناهموار شکست

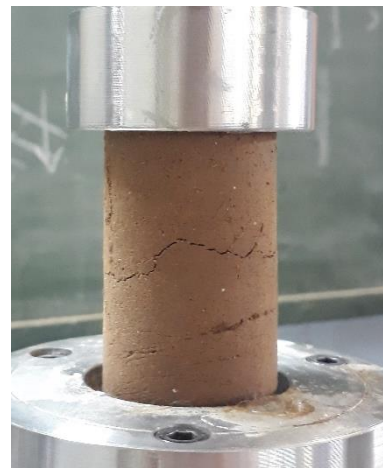
### ۲-۳. مقاومت و رفتار کششی خاک‌های بازسازی شده

در این تحقیق مقاومت و تغییر شکل‌پذیری نمونه‌های بازسازی شده از خاک‌های رمبنده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های بازسازی شده، شامل نمونه‌هایی دست خورده خاک است که در آزمایشگاه با استفاده قالب نمونه‌سازی تا رسیدن به یک دانسیته مشخص متراکم شده‌اند. نمونه‌های بازسازی شده هر خاک در دو دانسیته متفاوت شامل ۹۵ درصد دانسیته حداکثر و ۱۰۰ درصد دانسیته حداکثر آن خاک تهیه شده‌اند. شکل ۱۰ نمودارهای تنش-کرنش کششی نمونه‌های بازسازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰ الف قابل مشاهده است، خاک ۱ بازسازی شده با دانسیته ۹۵ درصد، دارای مقاومت کششی تک محوری در حدود ۱۵ کیلوپاسکال و کرنش گسیختگی ۰/۵۵ درصد است. مدول الاستیسیته کششی این خاک در حدود ۴/۴ مگاپاسکال است. از طرف دیگر این خاک



شکل ۱۰. نمودار تنش- کرنش کششی خاک‌های بازسازی شده، الف خاک ۱، ب خاک ۲ و ج خاک ۳

تراکم مخلوط خاک و ماده افزودنی تا ۹۵ درصد دانسیته حداکثر خاک، نمونه‌های بهسازی شده تهیه گردید و سپس این نمونه‌ها تحت آزمایش کششی تک محوری قرار گرفتند. نمودارهای تنش-کرنش کششی نمونه‌های بهسازی شده با سیلیکا و آلومینا به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، کمترین مقاومت خاک بهسازی شده در هر دو ماده سیلیکا و آلومینا و برای هر سه خاک مربوط به اضافه کردن ۰/۵ درصد وزنی ماده افزودنی است و بیشترین مقدار نیز مربوط به اضافه کردن ۱ درصد ماده افزودنی است. نتایج به دست آمده به این صورت است که مقاومت خاک بهسازی شده با ۰/۵ درصد ماده افزودنی کم است، با اضافه کردن ۱ درصد ماده افزودنی مقاومت به بیشترین مقدار خود می‌رسد و نهایتاً با اضافه کردن ۱/۵ درصد ماده افزودنی مقاومت دوباره کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، درصد بهینه ماده افزودنی برای بهسازی خاک‌های مورد مطالعه ۱



شکل ۱۱. چگونگی شکست نمونه‌های بازسازی شده در

کشش

### ۳-۳. مقاومت و رفتار کششی خاک‌های بهسازی شده

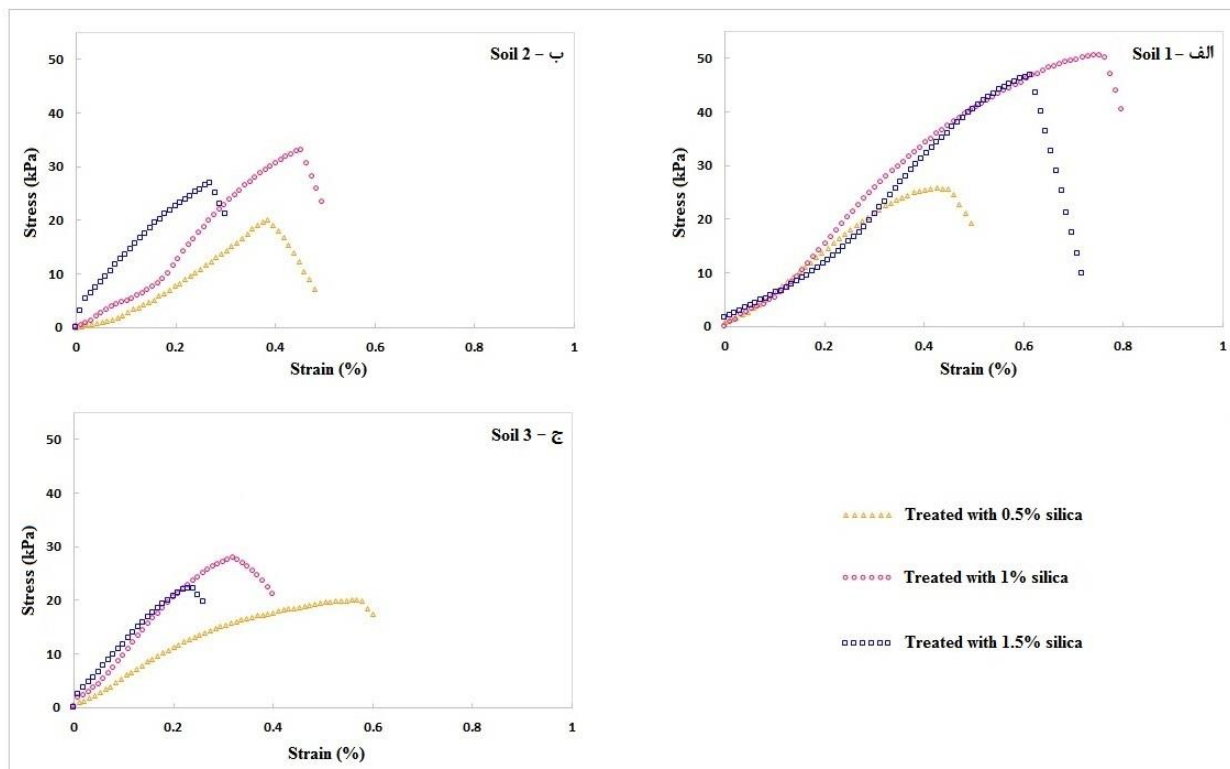
برای بررسی مقاومت و رفتار کششی خاک‌های رهمبده بهسازی شده، با افزودن پودر سیلیکا و آلومینا در درصد‌های مختلف وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به خاک‌های مورد مطالعه و سپس

درصد است. بنابراین در ادامه خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل کششی نمونه‌های بهسازی شده با افزودن ۱ درصد ماده افزودنی شرح داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ الف مشاهده می‌شود، در خاک ۱ با اضافه کردن ۱ درصد سیلیکا مقاومت کششی خاک بهسازی شده به حدود ۵۰ کیلوپاسکال و مقدار کرنش گسیختگی به ۰/۷۳ درصد می‌رسد. مدول الاستیسیته کششی نیز در حالت بهسازی بهینه با سیلیکا در حدود ۱۰/۵ مگاپاسکال است. این در حالی است که بهسازی خاک ۱ با اضافه کردن ۱ درصد آلومینا سبب افزایش مقاومت کششی خاک تا ۴۳ کیلوپاسکال و کرنش گسیختگی تا ۰/۹۳ درصد می‌شود (شکل ۱۳ الف). مدول الاستیسیته خاک بهسازی شده با آلومینا نیز در حدود ۵/۸ مگاپاسکال است. این نتایج نشان می‌دهد خاک بهسازی شده با سیلیکا در مقایسه با خاک بهسازی شده با آلومینا، مقاومت و مدول الاستیسیته کششی بیشتری دارد. مقایسه مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی خاک‌های بهسازی شده نشان می‌دهد، خاک بهسازی شده با آلومینا در کشش شکل‌پذیرتر رفتار می‌کند. در خاک ۲ با اضافه کردن ۱ درصد سیلیکا مقاومت کششی به مقدار ۳۳ کیلوپاسکال و کرنش گسیختگی به ۰/۴۵ درصد می‌رسد. مدول الاستیسیته کششی خاک در این حالت ۱۱/۸ مگاپاسکال است (شکل ۱۲ ب). از طرف دیگر بهسازی خاک ۲ با اضافه کردن ۱ درصد آلومینا به خاک نیز سبب می‌شود مقاومت کششی خاک بهسازی شده به ۳۴ کیلوپاسکال، کرنش گسیختگی به ۰/۸۲ درصد برسد. مدول الاستیسیته خاک ۲ بهسازی شده با آلومینا نیز ۵/۴ مگاپاسکال است (شکل ۱۳ ب). مقایسه نتایج بهسازی خاک ۲ با دو ماده افزودنی نشان می‌دهد مقاومت کششی تک محوری خاک بهسازی شده، در هر دو ماده افزودنی تقریباً برابر است. اما مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی نشان می‌دهد خاک ۲ بهسازی شده با آلومینا در کشش نرم‌تر و شکل‌پذیرتر عمل می‌کند. به عبارت دیگر، خاک ۲ بهسازی شده با آلومینا، قبل از گسیختگی تغییر شکل کششی بیشتری را تحمل می‌نماید.

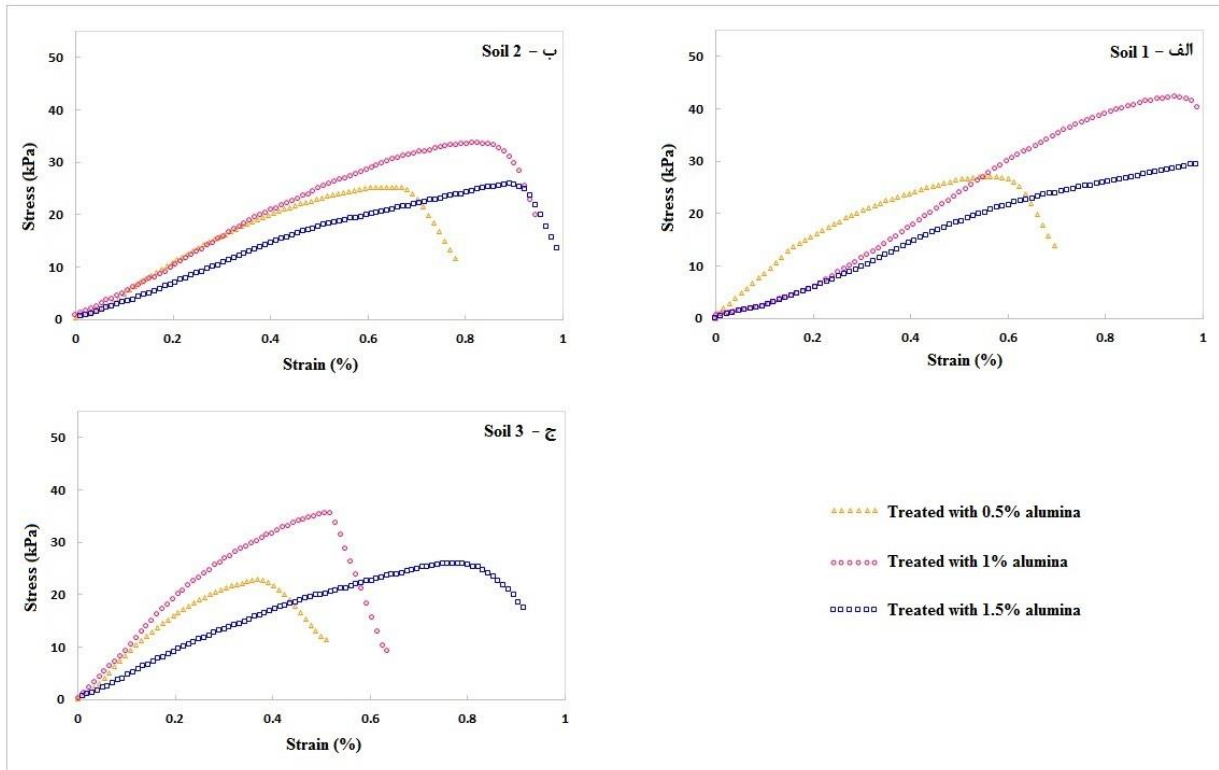
#### ۴-۳. مقایسه مقاومت کششی تک محوری و مقاومت تراکمی

##### تک محوری

بررسی رابطه مقاومت کششی تک محوری و مقاومت تراکمی تک محوری خاک‌های مورد مطالعه یکی از موارد بررسی شده در تحقیق حاضر است. برای این منظور علاوه بر مقاومت کششی، مقاومت و رفتار تراکمی تک محوری خاک‌های مورد مطالعه نیز اندازه‌گیری و نتایج مقاومت کششی با نتایج مقاومت تراکمی خاک‌ها تطبیق داده شده است. شایان ذکر است برای دستیابی به یک رابطه منطقی بین مقاومت کششی و مقاومت تراکمی، این مقایسه در نمونه‌های بازسازی شده و بهسازی شده که در آن‌ها ساختار، تخلخل و دانسیته دو نمونه مورد مقایسه مشابه است، انجام شده است. در نمونه‌های دست نخورده به دلیل عدم امکان تهیه نمونه‌های مشابه از یک خاک که در آن‌ها ساختار، تخلخل و دانسیته مشابه باشد، مقایسه مقاومت تراکمی و کششی انجام نشده است.

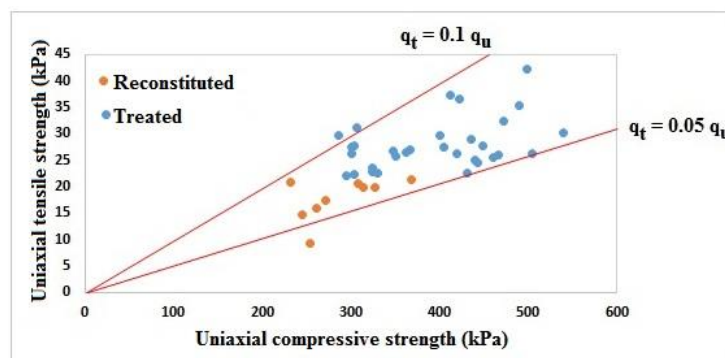


شکل ۱۲. نتایج بهسازی خاک‌های مورد مطالعه با افزودن سیلیکا، الف خاک ۱، ب خاک ۲ و ج خاک ۳



شکل ۱۳. نتایج بهسازی خاک‌های مورد مطالعه با افزودن آلومینا، الف خاک ۱، ب خاک ۲ و ج خاک

رابطه بین آنها به صورت  $q_t = 0.1q_u$  است. در این دو رابطه،  $q_t$  معرف مقاومت کششی و  $q_u$  معرف مقاومت تراکمی نمونه‌های مورد مطالعه است. بنابراین مقاومت کششی تک محوری خاک‌های مورد مطالعه بین ۵ تا ۱۰ درصد مقاومت تراکمی تک محوری آنها است ( $q_t = 0.05 - 0.1q_u$ ).



شکل ۱۴. مقایسه مقاومت کششی تک محوری و مقاومت تراکمی تک محوری نمونه‌های بازسازی شده و بهسازی شده

حداکثر تنش کششی به صورت واضح و مشخص مشاهده می‌شود. این امر به دلیل این است که در این خاک‌ها، سطح گسیختگی از نقاطی شروع به تشکیل و توسعه می‌یابد و پس از توسعه کامل سطح گسیختگی، تنش کششی به صفر می‌رسد. بنابراین در نمودار تنش- کرنش خاک‌های مطالعه شده، مقداری تنش باقیمانده بعد از نقطه حداکثر و قبل از گسیختگی کامل مشاهده می‌شود. به بیان دیگر، در خاک‌های مطالعه شده توسط سان و همکاران (Sun et al., 2016) رفتار خاک قبل از گسیختگی تماماً به صورت الاستیک بوده است در حالیکه در خاک‌های تحقیق حاضر بخش بیشتری از رفتار خاک قبل از گسیختگی به صورت الاستیک و بخش کوچکتر دیگر به صورت پلاستیک است. دلیل مشاهده این تفاوت مهم در رفتار خاک‌ها به ویژگی‌های آنها و همچنین روش انجام آزمایش کشش مستقیم مربوط می‌شود. مهمترین عوامل این تفاوت، درزه‌دار بودن خاک مطالعه شده توسط سان و همکاران (Sun et al., 2016) و استفاده از آزمایش کشش مستقیم به روش تنش-کنترل با اعمال تنش کششی به صورت ناپیوسته است. در صورتیکه در تحقیق حاضر، خاک‌های مورد بررسی فاقد درزه

نتیجه انطباق مقاومت‌های کششی و تراکمی خاک‌ها نمونه‌های بازسازی شده و بهسازی شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود نتایج در بین دو خط بر روی نمودار محدود شده‌اند. در خط پائین رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت تراکمی به صورت  $q_t = 0.05q_u$  و در خط بالا

#### ۴. بحث

مقایسه مقاومت و رفتار کششی خاک‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر با خاک‌های رمبنده مطالعه شده توسط سایر محققین نشان می‌دهد، مقاومت کششی لس‌های ورامین (بین ۲۵ تا ۴۰ کیلوپاسکال) از مقاومت کششی لس‌های مطالعه شده در چین توسط لی (Li, 2018) و هی و همکاران (He et al., 2018) (بین ۱۰ تا ۱۶۰ کیلوپاسکال) کمتر و از مقاومت کششی لس‌های مطالعه شده توسط سان و همکاران (Sun et al., 2009, 2016) و وانگ و همکاران (Wang et al., 2019) (بین ۲ تا ۲۰ کیلوپاسکال) بیشتر است. نکته قابل توجه، تفاوت رفتار تنش-کرنش کششی خاک‌های تحقیق حاضر با رفتار تنش-کرنش کششی خاک‌های درزه دار مطالعه شده توسط سان و همکاران (Sun et al., 2016) است. در مطالعه سان و همکاران (Sun et al., 2016) نمودار تنش-کرنش کششی خاک فاقد نقطه حداکثر مشخصی است. بدین معنی که تنش وارد شده به خاک تا قبل از گسیختگی روند افزایشی دارد و کاهشی در مقدار تنش کششی مشاهده نمی‌شود. اما در نمودار تنش-کرنش کششی خاک‌های مطالعه شده در تحقیق حاضر (شکل ۸) یک نقطه

کوچکتری از مقاومت تراکمی خاک‌های مورد مطالعه است. دلیل این امر روش انجام آزمایش کشش است که در تحقیق حاضر به صورت مستقیم و در تحقیقات محققین ذکر شده به صورت غیر مستقیم است. از آنجا که روش کشش مستقیم، کمترین مقاومت کششی خاک را به دست می‌دهد (Li, 2018) بنابراین نتایج حاصله در تحقیق حاضر منطقی و قابل مقایسه با نتایج سایر محققین نام برده است.

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های کشش بر روی خاک‌های مورد مطالعه در حالت‌های مختلف (جدول ۲ و شکل ۱۵) نشان می‌دهد، خاک‌های رمبند دشت ورامین در حالت دست‌نخورده از مقاومت خوبی در مقایسه با حالت بازسازی شده و حتی در مواردی از حالت بهسازی شده برخوردارند. در هر سه خاک ۱، ۲ و ۳ مقاومت کششی در حالت دست‌نخورده به مراتب بیشتر از حالت بازسازی شده با تراکم حداکثر است. همچنین مقاومت کششی خاک در حالت دست‌نخورده اختلاف کمی با مقاومت کششی خاک بهسازی شده دارد. مدول الاستیسیته کششی این خاک‌ها در حالت دست‌نخورده به مراتب بیشتر از مدول الاستیسیته در حالت‌های بازسازی شده و بهسازی شده است. از طرف دیگر کرنش گسیختگی این خاک‌ها در حالت دست‌نخورده بسیار کمتر از کرنش گسیختگی خاک‌های بازسازی شده و بهسازی شده است (شکل ۱۵).

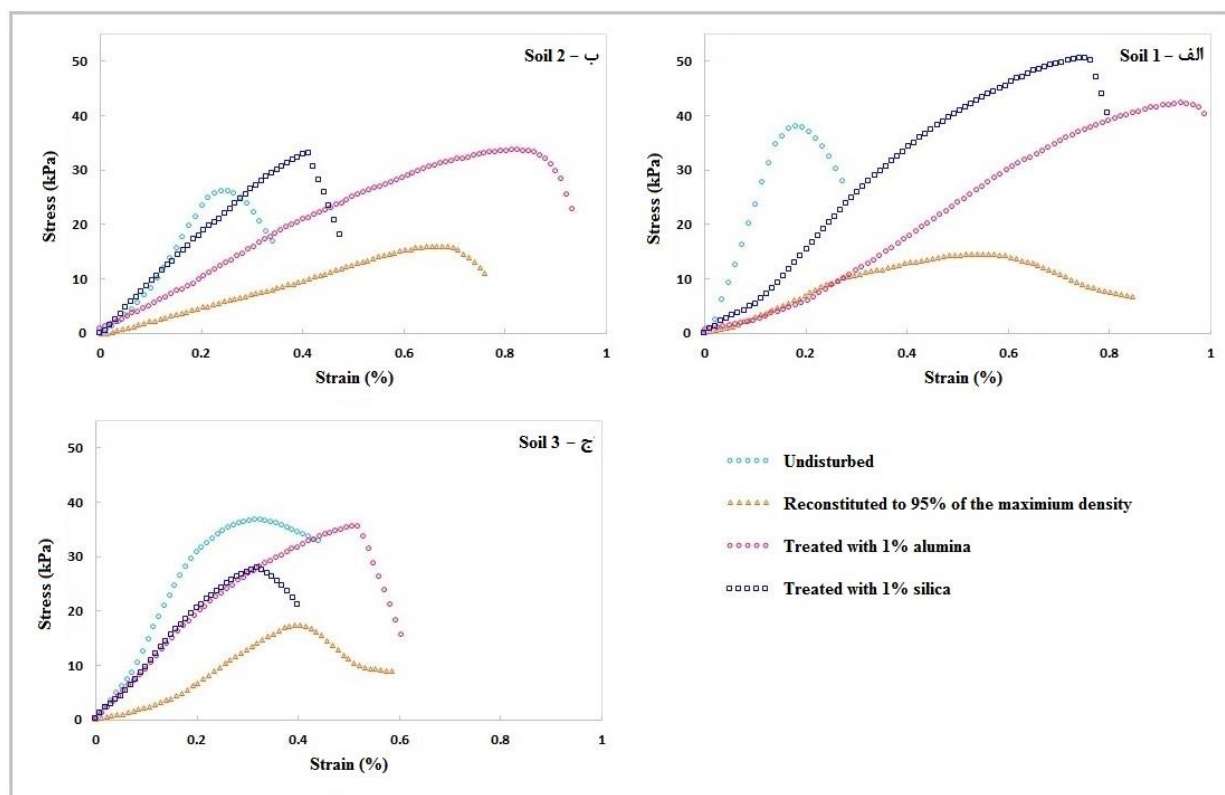
و شکستگی مشخص بوده و آزمایش کششی مستقیم به روش کرنش-کنترل و به صورت پیوسته انجام شده است.

همچنین یافته‌ها این تحقیق در زمینه رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت تراکمی نمونه‌های مورد مطالعه با نتایج مطالعات سایر محققینی که رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت تراکمی خاک‌های بهسازی شده را بررسی کرده‌اند، قابل مقایسه است. تران و همکاران (Tran et al., 2018) رابطه مقاومت کششی و مقاومت تراکمی خاک سیلتی بهسازی شده با سیمان و فیبر را بررسی نموده است. بر اساس نتایج مطالعات این محققین، در حالتی که خاک فقط با سیمان بهسازی شده باشد، مقاومت کششی در حدود  $14/5$  درصد مقاومت تراکمی است ( $q_t=0.145q_u$ ) و در صورتیکه خاک همزمان با سیمان و فیبر بهسازی شده باشد، مقاومت کششی خاک در حدود  $16/2$  درصد مقاومت تراکمی آن است ( $q_t=0.162q_u$ ). بر اساس نتایج مطالعات ژیانو و لی (Xiao and Liu, 2018) در خاک‌های رسی بهسازی شده با سیمان و فیبر نیز مقاومت کششی در حدود  $13$  درصد مقاومت تراکمی خاک بهسازی شده است ( $q_t=0.13q_u$ ). همانطور که مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج مطالعات سایر محققین نشان می‌دهد، در تحقیق حاضر ضریب  $q_u$  برای دستیابی به  $q_t$  کمتر از  $0/1$  است در صورتیکه بر اساس نتایج سایر محققین ذکر شده، این ضریب بین  $0/13$  تا  $0/162$  است. به عبارت دیگر در تحقیق حاضر مقاومت کششی کسر

جدول ۲. ویژگی‌های مقاومت و تغییر شکل کششی خاک‌های مورد مطالعه در حالت‌های مختلف

Property	Condition	Soil 1	Soil 2	Soil 3
Tensile Strength (kPa)	Undisturbed	38	26	36
	Reconstituted	15	16	18
	Treated with Silica	50	33	28
	Treated with Alumina	43	34	36
Modulus of Elasticity (MPa)	Undisturbed	21.8	16.3	19.1
	Reconstituted	4.4	2.5	6.3
	Treated with Silica	10.5	11.8	11.2
	Treated with Alumina	5.8	5.4	9.9
Failure Strain (%)	Undisturbed	0.18	0.24	0.33
	Reconstituted	0.55	0.66	0.40
	Treated with Silica	0.73	0.45	0.32
	Treated with Alumina	0.93	0.82	0.52





شکل ۱۵. مقایسه مقاومت و رفتار کششی خاک‌های مورد مطالعه در حالت‌های دست‌نخورده، بازسازی شده و بهسازی شده

دهنده سیمان شدگی ذرات خاک است. تاثیر سیمان شدگی ذرات خاک در مقاومت و رفتار کششی این خاک‌ها نیز به خوبی قابل مشاهده است.

نمونه‌های دست نخورده وقتی در معرض تنش‌های کششی قرار می‌گیرند، به دلیل سیمان شدگی نسبتاً قوی بین ذرات، خاک در مقابل تنش و تغییر شکل کششی مقاومت می‌کند و بنابراین تغییر شکل کششی کمی در خاک رخ می‌دهد. با افزایش تنش کششی، سیمان شدگی و اتصال بین ذرات خاک در نقاط ضعیفتر شکسته شده و گسیختگی کششی آغاز می‌شود. از این مرحله به بعد همزمان با توسعه گسیختگی کششی، تنش کششی کاهش می‌یابد تا جایی که با کامل شدن سطح گسیختگی در عرض نمونه خاک، تنش کششی به صفر می‌رسد. در خاک‌های دست نخورده به دلیل مقاومت خاک در مقابل تغییر شکل، تنش کششی با نرخ زیادی نسبت به کرنش افزایش می‌یابد و با رسیدن تنش به مقاومت کششی حداکثر، خاک گسیخته می‌شود.

این مشاهدات به دلیل وجود سیمان در ساختار خاک رمبنده در حالت دست‌نخورده و تفاوت آن با ساختار خاک‌های بازسازی شده و بهسازی شده است. در خاک رمبنده مورد مطالعه، ذرات سیلت توسط ذرات کوچکتر به یکدیگر متصل شده‌اند و این اتصال بین ذرات سبب مقاومت قابل توجه این خاک شده است. بر اساس مطالعات انجام شده توسط نیکبختی و همکاران (Nikbakhti et al., 2018) خاک رمبنده دشت ورامین دارای چسبندگی در حدود ۱۲۸ کیلوپاسکال ( $c=128\text{kPa}$ ) است که این مقدار چسبندگی برای یک خاک سیلتی مقدار زیادی است. این مقدار چسبندگی، سیمان شدگی بین ذرات را به خوبی تایید میکند. از طرف دیگر بر اساس آزمایش‌های صحرایی انجام شده توسط نیکبختی و همکاران (Nikbakhti et al., 2018)، عدد معادل نفوذ استاندارد (SPT) در خاک‌های رمبنده دشت ورامین بین ۲۰ تا ۴۰ در تغییر است. با توجه به دانسیته طبیعی کم این خاک‌ها، این مقادیر نسبتاً بالای عدد نفوذ استاندارد نیز نشان

به همین دلیل، خاک‌های رمبنده مورد مطالعه تحت تنش‌های کششی، بسیار شکننده رفتار می‌کنند.

رطوبت از جمله عواملی است که می‌تواند گسیختگی خاک‌های رمبنده تحت تنش‌های کششی را تسهیل نماید. به این صورت که وقتی خاک رمبنده تحت تنش کششی قرار دارد و هنوز به حد گسیختگی نرسیده است، افزایش رطوبت خاک باعث کاهش مقاومت و کاهش حد کرنش گسیختگی کششی شده و بنابراین گسیختگی در خاک زودتر اتفاق می‌افتد (Li و Wang et al. 2018, 2019). این نتایج با مشاهدات صحرایی مرتبط با تشکیل یک شکاف جدید در محدوده پیرامونی دشت ورامین (شکل ۲) در اثر بارندگی و افزایش رطوبت خاک مطابقت دارد. بر اساس مطالعات نیک‌بختی و همکاران (Nikbakhti et al., 2018)، شکاف نشان داده شده در شکل ۲ پس از یک بارندگی شدید، به صورت ناگهانی در محدوده پیرامونی دشت ورامین تشکیل شده است. فرایند تشکیل این شکاف را بر اساس نتایج تحقیق حاضر اینگونه می‌توان تفسیر نمود که به دلیل در حال نشست بودن دشت ورامین، نواحی پیرامونی آن، از جمله محدوده تشکیل شکاف جدید، در معرض تنش‌های کششی افقی قرار دارند. خاک رمبنده محدوده شکاف در مقابل تنش‌های کششی مقاومت نموده و تا حدی دچار کرنش کششی شده است. با وقوع بارندگی شدید و نفوذ آب به درون زمین و افزایش رطوبت خاک، مقاومت کششی خاک کاهش یافته و گسیختگی کششی به شکل شکاف زمین به صورت ناگهانی رخ داده است. این پدیده در سایر بخش‌های این محدوده می‌تواند به صورت مشابه رخ دهد کما اینکه تعدادی از شکاف‌های قدیمی‌تر این محدوده نیز به همین شکل تشکیل شده‌اند.

در مجموع در ارتباط با خاک رمبنده در حالت دست‌نخورده می‌توان گفت علیرغم اینکه این خاک در مقایسه با خاک‌های بازسازی شده و بهسازی شده دارای مقاومت کششی خوبی است، اما به دلیل شکنندگی زیاد (قابلیت کرنش کششی کم قبل از گسیختگی) و همچنین ساختار ناپایدار و حساس به رطوبت، در مواقعی که در معرض تنش‌های کششی قرار می‌گیرد، دچار

گسیختگی کششی می‌شود. بنابراین لازم است در مواردی که این خاک‌ها تحت تنش‌های کششی قرار دارند، خاک بهسازی شود.

نتایج مربوط به مقاومت و رفتار کششی خاک‌های بازسازی و بهسازی شده راهنمای مناسبی برای بهسازی و مقاوم سازی خاک‌های رمبنده مورد مطالعه در مقابل تنش‌های کششی است. در خاک بازسازی شده، خصوصیات خاک تنها در اثر تراکم بهبود می‌یابند. تراکم در این خاک‌ها موجب کاهش تخلخل و افزایش دانسیته خاک می‌شود. بر اساس مقایسه وزن واحد حجم خاک در حالت طبیعی و وزن واحد حجم خاک در حالت بازسازی شده (جدول ۱) می‌توان نتیجه گرفت که خاک بازسازی شده در مقایسه با خاک دست‌نخورده دارای تخلخل بسیار کمتری است. اما به دلیل اینکه خاک بازسازی شده، خاک دست‌خورده‌ای است که ذرات آن فاقد سیمان شدگی و چسبندگی ناشی از آن است، بنابراین در مقایسه با خاک دست‌نخورده، دارای مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بسیار کمتری است (جدول ۲). این امر به دلیل عدم وجود نیروی چسبندگی کافی بین ذرات خاک در حالت بازسازی شده است که موجب می‌شود خاک در مقابل تنش‌های کششی مقاومت کمی از خود نشان دهد (Wang et al. 2019). خاک‌های بازسازی شده وقتی در معرض تنش کششی قرار می‌گیرند، در مقابل تغییر شکل کششی مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند و نرخ افزایش کرنش کششی نسبت به نرخ افزایش تنش کششی بیشتر است (شکل ۱۵). از اینرو این خاک‌ها پس از تحمل مقدار مشخصی تغییر شکل کششی و به ازای مقادیر کمی از تنش‌های کششی دچار گسیختگی می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تراکم خاک به تنهایی، مانند آنچه در شکل ۱۶ دیده می‌شود، نمی‌تواند مقاومت و تغییر شکل‌پذیری کششی خاک‌های رمبنده را به اندازه کافی بهبود بخشد.

مقابل تنش‌های کششی بسیار شکل پذیرتر رفتار می‌کنند و دیرتر دچار گسیختگی می‌شوند. از طرف دیگر خاک‌های رمنده بهسازی شده در مقایسه با خاک‌های رمنده طبیعی ساختار پایدارتری دارند و حساسیت آن‌ها در مقابل تغییر رطوبت بسیار کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بهسازی خاک‌های رمنده با استفاده از افزودن مواد تثبیت کننده و سپس تراکم خاک، روش مناسبی برای جلوگیری از شکل‌گیری گسیختگی-های کششی در مناطق واجد این خاک‌ها است. در این تحقیق از آلومینا و سیلیکا برای بهسازی و تثبیت خاک استفاده شده، در صورتیکه استفاده از سایر مواد افزودنی مانند آهک می‌تواند مقاومت خاک‌های مورد مطالعه را به میزان بسیار بیشتری نسبت به آلومینا و سیلیکا افزایش دهد. بر اساس مطالعات نیک‌بختی و همکاران (Nikbakhti et al., 2018) بهسازی خاک رمنده دشت ورامین با آهک مقاومت تراکمی تک محوری این خاک را تا حدود ۱۰۰۰ کیلوپاسکال افزایش می‌دهد. بر اساس رابطه ارائه شده بین مقاومت کششی و مقاومت تراکمی خاک (بخش ۴-۳) می‌توان پیش بینی نمود که مقاومت کششی این خاک‌ها در صورت بهسازی با آهک تا حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال افزایش خواهد یافت که مقدار قابل توجهی برای مقاومت کششی یک خاک بهسازی شده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

مطالعه و شناخت عوامل موثر در رخداد پدیده‌های زمین‌شناسی مهندسی به خصوص پدیده‌های مخاطره‌آمیز، از اهمیت زیادی برخوردار است. شکاف‌های تشکیل شده در سطح زمین در حاشیه دشت ورامین یکی از پدیده‌های مخاطره‌آمیز زمین-شناسی مهندسی در این ناحیه است که در تحقیق حاضر ویژگی‌های مقاومت کششی خاک که یکی از عوامل موثر در تشکیل این شکاف‌ها است، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بر اساس تحقیق حاضر می‌توان نتیجه گرفت خاک‌های رمنده دشت ورامین در حالت طبیعی و دست‌نخورده دارای مقاومت و کرنش گسیختگی کمی هستند. رفتار این خاک‌ها در کشش شکننده است و قابلیت کرنش کششی کمی دارند و خیلی زود گسیخته می‌شوند. بر اساس نتایج تحقیق حاضر می‌توان



شکل ۱۶. پر کردن شکاف‌های زمین توسط خاک محلی بدون انجام تراکم (حاشیه بزرگراه حرم تا حرم، دشت ورامین)

نتایج مقاومت و رفتار کششی خاک‌های بهسازی شده نشان می‌دهد، بهسازی خاک با استفاده از افزودن مواد افزودنی و تراکم به صورت همزمان، مقاومت و تغییر شکل پذیری کششی خاک‌های رمنده را به میزان قابل قبولی بهبود می‌بخشد (شکل-های ۱۲، ۱۳ و ۱۵). در بهسازی، تراکم سبب کاهش تخلخل خاک و افزایش تماس و اصطکاک بین ذرات آن می‌شود و مواد افزودنی نیز با پر کردن فضای خالی باقیمانده بین ذرات موجب کاهش هرچه بیشتر تخلخل و افزایش دانسیته خاک می‌شوند. مواد افزودنی از طرف دیگر با چسبیدن به سطح ذرات خاک مانند یک سیمان بین ذرات عمل کرده و باعث افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات و به تبع آن افزایش مقاومت خاک می‌شوند (Zommodian et al., 2017; Cui et al., 2018). بنابراین خاک‌های بهسازی شده در مقایسه با خاک‌های بازسازی شده، مقاومت کششی بیشتری دارند. این خاک‌ها همچنین می‌توانند قبل از گسیختگی، تغییر شکل کششی بیشتری را تحمل کنند (شکل ۱۵).

خاک‌های بهسازی شده در مقایسه با خاک‌های دست‌نخورده تا حدودی دارای مقاومت کششی بیشتری هستند اما تردی و شکنندگی خاک‌های بهسازی شده در مقایسه با خاک‌های دست‌نخورده بسیار کمتر است (شکل ۱۵). به عبارت دیگر خاک‌های بهسازی شده در مقایسه با خاک رمنده طبیعی در

برخوردارند. بهسازی خاک با مواد افزودنی سبب می شود خاک بهسازی شده همزمان با دارا بودن مقاومت کششی بیشتر، تغییر شکل پذیری بهتری در مقابل تنش های کششی از خود نشان داده و دیرتر دچار گسیختگی شود. به عبارت دیگر با بهسازی خاک رمبنده، شکنندگی خاک در تغییر شکل های کششی به میزان قابل توجهی کاهش و مقاومت آن افزایش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت بهسازی خاک های رمبنده با استفاده از مواد تثبیت کننده و سپس تراکم خاک، روش مناسبی برای تقویت این خاک ها در مقابل تنش های کششی است.

مقاومت کششی کم، قابلیت تغییر شکل پذیری کم و شکنندگی زیاد خاک های رمبنده دشت ورامین را از عوامل اصلی تسهیل کننده تشکیل شکاف های زمین در این محدوده برشمرد. با بازسازی این خاک رمبنده با استفاده از تراکم خاک، شکل پذیری خاک در مقایسه با حالت دست نخورده افزایش می یابد اما از طرف دیگر مقاومت کششی آن به میزان زیادی کاهش می یابد. این نتایج نشان می دهد تراکم خاک رمبنده به تنهایی برای افزایش مقاومت کششی و بهبود رفتار خاک تحت تنش های کششی کافی نیست. خاک های بهسازی شده با مواد افزودنی در مقایسه با دو حالت دیگر، از مقاومت و رفتار کششی خوبی

### منابع

- حافظی مقدس، ن.، نیکودل، م. ر.، بهرامی، ک.، ۱۳۹۰. ارزیابی قابلیت رمبندگی خاک های لسی حوزه قرناوه در شمال کلاله، استان گلستان، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد چهارم، شماره ۱ و ۲، ۳۹-۴۶.
- رضایی، ح.، لشکری پور، غ.، رهنما راد، ج.، پیراندخ ر.، ۱۳۹۰. ارزیابی لس های استان گلستان بر اساس معیارهای زمین شناسی مهندسی، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، شماره یک، ۲۹-۴۰.
- فریدونی، د.، ۱۳۹۰. مروری بر ویژگیهای ژئوتکنیکی خاکهای رمبنده و بررسی پراکندگی آنها در ایران. هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- کمک پناه، ع.، ۱۳۸۶. مطالعه علل پدیده گسیختگی زمین در جاده های دشت یزد - اردکان، پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره دوم، ۱۹۶-۱۸۱.
- معروف، م. ع.، بلوری بزاز، ج.، ۱۳۹۳. اصلاح و بهسازی خاک های رمبنده. نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد هشتم، شماره ۴، ۲۵۳۳-۲۵۱۳.
- ASTM., 2007. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, D698.
- ASTM., 2007. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, D2166.
- Avsar, E., Ulusay, R., Aydan, O., Mutluturk, M., 2016. On the difficulties of geotechnical sampling and practical estimates of the strength of a weakly bonded volcanic soil, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74: 1375-1394.
- Cui, H., Jin, Z., Bao X., Tang, W., Dong, B., 2018. Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms, *Construction and Building Materials*, 189: 286-295.
- Goulding, R. B., 2006. Tensile strength, shear strength, and effective stress for unsaturated sand. Ph.D. dissertation, University of Missouri - Columbia.
- He, S., Bai, H., Xu, Z., 2018. Evaluation on Tensile Behavior Characteristics of Undisturbed Loess, *Energies*, 11: 1974.
- Kafodya, I., Okonta, F., 2018a. Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil, *Construction and Building Materials*, 170: 737-746.
- Kafodya, I., Okonta, F., 2018b. Density control method for compression test of compacted lime-flyash stabilised fiber-soil mixtures, *MethodsX*, 5: 848-856.

- Kim, T., Kim, T., Kang, C., Ge, L., 2012. Factors influencing crack-induced tensile strength of compacted soil, *Journal of materials in civil engineering (ASCE)*, 24(3): 315-320.
- Li, Y., 2018. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China, *Engineering Geology*, 236:4-10.
- Li, P., Vanapalli, S., Li, T., 2016. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8: 256-274.
- Lu, N., Wu, B., Tan, C., 2007. Tensile strength characteristics of unsaturated sands, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering (ASCE)*, 133: 144-154.
- Luo, H., Wu, F., Chang, J., Xu, J., 2018. Microstructural constraints on geotechnical properties of Malan Loess: A case study from Zhaojiaan landslide in Shaanxi province, China, *Engineering Geology*, 236: 60-69.
- Nikbakhti, O., Hashemi, M., Banikheir, M., Khabbazi Basmenj, M., 2018. Geoenvironmental assessment of the formation and expansion of earth fissures as geological hazards along the route of the Haram-to-Haram Highway, Iran, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77: 1421-1438.
- Peng, J., Wang, S., Wang, Q., Zhuang, J., Huang, W., Zhu, X., Leng, Y., Ma, P., 2019. Distribution and genetic types of loess landslides in China, *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 329-350.
- Sun, P., Peng, J., Chen, L., Yin, Y., Wu, S., 2009. Weak tensile characteristics of loess in China — An important reason for ground fissures, *Engineering Geology*, 108: 153-159.
- Sun, P., Peng, J., Chen, L., Lu, Q., Igwe, O., 2016. An experimental study of the mechanical characteristics of fractured loess in western China, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4): 1639-1647.
- Tran, K. Q., Satomi, T., Takahashi, H., 2018. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers, *Construction and Building Materials*, 178: 204-210.
- Vanicek, I., 2013. The importance of tensile strength in geotechnical engineering, *Acta Geotechnica Slovenica*, 1: 5-17.
- Wang, J., Li, P., Gu, Q., Xu, Y., Gu, T., 2019. Changes in tensile strength and microstructure of loess due to vibration, *Journal of Asian Earth Sciences*, 169: 298-307.
- Xu, J., Meng, L., An, H., Wang, L., 2015. The bending mechanism of Anping ground fissure in the Hebei Plain, North China, *Environmental Earth Sciences*, 74(9): 6859-6870.
- Xu, L., Coop, M. R., Zhang, M., Wang, G., 2018. The mechanics of a saturated silty loess and implications for landslides, *Engineering Geology*, 236: 29-42.
- Zomorodian, S. M. A., Moghispour, S., Soleymani, A., O'Kelly, B. C., 2017. Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives, *Applied Clay Science*, 140: 140-147.