

## نقش توأمان قطر و تراکم ریشه درخت بید بر مقاومت برشی خاک

نوشته: محمد هادی داودی\* و محمود فاطمی عقدا\*\*

\*مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران  
\*\*دانشگاه تربیت معلم، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۱/۲۶

### چکیده

پایدارسازی ترانه‌های طبیعی و دامنه‌های مستعد لغزش از نظر ایمنی شهروندان، حفظ محیط زیست، مهندسی رودخانه و منابع طبیعی حائز اهمیت است. استفاده از ریشه درختان به منظور تقویت توده‌های خاک از راهکارهای مناسبی است که مورد توجه محققان بسیار قرار گرفته است. در این تحقیق، اثر توأم قطر و تراکم ریشه بر مقاومت برشی خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. هجده آزمایش برش مستقیم برجا در خاک دارای ریشه درخت بید (Willow) انجام و نتایج آن با خاک بدون ریشه مقایسه شد. پارامتر جدیدی به نام "شاخص قطر-تراکم ریشه" (RDDI) تعریف شد که بازتاب‌کننده پراکنش قطر و تراکم ریشه در خاک است. نتایج نشان داد که با افزایش RDDI چسبندگی ظاهری خاک و در نتیجه مقاومت برشی خاک زیاد و بالعکس زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد، اما از آنجا که میزان این تغییرات قابل ملاحظه نیست در مجموع مقاومت برشی توده مسلح شده به ریشه افزایش می‌یابد. در پایان به منظور استفاده مهندسان طراح، روابط کاربردی برای محاسبه مقاومت برشی افزوده شده به خاک ارائه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** پایدارسازی دامنه، مقاومت برشی خاک، چسبندگی ظاهری، زاویه اصطکاک داخلی، قطر ریشه، تراکم ریشه.

### ۱. مقدمه

مشابهی نیز برای خاک درشت‌دانه و درخت اقاویا توسط استیری (۱۳۸۰) گزارش شده که بر اساس آن آهنگ افزایش مقاومت برشی توده حاکی ارتباط معکوس با رطوبت خاک دارد. (Waldron (1977) برای ریشه جو در خاک سیلتی رسی لوم و Ziemer (1981) برای ریشه Pinus cordata در خاک ماسه‌ای رابطه خطی بین تراکم ریشه و افزایش مقاومت برشی خاک ارائه کردند. اما (Tengbeh (1989) رابطه‌ای نمایی بین تراکم ریشه Loretta grass و افزایش چسبندگی ظاهری خاک‌های رسی و رس شنی پیدا کرد.

در زمینه اثر قطر ریشه بر رفتار مقاومتی خاک‌ها، دیدگاه‌ها متفاوت است. (Nilaweera (1994) با انجام آزمایش مقاومت کششی بر روی هفت گیاه مختلف گزارش داد که به طور کلی، مقاومت کششی ریشه گیاهان با افزایش قطر به صورت نمایی کاهش می‌یابد. داودی و همکاران (۱۳۸۳) برای درخت بید رابطه (۲) را گزارش دادند که در آن  $T$  و  $d$  به ترتیب مقاومت کششی و قطر ریشه و بر حسب Mpa و mm می‌باشند.

(۲)  $T = 13.491d^{0.4845}$

در رابطه با اثر قطر ریشه بر مقاومت برشی خاک‌های ریشه مسلح، استیری و همکاران (۱۳۸۰) نشان دادند که با افزایش قطر ریشه‌ها، مقدار چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک داخلی خاک درشت‌دانه افزایش می‌یابد. اما نتایج داودی و همکاران (۱۳۸۳) در خاک ریزدانه حاکی از اثر متضاد قطر ریشه بر این دو پارامتر است. آنها گزارش دادند که وجود ریشه موجب افزایش چسبندگی ظاهری و کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. در عین حال، با افزایش قطر، آهنگ افزایش چسبندگی کاهش یافته و در یک قطر خاص، چسبندگی ظاهری به بیشترین مقدار خود می‌رسد و برای قطرهای بزرگ‌تر، پس از اندکی کاهش ثابت می‌شود. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در برابر قطر ریشه به طور دقیق عکس حالت چسبندگی را دارد، به گونه‌ای که در قطر ریشه متناظر با چسبندگی بیشینه، به کمترین مقدار خود می‌رسد. این نتایج با داده‌های O'Loghlin (1984) همخوانی دارد. وی نشان داد که ریشه‌های با قطر ۱ تا ۲۰ میلی‌متر، بیشترین سهم را در مسلح کردن خاک به عهده داشته و ریشه‌های با قطر بیشتر نقش معنی داری ندارند.

روش‌های گوناگونی برای تثبیت شیروانی‌های حاکی طبیعی اعم از دامنه‌های کوهستانی، ترانه‌های طبیعی و سواحل رودخانه‌های عمیق وجود دارد که از این میان روش بیومکانیکی و استفاده از ریشه درختان به دلیل سنجیت بیشتر با مسائل زیست محیطی اولویت خاصی دارد. به طور کلی، نظریه مسلح کردن خاک توسط ریشه به دو رویکرد عمده "مدل کششی" و "مدل برشی" تقسیم می‌شود. مدل کششی خاک‌های ریشه مسلح توسط (Yarborough (2000) برای پادگانه‌های حاکی و شیروانی‌های پر شیب ارائه شده که به دلیل ریخت‌شناسی خاص‌شان به طور کامل یا بخشی از آنها تحت تنش کششی ناشی از نیروی گرانش بوده و ترک‌های کششی نقش مهمی در ناپایداری آنها دارند. در این مدل، مقاومت کششی ریشه به طور مستقیم در تحلیل پایداری توده به کار گرفته می‌شود. مدل برشی توده‌های ریشه مسلح سابقه طولانی‌تری داشته و در این زمینه تحقیقات آزمایشگاهی، صحرایی، شبیه‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی فراوانی انجام شده است. در این مدل، بخشی از مقاومت کششی ریشه به صورت یک مؤلفه مقاوم برشی به مقاومت برشی توده حاکی اضافه شده و آن را در برابر نیروهای مهاجم برشی تقویت می‌کند. (Waldron (1977) با آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی روی نمونه‌های حاکی که در آنها یکی از سه گیاه یونجه، جو و کاج زرد کاشته بود، نتیجه گرفت که مقاومت برشی افزوده شده خاک، تابع نوع، جنس، پراکنش و تراکم ریشه بوده و ریشه یونجه بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت برشی خاک دارد. نتایج محققان زیر نشان می‌دهد که از بین پارامترهای مؤثر، دو پارامتر قطر و تراکم ریشه نقش مهمی دارند. تراکم ریشه (RAR) توسط (Burroughs & Thomas (1977) به عنوان نسبت مجموع سطح مقطع ریشه‌ها به سطح توده حاکی تعریف و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$RAR = \frac{A_r}{A_w} \cdot 100 = \sum_i \frac{a_i}{A_w} \cdot 100 \quad (1)$$

در این رابطه،  $A_w$  سطح توده حاکی دارای ریشه در امتداد صفحه گسیختگی (مجموع مساحت خاک و ریشه)،  $A_r$  مساحت اشغال شده توسط ریشه (در امتداد سطح گسیختگی)،  $i$  تعداد ریشه‌های موجود و  $a_i$  سطح مقطع هر یک از ریشه‌هاست. شفاعی بجستان و سلیمی گل شیخی (۱۳۸۱) رابطه مستقیم خطی بین افزایش مقاومت برشی خاک ریزدانه سواحل کارون و تراکم ریشه درختان "پده" و "گز" ارائه کرد. رابطه

شده است. در این جدول نتایج خاک فاقد ریشه نیز با عنوان  $RAR=0$  آمده است. مشاهده می‌شود که در هر ایستگاه، بلوک‌های دارای ریشه نسبت به بلوک‌های فاقد ریشه مقاومت برشی بیشتری دارند. همچنین مقاومت‌های برشی بلوک‌ها تابع مستقیم سربار وارده بر آنها است.

برای بررسی اثر توأم تراکم و قطر ریشه بر مقاومت برشی خاک، پارامتر بدون بعدی با عنوان "شاخص قطر-تراکم ریشه" (Root Diameter & Density Index) به شرح زیر تعریف شده و با علامت RDDI نمایش داده می‌شود:

$$RDDI = RAR \cdot RDR \quad (3)$$

در این رابطه RDR عبارت است "پارامتر قطر ریشه" که توسط داودی و همکاران (۱۳۸۴) به شرح زیر تعریف شده است:

$$RDR = \frac{d_{50}}{d_{max}} \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه،  $d_{50}$  قطری است که ۵۰٪ ریشه‌ها برابر و یا نازک‌تر از آن باشند و  $d_{max}$  بزرگ‌ترین قطر ریشه موجود در سطح برش است. برای هر بلوک خاک آزمایش شده،  $d_{50}$  از طریق رسم منحنی درصد فراوانی ریشه‌های با قطر معین یا نازک‌تر (Nd/Nt) به دست می‌آید (شکل ۴-الف).

بر اساس آزمایش‌های برش مستقیم بر روی خاک فاقد ریشه که در شکل ۵ نشان داده شده چسبندگی خاک در ایستگاه ابراهیم آباد  $c=15/1$  kPa و زاویه اصطکاک داخلی آن  $\phi=28^\circ$  و در ایستگاه میناوند به ترتیب  $c=7/4$  kPa و  $\phi=44^\circ$  است. این اختلاف با تفاوتی که در چگالی، شاخص خمیری و کلاس آنها وجود دارد همخوانی کامل دارد. مشاهدات و اندازه‌گیری‌های به عمل آمده نشان داد که در ابراهیم آباد، به دلیل جوان‌تر بودن درخت، قطر و تراکم ریشه‌ها کم و RDDI حداکثر ۰/۱۴ و در میناوند که درخت آن کهن‌سال‌تر و ریشه‌ها، تراکم و قطر بیشتری دارند RDDI به ۲/۹۶ نیز بالغ می‌شود. این تفاوت اساسی به همراه تفاوت درصد شن، شاخص خمیری، چگالی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی موجب شده که با وجود این که رفتار کلی این دو خاک در مقابل RDDI مشابه است، اما تا اندازه‌ای متفاوت باشد. در شکل ۶ رفتار خاک ابراهیم آباد در برابر تغییرات RDDI ارائه شده که در قسمت (الف) آن مقاومت برشی تحت دو سربار مختلف با افزایش RDDI بهبود می‌یابد. قسمت ب این شکل "افزایش نسبی مقاومت برشی" ( $\Delta\tau/\tau_0$ ) را در برابر تغییرات RDDI نشان می‌دهد که رابطه مستقیم با ضریب همبستگی خوبی بین این دو پارامتر وجود دارد. در این شکل  $\tau_0$  مقاومت برشی خاک بدون ریشه است. قابل توجه است که آهنگ افزایش مقاومت برشی نسبی برای سربار ۱۹ kPa بیشتر از سربار ۵۸ kPa است و این امر به دلیل آن است که، بر اساس رابطه کولمب، سهم عامل اصطکاک داخلی در مقاومت برشی با افزایش سربار کاهش می‌یابد. این تفاوت در شکل ۶-الف نیز مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده برای خاکی با شرایط ابراهیم آباد، افزایش نسبی مقاومت برشی خاک مسلح شده به ریشه درخت بید تحت تنش‌های قائم ۱۹ kPa و ۵۸ kPa مشروط بر این که RDDI از ۰/۱۵ فراتر نرود به ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود:

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = (1095.4RDDI + 2)100 \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = (156.5RDDI + 0.8)100 \quad (6)$$

نتایج آزمایش‌های ایستگاه میناوند در شکل ۷ ارائه شده که در آن به طور مشابه با نتایج ابراهیم آباد، رابطه‌ای مستقیم بین مقاومت برشی و RDDI دیده می‌شود. مقایسه بین این دو سری نتایج نشان می‌دهد که اولاً آهنگ تغییرات مقاومت برشی در ابراهیم آباد به مراتب بیشتر از میناوند است. دوم این که در ابراهیم آباد آهنگ تغییرات مربوط به سربار ۱۹ kPa آشکارا از آهنگ تغییرات مربوط به سربار ۵۸ kPa

ناکون مطالعه‌ای در مورد تأثیر توأمان دو پارامتر قطر و تراکم ریشه بر مقاومت برشی خاک‌ها، صورت نگرفته است. لذا با توجه به این که افزایش مقاومت برشی خاک با افزایش تراکم ریشه نسبت مستقیم و با قطر ریشه نسبت عکس دارد و علاوه بر آن، با توجه به نظرات متناقض تأثیر قطر ریشه، این مقاله به بررسی تأثیر توأمان این دو پارامتر اختصاص داده شده است. این موضوع بویژه از آن جهت اهمیت دارد که در خاک‌های مسلح شده، پارامترهای هندسی عامل تسلیح، نیز اهمیت قابل توجهی دارند. برای مثال، در خاک‌های مسلح شده به وسیله تراشه‌های لاستیک، افزایش زاویه اصطکاک داخلی ماسه، تابع نسبت طول به عرض تراشه‌هاست به گونه‌ای که به ازای عرض‌های متفاوت تراشه، مقدار بهینه‌ای برای نسبت فوق وجود دارد (عامل سخی و قضاوی، ۱۳۸۰). در مورد ریشه نیز علاوه بر دو پارامتر قطر و تراکم، پارامترهای دیگری همچون طول، اعوجاج و زاویه نسبت به امتداد صفحه برش وجود دارد که نقش مهمی در افزایش مقاومت برشی خاک داشته و نیازمند تحقیق است. در عین حال، از آنجا که تغییرات هر یک از پارامترهای اخیر از یک نقطه به نقطه دیگر فراوان و غیر قابل پیش‌بینی است لذا تحقیق بر روی تأثیر توأمان دو پارامتر قطر و تراکم که برای هر درختی بر اساس سن و مشاهدات حاصل از درختان مجاور آن قابل برآورد است، می‌تواند در طراحی پروژه‌های اجرایی مفید واقع شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

از آنجا که در بیشتر نواحی لغزشی ایران بید سازگاری خوبی دارد، آزمایش‌هایی بر روی این درخت انجام شد. محل انجام آزمایش در دو ایستگاه ابراهیم آباد و میناوند در منطقه طالقان و در حدود ۱۱۰ کیلومتری تهران قرار دارد. آزمایش‌ها از نوع برجا و بر روی بلوک‌های خاک دست نخورده دارای ریشه درخت بید و همچنین فاقد ریشه (شاهد) انجام شده است. دستگاه برش مستقیم صحرایی، بر اساس استاندارد BS طراحی و ساخته شد که شامل تجهیزات زیر است: جعبه برشی به ابعاد  $30 \times 30$  سانتی‌متر برای در بر گرفتن بلوک خاک تحت آزمایش، چک هیدرولیکی ۱۵ و ۲۰ تنی، سکوی بارگذاری، نمایشگرهای جا به جایی افقی و قائم نمونه، قرقری جهت تضمین عمود بودن نیروی برشی وارد بر خاک و سربارهای سربی و بتونی. پس از ساخت دستگاه و پیش از شروع آزمایش، اعتماد پذیری دستگاه از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج دستگاه آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی استاندارد ارزیابی و تأیید شد. شکل‌های ۱ تا ۳ مراحل مختلف آماده سازی دستگاه و اجرای آزمایش را نشان می‌دهد.

## ۳. نتیجه گیری

خاک هر دو ایستگاه از نوع CL با فشار پیش تحکیمی ۸ kPa و درختان بید با سن بیش از ۱۵ سال می‌باشد. ویژگی‌های مکانیکی خاک دو ایستگاه به شرح جدول ۱ است. بیست و هفت آزمایش برش مستقیم تحت بارهای قائم ۱۹ kPa، ۵۸ و ۹۸ و با روش سرعت جا به جایی ثابت ۰/۲ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، جا به جایی افقی نمونه توسط دو سنجشگر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شد. در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه‌ای جا به جایی افقی و مقاومت برشی خاک قرائت می‌شد و آزمایش‌ها حداقل ۳ تا ۳۰ سانتی‌متر جا به جایی و یا تا رسیدن به مقاومت برشی بیشینه ادامه می‌یافت. همچنین جا به جایی قائم بلوک خاک در فواصل دو دقیقه‌ای توسط چهار سنجشگر اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. پس از پایان آزمایش‌ها تعداد و قطر ریشه‌های واقع در ناحیه برشی بلوک اندازه‌گیری می‌شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول محل آزمایش، شماره چاله شناسایی، تنش قائم ( $\sigma_v$ )، بیشینه مقاومت برشی و تراکم ریشه در قسمت برشی هر یک از بلوک‌ها درج

غیر اصطکاکی خارجی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن در یک روند صعودی برای RDDI، در صورت ثابت بودن RAR و افزایش RDR، به ناچار مقدار  $d_{50}$  به سمت  $d_{max}$  نزدیک‌تر می‌شود و موجب یکنواختی بیشتر قطر ریشه‌ها می‌شود. این امر خود موجب می‌شود که توزیع بار بر روی ریشه‌ها و در نتیجه بر روی توده یکنواخت‌تر شده و از بروز گسیختگی پیشرونده که ناشی از گسیختگی ریشه‌های باریک‌تر و تمرکز تنش بر روی باقیمانده ریشه‌ها و ذرات خاکی اطراف آنها است جلوگیری شده و سرانجام مقاومت بیشتری از توده مشاهده شود.

برای این که نتایج این تحقیق به حالت کاربردی تبدیل شده و توسط مهندسان طراح قابل استفاده شود، نتایج دو ایستگاه امتزاج شد. برای محاسبه افزایش نسبی چسبندگی ظاهری خاک مسلح شده توسط درخت بید بر اساس شکل ۱۲ رابطه ۷ توصیه می‌شود. برای مقادیری از RDDI که در طبیعت با آن مواجه می‌شویم، با رعایت جنبه ایمنی طراحی‌ها، کاهش نسبی زاویه اصطکاک داخلی را می‌توان ثابت فرض نموده و از رابطه ۸ محاسبه کرد.

$$\frac{\Delta c}{c_0} = (39.7Ln(RDDI) + 231.4)100 \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \phi}{\phi_0} = -15\% \quad (10)$$

#### ۴. بحث

برای بررسی رفتار مقاومت برشی خاک تحت تأثیر ریشه درخت "شاخص قطر-تراکم ریشه" (RDDI) تعریف شد. این شاخص علاوه بر تراکم ریشه در ناحیه برشی خاک نمایانگر پراکنش قطر ریشه‌ها بوده و از حاصلضرب تراکم ریشه در نسبت قطر میانه به قطر بیشینه ریشه‌ها به دست می‌آید. هجده آزمایش برش مستقیم برجا بر خاک دارای ریشه درخت بید انجام و از مقایسه داده‌های آنها با داده‌های حاصل از ۹ آزمایش مشابه بر روی خاک فاقد ریشه نتایج زیر به دست آمد.

با افزایش پارامتر RDDI، چسبندگی ظاهری خاک افزایش می‌یابد و در محدوده مشاهدات به عمل آمده به ۲۱۲٪ بالغ شود. آهنگ این افزایش به تدریج برای مقادیر بیشتر RDDI کاهش می‌یابد و انتظار می‌رود که در مقادیر بیشتر به سمت صفر میل کند. با افزایش پارامتر RDDI، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد، اما میزان این تغییرات محدود است. به همین ترتیب با چسبندگی ظاهری، آهنگ کاهش زاویه اصطکاک داخلی با افزایش RDDI کم شده و سرانجام صفر می‌شود به گونه‌ای که در محدوده آزمایش‌های انجام شده، زاویه اصطکاک داخلی در حد ۸۵٪ خاک فاقد ریشه ثابت می‌ماند.

به دلیل غالب بودن اثر تغییرات چسبندگی ظاهری بر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت برشی توده خاکی ریشه مسلح با افزایش RDDI افزایش می‌یابد.

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی خاک مورد آزمایش

نام ایستگاه	کلاس خاک	چگالی خشک $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	رطوبت w (%)	حد روانی LL (%)	شاخص خمیری PI (%)
ابراهیم‌آباد	رس لاغر ماسه‌ای	۱/۵۵	۱۶/۵	۳۹	۱۷
میناوند	رس لاغر شنی	۱/۷۵	۱۷	۳۰	۱۲

بیشتر است، در صورتی که در میناوند منحنی تغییرات این دو سربار، شیب یکسانی دارند. این دو تفاوت یک منشأ دارند و آن تفاوت آشکار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک‌های دو ایستگاه است. این موضوع در بخش‌های بعدی بیشتر توضیح داده خواهد شد. بر اساس شکل ۷-ب در خاک‌های مشابه با خاک ایستگاه میناوند، مقاومت‌برشی نسبی افزوده شده در تنش‌های قائم ۱۹ kPa و ۵۸ kPa برای محدوده وسیعی از RDDI به ترتیب از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود. البته رابطه دوم برای مقادیر  $RDDI > 0.03$  صادق است.

$$\frac{\Delta \tau}{\tau_0} = (12.5RDDI + 0.1)100 \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \tau}{\tau_0} = (12.3RDDI - 0.3)100 \quad (8)$$

به منظور بررسی تأثیر شاخص قطر-تراکم بر دو پارامتر مقاومت برشی توده خاک، یعنی چسبندگی ظاهری (c) و زاویه اصطکاک داخلی (φ)، داده‌های به دست آمده در هر یک از دو ایستگاه بر اساس RDDI دسته‌بندی شده و مطابق استاندارد آزمایش برش مستقیم با استفاده از سه تنش قائم مختلف، پوش گسیختگی موهر-کولمب رسم شده و پارامترهای c و φ محاسبه شد. شکل ۸ دو نمونه از منحنی‌ها را نمایش می‌دهد. جدول ۲ نشان می‌دهد که در هر یک از دو ایستگاه، مقادیر RDDI به دو طیف عمده قابل تقسیم است به گونه‌ای که میانگین آنها در میناوند ۰/۴۸ و ۱/۹۰ و در ابراهیم‌آباد ۰/۰۵ و ۰/۱۱ است. پارامترهای c و φ برای چهار گروه یاد شده در جدول ۳ ارائه شده است. ستون‌های Δc و Δφ به ترتیب تفاوت چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک داخلی خاک دارای ریشه نسبت به خاک فاقد ریشه است. در دو ستون دیگر تفاوت نسبی این دو پارامتر نسبت به خاک فاقد ریشه (c<sub>0</sub> و φ<sub>0</sub>) بر حسب درصد محاسبه شده است.

روند تغییرات دو پارامتر c و φ به ازای تغییرات RDDI با هم به‌طور کامل متفاوت است. شکل ۹-الف نشان می‌دهد در ابراهیم‌آباد "شاخص قطر-تراکم ریشه" نقش موثر و مستقیمی در چسبندگی ظاهری خاک داشته و موجب افزایش آن می‌شود. این روند در عین این که آهنگ ثابتی ندارد، اما با آنچه در مورد مقاومت برشی مشاهده شد (شکل‌های ۶ و ۷) همخوانی کلی دارد. در مقابل، شکل ۹-ب رفتار کاملاً معکوسی برای زاویه اصطکاک داخلی نمایش می‌دهد، به گونه‌ای که با افزایش RDDI مقدار اصطکاک با یک آهنگ نزولی کاهش می‌یابد. شکل ۱۰ نیز رفتارهای مشابهی برای ایستگاه میناوند ارائه می‌کند.

تغییرات نسبی چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک داخلی در شکل ۱۱ نشان داده شده که در آن رفتار متضاد این دو پارامتر در ایستگاه ابراهیم‌آباد به وضوح نمایش داده می‌شود. نکته مهم آن است که تغییرات نسبی چسبندگی ظاهری در مقایسه با زاویه اصطکاک داخلی به مراتب بیشتر است به گونه‌ای که چسبندگی ظاهری تا ۱۴۹٪ افزایش می‌یابد. در صورتی که زاویه اصطکاک داخلی، حداکثر تا ۱۵٪ کاهش یافته است. این مقادیر برای میناوند به ترتیب ۲۱۲٪ و ۱۱٪- است. این امر باعث می‌شود که در مجموع، مقاومت برشی که ترکیبی از این دو پارامتر است، با افزایش RDDI افزایش یابد. نکته دیگر این است که به دلیل این که شیب منحنی تغییرات c و φ با افزایش شاخص کاهش می‌یابد، اثر این دو پارامتر به تعادل رسیده و موجب می‌شود مقاومت برشی با شیب یکنواختی در برابر RDDI افزایش یابد (شکل‌های ۶ و ۷).

تأثیر معکوس "شاخص قطر-تراکم ریشه" در چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک داخلی را باید در ترکیب دو گانه خاک و ریشه و تعامل بین آنها جستجو کرد. یک توده خاکی ریشه مسلح، مانند دیگر محیط‌های دانه‌ای گسسته که به وسیله اندام‌های پیوسته تقویت می‌شوند، با افزایش درصد ریشه خاصیت پلاستیکی و چسبندگی بیشتری می‌یابد و در مقابل، درگیری اصطکاکی بین ذرات، به دلیل وجود عامل

جدول ۳- پارامترهای مقاومت برشی خاک برای مقادیر مختلف RDDI

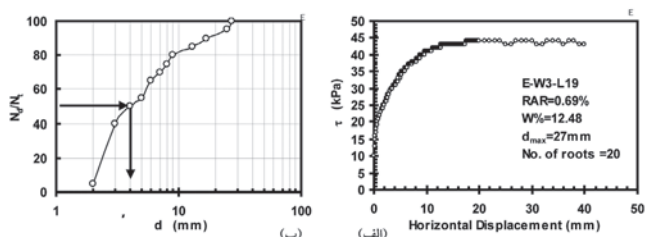
ایستگاه	RDDI (%)	c (kPa)	$\phi$ (degree)	$\Delta c$ (kPa)	$\Delta c/c_0$ (%)	$\Delta \phi$ (degree)	$\Delta \phi/\phi_0$ (%)
میوانند	۰	۷/۴	۴۴	۰	۰	۰	۰
	۰/۴۸	۱۱/۱	۴۲	۳/۶	۴۹	-۲	-۴/۵
	۱/۹۰	۲۳/۳	۳۹	۱۵/۹	۲۱۲	-۵	-۱۱
ابراهیم آباد	۰	۱۵/۱	۲۸	۰	۰	۰	۰
	۰/۰۵	۳۱/۵	۲۵	۱۶/۴	۱۰۸	-۳	-۹
	۰/۱۱	۳۷/۷	۲۴	۲۲/۶	۱۴۹	-۴	-۱۵



شکل ۱- تهیه بلوک خاک آزمایش: الف) حفر چاله شناسایی و تهیه بلوک دست نخورده، ب) تنظیم ابعاد بلوک و قطع ریشه‌های اضافی، ج) محیط کردن جعبه برش بر بلوک خاک و کنترل افقی بودن آن



شکل ۳- الف) آزمایش در حال اجرا در ایستگاه میوانند، ب) اندازه گیری ریشه‌های بلوک خاک در پایان آزمایش



شکل ۴- نتایج آزمایش چاله شماره ۳ ابراهیم آباد تحت سربار ۱۹ kPa: الف) نمودار تنش در برابر جابه جایی افقی بلوک خاک، ب) نمودار فراوانی ریشه‌های با قطر مساوی یا باریک‌تر و تعیین قطر میانه ریشه ( $d_{50}$ ).

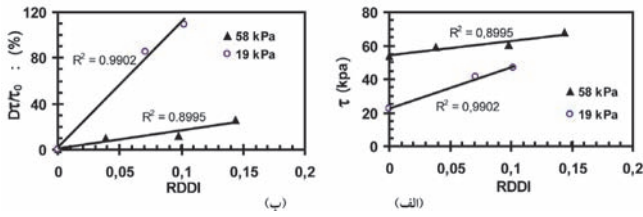
جدول ۲- نتایج آزمایش برش مستقیم برجا در ایستگاه‌های ابراهیم آباد و میوانند

مختصات	شماره چاله	$\sigma_v$ (kpa)	$\tau_{max}$ (kpa)	RAR (%)	$d_{50}$ (mm)	$d_{max}$ (mm)	RDR (%)	RDDI	
ابراهیم آباد	۱	۱۹	۴۱/۱۸۴	۰/۷۳	۲/۹	۳۰	۰/۱۰	۰/۰۷	
		۵۸	۶۷/۵۸۴	۳/۲۰	۴/۵	۱۰۰	۰/۰۵	۰/۱۴	
		۹۸	۸۵/۵۳۶	۰/۷۵	۱/۷	۳۲	۰/۰۵	۰/۰۴	
	۲	۵۸	۶۰/۱۹۲	۰/۴۵	۳/۷	۱۷	۰/۲۲	۰/۱۰	
		۱۹	۴۶/۴۶۴	۰/۶۹	۴	۲۷	۰/۱۵	۰/۱۰	
		۵۸	۵۹/۱۳۶	۰/۱۰	۵	۱۳	۰/۳۸	۰/۰۴	
	۳	۹۸	۴۷/۵۲	۰/۱۰	۲	۱۲	۰/۱۷	۰/۰۲	
		۱۹	۲۲/۱۷۶	۰	۰	۰	۰	۰	
		۵۸	۵۳/۸۵۶	۰	۰	۰	۰	۰	
	۵	۹۸	۶۴/۴۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	
		۹۸	۷۱/۸۰۸	۰/۳۰	۱/۵	۱۵	۰/۱۰	۰/۰۳	
		۹۸	۴۸/۵۷۶	۲/۲۴	۷/۲	۵۰	-	-	
	میوانند	۱	۱۹	۲۶/۹۲۸	۰	۰	۰	۰	۰
			۵۸	۶۳/۸۸۸	۰	۰	۰	۰	۰
			۹۸	۱۰۳/۴۸۸	۰	۰	۰	۰	۰
۲		۱۹	۲۷/۳۵۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	
		۵۸	۶۵/۴۷۲	۰	۰	۰	۰	۰	
		۹۸	۱۰۵/۶	۰	۰	۰	۰	۰	
۳		۱۹	۲۹/۸۷	۹/۵۷	۳/۱	۶۲	۰/۰۵	۰/۴۸	
		۱۹	۳۷/۲۰۳	۲۵/۷۰	۷	۶۱	۰/۱۲	۲/۹۶	
		۵۸	۷۶/۲۶۴	۱۲/۰۴	۵/۱	۳۲	۰/۱۶	۱/۹۲	
۴		۹۸	۱۰۶/۳۰۷	۱۲/۹۴	۵	۴۵	۰/۱۱	۱/۴۴	
		۵۸	۸۸/۸۶۲	۲۶/۱۵	۴/۹	۶۸	۰/۰۷	۱/۸۸	
		۹۸	۹۹/۵۸۱	۵/۶۴	۸/۵	۳۶	۰/۲۴	۱/۳۳	
۶		۱۹	۲۷/۷۲	۴/۰۵	۴	۳۵	۰/۱۱	۰/۴۶	
		۹۸	۹۹/۴۹۶	۱۱/۲۲	۴/۶	۱۰۵	۰/۰۴	۰/۴۹	
		۱۹	۳۳/۶۸۶	۰/۱۰	۲/۲	۱۲	۰/۱۸	۰/۰۲	

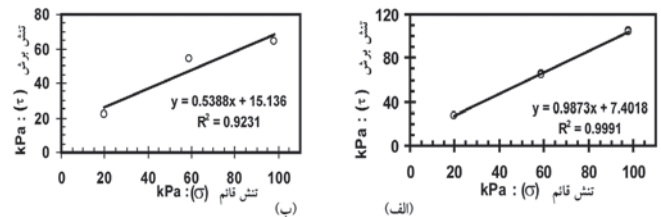


شکل ۲- نصب تجهیزات: الف) نصب نمایشگرهای جا به جایی افقی، ب) نصب جک نیروی برشی، ج) نصب سکوی بارگذاری و نمایشگرهای قائم و جک نیروی قائم

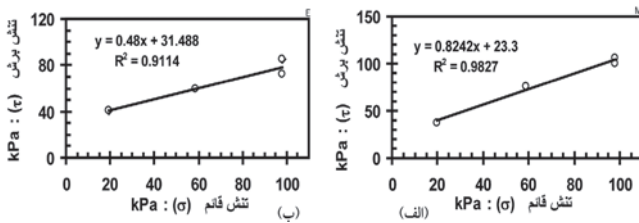




شکل ۶- رفتار مقاومت برشی خاک در برابر تغییرات "شاخص قطر- تراکم ریشه" در ابراهیم آباد: الف) تغییرات مقاومت برشی به ازای RDDI ب) افزایش نسبی مقاومت برشی در برابر RDDI

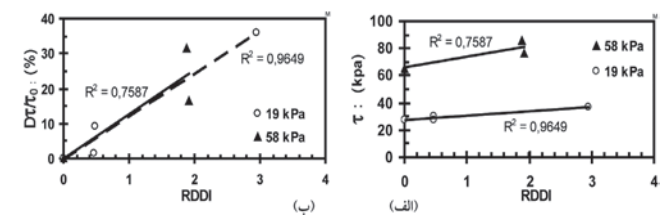


شکل ۵- پوش گسیختگی موهر- کولمب برای خاک فاقد ریشه: الف) میناوند، ب) ابراهیم آباد

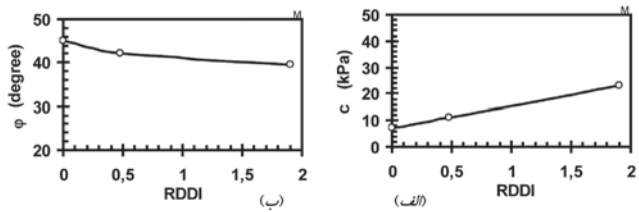


شکل ۸- پوش گسیختگی موهر- کولمب برای خاک دارای ریشه:

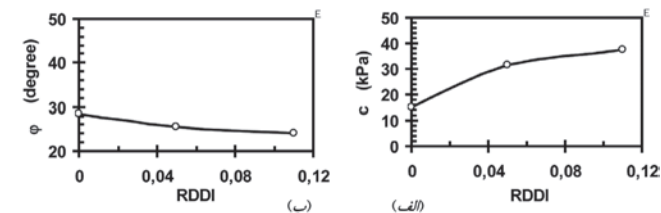
الف) ایستگاه میناوند با RDDI=1/9، ب) ایستگاه ابراهیم آباد با RDDI=0/05



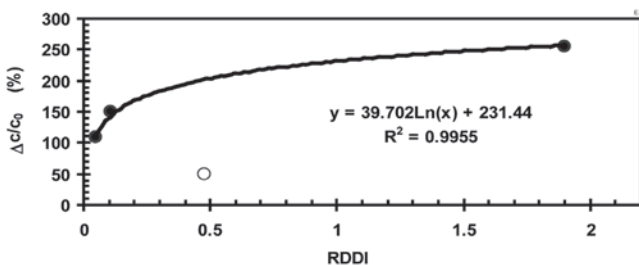
شکل ۷- رفتار مقاومت برشی خاک در برابر تغییرات "شاخص قطر- تراکم ریشه" در میناوند: الف) تغییرات مقاومت برشی به ازای RDDI، ب) افزایش نسبی مقاومت برشی در برابر RDDI



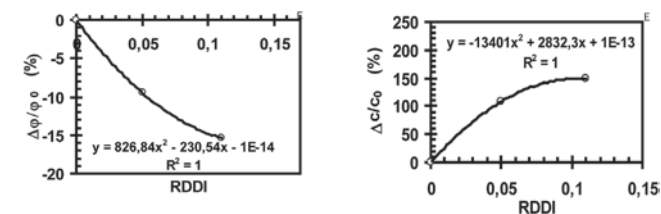
شکل ۱۰- تغییرات پارامترهای مکانیکی خاک در برابر "شاخص قطر- تراکم ریشه" در ایستگاه میناوند: الف) چسبندگی ظاهری، ب) زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۹- تغییرات پارامترهای مکانیکی خاک در برابر "شاخص قطر- تراکم ریشه" در ایستگاه ابراهیم آباد: الف) چسبندگی ظاهری، ب) زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۱۲- افزایش چسبندگی ظاهری نسبی خاک های رس لاغر شنی یا ماسه ای مسلح شده توسط ریشه درخت بید



شکل ۱۱- تغییرات نسبی چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک داخلی در ایستگاه ابراهیم آباد

### کتابنگاری

- استیری، غ. ر.، فتاحی، م. ع.، ۱۳۸۰- "استفاده از روش بیو مهندسی در تثبیت شیپها". دومین سمینار زمین لغزش و کاهش خسارات آن، تهران، ص ۴۰۱-۴۰۸
- داودی، م. ه.، فاطمی عقدا، م.، نودری، ح.، شاه علیپور، غ. ر.، ۱۳۸۳- بررسی اثر قطر ریشه درخت بر مقاومت برشی خاک"، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی.
- داودی، م. ه.، نیک کامی، د.، امام جمعه، س. ر. ف. ۱۳۸۳- "تأثیر ریشه درخت بر مقاومت برشی خاک با استفاده از آزمایشات بزرگ مقیاس". پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. ۱۵۵ ص.
- شفاعی بجستان، م. و سلیمی گل شیخی، م.، ۱۳۸۱- "تعیین اثر ریشه درختان پده و گز بر مقاومت برشی خاک ساحل کارون در محل"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ششم، شماره چهارم، ص. ۲۷-۴۰

عامل سخی، م.، قضاوی، م.، ۱۳۸۰ - "تأثیر تراشه لاستیک‌های فرسوده بر پارامترهای مقاومت برشی خاک"، دومین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران، ص ۴۸۳-۴۹۱

#### References

- Burroughs, E.R., Thomas, B.R., 1977- Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability, USDA For Serv. Res. Pap. INT-190.
- Nilaweera, N.S., 1994- Influence of Hardwood Roots On Soil Shear Strength And Slope Stability In Southern Thailand, Ph.D. Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- O'Loghlin, C.L., 1984- Effective of Introduced Forest Vegetation For Protecting Against Landslides And Erosion In New Zealand Steep Lands, Paper presented to Symposium on effects of forest landuse on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii.
- Tengbeh, G.T., 1989- The Effect of grass cover on Bank Erosion, Ph.D. Thesis, Silsoe College, Cranfield Institute of Technology.
- Waldron, L.J., 1977- Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous And Stratified Soils, Soil science Society of America Jour., 41: 343-349.
- Yarbrough, L.D., 2000- Channel Bank Stability Analysis And Design Considering the Effects of Riparian Vegetation And Root Reinforcement, University of Mississippi, Thesis for Master Degree.
- Ziemer, R., 1981- Roots And Shallow Stability of Forested Slopes, International Association of Hydrological Sciences, Publications No .132.pp.343-361.