

بررسی اثر قطر ریشه درخت بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک*

محمد هادی داودی**

* برگرفته از طرح تحقیقاتی با عنوان: «تأثیر ریشه گیاهان بر مقاومت برشی خاک با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس»

** استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، نشانی: تهران، خیابان فلسطین شمالی، پلاک ۸۱، طبقه هفتم، دفتر طرح‌های توسعه منابع

آب، تلفن: ۸۸۹۱۶۷۲۶ (۰۲۱)، پیام نگار: davoudi_h@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۴/۴/۱۳؛ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۵/۳/۲۷

چکیده

امروزه، کاربرد روش‌های بیومهندسی در کارهای عمرانی به دلیل رعایت مسائل زیست محیطی از اولویت خاص برخوردار است. از جمله می‌توان به تثبیت سواحل رودخانه‌ها و شیب‌های طبیعی از طریق کاشت درخت اشاره کرد. در تحقیق حاضر، تأثیر قطر ریشه درخت بر مقاومت برشی افزوده شده خاک، با آزمایش‌های برجا بررسی شده است. سبی تست برش مستقیم بر جا تحت بارهای قائم مختلف با استفاده از سیستم طراحی شده در پ. ح. خ. آ. روی توده طبیعی دارای خاک CL و ریشه درخت بید انجام شد. پارامتر جدیدی به نام «پارامتر قطر ریشه (RDR)» به عنوان شاخص قطر ریشه موجود در ناحیه برشی خاک تعریف و رابطه آن با زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که وجود ریشه موجب افزایش چشمگیر در چسبندگی خاک، کاهش اندک در زاویه اصطکاک داخلی خاک، و در مجموع افزایش مقاومت برشی می‌شود. با افزایش قطر، مقدار افزایش چسبندگی کاهش می‌یابد و در یک قطر خاص، چسبندگی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و برای قطرهای بزرگ‌تر، پس از اندکی کاهش ثابت می‌شود. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مقابل قطر ریشه دقیقاً عکس حالت چسبندگی را دارد، به طوری که در قطر ریشه متناظر با چسبندگی حداکثر، به حداقل خود می‌رسد.

واژه‌های کلیدی

آزمایش برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، قطر ریشه، مقاومت برشی

مقدمه

نیز در این زمینه ارائه داده‌اند. اما در زمینه تأثیر قطر ریشه بر افزایش مقاومت برشی خاک، تحقیقات به عمل آمده بسیار اندک است.

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی والدران (Waldron, 1973) نشان می‌دهد که سیستم‌های زنده ریشه، مقاومت برشی حداکثر و پس‌ماند را به ترتیب دو تا چهار برابر افزایش می‌دهند. والدران (Waldron, 1977) و والدران و داکسیان (Waldron & Dakessian, 1981) جو، یونجه و کاج را در استوانه‌های دارای خاک رسی لومی کاشتند و پس از رشد کامل گیاهان، آنها را در عمق‌های مختلف در دستگاه برش مستقیم آزمایشگاهی برش دادند و نتیجه گرفتند که یونجه به دلیل تراکم ریشه بیشتر، تأثیر بیشتری در افزایش

استفاده از گیاهان برای تقویت پایداری شیروانی‌های خاکی ساحل رودخانه‌ها و دریاها و همچنین کاهش خطر زمین لغزش در توده‌های طبیعی، به دلایل مختلف از قبیل رعایت اصول زیست محیطی، گسترش توریسم، و کاهش هزینه‌های اجرایی در دهه‌های اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته است. از این رو، تاکنون مطالعاتی در مورد تأثیر ریشه درخت بر مقاومت برشی خاک صورت گرفته است. اغلب محققان با فرض یکسان بودن قطر ریشه و یکنواختی توزیع آن در خاک، با آزمایش‌های آزمایشگاهی به این موضوع پرداخته‌اند و عمدتاً تأثیر تراکم ریشه را بر مقاومت خاک و نیز تأثیر متقابل ریشه و خاک را بررسی کرده‌اند و مدل‌هایی

$$T = n d^m \quad (2)$$

در این رابطه، T = مقاومت کششی؛ d = قطر ریشه؛ و n و m = ضرایبی که تابع نوع گیاه و به ترتیب بین ۲۹/۱ تا ۸۷ و ۰/۷۶ تا ۰/۴۵ تغییر می‌کند، هستند.

نیلاویرا و ناتالی (Nilaweera & Nutalay, 1999) بر اساس آزمایش‌ها به عمل آمده روی درختان چندین ساله (*Alganium kurzii*) نتیجه گرفتند که برای حجم معینی از ریشه، درختان دارای ریشه‌های باریک‌تر ولی طولانی‌تر مقاومت بیشتری در مقابل بیرون کشیدن از خاک دارند. وؤ (Wu, 1976) و والدران (Waldron, 1977) در مدل‌هایی مشابه، افزایش مقاومت برشی ناشی از حضور ریشه را در خاک بر حسب تابعی از ماکزیم تنش کششی ریشه تعریف کرده‌اند و آن را متناسب با عکس جذر قطر ریشه می‌دانند. آب و زایمر (Abe & Ziemer, 1991) با آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی استنتاج کردند به دلیل اینکه با افزایش قطر، انحراف و تغییر شکل ناشی از نیروی برشی در ریشه‌های واقع در منطقه برشی کاهش می‌یابد، مقدار مقاومت برشی ناشی از حضور ریشه نیز کاهش می‌یابد. اما استیری و فتاحی (Estiri & Fattahi, 2001) با آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی روی نمونه‌هایی بازسازی شده از خاک درشت دانه و ریشه درخت افاقیا نشان دادند که با افزایش قطر ریشه، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز افزایش می‌یابد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق آزمایش‌های برش مستقیم برجا روی خاک حاوی ریشه درخت بید زنده صورت گرفت و با نتایج خاک بدون ریشه مقایسه شد. دستگاه برش مستقیم برجا طراحی و ساخته شد که شامل قطعات و تجهیزات زیر است: قاب برشی، جک‌های هیدرولیکی برای اعمال نیروی برشی و قائم، نمایشگرهای جابه‌جایی افقی و قائم خاک، نمایشگرهای فشار افقی و قائم، قرقری، صفحات پایه، و

مقاومت خاک دارد. تعدادی از محققان نیز مطالعاتی به روش آزمایش برش مستقیم برجا انجام داده‌اند که از آن میان می‌توان به زایمر (Ziemer, 1981)، گرینوی (Greenway, 1987)، وؤ و همکاران (Wu et al., 1988) و وؤ و واتسون (Wu & Watson, 1988) اشاره کرد. هنگچوانیچ و نیلاویرا (Hengchovanich & Nilaweera, 1996) نیز با آزمایش‌های برش مستقیم برجا روی بلوک خاک بدون سربار قائم نتیجه‌گیری کردند که مقاومت برشی خاک دارای ریشه گیاه مطابق رابطه خطی شماره ۱ افزایش می‌یابد:

$$\Delta S = 2.7 \text{ RAR} \quad (1)$$

در این رابطه، ΔS = افزایش مقاومت برشی؛ و RAR^1 = تراکم ریشه در خاک است. شفافی بجهستان و سلیمی‌گل - شیخی (Shafaei Bajestan & Salimi Gol Sheikhi, 2002) با اجرای مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم برجا، افزایش مقاومت برشی خاک ساحل کارون را در اثر وجود ریشه درختان پده و گز به ترتیب ۲۰ و ۳۵ درصد برای درختان یکساله و ۶۶ و ۶۹ درصد برای درختان چند ساله اعلام کردند. همچنین نشان دادند که میزان افزایش مقاومت برشی خاک با تراکم ریشه رابطه مستقیم خطی دارد. اولوگلین (O'Loughlin, 1984) گزارش داد که بوته‌های کوچک می‌توانند اثر مسلح‌سازی معنی‌دار در اعماق ۰/۷۵ تا ۱/۵ متری داشته باشند. در حالی که درختان در عمق بیشتر اثر دارند و می‌توانند قدرت خاک را تا عمق ۳ متر یا بیشتر بسته به نوع ریشه افزایش دهند. در عین حال وی نشان داد که ریشه‌های با قطر ۱ تا ۲۰ میلی‌متر بیشترین سهم را در مسلح کردن خاک دارند و ریشه‌های با قطر بیشتر نقش معنی‌دار ندارند. این نتایج را نیلاویرا (Nilaweera, 1994) به شکل دیگری تأیید کرده است. وی با آزمایش‌های کشش استاندارد روی ریشه هفت نوع گیاه نشان داد که با افزایش قطر، مقاومت کششی ریشه مطابق رابطه شماره ۲ کاهش می‌یابد:

کنترل شد و آزمایش تا حصول به نقطه اوج مقاومت یا ۵۰ میلی متر جابه‌جایی ادامه یافت. ضمناً در فواصل زمانی ۲ دقیقه تغییر شکل قائم بلوک نیز قرائت می‌شد. در پایان، تعداد و قطر ریشه‌های واقع در ناحیه برشی کف بلوک اندازه‌گیری می‌شد.

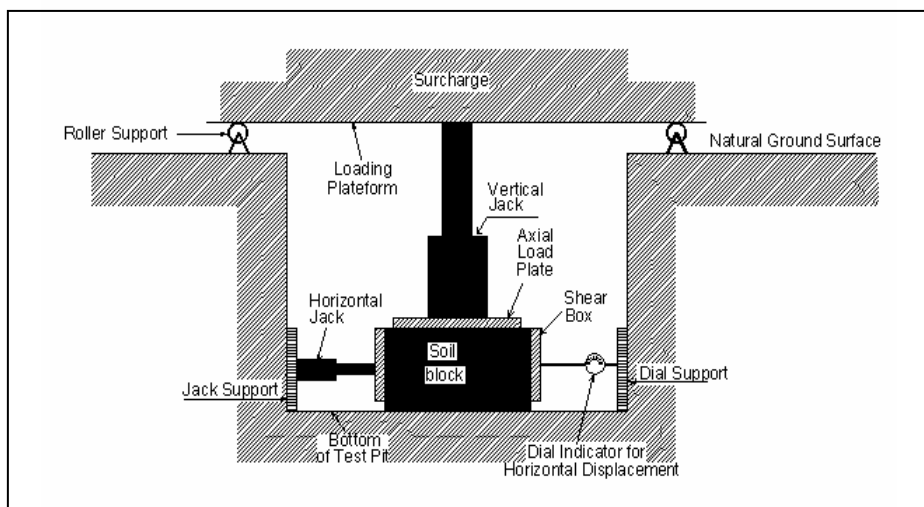
تعداد ۱۷ برش مستقیم برجا، تحت بارهای قائم ۲۰، ۵۹ و ۹۸ کیلو پاسکال در ایستگاه میناوند انجام شد و به دلیل اینکه تهیه بلوک ریشه‌دار بیشتر در این ایستگاه میسر نبود ۱۳ آزمایش دیگر در ایستگاه ابراهیم‌آباد اجرا شد. از این میان ۲۱ برش در خاک ریشه‌دار با تراکم و قطرهای متفاوت و ۹ برش در خاک بدون ریشه اجرا شد. در ایستگاه اول خاک از نوع CL با ۳۲ درصد شن، ۱۶ درصد ماسه، ۱۸ درصد سیلت، ۳۴ درصد رس با شاخص خمیری ۱۵ درصد، و در ایستگاه دوم نیز خاک از نوع CL با ۸ درصد شن، ۳۸ درصد ماسه، ۳۳ درصد سیلت و ۲۲ درصد رس با شاخص خمیری ۱۷ درصد است. خاک هر دو ایستگاه عادی تحکیم‌یافته و حاوی درخت بید بیش از ۱۰ سال است.

علاوه بر آزمایش‌های برش و به منظور بررسی رابطه مقاومت کششی- قطر ریشه، تعداد ۱۳ آزمایش کشش استاندارد روی ریشه‌های درخت بید ایستگاه میناوند انجام گرفت.

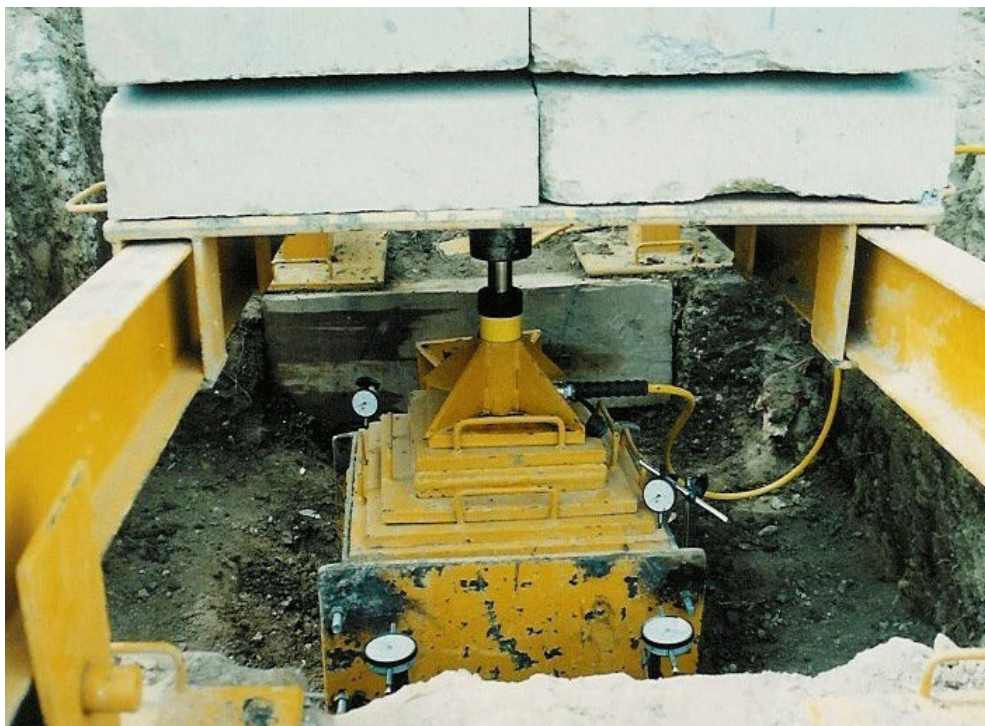
سکوی بارگذاری شامل: شاسی، صفحه سربار، و پایه‌های بلبرینگی.

برای اجرای آزمایش‌ها، ابتدا در محل مورد نظر چاله شناسایی به ابعاد تقریبی ۲×۱ متر و تا رسیدن به ریشه درختان حفر شد. مطابق شکل شماره ۱ در وسط کف آن، بلوک خاکی به ابعاد ۵۰×۵۰ و به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به صورت دست نخورده باقی گذاشته شد. قاب برشی بر روی آن قرار داده به آرامی به پایین رانده شد تا بلوک خاک را احاطه کند. پس از نصب سکوی بارگذاری در سطح زمین و نصب نمایشگرهای جابه‌جایی قائم، بار قائم از طریق جک هیدرولیکی به آن اعمال و فرصت کافی به نمونه داده شد تا تحکیم یابد. پس از نصب نمایشگرهای جابه‌جایی افقی، آزمایش با اعمال بار افقی توسط جک هیدرولیکی شروع و مقاومت برشی بلوک خاک اندازه‌گیری شد. بر هر بلوک فقط یک آزمایش قابل اجراست و برای آزمایش‌های بعدی باید چاله شناسایی حداقل یک متر عمیق‌تر حفر و بلوک جدیدی به‌روش مذکور تهیه شود.

آزمایش‌ها با سرعت جابه‌جایی افقی ۰/۲ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. همان‌طور که در شکل شماره ۲ دیده می‌شود جابه‌جایی افقی خاک توسط دو سنجشگر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری و



شکل شماره ۱- شماتیک آزمایش برش مستقیم برجا



شکل شماره ۲- آزمایش برش مستقیم برجا در حال اجرا، در عکس سکوی بارگذاری، جعبه برش، جک قائم، و نمایشگرهای افقی و قائم دیده می‌شود.

نتایج و بحث

که در آن، d = قطر ریشه (برحسب میلی‌متر)؛ و T = مقاومت کششی (بر حسب کیلوپاسکال) است.

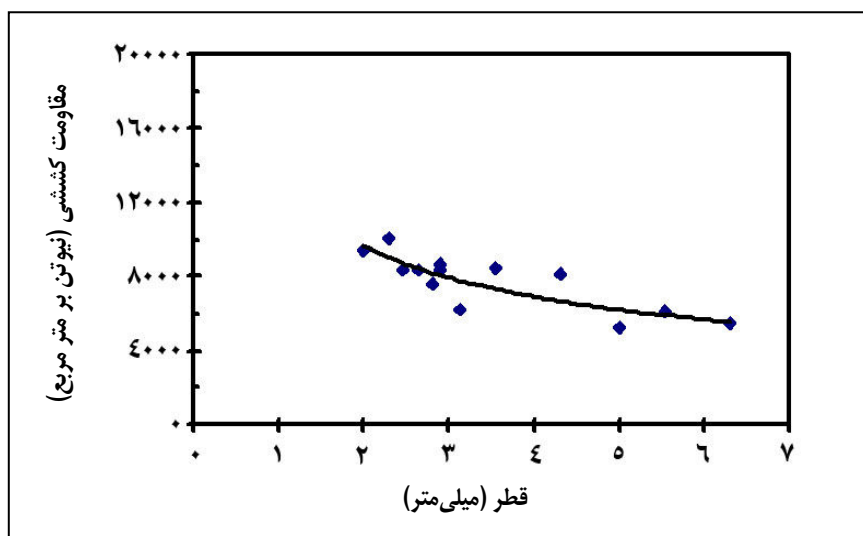
نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برجا در جدول شماره ۱ ارائه شده است. در این جدول، d_{max} = بزرگترین قطر مشاهده شده در ناحیه برشی خاک؛ τ_{max} = تنش برشی حداکثری که بلوک خاک تحت فشار قائم σ_v از خود نشان داده؛ و RAR = تراکم ریشه که بر اساس رابطه شماره ۴ محاسبه می‌شود، هستند.

$$RAR = \frac{\sum a}{A_B} \cdot 100 = \frac{\sum (\pi d^2 / 4)}{A_B} \cdot 100 \quad (۴)$$

در این رابطه، d = قطر؛ a = سطح مقطع ریشه‌های واقع در ناحیه برشی کف بلوک خاک؛ و A_B = سطح مقطع افقی بلوک خاک مورد آزمایش است.

نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی ریشه‌ها نشان می‌دهد که مطابق یافته‌های نیلاویرا (Nilaweera, 1994) مقاومت کششی ماکزیمم ریشه‌ها با قطرشان رابطه معکوس دارند. شکل شماره ۳ که با استفاده از نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی به دست آمده است نشان می‌دهد که مقاومت کششی ماکزیمم یک ریشه ۲ میلی‌متری درخت بید در حدود ۹/۵ کیلوپاسکال است و چنانچه این ریشه رشد کند و قطر آن به ۶/۳ میلی‌متر افزایش یابد مقاومت کششی آن به ۵/۵ کیلوپاسکال کاهش خواهد یافت. روند این تغییرات با رابطه شماره ۳ نشان داده شده است.

$$T = 13.49 d^{0.485} \quad (۳)$$



شکل شماره ۳- تغییرات مقاومت کششی ریشه درخت بید در برابر قطر آن

شکل شماره ۴، محور افقی نشان‌دهنده قطر ریشه‌ها و محور قائم آن فراوانی تجمعی نسبی ریشه‌ها (N) را نشان می‌دهد که عبارت است از:

$$N = \frac{n_i}{n_t} \cdot 100 \quad (5)$$

در این رابطه، n_i = تعداد ریشه‌های به قطر d_i و یا باریک‌تر؛ و n_t = تعداد کل ریشه‌های موجود در ناحیه برشی بلوک است. بنابراین، قطر میانه (d_{50}) هر بلوک قطری است که ۵۰ درصد ریشه‌های ناحیه برشی آن بلوک از آن قطر باریک‌تر هستند. شکل شماره ۴ نمونه‌ای از محاسبه d_{50} را نشان می‌دهد. نتایج d_{50} هر یک از آزمایش‌ها در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

با استفاده از نتایج جدول‌های شماره ۱ و ۲ تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقابل قطر میانه ریشه بررسی شد. در هر گروه از جدول شماره ۲، میانگین قطر میانه ریشه بلوک‌ها محاسبه و در شکل‌های شماره ۵ تا ۷ استفاده شده‌اند.

مقادیر چسبندگی توده خاکی در مقابل قطر میانه ریشه

بلوک‌های خاک بر اساس تراکم ریشه (RAR) در پنج گروه دسته‌بندی شدند و مطابق تئوری آزمایش برش مستقیم، پوش گسیختگی موهر-کولمب رسم و زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی توده خاکی محاسبه گردید. جدول شماره ۲، گروه‌های فوق در دو ایستگاه میناوند و ابراهیم‌آباد و نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که انتظار می‌رود، وجود ریشه تغییرات چشمگیری در پارامترهای مقاومتی خاک ایجاد کرده است. این تغییرات عمدتاً در مقدار ضریب چسبندگی خاک بوده و زاویه اصطکاک داخلی نیز تا حدی تحت تأثیر قرار گرفته است. در این مقاله، تأثیر قطر ریشه بر پارامترهای فوق مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج اندازه‌گیری قطر ریشه‌ها نشان داد که در ناحیه برشی هر بلوک خاک، محدوده‌ای وسیع از تغییرات قطر ریشه وجود دارد. لذا برای بررسی تأثیر قطر ریشه بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، قطر میانه (d_{50}) در هر بلوک با رسم منحنی توزیع قطر ریشه محاسبه شد. مطابق

بررسی اثر قطر ریشه درخت بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک

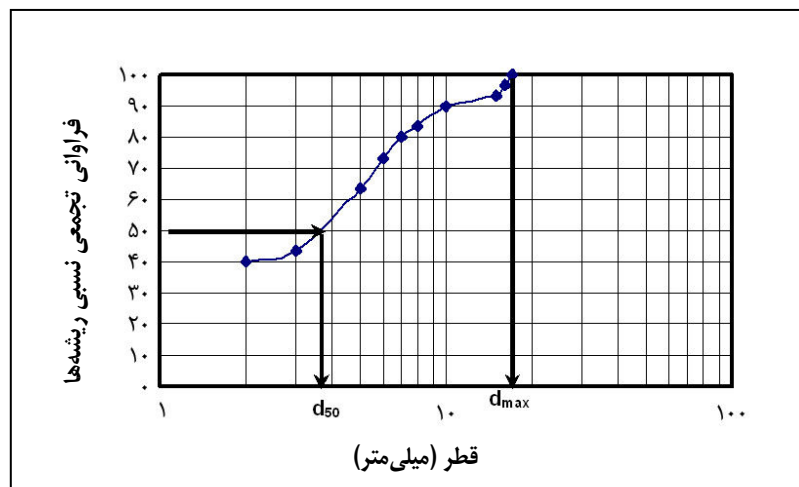
رسم و روند تغییرات آن در شکل شماره ۵ نمایش داده شده است. وجود ریشه در خاک باعث افزایش چشمگیر چسبندگی شده است به نحوی که برای یک قطر میانه خاص به حداکثر خود می‌رسد، پس از آن با افزایش قطر اندکی کاهش می‌یابد، و سپس به تدریج ثابت می‌شود. برای خاک CL مورد آزمایش و برای ریشه درخت بید، حداکثر چسبندگی مشاهده شده به ازای قطر میانه (میلی متر) $d_{50}=2$ است و مقدار آن بیش از دو برابر چسبندگی خاک فاقد ریشه است. برای قطرهای میانه بزرگتر از ۴ میلی متر چسبندگی تقریباً ثابت و نزدیک به دو برابر چسبندگی خاک بدون ریشه است.

جدول شماره ۱- نتایج آزمایش‌ها در ایستگاه‌های ابراهیم آباد و میناوند

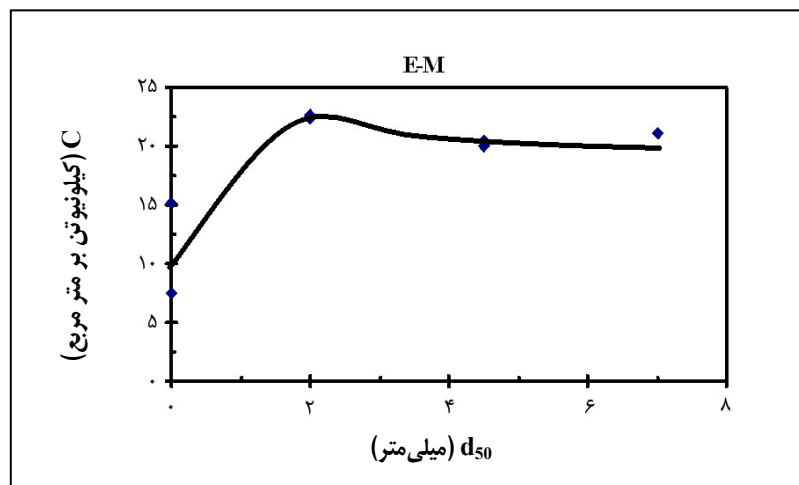
منطقه	شماره چاله	وزن سربار (کیلوگرم)	σ_r (کیلوپاسکال)	τ_{max} (کیلوپاسکال)	RAR (درصد)	d_{50} (میلی متر)	d_{max} (میلی متر)	RDR (درصد)
ابراهیم آباد	۱	۵۰۰	۲۰	۴۱/۱۸۴	۰/۷۳	۲/۹	۳۰	۹/۶
		۱۵۰۰	۵۹	۶۷/۵۸۴	۳/۲۰	۴/۵	۱۰۰	۴/۵
		۲۵۰۰	۹۸	۸۵/۵۳۶	۰/۷۵	۱/۷	۳۲	۵/۳
	۲	۵۰۰	۲۰	۲۵/۸۷۲	۱/۰۰	۲	۲۰	۱۰
		۱۵۰۰	۵۹	۶۰/۱۹۲	۰/۴۵	۳/۷	۱۷	۲۱/۸
		۵۰۰	۲۰	۴۶/۴۶۴	۰/۵۱	۴	۲۷	۱۴/۸
	۳	۱۵۰۰	۵۹	۵۹/۱۳۶	۰/۶۹	۵	۱۳	۳۸/۵
		۲۵۰۰	۹۸	۴۷/۵۲	۰/۱۰	۲	۱۲	۱۶/۷
		۵۰۰	۲۰	۲۲/۱۷۶	۰/۱۰	۰	۰	۰/۰۰
		۱۵۰۰	۵۹	۵۳/۸۵۶	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰
	۲۵۰۰	۹۸	۶۴/۴۱۶	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۲۵۰۰	۹۸	۷۱/۸۰۸	۰/۳۰	۱/۵	۱۵	۱۰	
	۲۵۰۰	۹۸	۴۸/۵۷۶	۲/۲۴	۷/۲	۵۰	۱۴/۴	
	۵۰۰	۲۰	۲۶/۹۲۸	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۱۵۰۰	۵۹	۶۳/۸۸۸	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۲۵۰۰	۹۸	۱۰۳/۴۸۸	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۵۰۰	۲۰	۲۷/۳۵۰۴	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۱۵۰۰	۵۹	۶۵/۴۷۲	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۲۵۰۰	۹۸	۱۰۵/۶	۰/۰	۰	۰	۰/۰۰	
	۵۰۰	۲۰	۲۹/۸۷	۹/۵۷	۳/۱	۶۲	۵	
میناوند		۵۰۰	۲۰	۳۷/۲۰۳	۲۵/۷۰	۷	۶۱	۱۱/۵
	۴	۱۵۰۰	۵۹	۷۶/۲۶۴	۱۲/۰۴	۵/۱	۳۲	۱۵/۹
		۲۵۰۰	۹۸	۱۰۶/۳۰۷	۱۲/۹۴	۵	۴۵	۱۱/۱
	۵	۱۵۰۰	۵۹	۸۸/۸۶۲	۲۶/۱۵	۴/۹	۶۸	۷/۲
		۲۵۰۰	۹۸	۹۹/۵۸۱	۵/۶۴	۸/۵	۳۶	۲۳/۶
	۶	۵۰۰	۲۰	۲۷/۷۲	۴/۰۵	۴	۳۵	۱۱/۴
		۱۵۰۰	۵۹	۶۶/۷۵	۴/۰۰	۶	۲۳	۲۶/۱
	۷	۲۵۰۰	۹۸	۹۹/۴۹۶	۱۱/۲۲	۴/۶	۱۰۵	۴/۴
		۵۰۰	۲۰	۳۳/۶۸۶	۰/۱۰	۲/۲	۱۲	۱۸/۳
	۹	۱۵۰۰	۵۹	۴۸/۱۵۴	۰/۲۶	۱/۷	۱۰	۱۷

جدول شماره ۲- زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای گروه‌های مختلف RAR

ایستگاه	RAR (درصد)	C (کیلو پاسکال)	ϕ (درجه)
ابراهیم آباد	۰/۰	۱۵/۱	۲۸/۳
	۰/۱-۰/۳	۲۶/۳	۲۵/۹
	۰/۴۵-۰/۷۵	۳۴/۸	۲۶/۵
میناوند	۰/۰	۷/۵	۴۵
	۴-۶	۱۰/۸	۴۲/۵
	۹-۱۳	۱۳/۵	۴۴/۳



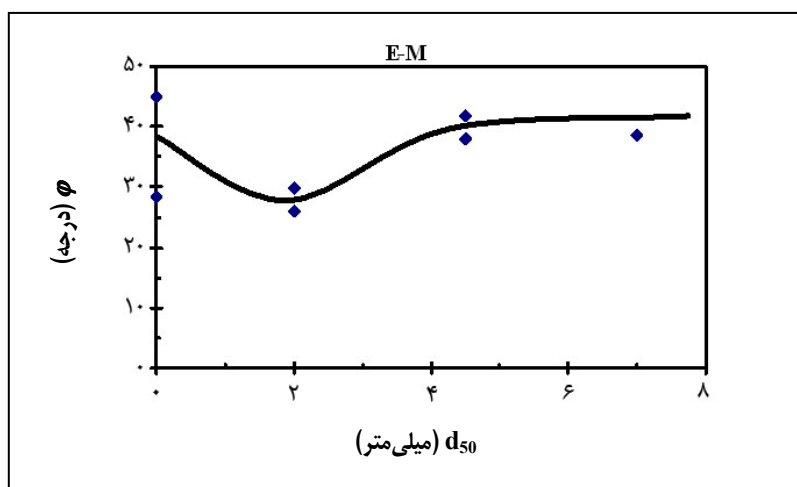
شکل شماره ۴- منحنی محاسبه قطر میانه (d_{50}) چاله شناسایی ۲ ابراهیم آباد تحت تنش قائم ۵۹ کیلو پاسکال



شکل شماره ۵- چسبندگی خاک در مقابل قطر میانه (d_{50}) ریشه موجود در نمونه‌های تحت برش

برای ریشه‌های کم‌قطر، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد به نحوی که برای ریشه با قطر ۲ میلی‌متر، زاویه اصطکاک داخلی به حداقل می‌رسد اما پس از آن با افزایش قطر، روند بازگشت را طی می‌کند و برای قطر میانه بیش از ۴ میلی‌متر، به مقدار اولیه بر می‌گردد.

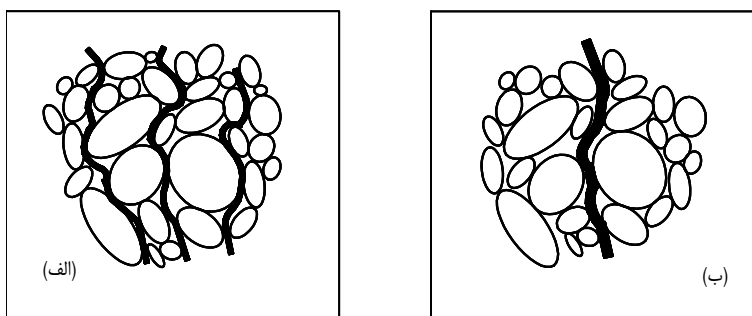
شکل شماره ۶ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک را در برابر قطر میانه ریشه (d_{50}) نشان می‌دهد. به طور کلی در اثر وجود ریشه، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد و میزان آن تابع قطر میانه ریشه است. در مقایسه با شکل شماره ۵، به خوبی روشن می‌شود که روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی عکس روند تغییرات چسبندگی است.



شکل شماره ۶- زاویه اصطکاک داخلی خاک در مقابل قطر میانه (d_{50}) ریشه موجود در ناحیه برش

اما در مورد چسبندگی خاک نتیجه عکس است، زیرا در اثر وجود ریشه‌های نازک‌تر و متعددتر در بین ذرات خاک، پیامدهای زیر حاصل می‌شود: اول، تماس و درگیری بین ریشه و خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل ریخت‌شناسی ریشه‌ها اهمیت زیادی دارد. زیرا ریشه‌های نازک‌تر، در مقایسه با ریشه‌های قطورتر پیچیدگی بیشتری دارند. دوم، نیروهای برشی به تعداد بیشتری از خاکدانه‌ها انتقال و نتیجتاً تنش برشی کاهش می‌یابد. سوم، یکپارچگی خاکدانه‌ها و عملکرد آنها در مقابل نیروهای وارده افزایش می‌یابد. این سه پدیده به همراه رابطه معکوس قطر- مقاومت کششی، مجموعاً به صورت افزایش عامل چسبندگی (c) تحت تأثیر کاهش قطر ریشه منعکس می‌شود.

از دیدگاه تحلیلی و بر اساس نتایج آزمایش‌ها، افزایش عامل چسبندگی و کاهش عامل اصطکاک توده‌ها تحت تأثیر ریشه و روند تغییرات این دو پارامتر با قطر ریشه با استفاده از شکل شماره ۷ به شرح زیر بیان می‌شود. برای دو توده با RAR تقریباً مساوی، زمانی که ریشه درخت قطر کوچک‌تری دارد (شکل شماره ۷-الف)، ریشه‌ها بین ذرات خاک قرار می‌گیرند و تماس ذرات را با یکدیگر کمتر می‌کنند، بنابراین زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد. اما با افزایش قطر، تعداد ریشه‌های موجود در نمونه کاهش می‌یابد (شکل شماره ۷-ب)، و تماس بیشتری بین ذرات خاک برقرار می‌شود و نهایتاً زاویه اصطکاک داخلی خاک به میزان کم‌تری در مقایسه با حالت اول کاهش می‌یابد.

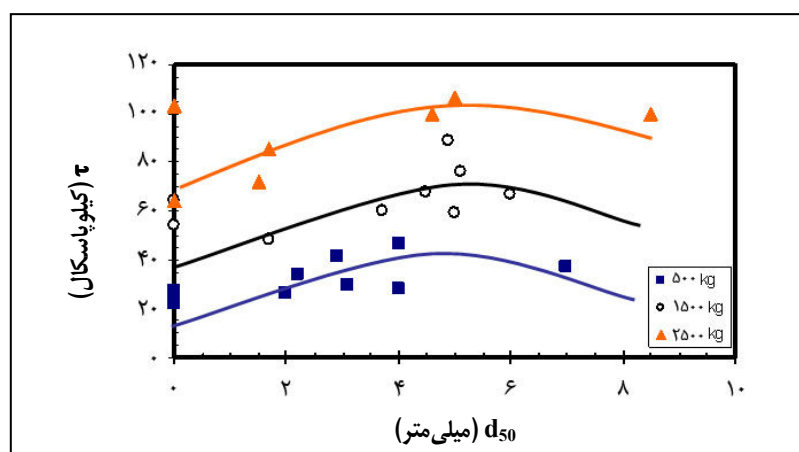


شکل شماره ۷- مقایسه توزیع یک ریشه قطور و سه ریشه باریک در دو نمونه خاک با تراکم ریشه‌های (RAR) یکسان

همین دلیل نیز در شکل شماره ۶ روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی توده به ازای قطر میانگین ۲ میلی‌متر معکوس می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق و شکل شماره ۸ که مقاومت برشی خاک را در برابر قطر میانه نشان می‌دهد، می‌توان استنتاج کرد که افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک در قطر میانه ۲ میلی‌متر، اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. اما در قطر میانه ۵ میلی‌متر که زاویه اصطکاک داخلی در حداکثر و چسبندگی نزدیک به حالت بیشینه خود هست، مقاومت برشی خاک بیشترین مقدار را دارد. این قطر را «قطر بهینه» ریشه می‌نامیم (d_{opt}).

در عین حال همان طور که در شکل‌های شماره ۵ و ۶ نشان داده شده است روند تغییرات c و ϕ در ارتباط با قطر ریشه‌ها یکنواخت نیست. در واقع ریشه‌های کم‌قطر به دلیل جوانی بافت‌هایشان مقاومت برشی کمتری دارند و بدین ترتیب در هنگام تغییر شکل توده خاک که منجر به جابه‌جایی خاکدانه می‌شود آسیب‌پذیری آنها بیشتر از ریشه‌های قطور است. این امر باعث می‌شود که چنانچه قطر ریشه از مقداری معین کمتر باشد احتمال بریده شدن آن در هنگام جابه‌جایی خاکدانه بیشتر شود و از این رو مقاومت برشی توده کاهش یابد. شکل شماره ۵ نشان می‌دهد که برای درخت بید، میانگین این مقدار ۲ میلی‌متر است. به



شکل شماره ۸- مقاومت برشی خاک در مقابل قطر میانه ریشه (d_{50})

در این رابطه، $RDR =$ پارامتر قطر ریشه؛ $d_{50} =$ قطر میانه ریشه؛ و $d_{max} =$ بزرگترین قطر ریشه در ناحیه برشی توده خاکی است. بلوک‌های خاک تحت آزمایش بر اساس RDR در چهار گروه دسته‌بندی و زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بلوک برای هر گروه تعیین می‌شود. جدول شماره ۳ گروه‌های چهارگانه و نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.

به منظور درک بهتر تأثیر قطر و حصول نتایج جامع‌تر، به جای قطر میانه، پارامتر بدون بعدی به نام «پارامتر قطر ریشه» به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$RDR = \frac{d_{50}}{d_{max}} \quad (6)$$

جدول شماره ۳- پارامترهای اصطکاک داخلی و چسبندگی برای گروه‌های مختلف RDR

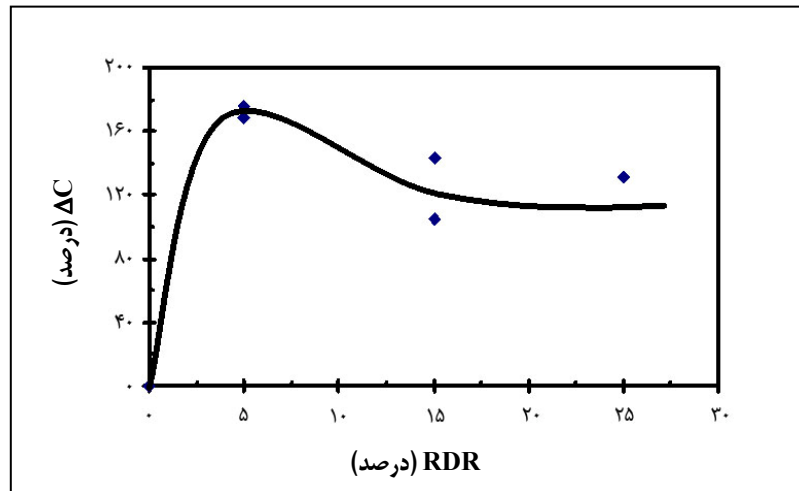
ایستگاه	RDR (درصد)	C (کیلو پاسکال)	ϕ (درجه)
ابراهیم آباد	۰	۱۵/۱	۲۸/۳
	۰-۱۰	۲۰/۷	۲۴/۶
	۱۰-۲۰	۳۶/۸	۱۹/۷
میناوند	۰	۷/۵	۴۴/۹
	۰-۱۰	۲۰/۵	۴۱/۶
	۱۰-۲۰	۱۵/۲	۴۳/۷
	۲۰-۳۰	۱۷/۳	۴۰/۱

بسیار محدود است و حداکثر آن به ۱۳ درصد می‌رسد. روند کلی تغییرات آن به طور مشابه با شکل شماره ۶ به نحوی است که با افزایش RDR مقدار ϕ کم می‌شود و در $RDR=5$ به حداقل خود می‌رسد. پس از آن، این تغییرات کاهش می‌یابد و به تدریج به حالت خاک بدون ریشه نزدیک می‌شود.

مقیاسه کلی شکل‌های شماره ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که تأثیر RDR بر دو پارامتر اصلی مقاومت برشی، یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، متفاوت است، به طوری که با افزایش RDR ، چسبندگی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی اندکی کاهش می‌یابد. همچنین، تطابق این نتایج با نتایج سایر محققان گویای آن است که RDR معرف خوبی برای انعکاس پراکنش قطر ریشه‌ها و تأثیرات آن بر ویژگی‌های مکانیکی خاک است.

شکل شماره ۹ تغییرات درصد افزایش چسبندگی (ΔC) را در برابر «پارامتر قطر ریشه» برای همه آزمایش‌های اجرا شده در دو ایستگاه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که همانند شکل شماره ۵ در مقادیر کم RDR ، مقدار افزایش چسبندگی بسیار زیاد است، اما با افزایش RDR این مقدار کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار چسبندگی در $RDR=5$ دیده می‌شود که افزایشی معادل ۱۷۰ درصد را نشان می‌دهد. پس از آن، روند نزولی تدریجی به خود می‌گیرد و به ازای مقادیر $RDR=15$ تثبیت می‌شود و با افزایش چسبندگی در حدود ۱۱۰ درصد مازاد بر حالت بدون ریشه باقی می‌ماند.

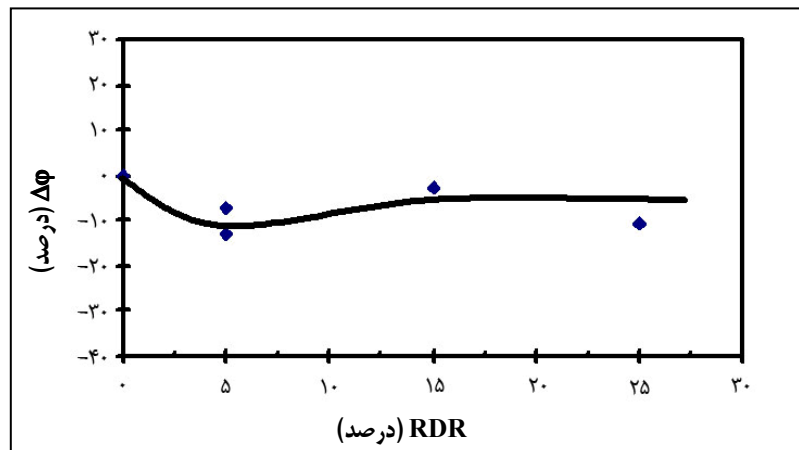
درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در برابر «پارامتر قطر ریشه» در شکل شماره ۱۰ ارائه شده است. به طور کلی، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد اما در مقدار



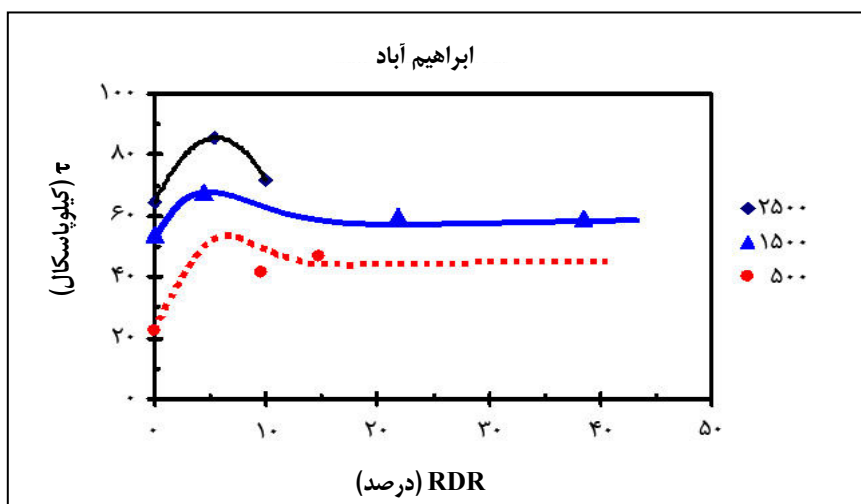
شکل شماره ۹- درصد تغییرات چسبندگی در برابر «پارامتر قطر ریشه»

شکل و از آن مهم‌تر منحنی‌های تغییرات ΔC از شکل شماره ۹ و منحنی تغییرات τ در شکل شماره ۸ انتظار می‌رود که روند مشابهی نیز برای این سربار وجود داشته باشد. لذا منحنی نقطه‌چین به عنوان «مدل برآوردی» ارائه می‌شود. در شکل شماره ۱۲ نیز رفتار توده تحت سربار ۱۵۰۰ کیلوگرمی به خوبی مشهود است و بر همین مبنا رفتار دو سری دیگر نتایج به صورت خط‌چین و به مفهوم «مدل برآوردی» ترسیم شده است. بدیهی است که مدل قطعی آنها پس از وصول داده‌های بیشتر تعیین خواهد شد.

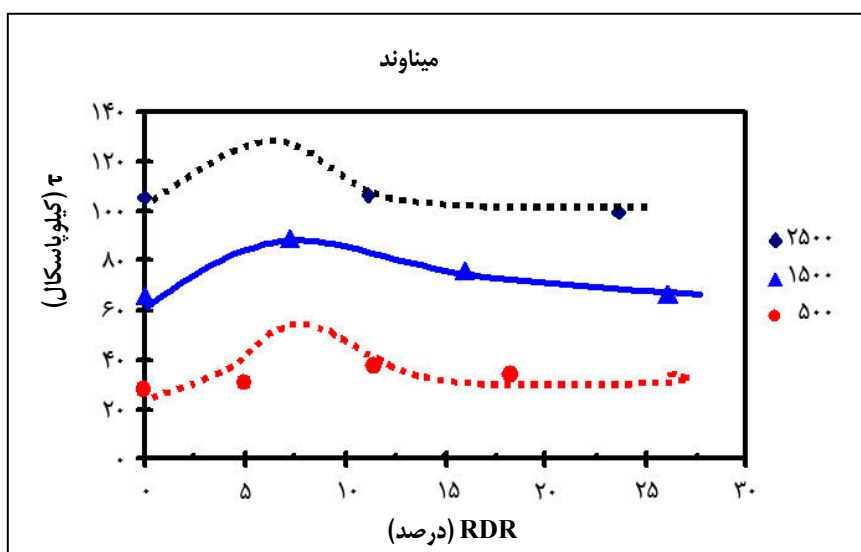
شکل‌های شماره ۱۱ و ۱۲ مقاومت برشی حداکثر خاک ریشه‌دار (τ) را در برابر RDR برای سه سربار قائم ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ کیلوگرم نشان می‌دهد که به ترتیب تنش‌های ۲۰، ۵۹، و ۹۸ کیلوپاسکال را در بلوک‌های خاکی میناوند و ابراهیم‌آباد ایجاد می‌کنند. در شکل شماره ۱۱، آزمایش‌ها تحت سربارهای ۲۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم روند یکسانی را مشابه شکل‌های قبلی نشان می‌دهند، اما برای سربار ۵۰۰ کیلوگرمی به دلیل کمبود داده‌ها روند قطعی مشاهده نمی‌شود. در عین حال، بر اساس دو منحنی دیگر همین



شکل شماره ۱۰- درصد تغییرات زاویه اصطکاک خاک در برابر «پارامتر قطر ریشه» (RDR)



شکل شماره ۱۱- تغییرات مقاومت برشی در برابر «پارامتر قطر ریشه» در منطقه ابراهیم‌آباد



شکل شماره ۱۲- تغییرات مقاومت برشی در برابر «پارامتر قطر ریشه» در منطقه میناوند

کاهش می‌شود. به عبارت بهتر، همان روند دوگانه افزایشی و کاهش حاکم بر تغییرات چسبندگی، بر کل مقاومت برشی نیز حاکم است.

در یک جمع‌بندی اولیه، همخوانی و به عبارت بهتر تبعیت تغییرات مقاومت برشی از تغییرات چسبندگی از فرم دیفرانسیلی رابطه موهر-کولمب به صورت زیر قابل استنتاج است:

دو شکل اخیر، به رغم کمبود داده‌ها، با شکل شماره ۸ به خوبی تطابق دارد و از این رو صلاحیت پارامتر قطر ریشه را در رفتارسنجی توده‌های خاکی ریشه مسلح تأیید می‌کند. همچنین در این دو شکل، همانند شکل‌های شماره ۹ و ۱۰ در اثر وجود ریشه، مقاومت برشی خاک ابتدا افزایش چشمگیر می‌یابد، ولی با افزایش RDR ، روند این تغییرات

ریشه در خاک‌های کم عمق بیشتر از خاک‌های عمیق است.

$$\Delta\tau = \Delta c + \sigma_v \operatorname{tg} \Delta\varphi \quad (7)$$

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ۱۳ آزمایش کشش استاندارد نشان می‌دهد که مقاومت کششی ریشه بید با افزایش قطر آن کاهش می‌یابد. همچنین از نتایج ۳۰ آزمایش برش مستقیم برجا استنتاج می‌شود که وجود ریشه در خاک باعث افزایش قابل توجه در چسبندگی و کاهش بسیار جزئی در زاویه اصطکاک داخلی توده خاکی می‌شود. از آنجا که افزایش چسبندگی به مراتب از کاهش زاویه اصطکاک داخلی بزرگ‌تر است، لذا حضور ریشه، در مجموع، موجب افزایش مقاومت برشی توده می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، با افزایش قطر ریشه تا قطر بهینه (d_{opt})، ضریب چسبندگی و نهایتاً مقاومت برشی توده افزوده می‌شود و به ماکزیمم سطح خود می‌رسد؛ اما برای ریشه‌های قطورتر این دو پارامتر اندکی کاهش می‌یابد و سپس تثبیت می‌شود. روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی توده هر چند ناچیز است و به ۱۳ درصد کاهش محدود می‌شود، دقیقاً عکس روند تغییرات چسبندگی است. برای خاک مورد آزمایش و ریشه درخت بید، در تراکم ریشه‌های یکسان، حداکثر ضریب چسبندگی و حداکثر مقاومت برشی و حداقل زاویه اصطکاک داخلی به ازای پارامتر قطر ریشه $RDR=5$ مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که بهتر است از درختانی استفاده شود که دارای ریشه‌های یکنواخت‌تر با قطر میانه ریشه (میلی‌متر) $d_{50}=5$ باشند. همچنین، این نتیجه حاصل شد که درصد افزایش مقاومت برشی خاک در لایه‌های سطحی بیش از لایه‌های عمقی است.

در رابطه فوق، به دلیل ثابت بودن مقدار تنش قائم (σ_v) و با توجه به شکل‌های شماره ۹ و ۱۰، روشن می‌شود که تغییرات مؤلفه چسبندگی خیلی بیشتر از تغییرات مؤلفه اصطکاک است:

$$\Delta c \gg \gg \operatorname{tg} \Delta\varphi \quad (8)$$

بنابراین، از دیدگاه کاربردی می‌توان از تغییرات زاویه اصطکاک داخلی صرف‌نظر کرد و میزان تغییرات مقاومت برشی خاک را صرفاً تابعی از تغییرات چسبندگی دانست:

$$\Delta\tau \approx f(\Delta c) \quad (9)$$

این موضوع با یافته‌های والدردان و داکسیان (Waldron & Dakessian, 1981) تطابق کامل دارد که مقاومت برشی خاک ریشه‌دار را به صورت رابطه شماره ۱۰ ارائه کرده‌اند.

$$\tau = (c + \Delta c) + \sigma_v \operatorname{tg} \varphi \quad (10)$$

شکل شماره ۸، مقایسه بین خاک دارای قطر میانه ۵ میلی‌متر و خاک بدون ریشه، نشان می‌دهد که افزایش مقاومت برشی برای خاک تحت سربار ۵۰۰ کیلوگرم حدود ۱۰۰ درصد و برای سربار ۲۵۰۰ کیلوگرم حدود ۴۵ درصد است. این تفاوت بی‌شک ناشی از افزایش مؤلفه اصطکاک خاک تحت تأثیر تنش قائم است که موجب کم‌رنگ شدن سهم ریشه در مقاومت توده می‌شود. بنابراین، تأثیر نسبی

مراجع

- 1- Abe, K. and Ziemer, R. R. 1991. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Can. J. For. Res.* 21, 1012-1019.
- 2- Davoudi, M. H., Imamjomeh, R. and Nikkami, D. 2005. Study of effect of plant roots on the

- soil shear resistance using large scale test. Research Report. Soil Conservation and Watershed Management Institute. (in Farsi)
- 3- Estiri, G. and Fattahi, M. A. 2001. Application of bioengineering in landslide stabilization. M. Sc. Thesis. University of Science and Technology. (in Farsi)
 - 4- Greenway, D. R. 1987. Vegetation and Slope Stability, in Slope Stability. Wiley. Chichester.
 - 5- Hengchaovanich, D. and Nilaweera, N. S. 1996. An assessment of strength properties of Vetiver grass root in relation to slope stabilization. International Conference on Vetiver. Chain Kai. Thailand.
 - 6- Nilaweera, N. S. 1994. Influence of hardwood roots on soil shear strength and Slope stability in souther Thailand. Ph.D. Thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok.
 - 7- Nilaweera, N. S. and Nutalaya, P. 1999. Role of tree roots in slope stabilization. Bull. of Eng. Geology and Environmental. 57, 337-342.
 - 8- O'Loughlin, C. L. 1984. Effective of introduced forest vegetation for protecting against Landslides and erosion in New Zealand;s steeplands. Symposium on Effects of Forest Landuse on Erosion and Slope Stability. Honolulu. Hawaii.
 - 9- Shafaei Bejestan, M. and Salimi Gol Sheikhi, M. 2002. Effect of roots of pedeh and gaz on the soil sheaar resistance in Karoon river. J. of Agric. And Natural Res. Sci. & Tech. 6(4): 40-27. (in Farsi)
 - 10- Waldron, L. J. 1977. The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Sci. Soc. of Am. J. 41, 843-849.
 - 11- Waldron, L. J. and Dakessian, S. 1981. Effect of grass, legume and tree roots on soil shearing resistance, Soil sci. Soc. Am. J., 46, 894-899.
 - 12- Wu, H. T. and Watson, A. 1998. In-situ shear test of soil blocks with roots. Can. Geotech. J. 35, 579-590.
 - 13- Wu, T. H. 1976. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Department of Civil Engineering. Ohio State University. Columbus. Geotech. Eng. Rep. No. 5.



- 14- Wu, T. H., Beal, P. E. and Lan, C. 1988. In-situ shear test of soil-root interactions. *J. of Geotechnical Eng.* 114(GT12):1351-1375.
- 15- Ziemer, R. R. 1981. The role of vegetation in stability of forested slope. *Proceedings-reframe Exposes IUFRO R. R.* 297-308.

Effect of Tree Root Diameter on Cohesion and Internal Friction Angle of Soil

M. H. Davoudi

From the environmental point of view, application of bioengineering techniques in civil projects such as landslide stabilization is given priority in recent years. In this paper, the influence of the diameter of tree roots on the increase of shear resistance of soil was investigated by means of series of in-situ direct shear tests. Thirty tests were carried out on a natural deposit CL soil containing midow roots by means of a set up designed in soil laboratory of SCWMRI. Since the existing roots in natural deposits have different diameters, a no dimensional index referred to as Root Diameter Ratio (RDR) was defined as the ratio of the mean root diameter to the maximum root diameter. The results showed, in general, the increased shear resistance of the soil due to the presence of roots was inversely proportional to the root diameters. In fact the apparent cohesion of soil increases considerably as the root diameter increases, while at the same time the internal friction angle decreases smoothly. However, the shear resistance growth stops at a given diameter, then stabilizes after a slight declination. A similar behavior was observed for the soil cohesion, while the internal friction angle showed a completely opposite behavior.

Key words: Cohesion, Direct Shear Test, Internal Friction Angle, Root Diameter, Shear Resistance