

بررسی مسلح‌سازی خاک براساس تغییرات چسبندگی در حضور ریشه درختان ممرز (*Carpinus betulus* L.)

سمیه کرمی راد^{۱*}، مجید لطفعلیان^۲، عیسی شوش پاشا^۳، حمید جلیوند^۲ و فیلیپو گیادروسچیچ^۴

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

پست الکترونیک: s.karamirad64@gmail.com

۲- استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- دانشیار، گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۴- استاد، گروه جنگل‌داری و علوم محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ساساری، ساساری، ایتالیا

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

چکیده

مقدار چسبندگی ظاهری خاک در حضور ریشه از معیارهای مهم در مسلح‌سازی خاک است. در پژوهش پیش‌رو با استفاده از دو مدل WWM (Wu-Waldron Model) و FBM (Fiber Bundle Model) مقدار چسبندگی خاک بررسی شد. هفت درخت ممرز (*Carpinus betulus* L.) در هرکدام از سه رویشگاه مورد بررسی در سری یک جنگل سرچشمه چالوس انتخاب شدند. برای بررسی پراکنش ریشه‌ها از روش حفر پروفیل و برای اندازه‌گیری مقاومت کششی از دستگاه اینسترون استاندارد استفاده شد. براساس نتایج، نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) با افزایش عمق کاهش یافت. بیشینه شاخص RAR برای هر سه رویشگاه در ۴۰ سانتی‌متری ابتدایی خاک مشاهده شد و بیشینه عمق ریشه‌دوانی نیز ۶۰ سانتی‌متر بود. کمینه و بیشینه مقاومت کششی در رویشگاه اول ۱۱/۵۲ تا ۳۲۳/۴۲، رویشگاه دوم ۶/۸۹ تا ۳۱۸/۷۹ و رویشگاه سوم ۶/۹۱ تا ۳۱۲/۶۶ مگاپاسکال به ترتیب در دامنه قطر ریشه برای رویشگاه اول ۰/۵ تا ۹/۴۵، رویشگاه دوم ۰/۵۶ تا ۹/۲۱ و رویشگاه سوم ۰/۴۵ تا ۹/۳۲ میلی‌متر برآورد شدند. همچنین، متوسط چسبندگی ریشه در تمام عمق‌ها با استفاده از مدل WWM در رویشگاه اول ۴/۰۴ تا ۶۱/۳۷، در رویشگاه دوم ۵/۷ تا ۵۳/۱۸ و در رویشگاه سوم ۴/۶ تا ۴۶/۶۶ کیلوپاسکال و با استفاده از مدل FBM در رویشگاه اول ۱/۲۲ تا ۲۷/۴۸، در رویشگاه دوم ۱/۸۷ تا ۲۴/۲۲ و در رویشگاه سوم ۱/۸۵ تا ۱۹/۰۴ کیلوپاسکال به دست آمد. مقایسه دو مدل مذکور باعث افزایش شناخت از ویژگی‌های زیست‌فنی ممرز و تعیین دقیق‌تر مقدار مسلح‌سازی خاک شد. از این یافته‌ها می‌توان در آینده در مدیریت پدیده‌های طبیعی مانند زمین‌لغزش استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاک، زیست‌مهندسی، مدل FBM، مدل WWM، مقاومت کششی ریشه.

مقدمه

شناخته شده است. پوشش گیاهی، ایزاری مؤثر در کاهش زمین‌لغزش به‌خصوص در زمین‌لغزش سطحی محسوب می‌شود (Bischetti et al., 2009). تاکنون در پژوهش‌های زیادی بر اهمیت سیستم ریشه درختان جنگلی در افزایش

زمین‌لغزش یکی از مخاطرات طبیعی است که سالانه خسارت‌های جانی و مالی فراوانی به دنبال دارد. اهمیت پوشش گیاهی در جلوگیری از ناپایداری دامنه‌ها به‌خوبی

(Fiber Bundle Model) از روش‌های دیگر محاسبه مقدار مسلح‌سازی خاک در حضور ریشه است. در این مدل، فرض بر این است که ریشه‌ها در جریان تنش به تدریج گسیخته می‌شوند (Wang *et al.*, 2017). در مدل ابتدا بار به‌طور مساوی بین ریشه‌ها توزیع می‌شود. پس از گسیختگی ریشه‌ها، بار دوباره بین ریشه‌های سالم تقسیم می‌شود. این فرایند تا آنجایی ادامه می‌یابد که همه ریشه‌ها گسیخته شوند. مهم‌ترین عامل در این مدل، قطر ریشه است که هرچه بیشتر باشد، نیروی کمتر و هر چه کمتر باشد، نیروی بیشتری را تحمل می‌کند. در نتیجه، چسبندگی ریشه در مدل FBM به بیشینه مقاومت کششی که ریشه‌ها در این حالت می‌توانند تحمل کنند، بستگی دارد (Pollen & Simon, 2005). در انواع مختلف این مدل فرض می‌شود که مقدار مقاومت کششی در طول ریشه‌ها با توجه به سطح مقطع (FBM نوع یک) (Daniels, 1945) یا قطر ریشه (FBM نوع دو) (Pollen & Simon, 2005) یا تعداد در یک دسته از ریشه (FBM نوع سه) (Hidalgo *et al.*, 2001) توزیع می‌شود. به‌طور کلی، در هر دو مدل WWM و FBM، متغیرهای تراکم ریشه، مقاومت کششی ریشه و زاویه قرارگیری ریشه با توجه به سطح برش، اهمیت بسیار دارند. RBM (Root Bundle Model) (Schwarz *et al.*, 2010) و RBMw (Root Bundle Model Weibull) (Schwarz *et al.*, 2010) از جدیدترین مدل‌ها در برآورد میزان مسلح‌سازی خاک هستند.

در پژوهش‌های متعددی از مدل‌های WWM و FBM برای مقایسه مقدار چسبندگی خاک در حضور ریشه‌های مختلف استفاده شده است (Bischetti *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2017; Adhikari *et al.*, 2013). در پژوهش پیش‌رو نیز با استفاده از این دو مدل، مسلح‌سازی خاک در حضور ریشه درختان مرز (*Carpinus betulus* L.) بررسی شد. لازم به‌ذکر است که Abdi و همکاران (۲۰۰۹) با کاربرد مدل WWM و Deljouei و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل RBM به‌بررسی ویژگی‌های زیست‌فنی سیستم ریشه مرز و تأثیر آن بر مسلح‌سازی خاک پرداختند. پژوهش‌های

مقاومت خاک تأکید شده است (Abdi *et al.*, 2009; Bischetti *et al.*, 2009; Schwarz *et al.*, 2010; Giadrossich *et al.*, 2016). ریشه موجب افزایش پایداری و مسلح‌سازی خاک (Sidle & Bogaard, 2016) و در نتیجه، افزایش مقاومت برشی آن می‌شود (Moresi *et al.*, 2019). مقدار این اثر به مقدار نفوذ سیستم ریشه در خاک بستگی دارد. این عامل خود تحت تأثیر گونه و ویژگی‌های رویشگاه (بافت خاک، رطوبت، حرارت و رقابت با گونه‌های دیگر) تغییر می‌کند. ریشه‌ها با ایجاد شبکه اتصال در لایه خاک و اتصال لایه بی‌ثبات به لایه عمیق‌تر و پایدارتر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک تأثیر می‌گذارند (Gyssels *et al.*, 2005). همچنین، مقاومت مکانیکی ریشه‌های تحت تنش موجب افزایش چسبندگی خاک می‌شود (Dupuy *et al.*, 2005). بنابراین مقدار مسلح‌سازی خاک به تعداد ریشه‌های موجود در سطح برش (شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک)، نیروی کششی و قطر و جهت ریشه‌ها در سطح برش بستگی دارد (Pollen & Simon, 2005). اندازه‌گیری مسلح‌سازی خاک در گونه‌ها و رویشگاه‌های مختلف از مؤلفه‌های کلیدی در زیست‌مهندسی هستند (Naghdi *et al.*, 2013).

کمی‌سازی تأثیر مسلح‌سازی ریشه یکی از مهم‌ترین مسائل در پایداری دامنه‌ها است که مدل‌های متعددی برای آن توسعه داده شده است. ساده‌ترین مدل بررسی مسلح‌سازی خاک، WWM (Wu-Waldron Model) است که توسط Waldron (۱۹۷۷) و Wu و همکاران (۱۹۷۹) پیشنهاد شد. در این مدل، مقدار پایداری شیب در خاک در حضور ریشه با توجه به زاویه اعوجاج برشی ریشه (Distortion Angle of Sheared Root) و اصطکاک سطح ریشه با خاک محاسبه می‌شود. در مدل WWM، ریشه با تبدیل تنش‌های برشی موجود در خاک به مقاومت کششی در برابر تغییر شکل و گسیختگی خاک مقاومت می‌کند. این مدل با در نظر گرفتن گسیختگی همه ریشه‌ها در یک‌زمان، مقدار مسلح‌سازی و چسبندگی خاک را بسیار بیشتر محاسبه می‌کند (Pollen & Simon, 2005). مدل FBM

اولیه در پارسل‌های ۱۲۲ و ۱۲۳، سه رویشگاه با شیب عمومی کمتر از ۲۰ درصد، جهت عمومی شمال‌شرقی و ارتفاع ۶۰۰ متر از سطح دریا انتخاب شدند. مساحت پارسل ۱۲۲ برابر با ۵۱ هکتار است و بیشتر سطح آن در شیب کمتر از ۳۰ درصد قرار دارد. تیپ غالب این پارسل، ممرز-انجیلی است. درختان ممرز موجود در آن، کیفیت متوسط تا خوب دارند و بیشتر آن‌ها متعلق به مرحله جوان (تیرک) هستند. جنگل در این قسمت از سری، یک تا دواشکوبه است و به سبب تراکم زیاد درختان، تاج‌پوشش زیادی (بیشتر از ۷۵ درصد) دارد. مساحت پارسل ۱۲۳ حدود ۴۷ هکتار است. از نظر زمین‌شناسی، وجود دولین‌های بزرگ و کوچک، گسل‌های تکتونیکی و دره‌های انحلالی موجب حرکت توده‌های خاک در این پارسل شده است.

روش پژوهش

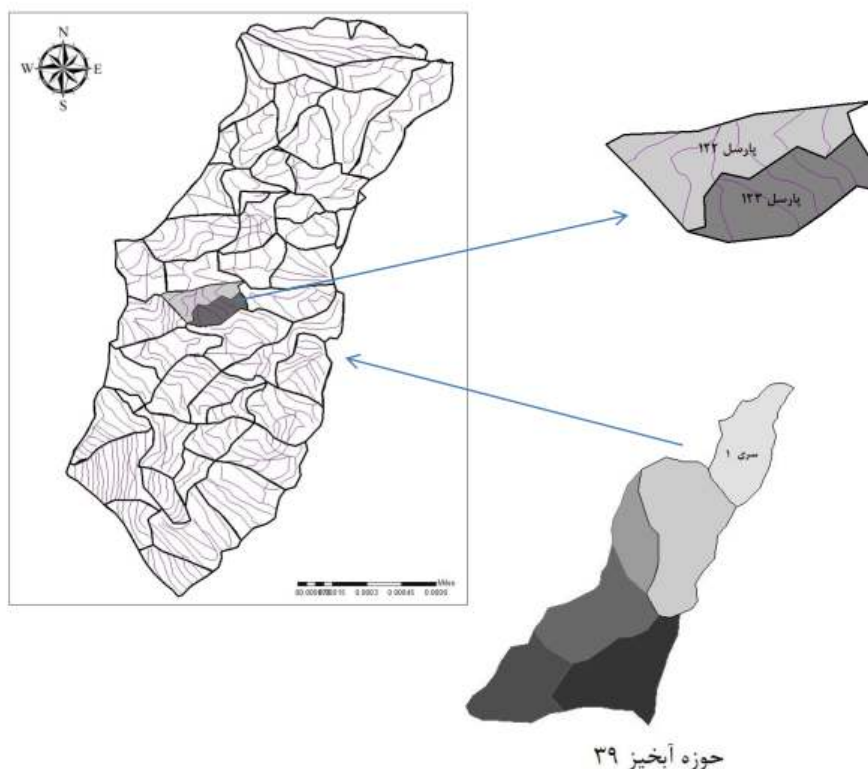
در هر رویشگاه، هفت درخت ممرز که شرایط یکسانی از نظر ارتفاع از سطح دریا و زاویه شیب دامنه داشتند، انتخاب شدند (Vergani et al., 2014) و مختصات، قطر، ارتفاع و زاویه شیب این درختان یادداشت شد. سپس، در اطراف هرکدام از آن‌ها، سه پروفیل به ابعاد $۱ \times ۰/۵$ متر مربع در فاصله‌های یک، $۱/۵$ و $۲/۵$ متر از تنه و در سمت پایین شیب حفر شد (Vergani et al., 2014). در واقع، ریشه‌های سمت پایین شیب، مقاومت کششی زیادتری دارند که علت آن، وجود تنش‌های بیشتر در سمت پایین شیب و در نتیجه، سازگاری سیستم ریشه‌ای است (Abdi, 2009). عمق حفر هر پروفیل تا بیشینه عمق ریشه‌دوانی ادامه داشت. هر پروفیل روی دیواره نزدیک به درخت به افق‌های ۱۰ سانتی متری تفکیک و علامت‌گذاری شد. سپس، تعداد و قطر همه ریشه‌ها در هر افق با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد (Vergani et al., 2014). قطر ریشه‌ها در پنج طبقه قطری شامل $۰/۵$ تا $۱/۵$ ، $۱/۵$ تا $۲/۵$ ، $۲/۵$ تا ۵ ، ۵ تا ۱۰ و بیشتر از ۱۰ میلی‌متر دسته‌بندی شدند (Genet et al., 2008).

مذکور در شرایط رویشگاهی (خاک، شیب، جهت دامنه و زمین‌شناسی) مختلف انجام شدند. بدیهی است که ساختار درختان جنگلی و سیستم ریشه آن‌ها به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر شرایط رویشگاه است، بنابراین هدف از پژوهش پیش‌رو، برآورد دقیق‌تر مقدار چسبندگی خاک درختان ممرز در جنگل سرچشمه چالوس بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو در سری یک از جنگل سرچشمه چالوس انجام شد. این سری از نظر تقسیمات حوضه آبخیز جنگل‌های هیرکانی در قسمت شمالی حوضه ۳۹ بین عرض جغرافیایی $۳۳^{\circ} ۳۶'$ تا $۳۸^{\circ} ۳۸'$ شمالی و طول جغرافیایی $۲۱^{\circ} ۵۱'$ تا $۲۵^{\circ} ۵۱'$ شرقی قرار دارد (شکل ۱). براساس اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی نوشهر و سیاه‌بیشه، کمینه و بیشینه بارندگی در این منطقه در ماه‌های آبان و مرداد مشاهده می‌شود که به ترتیب $۱۸/۴۸$ و $۲/۵۵$ درصد از بارندگی سالانه را شامل می‌شوند. خاک منطقه مورد مطالعه، قهوه‌ای جنگلی آهکی با عمق به نسبت زیاد و از نظر زمین‌شناسی نیز حاوی سنگ‌های آهکی کرتاسه با مقدار کمی از لایه‌های مارنی است. خاک این منطقه براساس طبقه‌بندی یونیفاید جزء خاک‌های رسی با پلاستیسیته زیاد (CH) محسوب می‌شود. این جنگل‌ها در دامنه ارتفاعی بین ۱۰۰ تا ۱۷۵۰ متر از سطح دریا پراکنش دارند. بیشترین درختان سری مورد مطالعه را ممرز (*Carpinus betulus* L.) و توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata*) تشکیل می‌دهند. انجیلی (*Parrotia persica*)، خرمندی (*Diospyros*)، افرا (*Acer* sp.)، شمشاد (*Buxus hyrcanus*) و بلندمازو (*Quercus castaneifolia*) نیز همراه با آن‌ها دیده می‌شوند. با توجه به اهداف پژوهش، رویشگاه‌های مورد مطالعه به‌نحوی انتخاب شدند که شرایط محیطی درختان ممرز در آن‌ها مشابه باشند و نیز درختان در هر رویشگاه در یک طبقه قطری قرار داشته باشند. بنابراین، با جنگل‌گردشی



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه در شمال کشور

سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، دقت اندازه‌گیری ± 0.001 نیوتن و جابه‌جایی در واحد طول ± 0.0001 میلی‌متر قرار داده شدند. بیشینه نیروی لازم برای گسیختگی ریشه‌ها با استفاده از دستگاه مذکور اندازه‌گیری شد. نمونه ریشه‌هایی که گسیختگی آن‌ها در محل نزدیک فک‌ها بود، نامعتبر در نظر گرفته شد و داده‌های آن‌ها حذف شد (Abdi et al., 2009). همچنین، قطر ریشه از میانگین سه نقطه نزدیک به نقطه گسیختگی در طول ریشه که با کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شده بود، به دست آمد (Vergani et al., 2014).

براساس رابطه ۲، با تقسیم بیشینه نیروی لازم برای گسیختن ریشه (F_{max}) به سطح مقطع (CSA) ریشه در محل گسیختگی، مقاومت کششی ریشه در محل گسیختگی (T_r) محاسبه شد (Bischetti et al., 2005).

$$T_r = \frac{F_{max}}{CSA} \quad \text{رابطه (۲)}$$

با تقسیم مساحت اشغال‌شده توسط ریشه‌ها (A_r) به مساحت خاک (A_s) در هر لایه، شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR: Root Area Ratio) طبق رابطه ۱ محاسبه شد (Wu et al., 1979; Zhang et al., 2014).

$$RAR = \frac{A_r}{A_s} \quad \text{رابطه (۱)}$$

برای محاسبه مقاومت کششی ریشه، نمونه‌های ریشه درختان در عمق حدود ۳۰ سانتی‌متری خاک با سیم‌چین تیز بریده و جمع‌آوری شدند (Abdi et al., 2014). این نمونه‌ها پس از شستشو در تیمار الکل ۱۵ درصد در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند. بین زمان جمع‌آوری ریشه‌ها و اجرای آزمایش مقاومت کششی، ۱۰ روز اختلاف زمانی وجود داشت. برای انجام این آزمایش در آزمایشگاه از دستگاه اینسترون استاندارد ساخت سنتام ایران (STM20) استفاده شد. ریشه‌های به‌طول تقریبی ۱۵ سانتی‌متر درون فک دستگاه با

است (Bischetti *et al.*, 2009). بیشینه مقاومت کششی (T_r) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$T_r = \alpha d^{-\beta} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن: α و β به ترتیب بیانگر عامل مقیاس و عامل شکل هستند. این دو ضریب، مقدار کاهش مقاومت کششی را نشان می‌دهند و به گونه بستگی دارند (Bischetti *et al.*, 2005).

با توجه به اینکه در ریشه‌های مختلف، قطر و بیشینه مقاومت کششی متفاوت هستند، بنابراین آن‌ها در زمان‌های مختلفی در خاک گسیخته می‌شوند. بر این اساس، مدل FBM به کار می‌رود (Pollen & Simon, 2005). در این مدل: (۱) بار به طور مساوی بر ریشه‌هایی که به طور موازی در کنار هم قرار گرفتند، وارد می‌شود؛ (۲) بار به طور پیوسته افزایش می‌یابد تا آنجایی که ریشه گسیخته شود (زمانی ریشه گسیخته می‌شود که مقدار بار از مقاومت کششی ریشه بیشتر باشد)؛ (۳) اگر توزیع بار دوباره باعث گسیختگی ریشه شود، بار دوباره تقسیم می‌شود و (۴) این روند تا آنجا ادامه می‌یابد که همه ریشه‌ها گسیخته شوند، بنابراین مقدار مسلح سازی خاک در این مدل به بیشینه مقاومت کششی که ریشه‌ها می‌توانند تحمل کنند، بستگی دارد و از مجموع مقاومت کششی ریشه‌هایی که در سطح برش قرار دارند، محاسبه می‌شود (Pollen & Simon, 2005). برای محاسبه C_r با استفاده از مدل FBM، متغیرهای T_r و RAR مانند مدل Wu محاسبه می‌شود. در این مدل، ترتیب گسیخته شدن ریشه تابعی از قطر ریشه است (رابطه ۷).

$$C_r = T_{rj} RAR_j \frac{\sum_{n=1}^j d_n}{d_j} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن: d_j نشان‌دهنده قطر نازک‌ترین ریشه است که در هر مرحله از بارگذاری گسیخته می‌شود (Mao *et al.*, 2012).

سپس، مقدار مسلح‌سازی خاک توسط ریشه گونه مورد بررسی با استفاده از مدل Wu و همکاران (۱۹۷۹) تعیین شد. مدل مسلح‌سازی ریشه Wu، یکی از آسان‌ترین و سریع‌ترین روش‌ها برای کمی‌سازی مسلح‌سازی خاک توسط ریشه‌ها است که مبتنی بر معادله موهر-کلمب است. در این مدل، مقدار افزایش مقاومت برشی در اثر حضور ریشه (T_{sr}) طبق رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$t_{sr} = C_r + C_s + \sigma \tan \varphi \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: C_s بیانگر چسبندگی خاک، C_r چسبندگی مضاعف در اثر حضور ریشه، σ تنش معمول در صفحه برش و φ زاویه اصطکاک درونی ذرات خاک هستند. مقدار C_r با استفاده از دو ویژگی شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک و مقاومت کششی ریشه از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$C_r = t_r (\sin \sigma + \cos \sigma \tan \varphi) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن: t_r متوسط مقاومت کششی ریشه (T_r) در هر سطح از خاک (A)، σ زاویه اعوجاج در ناحیه برش و d قطر ریشه هستند. ارزش‌های σ و φ اغلب در محدوده یک تا ۱/۳ قرار دارند و برابر با k هستند (Bischetti *et al.*, 2009). همچنین، C_r از حاصل ضرب مقاومت کششی ریشه (T_r) در شاخص RAR به دست می‌آید (رابطه ۵):

$$C_r = k' k'' T_r \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4A} \quad \text{رابطه (۵)}$$

به منظور کاهش بیش‌برآوردی مدل WWM از ضریب k'' استفاده می‌شود. این ضریب از نسبت چسبندگی ریشه در FBM به WWM به دست می‌آید و مقدار آن بسته به گونه‌های درختی مختلف و تراکم ریشه بین ۰/۳۲ تا یک متغیر

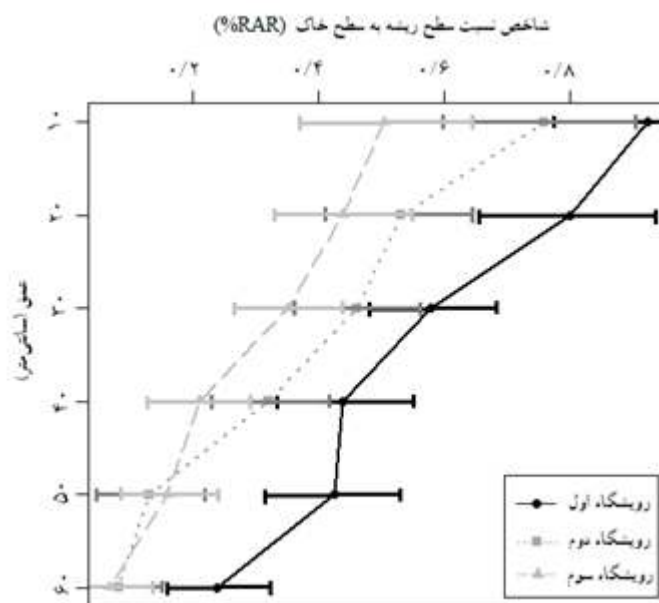
تجزیه و تحلیل داده‌ها

ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-سمیرنوف ارزیابی شد. بررسی رابطه بین مقاومت کششی و قطر از طریق رگرسیون توانی محاسبه شد. از آزمون ANCOVA برای مقایسه مقدار RAR بین طبقه های قطری مختلف و تعداد و چسبندگی ریشه‌ها با در نظر گرفتن عمق خاک به عنوان عامل کواریت استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها در نرم افزار R انجام شدند.

نتایج

توزیع ریشه درختان ممرز در ۶۳ پروفیل خاک برای سه فاصله از درخت و سه رویشگاه مورد مطالعه بررسی شد. شکل ۲ نشان می‌دهد که درصد RAR با افزایش عمق خاک کم می‌شود. بیشینه این شاخص برای سه رویشگاه در ۴۰ سانتی‌متر ابتدایی خاک به دست آمد. براساس شکل ۳، بیشترین مقدار ریشه‌های نازک نیز تا همین عمق مشاهده

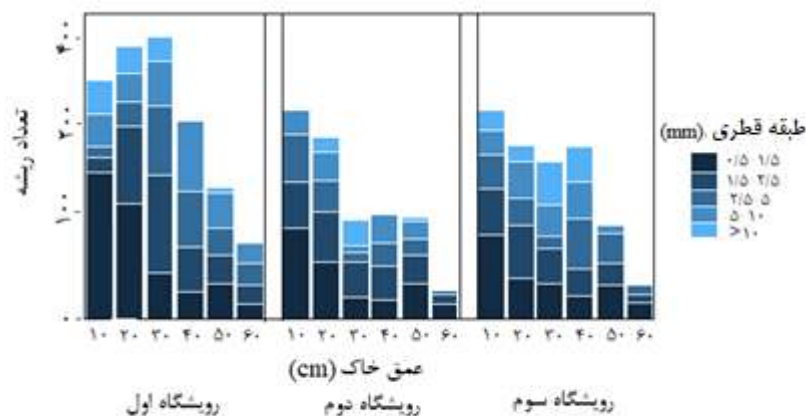
شد. همچنین، بیشینه عمق ریشه‌دوانی، ۶۰ سانتی‌متر بود. درصد RAR در فاصله‌های مختلف ($p < 0.001$)، در عمق‌های مختلف ($F=103/166$)، و در سه رویشگاه ($F=234/172$) اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۱). در هر سه رویشگاه، کمترین درصد این شاخص در عمق های ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر مشاهده شد. فراوانی تجمعی شاخص RAR در رویشگاه اول (۲/۷۶۳ درصد) بیشتر از رویشگاه‌های دوم (۱/۹ درصد) و سوم (۱/۸۶۲ درصد) به دست آمد. همچنین، پراکنش این شاخص بین طبقه‌های قطری ریشه در سه رویشگاه مورد بررسی متفاوت بود. شکل ۳، تعداد ریشه در هر طبقه قطری در سه رویشگاه را نشان می‌دهد. براساس این شکل، با افزایش عمق از تعداد ریشه‌های نازک (۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر) و قطور (بیشتر از ۱۰ میلی‌متر) کم شد. همچنین، بیشتر ریشه‌های قطور در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک دیده شدند.



شکل ۲- شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) در عمق‌های مختلف خاک در سه رویشگاه مورد مطالعه

جدول ۱- جدول ANCOVA برای تغییرات شاخص RAR در عمق‌ها، فاصله‌ها و رویشگاه‌های مختلف

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
عمق	۱	۰/۷۵	۰/۷۵	۲۳۴/۱۷۲	۰/۰۰
فاصله	۱	۰/۳۳	۰/۳۳	۱۰۳/۱۶۶	۰/۰۰
رویشگاه	۲	۰/۲۴۱	۰/۱۲۱	۳۷/۶۶۲	۰/۰۰
اثر متقابل	۱	۲/۳۸۸	۲/۳۸۸	۷۴۶/۰۲۴	۰/۰۰



شکل ۳- تعداد ریشه در طبقه‌های قطری مختلف (میلی‌متر) در عمق‌های مختلف سه رویشگاه

مقاومت کششی ریشه

رویشگاه سوم: $p < 0.001$ ($F=171/515$). همچنین، همبستگی منفی بین مقاومت کششی و قطر ریشه برای هر سه رویشگاه به دست آمد. معادله‌های توانی مربوط به رابطه بین این دو متغیر در رویشگاه اول برابر با $T_r = 189/63 d^{-1/0.81}$ ($R^2=0/8543$, $p < 0.001$)، در رویشگاه دوم $T_r = 127/93 d^{-0/861}$ ($p < 0.001$) و در رویشگاه سوم $T_r = 139/4 d^{-1/0.28}$ ($R^2=0/7518$) بودند. ($R^2=0/8537$, $p < 0.001$)

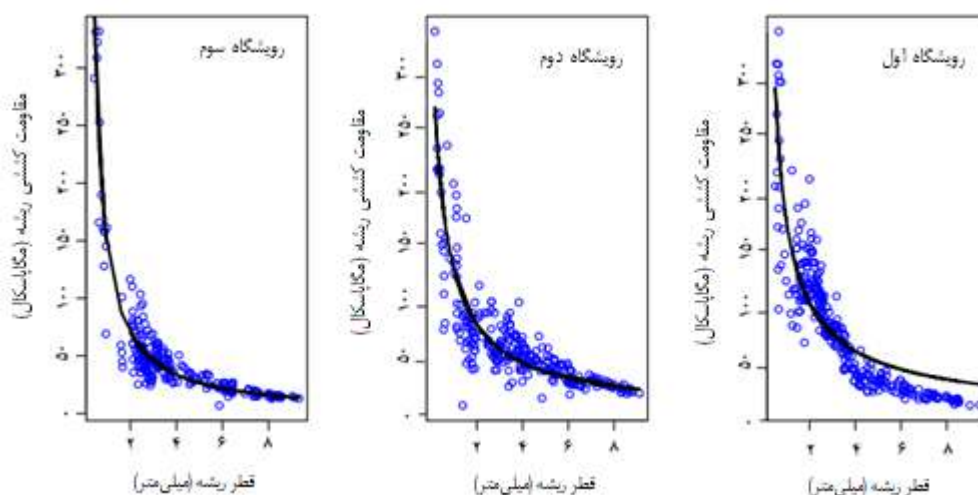
چسبندگی ریشه

نتایج مربوط به محاسبه چسبندگی خاک در حضور ریشه با استفاده از مدل‌های WWM و FBM در جدول ۲ ارائه شده است. طبق مدل WWM، متوسط چسبندگی ریشه در همه عمق‌ها برای رویشگاه‌های اول، دوم و سوم

در مجموع، ۸۴۸ نمونه ریشه درخت ممرز در آزمایش مقاومت کششی بررسی شد. دامنه تغییرات قطر این نمونه‌ها در رویشگاه اول ۰/۵ تا ۹/۴۵، رویشگاه دوم ۰/۵۶ تا ۹/۲۱ و رویشگاه سوم ۰/۴۵ تا ۹/۳۲ میلی‌متر بود. همچنین، کمینه و بیشینه مقاومت کششی در رویشگاه اول ۱۱/۵۲ تا ۳۲۳/۴۲، رویشگاه دوم ۶/۸۹ تا ۳۱۸/۷۹ و رویشگاه سوم ۶/۹۱ تا ۳۱۲/۶۶ مگاپاسکال برآورد شد. شکل ۴، مقاومت کششی با توجه به قطر در سه رویشگاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. آنالیز ANCOVA برای مقاومت کششی و قطر ریشه به عنوان عامل کواریت نشان داد که رابطه بین مقاومت کششی و قطرهای مختلف در هر سه رویشگاه معنی‌دار است (رویشگاه اول: $p < 0.001$ ، $F=559/482$ ، رویشگاه دوم: $p < 0.001$ ، $F=267/189$ و

مقدار چسبندگی اضافه شده به خاک در حضور ریشه با افزایش عمق خاک همانند تغییرات شاخص RAR (طبق تابع لگاریتمی) کاهش یافت (شکل ۵). بیشترین چسبندگی در عمق کمتر از ۱۰ سانتی متر مشاهده شد که بیشترین پراکنش ریشه را نیز دارد.

به ترتیب برابر با ۴/۰۴ تا ۶۱/۳۷، ۵/۷ تا ۵۳/۱۸ و ۴/۶ تا ۴۶/۶۶ کیلوپاسکال بود. در مدل چسبندگی ریشه در رویشگاه اول ۱/۲۲ تا ۲۷/۴۸، در رویشگاه دوم ۱/۸۷ تا ۲۴/۲۲ و در رویشگاه سوم ۱/۸۵ تا ۱۹/۰۴ کیلوپاسکال به دست آمد. در هر سه رویشگاه،

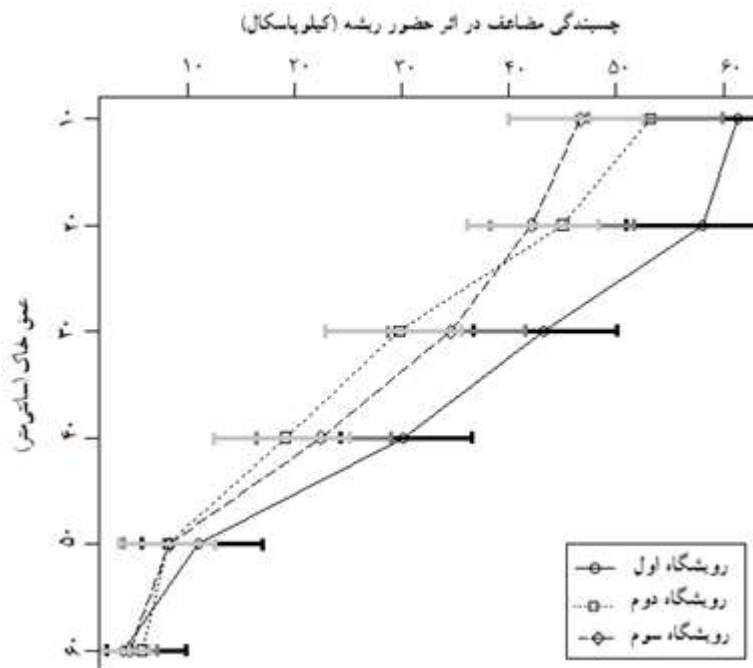


شکل ۴- رابطه بین مقاومت کششی و قطرهای مختلف ریشه در سه رویشگاه

جدول ۲- چسبندگی خاک در حضور ریشه با استفاده از مدل‌های WWM و FBM در سه رویشگاه مورد مطالعه (میانگین ± اشتباه

معیار)

عمق (سانتی متر)	C _{FBM} (kPa)			C _{WWM} (kPa)		
	رویشگاه سوم	رویشگاه دوم	رویشگاه اول	رویشگاه سوم	رویشگاه دوم	رویشگاه اول
۰-۱۰	۱۹/۰۴ ± ۲/۱۴	۲۴/۲۲ ± ۱/۰۴	۲۷/۴۸ ± ۰/۲۵	۴۶/۶۶ ± ۱/۱۴	۵۳/۱۸ ± ۱/۲۲	۶۱/۳۷ ± ۱/۰۹
۱۰-۲۰	۱۴/۳۶ ± ۰/۱۵	۱۸/۳۲ ± ۰/۱۷	۲۳/۱۲ ± ۱/۱۷	۴۲/۱۶ ± ۱/۰۹	۴۵/۰۱ ± ۱/۱	۵۸/۱۲ ± ۱/۱۱
۲۰-۳۰	۱۱/۰۹ ± ۱/۳	۱۱/۶۵ ± ۱/۱۲	۱۵/۷ ± ۲/۳۴	۳۴/۵۶ ± ۱/۶۲	۲۹/۷۴ ± ۰/۱۹	۴۳/۲۳ ± ۰/۶۵
۳۰-۴۰	۷/۶۱ ± ۰/۱۳	۶/۱۱ ± ۱/۲۹	۹/۱۴ ± ۰/۳۶	۲۲/۴۱ ± ۰/۱۲	۱۹/۱۲ ± ۰/۱۴	۳۰/۱۲ ± ۰/۰۸
۴۰-۵۰	۳/۱۶ ± ۰/۰۳	۲/۷۶ ± ۰/۱۲	۳/۵۸ ± ۰/۱	۸/۲۸ ± ۱/۳۶	۸/۱۶ ± ۰/۳۵	۱۱/۰۳ ± ۰/۱۶
۵۰-۶۰	۱/۸۵ ± ۱/۱۸	۱/۸۷ ± ۱/۰۹	۱/۲۲ ± ۱/۰۴	۴/۶ ± ۰/۱۸	۵/۷ ± ۰/۱۲	۴/۰۴ ± ۰/۴۵



شکل ۵- چسبندگی مضاعف خاک در حضور ریشه ممرز در عمق‌های مختلف برای سه رویشگاه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو، بیشینه ریشه‌دوانی ممرز برای هر سه رویشگاه در عمق ۶۰ سانتی‌متر مشاهده شد. این یافته با نتایج Abdi و همکاران (۲۰۰۹) و Deljouei و همکاران (۲۰۱۹) در خیرودکنار نوشهر مطابقت دارد. همچنین، بیشتر ریشه‌ها در چند سانتی‌متر ابتدایی پروفیل خاک مشاهده شد. Bordonni و همکاران (۲۰۱۶) و Moresi و همکاران (۲۰۱۹) نتایج مشابهی را گزارش کردند. تراکم ریشه‌های نازک (با قطر کمتر از ۱/۵ میلی‌متر) از ریشه‌های با قطر متوسط (با قطر ۱/۵ تا ۱۰ میلی‌متر) در لایه ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متری خاک بیشتر بود. با این حال، ریشه‌های با قطر متوسط در این لایه، مشارکت بیشتری نسبت به لایه‌های دیگر داشتند، بنابراین شاخص RAR بیشتر به اندازه ریشه نسبت به تعداد ریشه حساس است.

یافته‌ها نشان داد که مقاومت کششی ریشه ممرز از یک رابطه توانی کاهشی تبعیت می‌کند، به طوری که مقدار این متغیر با افزایش قطر کاهش یافت. یافته‌های مشابهی برای بعضی گونه‌های دیگر توسط Zhong و همکاران (۲۰۱۶)،

بحث

در هر سه رویشگاه مورد مطالعه، بیشترین مقدار شاخص RAR در ۴۰ سانتی‌متر ابتدایی خاک مشاهده شد و با افزایش عمق تا ۶۰ سانتی‌متر از مقدار آن کاسته شد. در بسیاری از پژوهش‌ها، روند مشابهی برای توزیع RAR در گونه‌های مختلف جنگلی گزارش شده است (Wang *et al.*, 2017). در پژوهش پیش‌رو، رابطه‌های معنی‌داری بین توزیع شاخص RAR در عمق‌های مختلف، فاصله‌های مختلف از درخت و نیز بین سه رویشگاه مشاهده شد. این یافته با نتایج پژوهش‌های Bordonni و همکاران (۲۰۱۶) و Zhong و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. شاخص RAR تحت تأثیر عمق و نوع خاک، ژنتیک و نوع گونه جنگلی، رویشگاه و آب‌وهوا قرار دارد (Bischetti *et al.*, 2005). در لایه‌های زیرین خاک، ذرات مترکم‌تر و مواد غذایی و هوادهی کمتر هستند، بنابراین با افزایش عمق خاک، شاخص مذکور کاهش می‌یابد (Bischetti *et al.*, 2005). بیشینه عمق ریشه‌دوانی به رویشگاه و گونه بستگی دارد. در

تری دارند، مقدار α بیشتر و β کمتری دارند که می‌توان علت آن را با تفاوت ساختار ریشه بین گونه‌های مختلف مرتبط دانست (Burylo *et al.*, 2011).

چسبندگی ظاهری ریشه با استفاده از دو مدل WWM و FBM برای محاسبه میزان تنش‌های استاتیک و پویا در خاک استفاده شد. در مدل WWM فرض بر این است که همه ریشه‌های در مجاورت سطح برش در یک‌زمان گسیخته می‌شوند. این مدل، تنش‌های استاتیک را در جریان برش محاسبه می‌کند، اما ریشه‌ها در مدل FBM بیشینه مقاومت کششی متفاوتی دارند، بنابراین در زمان‌های متفاوتی گسیخته می‌شوند. مدل مذکور برای برآورد مقدار بار پویا بر خاک در جریان زمین‌لغزش‌های سطحی استفاده می‌شود (Stokes *et al.*, 2009). در پژوهش پیش‌رو از این دو مدل برای برآورد نقش سیستم ریشه در پایداری شیب در جریان خطرات زمین‌شناسی مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که تنش استاتیک، چسبندگی ظاهری بیشتری نسبت به تنش پویا در خاک ایجاد می‌کند (جدول ۲). در پژوهش‌های دیگر نیز گسیختگی ریشه در یک‌زمان بین دو مدل WWM و FBM مقایسه شد (Wang *et al.*, 2013; Adhikari *et al.*, 2017). در این پژوهش‌ها، انسجام ریشه در WWM مقدار بیشتری به‌دست آمد. این یافته‌ها حاکی از آن است که مدل WWM چسبندگی ریشه را بیشتر از مقدار واقعی آن محاسبه می‌کند (Bischetti *et al.*, 2009). در مقابل، تنش پویا موجب گسیختگی پی‌درپی ریشه‌ها می‌شود (Wang *et al.*, 2017). در واقع، زمانی‌که مقدار بار اعمال‌شده بیشتر از مقاومت کششی یک ریشه باشد، ریشه گسیخته می‌شود. سپس، تنش بر ریشه‌های دیگر توزیع می‌شود (Pollen & Simon, 2005). از سوی دیگر، هر ریشه مقدار برابری از بار اعمال‌شده را تحمل می‌کند (Wang *et al.*, 2017).

چسبندگی ظاهری ریشه در خاک رویشگاه اول بیشتر از دو رویشگاه دیگر بود. تغییرات این پارامتر با توزیع RAR که روند مشابهی را نشان می‌دهد و متغیر اصلی در چسبندگی خاک در حضور ریشه است، مطابقت دارد (Federica *et al.*, 2017). چسبندگی ریشه از طریق

Deljouei و همکاران (۲۰۱۸) و Moresi و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شد. عوامل بسیاری مانند ویژگی‌های خاک، خصوصیات ریشه همچون سن، پوست، ساختار (Genet *et al.*, 2005)، اندازه، ریخت‌شناسی و توزیع آن و نیز نوع گونه (Gentile *et al.*, 2010) بر مقاومت کششی ریشه تأثیر می‌گذارند.

نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو حاکی از آن بود که ریشه‌های نازک، مقاومت بیشتری در مقابل کشش و استرس نسبت به ریشه‌های قطور دارند (Bischetti *et al.*, 2005). مهم‌ترین دلیل این یافته می‌تواند کاهش نسبت سلولز در ریشه‌های قطور در مقایسه با ریشه‌های نازک باشد (Zhang *et al.*, 2014). Genet و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که غلظت سلولز بر مقاومت کششی ریشه تأثیرگذار است، به طوری‌که افزایش سلولز موجب استحکام بیشتر ریشه‌ها می‌شود. غلظت لیگنین، یکی دیگر از عوامل مؤثر بر مقاومت کششی ریشه محسوب می‌شود. با این حال، تغییرات مقاومت کششی گونه‌ها به شرایط مختلف محیط رویش شامل رطوبت خاک، خصوصیات فیزیکی ریشه، شرایط نگهداری آن در طی آزمایش، زمان سپری‌شده پیش از آزمایش و تفاوت در دستگاه اندازه‌گیری مقاومت کششی نیز بستگی دارد (Bischetti *et al.*, 2009).

در پژوهش Abdi و همکاران (۲۰۰۹)، مقاومت کششی ریشه مرمرز برای دامنه قطری ۰/۳ تا ۴/۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۱/۷۲ و ۶۲/۲۰ مگاپاسکال برآورد شد. همچنین، Deljouei و همکاران (۲۰۱۸) مقاومت کششی را برای ریشه همین گونه ۲۵/۷ تا ۵۶/۷ مگاپاسکال در بالای شیب و ۲۳/۶ تا ۴۸/۲ در پایین شیب گزارش کردند. در پژوهش پیش‌رو، میانگین مقاومت کششی ریشه مرمرز ۱۱/۵۲ تا ۴۹/۶۸ مگاپاسکال در دامنه قطری ۰/۶۴ تا ۵/۳۴ میلی‌متر به‌دست آمد. این نتایج متفاوت را می‌توان به شرایط محیطی مختلف و یا در نظر گرفتن دامنه‌های قطری متفاوت توسط پژوهشگران مختلف نسبت داد. در پژوهش پیش‌رو، ضریب‌های α و β برای مرمرز به ترتیب ۴۸/۶ و ۰/۴۵- برآورد شد (رابطه ۶). درکل، گونه‌هایی که ریشه‌های قوی

استفاده از WWM فقط برای طبقه‌بندی گونه‌ها براساس پتانسیل آن‌ها در مسلح‌سازی خاک می‌تواند مفید باشد (Adhikari et al., 2013).

تاکنون در ایران، مسلح‌سازی خاک برای بسیاری از گونه‌های درختی با استفاده از مدل WWM بررسی شده است، درحالی‌که براساس یافته‌های بسیاری از پژوهشگران، مقدار مسلح‌سازی خاک در این مدل بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌شود. همین امر موجب کاهش دقت حداقل ۱۰ درصدی از عامل پایداری (Factor of safety) می‌شود (Schwarz et al., 2010). Bischetti و همکاران (۲۰۰۹) مقدار مسلح‌سازی *Castanea sativa* با استفاده از مدل FBM را ۱۹ کیلوپاسکال محاسبه کردند، اما Schwarz و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل WWM، این متغیر را برای گونه مذکور ۳۸ تا ۵۰ کیلوپاسکال به‌دست آوردند. همچنین، Abdi (۲۰۰۹) چسبندگی خاک در حضور ریشه‌های ممرز با استفاده از مدل WWM را چهار تا ۶۸ کیلوپاسکال محاسبه کرد، در حالی‌که در پژوهش پیش‌رو با استفاده از مدل FBM، این پارامتر برابر با ۱/۲۲ تا ۲۷/۴۸ کیلوپاسکال برآورد شد. در بین شیوه‌های جدید محاسبه مسلح‌سازی خاک، مدل مذکور نیاز به متغیرهای کمتری دارد و به‌آسانی قابل محاسبه است، بنابراین به‌منظور بررسی دقیق میزان مسلح‌سازی خاک، استفاده از روش‌های نوین مانند FBM که بر مبنای ویژگی‌هایی مانند قطر و آستانه مقاومت کششی ریشه به‌کار می‌روند، توصیه می‌شوند.

منابع مورد استفاده

- Abdi, E., 2009. An investigation of the effect of tree roots in slope stability in order to use in practical forest road construction and bioengineering. Ph.D. thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, 89p (In Persian).
- Abdi, E., 2014. Effect of Oriental beech root reinforcement on slope stability (Hyrcanian Forest, Iran). *Journal of Forest Science*, 60(4): 166-173.
- Abdi, E., Majnounian, B., Rahimi, H. and Zobeiri, M., 2009. Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of

مقاومت کششی که تابعی از قطر ریشه و تراکم آن است، محاسبه می‌شود، به‌طوری‌که ریشه‌های نازک، چسبندگی بیشتری ایجاد می‌کنند (Adhikari et al., 2013). مسلح‌سازی خاک در اثر حضور ریشه با افزایش عمق، روند کاهشی داشت. Bordonni و همکاران (۲۰۱۶) و Abdi و همکاران (۲۰۰۹) نیز به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند. درواقع، به‌دلیل تجمع ریشه در لایه‌های ابتدایی خاک، مقدار چسبندگی بیشتری در مقایسه با عمق خاک وجود دارد. با استفاده از مدل WWM، مقدار مسلح‌سازی خاک توسط ریشه حدود ۴۰ تا ۶۰ کیلوپاسکال در ۲۰ سانتی‌متر اول پروفیل و کمتر از ۱۰ کیلوپاسکال در لایه‌های عمیق‌تر خاک محاسبه شد. این نتیجه با یافته‌های Abdi و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد. مقدار مسلح‌سازی با استفاده از مدل FBM در عمق کمتر از ۲۰ سانتی‌متر، حدود ۱۵ تا ۳۰ کیلوپاسکال و در عمق‌های بیشتر، کمتر از پنج کیلوپاسکال به‌دست آمد. Mao و همکاران (۲۰۱۲) و Wang و همکاران (۲۰۱۷) نتایج مشابهی را گزارش کردند.

چسبندگی خاک در منطقه مورد مطالعه ۳۲/۴۸ کیلوپاسکال گزارش شد (Ghorbannezhad, 2014). با توجه به یافته‌های پژوهش پیش‌رو می‌توان نتیجه گرفت که چسبندگی خاک در حضور ریشه درختان نسبت به چسبندگی خاک منطقه بیشتر است. طبق نتایج چسبندگی با استفاده از مدل WWM، وجود ریشه درختان در خاک سبب افزایش مسلح‌سازی خاک می‌شود. براساس یافته‌های پژوهش‌های پیشین (Bischetti et al., 2009; Adhikari et al., 2013; Wang et al., 2017) مدل WWM نسبت به FBM، چسبندگی خاک در حضور ریشه را بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. در مدل WWM، قطر ریشه‌ها و مقاومت کششی آن‌ها برای محاسبه مقدار چسبندگی در نظر گرفته نمی‌شود. به همین دلیل بسیاری از پژوهشگران (Pollen & Simon, 2005; Bischetti et al., 2009; Mao et al., 2012) برای کاهش بیش‌برآوردی این مدل از ضریب تصحیح "k" استفاده کردند. در پژوهش پیش‌رو، این نسبت بین ۰/۳۲ تا ۰/۵ به‌دست آمد، بنابراین چسبندگی خاک با

- Management, 256(8): 1517-1526.
- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S.B., Fourcaud, T., Dumail, J.F. and van Beek, R., 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 278: 1-9.
 - Gentile, F., Elia, G. and Elia, R., 2010. Analysis of the stability of slopes reinforced by roots. *Design and Nature V, WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138: 198-200.
 - Ghorbannezhad, S., 2014. Reinforcement of deep trenches in clay and sticky soils in Sarcheshme. MSc. thesis, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Chalous, Chalous, 104p (In Persian).
 - Giadrossich, F., Cohen, D., Schwarz, M., Seddaiu, G., Contran, N., Lubino, M., ... and Niedda, M., 2016. Modeling bio-engineering traits of *Jatropha curcas* L. *Ecological Engineering*, 89: 40-48.
 - Gysseels, G., Poesen, J., Bochet, E. and Li, Y., 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 29(2): 189-217.
 - Hidalgo, R.C., Kun, F. and Herrmann, H.J., 2001. Bursts in a fiber bundle model with continuous damage. *Physical Review E*, 64(6): 066122.
 - Mao, Z., Saint-André, L., Genet, M., Mine, F.X., Jourdan, C., Rey, H., ... and Stokes, A., 2012. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45: 55-69.
 - Moresi, F.V., Maesano, M., Matteucci, G., Romagnoli, M., Sidle, R.C. and Scarascia Mugnozza, G., 2019. Root biomechanical traits in a montane Mediterranean forest watershed: Variations with species diversity and soil depth. *Forests*, 10(4): 341.
 - Naghdi, R., Maleki, S., Abdi, E., Mousavi, R. and Nikooy, M., 2013. Assessing the effect of *Alnus* roots on hillslope stability in order to use in soil bioengineering. *Journal of Forest Science*, 59(11): 417-423.
 - Pollen, N. and Simon, A., 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41(7): W07025.
 - Schwarz, M., Giadrossich, F. and Cohen, D., 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11): 4367-4377.
 - Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P. and Or, D., 2010. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering*, 36(3): 285-291.
 - Sidle, R. and Bogaard, T., 2016. Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated Caspian Forests, Iran. *Journal of Forestry Research*, 20(2): 105-110.
 - Adhikari, A.R., Gautam, M.R., Yu, Z., Imada, S. and Acharya, K., 2013. Estimation of root cohesion for desert shrub species in the Lower Colorado riparian ecosystem and its potential for stream bank stabilization. *Ecological Engineering*, 51: 33-44.
 - Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, E. and Morlotti, E., 2009. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324: 71-89.
 - Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P. and Zocco, A., 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, 278: 11-22.
 - Bordoni, M., Meisina, C., Vercesi, A., Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Vergani, C., ... and Cislighi, A., 2016. Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides. *Soil and Tillage Research*, 163: 195-206.
 - Burylo, M., Hudek, C. and Rey, F., 2011. Soil reinforcement by the root system of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena*, 84(1-2): 70-78.
 - Daniels, H.E., 1945. The statistical theory of the strength of bundles of threads. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 183(995): 405-435.
 - Deljouei, A., Abdi, E., Majnounian, B. and Schwarz, M., 2018. Comparing roots mechanical characteristics of hornbeam trees in different diameter at breast height classes. *Forest and Wood Products*, 71(3): 199-207 (In Persian).
 - Deljouei, A., Abdi, E., Majnounian, B. and Schwarz, M., 2019. Roots spatial distribution of *Carpinus betulus* in lowland Hyrcanian forests (Kheyroud forest, Nowshahr). *Journal of Forest Research and Development*, 4(4): 477-488 (In Persian).
 - Dupuy, L., Fourcaud, T. and Stokes, A., 2005. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science*, 56(3): 319-327.
 - Federica, G., Chiara, V., Rodolfo, G., Anne, B., Pierre, C., Sandra, C. and Chiaradia, E.A., 2017. Root characteristics of herbaceous species for topsoil stabilization in restoration projects. *Land Degradation and Development*, 28(7): 2074-2085.
 - Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Fourcaud, T., Cai, X., Ji, J. and Mickovski, S., 2008. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and*

- mitigation: A case study from Gansu province, China. *Geomorphology*, 282: 64-73.
- Wu, T.H., McKinnell III, W.P. and Swanston, D.N., 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1): 19-33.
 - Zhang, C.B., Chen, L.H. and Jiang, J., 2014. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology*, 206 :196-202.
 - Zhong, R.H., He, X.B., Bao, Y.H., Tang, Q., Gao, J.Z., Yan, D.D., ... and Li, Y., 2016. Estimation of soil reinforcement by the roots of four post-dam prevailing grass species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Mountain Science*, 13(3): 508-521.
 - landslides. *Earth Science Reviews*, 159:275-291.
 - Stokes, A., Atger, C., Bengough, A.G., Fourcaud, T. and Sidle, R.C., 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 324: 1-30.
 - Vergani, C., Schwarz, M., Cohen, D., Thormann, J.J. and Bischetti, G.B., 2014. Effect of root tensile force and diameter distribution variability on root reinforcement in the Swiss and Italian Alps. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(11): 1426-1440.
 - Waldron, L.J., 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(5): 843-849.
 - Wang, S., Meng, X., Chen, G., Guo, P., Xiong, M. and Zeng, R., 2017. Effects of vegetation on debris flow

Investigation of soil reinforcement according to the root cohesion changes in hornbeam (*Carpinus betulus* L.)

S. Karamirad ^{1*}, M. Lotfalian ², E. Shooshpasha ³, H. Jalilvand ² and F. Giadrossich ⁴

1* - Corresponding author, Ph.D. Student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: s.karamirad64@gmail.com

2- Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

3- Associate Prof., Department of Geotechnic, Faculty of Civil Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

4- Prof., Forestry and Environmental Science, Department of Agriculture, Sassari University, Sassari, Italy

Received: 08.05.2020

Accepted: 28.08.2020

Abstract

The degree of soil cohesion investigation through the presence of roots is one of the important criteria in soil reinforcement studies. In this study, the investigation and comparison of the degree of soil cohesion have been carried out using two models of WWM and FBM. For this purpose, seven hornbeam (*Carpinus betulus* L.) trees were selected in each three sites of chalos sarcheshme forest, series one. Then profile trenching method was used to analyze and compare root distribution and standard instron device have been measured tensile strength, respectively. The root area ratio (RAR) has decreased with increasing depth, and the maximum value of RAR in the three sites is seen at about 40 cm from the beginning, and the maximum depth of rooting is 60 cm. The results confirmed that there was a power law relationship between root diameter and tensile strength. The minimum and maximum tensile strength was estimated at 11.52-323.42, 6.89-318.79 and 6.91-312.66 MPa, in diameter range of 0.5-9.45, 0.56-9.21, 0.45-9.32 in the first, second and third site, respectively. In all three sites, the amount of soil cohesion through the presence of roots using the WWM model was 4.04-61.37, 5.7-53.18, 4.6-46.66 kpa and in FBM model the root cohesion in all depth was 1.22-27.48, 1.87-24.22, 1.85-19.04 kpa in the first, second and third site, respectively. Comparison of these two models increases our knowledge of the biomechanical features of the hornbeam species and more accurately determines the amount of soil reinforcement to be used in the future in the management of natural phenomena such as landslides.

Keywords: Bioengineering, FBM model, root tensile strength, soil stability, WWM model.