



ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی ریشه نهال برخی گونه‌های درختی

صغری کی‌بندری^۱، احسان عبدی^{۲*}، زاهد شاکری^۳ و وحید اعتماد^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
^۲ دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
^۳ پژوهشگر، گروه تعاملات اکولوژیک-اجتماعی در بوم‌سازگان‌های کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی ارگانیک، دانشگاه کاسل، ویتمن‌هاوزن، آلمان

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲)

چکیده

رفتار مکانیکی ریشه پوشش گیاهی به‌طور چشمگیری سازوکار مسلح‌سازی خاک و پایداری دامنه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف این پژوهش، تعیین ویژگی‌های مکانیکی ریشه نهال برخی گونه‌های درختی در بخش نم‌خانه جنگل خیرود بود. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی ریشه از سه گونه افراپلت (*Acer velutinum* Boiss.)، ممرز (*Carpinus betulus* L.) و راش (*Fagus orientalis* Lipsky.)، ده نمونه به‌طور کامل از خاک خارج شد. سپس تعداد کافی نمونه ریشه از هر گونه جمع‌آوری شد و آزمایش‌های مکانیکی روی آنها انجام گرفت. نتایج نشان داد که در هر سه گونه با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی ریشه براساس رابطه توانی مثبت، و مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه براساس رابطه توانی منفی تغییر می‌یابد. آنالیز کوواریانس نشان‌دهنده تفاوت نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه در گونه‌های مختلف است. بر این اساس، میانگین نیروی کششی و مقاومت کششی برای گونه ممرز به ترتیب با ۴۸ و ۴۰ درصد بیشتر از گونه راش و افراپلت و میانگین مدول یانگ ریشه گونه راش با ۳۸ درصد به‌طور معنی‌داری بیشتر از گونه ممرز و افراپلت بوده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که از ویژگی‌های مکانیکی ریشه می‌توان به‌عنوان عامل مهمی برای انتخاب نهال گونه‌های درختی در اهداف زیست‌مهندسی خاک استفاده کرد؛ بنابراین توصیه می‌شود این ویژگی‌ها در مدل‌های مسلح‌سازی خاک در نظر گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: حفاظت خاک، مدول یانگ ریشه، مکانیک ریشه، نهال گونه‌های درختی.

مقدمه

و افزایش هدررفت خاک، افزایش نرخ فرسایش، رسوب و ناپایداری دامنه‌ها می‌شود (Navarro Hevia et al., 2016).

محققان در پی دستیابی به روش‌هایی برای مسلح‌سازی خاک و افزایش پایداری دامنه‌اند و در این زمینه از روش‌های مختلفی همچون نیلینگ، سازه‌های نگهدارنده، ژئوسنتتیک و شاتکریت استفاده کرده‌اند (Eab et al., 2015). از نظر اقتصادی، این روش‌ها بسیار متمرکز و پرهزینه‌اند و کاربردی موضعی و محدود به دوره‌های بسیار کوتاه دارند و توسعه آنها در

بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران با مشکل افزایش آشفستگی‌ها و تخریب اکوسیستم‌های جنگلی مواجه‌اند. در بین آشفستگی‌هایی که در اکوسیستم‌ها رخ می‌دهد، ناپایداری‌های دامنه اثرهای زیادی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای دارد (Gobinath et al., 2021). افزایش لغزش‌های سطحی، تشدید ناپایداری دامنه و اثرهای منفی آن بر جوامع بشری یکی از دغدغه‌های بشر در قرن بیست‌ویکم است. این پدیده سبب کاهش حاصلخیزی

لغزش سطحی و زیست‌مهندسی پرداخته‌اند (Abdi et al., 2014; Wang et al., 2019; Moresi et al., 2019; Deljouei et al., 2020; Boldrin et al., 2021). با این حال تغییرات ویژگی‌های مکانیکی ریشه پوشش گیاهی و ارزیابی آن هنوز چالشی در زیست‌مهندسی به‌شمار می‌رود. به‌طور کلی ویژگی‌های مکانیکی ریشه دارای تغییرپذیری زیادی هستند و وابستگی زیادی به گونه گیاهی دارند (Hollis & Turner, 2019; Mao et al., 2012; Lee et al., 2017). Boldrin et al., 2017 برای نمونه به گفته Lee et al. (2021) و Boldrin et al. (2021) تفاوت‌های زیادی در نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه بین گونه‌های مختلف وجود دارد و برای گونه‌های مورد تحقیق آنان نیروی مقاومت کششی ریشه با افزایش قطر ریشه مطابق با تابع توانی مثبت افزایش یافت و مقاومت کششی ریشه و مدول یانگ ریشه با افزایش قطر ریشه مطابق با تابع توانی منفی کاهش پیدا کرد.

تا کنون همه پژوهش‌های داخلی فقط بر بررسی نیروی کششی ریشه و مقاومت کششی ریشه گونه‌های مختلف تمرکز داشته‌اند (Abdi et al., 2009, 2010; Naghdi et al., 2013; Kazemi et al., 2014; Deljouei et al., 2018; Abdi, 2018; Keybondori et al., 2018; Abdi & Deljouei, 2019; Mohammadrad et al., 2020; Afshar Sadr et al., 2020). با توجه به اینکه مدول یانگ ریشه از مهم‌ترین شاخص‌های ورودی برای مدل‌های جدید مسلح‌سازی خاک و پایداری دامنه به‌شمار می‌آید (Schwarz et al., 2010) و اطلاعات ملی در این زمینه برای گونه‌های گیاهی وجود ندارد، باید به بررسی این شاخص مهم برای گونه‌های مختلف پرداخت. از طرف دیگر، تاکنون پژوهش‌های جامع درباره ویژگی‌های مکانیکی ریشه نهال گونه‌های درختی انجام نگرفته است. بدین ترتیب با توجه به موارد بیان‌شده، هدف این پژوهش تعیین و بررسی نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه برای نهال گونه‌های درختی از قبیل افراپلت (Acer

عرصه‌های وسیع مانند عرصه‌های منابع طبیعی مقرون به صرفه نیست. با توجه به موارد ذکرشده، در سال‌های اخیر توجه محققان به استفاده از پوشش گیاهی برای کنترل فرسایش، لغزش‌های سطحی و ناپایداری دامنه معطوف شده است که با نام روش زیست‌مهندسی شناخته می‌شود (Maffra & Sutili, 2020).

پوشش گیاهی به‌ویژه سیستم ریشه آنها تأثیر مهمی در جلوگیری از لغزش‌های سطحی دارد (Moresi et al., 2019). ریشه گیاهان از طریق انتقال تنش برشی ایجادشده در خاک به نیروی کششی ریشه‌ها موجب افزایش مقاومت برشی می‌شود (Melese et al., 2021). بدین ترتیب مسلح‌سازی خاک توسط ریشه پوشش گیاهی تابعی از تراکم و ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌هاست (Zhang et al., 2021). سازوکار مسلح‌سازی مهم‌ترین ویژگی سیستم ریشه است که به ویژگی‌های مکانیکی ریشه بستگی دارد (Hairiah et al., 2020). ویژگی‌های مکانیکی ریشه شاخص‌های اساسی برای درک و کمی‌سازی مسلح‌سازی مکانیکی ریشه پوشش گیاهی‌اند و برای مدل‌سازی تثبیت خاک دامنه‌ها استفاده می‌شوند (Liang et al., 2017). ویژگی‌های مکانیکی ریشه مانند نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ (مدول کشسانی ریشه)^۱ منشأ اصلی مسلح‌سازی مکانیکی به حساب می‌آیند (Mao et al., 2012). نیروی کششی ریشه بیشینه نیروی لازم برای گسیخته شدن ریشه‌هاست. نسبت بیشینه نیروی لازم برای گسیختن ریشه به سطح مقطع ریشه، مقاومت کششی ریشه در نظر گرفته می‌شود (Abdi et al., 2014). مدول یانگ ریشه نیز بیانگر مقاومت به تغییر شکل کشسانی ریشه در راستای تنش اعمالی است (Mao et al., 2018).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری به بررسی ویژگی‌های مکانیکی ریشه برای گونه‌های مختلف در پایداری دامنه، مسلح‌سازی ریشه، کنترل فرسایش و

1. Root Young's modulus (Root elasticity modulus)

به کاررفته به منظور نگهداری و آماده‌سازی نمونه‌های ریشه شامل شست‌وشو، قرار دادن آنها در کیسه‌های پلاستیکی حاوی محلول آب و الکل ۱۵ درصد و نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود (Abdi, 2018). سپس نمونه ریشه‌های سالم به طول تقریبی ۱۰۰ میلی‌متر (Boldrin et al., 2017) به صورت تصادفی انتخاب و با استفاده از سیم‌چین تیز جدا شدند و قطر ریشه در سه قسمت مختلف وسط ریشه با دستگاه کولیس دیجیتال به دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های مکانیکی بعد از قرار دادن نمونه ریشه‌ها بین دو فک دستگاه سن‌تام استاندارد ساخت ایران (STM5) با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۰۱± نیوتن و جابه‌جایی در واحد طول ۰/۰۰۱± میلی‌متر انجام گرفت. سرعت آزمایش مقاومت کششی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد (Abdi et al., 2009). نیروی کششی (برحسب نیوتن) و مقاومت کششی (برحسب مگاپاسکال) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری و ثبت شدند. نمونه ریشه‌هایی که گسیختگی آنها از میان فک‌ها رخ داده بود برای محاسبه استفاده شدند. بدین ترتیب از ۱۰۰ نمونه ریشه آزمایش شده برای هر گونه، برای گونه افراپلت ۶۱ نمونه، برای گونه راش ۵۹ نمونه و برای گونه ممرز ۷۲ نمونه گسیختگی در وسط طول ریشه بین دو فک دستگاه رخ داد که برای محاسبه‌ها استفاده شدند. مدول یانگ ریشه (Er) از منحنی تنش- کرنش نمونه ریشه‌ها آزمایش شده برای گونه‌ها به دست آمد (Loades et al., 2013). مدول یانگ (برحسب مگاپاسکال) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$E_r = \frac{FL_0}{\pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \Delta L} \quad \text{رابطه ۱}$$

F بیشینه نیروی اعمال شده (نیوتن)، L_0 طول اولیه نمونه ریشه (میلی‌متر)، d قطر ریشه (میلی‌متر) و ΔL تغییر در طول ریشه (میلی‌متر) در طول آزمایش کشش است.

(*velutinum* Boiss.)، ممرز (*Carpinus betulus* L.) و راش (*Fagus orientalis* Lipsky.) است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

این پژوهش در سری نمخانه جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود دانشگاه تهران با مساحت ۱۰۸۰/۶۶ هکتار و تعداد ۲۷ پارسل (مساحت پارسل‌ها بین ۲۲ تا ۷۱/۹ هکتار) بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۹۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه انجام گرفت. جهت عمومی سری جنوبی- شمالی است و حداقل ارتفاع ۳۵۰ و حداکثر ارتفاع ۱۲۵۰ متر از سطح دریاست. متوسط بارندگی ۱۰۸۱ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۶/۱۵ درجه سانتی‌گراد است. خاک‌های سری اغلب روی سنگ مادری آهکی و به ندرت روی شیست و مارن آهکی مربوط به دوره ژوراسیک علیا قرار دارند. در بیشتر نقاط خاک قهوه‌ای کالسیک- قهوه‌ای شسته شده است. برای حذف اثرهای محیطی با جنگل‌گردشی‌های صورت گرفته، منطقه جل‌بن در ارتفاع ۹۵۰ متر از سطح دریا انتخاب شد. در این منطقه گونه‌های راش، ممرز و افراپلت با شرایط یکسان در کنار یکدیگر دارند. در این منطقه ناپایداری دامنه به‌ویژه زمین‌لغزش‌های کم‌عمق نیز وجود دارد.

شیوه اجرای پژوهش

نهال گونه‌های درختی افراپلت، ممرز و راش به دلیل غالب بودن و پراکنش وسیع روی دامنه‌های جاده برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی ریشه انتخاب شد. از هر گونه به روش کاملاً تصادفی ده نمونه نهال تقریباً سه‌ساله انتخاب و کدگذاری شد. نمونه‌های ریشه با استفاده از روش خارج کردن کل سیستم ریشه‌ای با حفر خاک جمع‌آوری شد (Afshar Sadr et al., 2020). بین زمان جمع‌آوری ریشه‌ها و آزمایش کمتر از ده روز اختلاف زمانی وجود داشت. تیمار

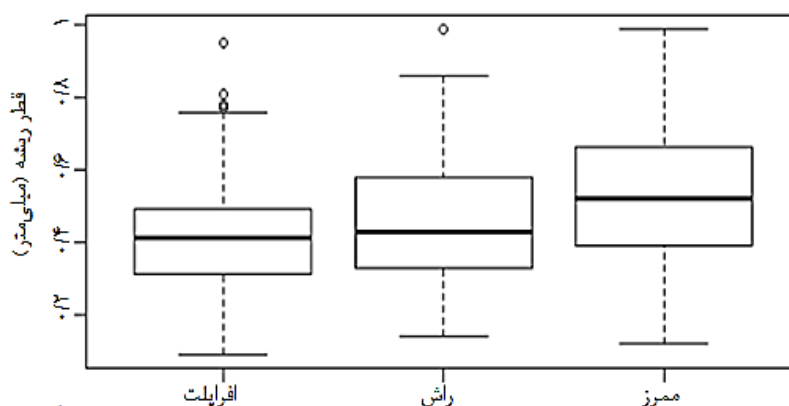
روش تحلیل

براساس سه نمودار توزیع قطر ریشه- نیروی کششی، قطر ریشه- مقاومت کششی و قطر ریشه- مدول یانگ، از مدل توانی برای مدل سازی نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه استفاده شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و برای نرمال سازی داده‌های نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه‌ها از تبدیل لگاریتمی استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل توانی در برآورد تغییرات نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه مقادیر ضرایب تعیین برای مدل محاسبه شد. برای بررسی وجود یا نبود اختلاف معنی دار مقاومت کششی و نیروی کششی و مدول یانگ ریشه برای گونه‌های مختلف نیز آنالیز کوواریانس

(با در نظر گرفتن قطر ریشه‌ها به عنوان عامل کواریت) به کار گرفته شد و در صورت معنی دار بودن اختلاف از آزمون توکی استفاده شد. همه تجزیه و تحلیل‌ها در نرم افزار R نسخه ۴/۰/۲ انجام گرفت.

نتایج

توزیع قطری ریشه‌ها برای گونه‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، توزیع میانگین داده‌های قطری برای هر سه گونه متفاوت بوده و برای گونه ممرز بیشتر از دو گونه افراپلت و راش بود. دامنه قطری ریشه‌ها در نمونه‌های افراپلت ۰/۰۹ تا ۰/۹۵ میلی‌متر، در نمونه‌های راش ۰/۱۴ تا ۰/۹۹ میلی‌متر و در نمونه‌های ممرز ۰/۱۲ تا ۰/۹۹ میلی‌متر بود.



شکل ۱- توزیع قطری ریشه‌ها برای گونه‌های مختلف

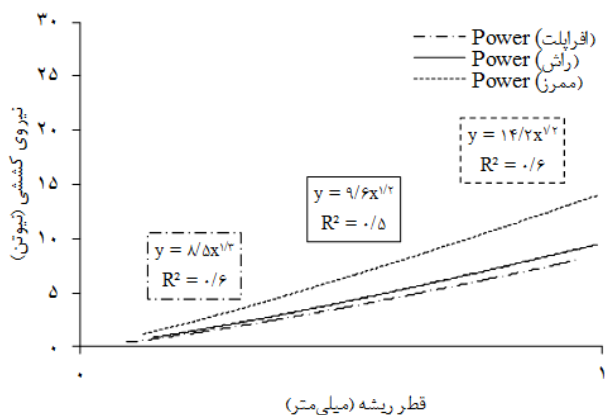
توزیع و تغییرات میانگین نیروی کششی ریشه‌ها برای گونه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس توزیع میانگین نیروی کششی برای گونه‌ها متفاوت بوده و برای گونه ممرز بیشتر از دو گونه افراپلت و راش است. کمینه و بیشینه نیروی کششی ریشه‌ها در نمونه‌های افراپلت به ترتیب ۰/۵ تا ۱۰/۸ نیوتن، در نمونه‌های راش به ترتیب ۰/۳۸ تا ۱۹/۳ نیوتن و در نمونه‌های ممرز به ترتیب ۱/۲ تا ۲۹/۲ نیوتن است. براساس نتایج آنالیز کوواریانس اثر متغیر گونه بر نیروی کششی معنی دار است ($F=50.03P<0.05$). مقایسه میانگین نشان داد که نیروی

نتایج آزمایش کشش ریشه نشان داد که در هر سه گونه با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی ریشه براساس تابع توانی مثبت افزایش می‌یابد (شکل ۲). در رابطه توانی نشان داده شده در شکل ۲، β مقدار افزایش نیرو به ازای افزایش قطر و α ضریب اندازه نامیده می‌شوند. از این رو هرچه مقدار β و α در رابطه بیشتر باشد، گونه دارای ریشه‌های قوی‌تری است.

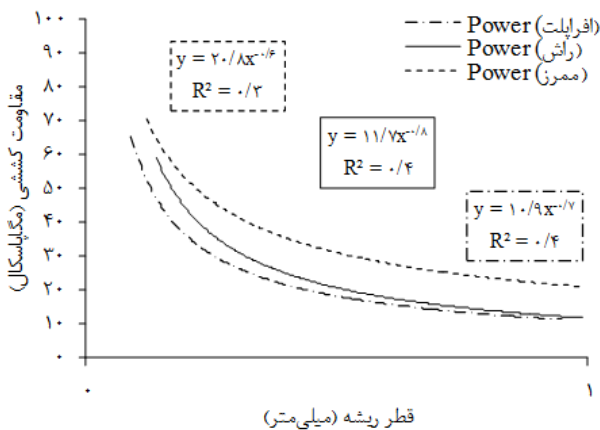
نتایج آزمایش مکانیکی ریشه نشان داد که در هر سه گونه با افزایش قطر ریشه، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه براساس تابع توانی منفی کاهش می‌یابد (شکل‌های ۳ و ۴).

دارند و میانگین نیروی کششی به ترتیب برای راش، ممرز و افراپلت ۴/۴۷، ۷/۳۹ و ۳/۴۰ نیوتن است.

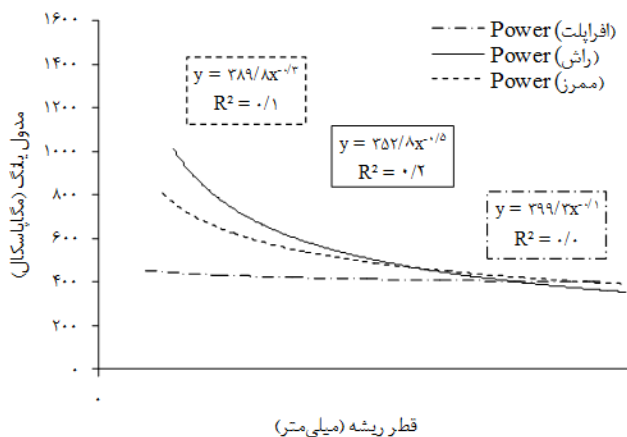
کششی گونه‌های راش و افراپلت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند، ولی با گونه ممرز تفاوت معنی‌داری



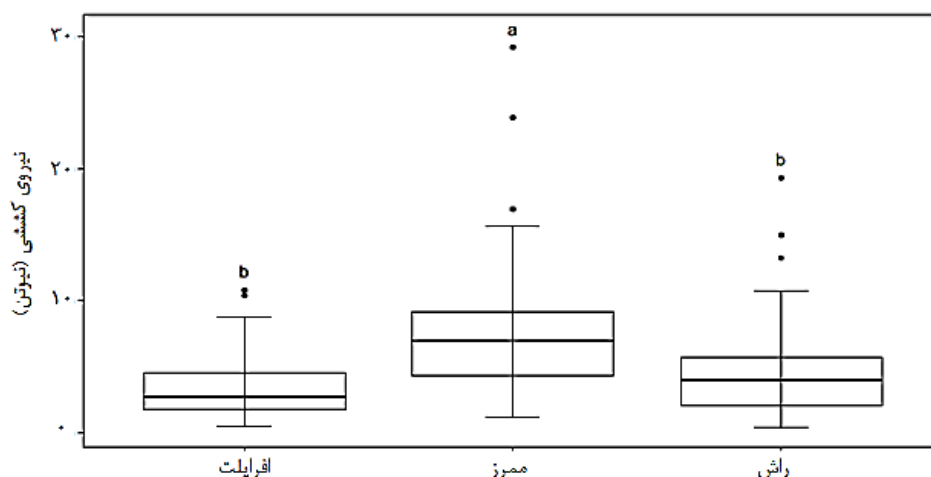
شکل ۲- رابطه نیروی کششی ریشه با قطر ریشه برای گونه‌های مختلف



شکل ۳- رابطه مقاومت کششی ریشه با قطر ریشه برای گونه‌های مختلف



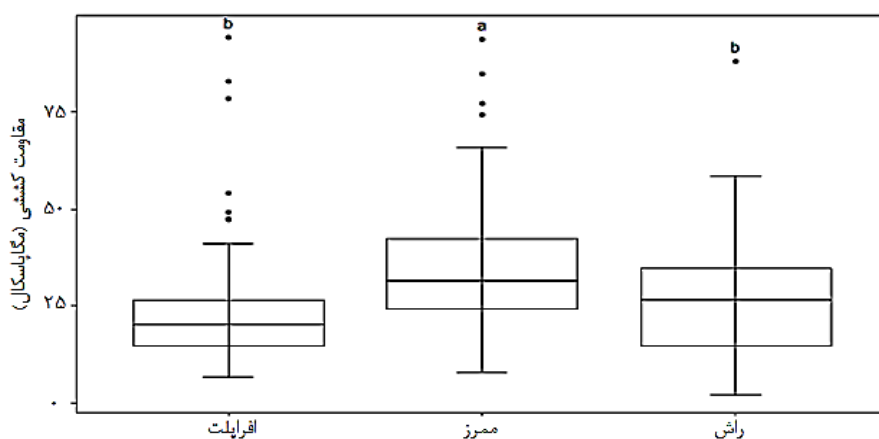
شکل ۴- رابطه مدول یانگ ریشه با قطر ریشه برای گونه‌های مختلف



شکل ۵- توزیع و تغییرات میانگین نیروی کششی ریشه گونه‌های مختلف. حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری اختلاف است.

در شکل ۶ توزیع و تغییرات میانگین مقاومت کششی برای گونه‌های مختلف نشان داده شده است. بر این اساس توزیع میانگین مقاومت کششی برای گونه‌ها متفاوت بوده و بیشترین توزیع میانگین مقاومت کششی برای گونه ممرز است. کمینه و بیشینه مقاومت کششی ریشه‌ها در نمونه‌های افراپلت به ترتیب ۶/۵۹ تا ۹۴/۳۱ مگاپاسکال، در نمونه‌های راش به ترتیب ۲/۱۰ تا ۸۸/۱۱ مگاپاسکال و در نمونه‌های ممرز به ترتیب ۷/۷۲ تا ۲۷/۶۱، ۳۵/۳۲ و ۲۵/۵۳ است.

توزیع میانگین مقاومت کششی ریشه گونه‌های مختلف. حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری اختلاف است. آنالیز کوواریانس نشان داد که اثر متغیر گونه بر مقاومت کششی نیز معنی‌دار است ($F=12/759, P<0/05$). همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقاومت کششی گونه‌های راش و افراپلت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند، ولی با گونه ممرز تفاوت معنی‌داری دارند. میانگین مقاومت کششی ریشه‌ها به ترتیب برای گونه‌های راش، ممرز و افراپلت ۲۷/۶۱، ۳۵/۳۲ و ۲۵/۵۳ است.



شکل ۶- توزیع و تغییرات میانگین مقاومت کششی ریشه گونه‌های مختلف. حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری اختلاف است.

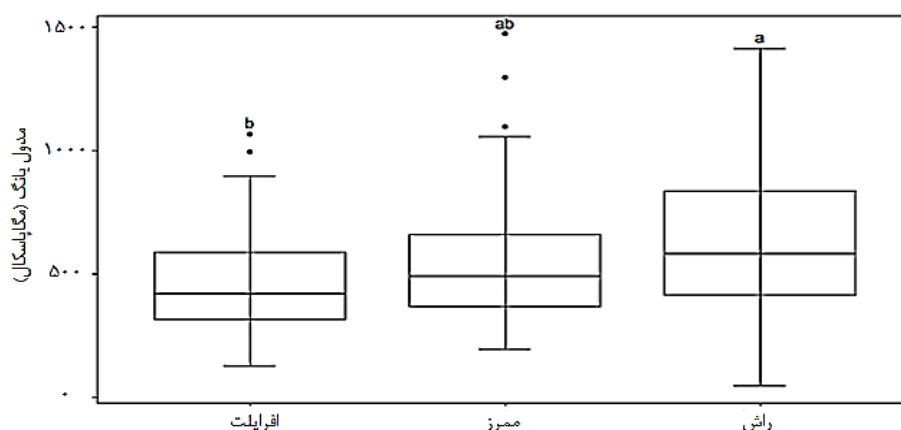
توزیع میانگین مدول یانگ برای راش است. کمینه و بیشینه مدول یانگ ریشه‌ها در نمونه‌های افراپلت به ترتیب ۱۲۷/۱۱ تا ۱۰۶۷/۳۵ مگاپاسکال، در نمونه‌های راش به ترتیب ۴۸/۷۰ تا ۱۴۱۳/۷۳

توزیع و تغییرات میانگین مدول یانگ ریشه‌ها برای گونه‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس توزیع میانگین مقاومت کششی و مدول یانگ برای گونه‌ها متفاوت بوده و بیشترین

گونه‌های راش و افراپلت ندارد. میانگین مدول یانگ به ترتیب برای راش، ممرز و افراپلت، ۶۳۵، ۵۵۳/۳۱ و ۴۶۵/۱۰ مگاپاسکال است.

در آنالیز کوواریانس اثر قطر ریشه به‌عنوان عامل کوواریت بر نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه معنی‌دار بود، بدین صورت که اگر اثر قطر ریشه در نظر گرفته نشود، سبب ایجاد خطا در نتایج می‌شود.

مگاپاسکال و در نمونه‌های ممرز به ترتیب ۱۹۷/۵۵ تا ۱۴۷۳/۰۳ مگاپاسکال است. با توجه به معنی‌دار شدن اثر گونه بر مدول یانگ در آنالیز کوواریانس ($F=6/909P<0/05$)، مقایسه میانگین مدول یانگ برای گونه‌های مختلف نشان داد که از نظر مقدار مدول یانگ، گونه‌های راش و افراپلت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند و میانگین مدول یانگ در گونه راش به‌طور معنی‌داری بیشتر از گونه افراپلت است. افزون‌بر این مدول یانگ در گونه ممرز تفاوت معنی‌داری با



شکل ۷- توزیع و تغییرات میانگین مدول یانگ ریشه گونه‌های مختلف. حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار است.

Lipsky (۱۹۵۸)، برای گونه ممرز (*orientalis*)، برای گونه افراپلت (*Carpinus betulus L.*) و برای گونه راش (*Acer velutinum Boiss.*) و ضریب β برای گونه راش ۱/۲۲، برای گونه ممرز ۱/۱۷ و برای گونه افراپلت ۱/۲۵ است. به‌عبارت دیگر، مقدار ضریب α بین ۱۴/۱۵-۸/۵۳ و مقدار ضریب β بین ۱/۱۷-۱/۲۵ برای گونه‌ها متغیر است. در پژوهشی Lee et al. (2021) در نهال‌های تحت بررسی، ضریب α را بین ۲۳/۴۱-۷/۲۸ و ضریب β را بین ۱/۷۳-۱/۴۶ گزارش کردند. Li et al. (2020) نیز ضریب α را بین ۳/۸۵-۰/۷۷ و ضریب β را بین ۱/۵۳-۰/۰۸ برای دو نهال گزارش کردند. بنابراین ضریب‌های β و α ارائه‌شده در تابع توانی رابطه قطر و نیروی کششی در هر سه گونه در دامنه گزارش‌شده در پژوهش‌های دیگر بودند. براساس نتایج آزمایش مقاومت کششی ریشه در هر سه گونه رابطه مقاومت کششی با قطر ریشه از

بحث

ویژگی‌های مکانیکی ریشه گونه‌های بررسی‌شده از نظر نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه با در نظر گرفتن قطر ریشه به‌عنوان عامل کوواریت تفاوت‌های معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند. نتایج آزمایش کشش ریشه برای گونه‌ها بیانگر تابع توانی مثبت بین قطر ریشه با نیروی کششی ریشه است. یافته‌های دیگر پژوهش‌ها (Abdi, 2018; Abdi & Deljouei, 2019; Abdi et al., 2019; Deljouei et al., 2020; Mohammadrad et al., 2020) نیز تابع توانی مثبت بین قطر ریشه و نیروی کششی ریشه را نشان دادند. β مقدار افزایش نیرو به‌زای افزایش قطر و α ضریب اندازه در این تابع است و هرچه مقدار β و α بیشتر باشد گونه دارای ریشه‌های قوی‌تری است. ضریب α برای گونه راش (*Fagus*)

2021). al. مقدار ضریب α بین ۱۷۱/۳۹-۵۱/۲۳ و مقدار ضریب β بین ۰/۴۸- تا ۰/۸۱- برای نهال‌ها گزارش شده است. براساس پیشینه پژوهش، ضریب‌های α و β در تابع توانی رابطه قطر و مدول یانگ برای گونه‌های این پژوهش در دامنه‌های ذکر شده قرار نگرفته بودند. با توجه به اینکه مدول یانگ ریشه نسبت به نیرو و مقاومت ریشه برای گونه‌های نهال کمتر بررسی شده است، باید پژوهش‌های بیشتری در آینده درباره مدول یانگ ریشه در گونه‌های مختلف انجام گیرد.

بررسی اثر نوع گونه بر نیروی کششی نشان داد که نیروی کششی در گونه‌های راش و افراپلت مشابه است و این دو گونه با گونه ممرز تفاوت دارند و میانگین نیروی کششی برای راش ۴/۴۷، ممرز ۷/۳۹ و افراپلت ۳/۴۰ است. نتایج پژوهش‌های دیگر نیز تفاوت در نیروی کششی را برای گونه‌های مختلف بیان کردند (Vergani et al., 2016; Deljoue et al., 2020). Lee et al. (2021) میانگین نیروی کششی را به ترتیب برای ریشه نهال *Hibiscus taiwanensis* ۴۲/۵۹، برای *Macaranga tanarius* ۱۹۷/۰۴ و برای *Mallotus paniculatus* ۲۱۳/۴۱ نیوتن گزارش کردند که این مقادیر ممکن است به علت قطر بیشتر ریشه‌های تحت آزمایش بیشتر از میانگین نیروی کششی گونه‌های این پژوهش باشد. افزون بر این، دلیل تفاوت در نیروی کششی گونه‌ها پاسخ‌های متفاوت گیاهان به شرایط متفاوت محیطی بیان شده است (Boldrin et al., 2017). همچنین سن گونه و تنش‌های غیرزیستی هم ممکن است بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها تأثیر بگذارد (Loades et al., 2013). بنابراین اثر سن گونه و تفاوت قطر ریشه‌های بررسی شده ممکن است دلیل احتمالی تفاوت در نیروی کششی ریشه گونه‌ها باشد.

نوع گونه بر مقاومت کششی ریشه نیز تأثیرگذار است. گونه‌های راش (۲۷/۶۱) و افراپلت (۲۵/۵۳) از نظر میانگین مقاومت کششی تفاوت معنی‌داری با

تابع توانی منفی پیروی می‌کند. رابطه توانی منفی بین قطر ریشه و مقاومت کششی با نتایج پژوهش‌ها (Naghdi et al., 2013; Maleki et al., 2014; Loades et al., 2015; Deljouei et al., 2018; Moresi et al., 2019; Abdi & Deljouei, 2019; Mohammadrad et al., 2020; Afshar Sadr et al., 2020) همخوانی دارد. به عبارت دیگر، افزایش قطر ریشه موجب کاهش مقاومت کششی می‌شود و ریشه‌های نازک مقاومت کششی بیشتری دارند. بدین ترتیب مقدار ضریب α بین ۲۰/۸۴- تا ۱۰/۸۶ و مقدار ضریب β بین ۰/۵۷- تا ۰/۸۲- برای گونه‌ها نوسان دارد. (Abdi (2018) بیان کرده است که هرچه α بزرگ‌تر و β کوچک‌تر باشد، مقاومت کششی گونه بیشتر است. (Afshar Sadr et al. (2020) برای نهال بلوط بلندمازو مقدار ضریب α را بین ۲۹/۶۳- تا ۲۰/۷۸ و مقدار ضریب β را بین ۰/۵۹- تا ۱/۳۴- تعیین کردند. (Lee et al. (2021) برای سه نهال مقدار ضریب α را بین ۲۹/۸۱- تا ۹/۲۷ و مقدار ضریب β را بین ۰/۲۶- تا ۰/۵۳- بیان کردند. (Li et al. (2020) برای دو نهال مقدار ضریب α را بین ۵/۳۱- تا ۱/۱۵ و مقدار ضریب β را بین ۰/۴۶- تا ۱/۱۸- بیان کردند. همان‌طور که در مرور منابع دامنه ارائه شده برای ضریب β بین ۰/۲۶- تا ۱/۳۴- و مقدار ضریب α بین ۲۹/۸۱- تا ۹/۲۷ برای تابع توانی رابطه قطر و مقاومت کششی ذکر شده است، مقدار ضریب‌های α و β برای هر سه گونه بررسی شده نیز در دامنه‌های بیان شده بودند.

نتایج آزمایش مکانیکی ریشه رابطه مدول یانگ ریشه با قطر ریشه را از نوع تابع توانی منفی نشان داد. رابطه توانی منفی بین قطر ریشه و مدول یانگ با یافته‌های دیگر پژوهش‌ها (Cislaghi et al., 2021; Lee et al., 2021) همخوانی دارد. مدول یانگ نیز تحت تأثیر قطر ریشه است و تفاوت در قطر ریشه سبب تغییر در مدول یانگ می‌شود (et al., Boldrin (2021). بر این اساس مقدار ضریب α بین ۳۹۹/۳۲- و مقدار ضریب β بین ۰/۰۵- تا ۰/۵۳- برای گونه‌ها نوسان دارد. در دیگر پژوهش‌ها مانند (Lee et

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی از قبیل نیروی کششی و مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه در گونه‌های مختلف متغیر است، به‌گونه‌ای که بیشینه مقاومت کششی در گونه ممرز و بیشینه مدول یانگ در گونه راش بوده است. با توجه به اینکه این گونه‌ها جزء گونه‌های بومی و بارز جنگل‌های شمال هستند و از آنجا که یکی از کاربردهای ویژگی‌های مکانیکی ریشه، برآورد مسلح‌سازی مکانیکی ریشه‌هاست، این اطلاعات می‌تواند در مدل‌سازی مسلح‌سازی خاک و پایداری دامنه در این جنگل‌ها استفاده شود. به‌عبارتی انتخاب گونه براساس ویژگی‌های مکانیکی ریشه می‌تواند موجب تغییر در مسلح‌سازی خاک و پایداری دامنه شود. بنابراین درک ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی ریشه گونه‌های زادآوری درختی و زیست‌مهندسی خاک برای مدیریت جنگل و انتخاب گونه‌های مناسب براساس ویژگی‌های مکانیکی ریشه برای مسلح‌سازی خاک و جنگلکاری مفید خواهد بود. بدین ترتیب پیشنهاد می‌شود که ویژگی‌های مکانیکی ریشه گونه‌های مختلف به‌خصوص گونه‌های علفی در مسلح‌سازی خاک و پایداری دامنه بررسی شود. افزون‌بر این پژوهش‌های بیشتری برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی ریشه به‌ویژه مدول یانگ ریشه در گونه‌های مختلف ضرورت دارد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره قرارداد ۹۹۰۱۶۱۲۲ اجرا شده است. نویسندگان لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از این صندوق اعلام کنند.

یکدیگر ندارند، ولی با گونه ممرز (۳۵/۳۲) تفاوت معنی‌داری دارند. در پژوهش Afshar Sadr et al. (2020)، میانگین مقاومت کششی ریشه برای نهال بلندمازو به ترتیب ۱۶/۰۲ تا ۹۸/۶۵ مگاپاسکال گزارش شد که دامنه مقاومت کششی برای گونه‌های تحت بررسی در این پژوهش نیز در این محدوده قرار می‌گیرند. (Ye et al. (2017 تغییرات مقاومت کششی ریشه با قطر ریشه را به ترکیب‌های شیمیایی ریشه نسبت داده و نشان دادند که مقاومت کششی رابطه منفی با لیگنین و نسبت لیگنین به سلولز دارد، ولی با مقدار سلولز و هولو سلولز دارای رابطه مثبت است.

همانند نیرو و مقاومت کششی، اثر گونه بر مدول یانگ نیز معنی‌دار است. از این نظر گونه‌های راش و افراپلت متفاوت‌اند و میانگین مدول یانگ در گونه راش (۶۳۵ مگاپاسکال) بیشتر از گونه افراپلت (۴۶۵/۱۰ مگاپاسکال) است. همچنین مدول یانگ در ممرز با راش و افراپلت مشابه است. به‌دلیل بررسی نکردن این شاخص در پژوهش‌های داخلی امکان مقایسه مقادیر آن برای گونه‌های مشابه وجود ندارد، ولی پژوهش‌های اندکی در دیگر گونه‌ها انجام گرفته است که نشان می‌دهند تفاوت‌های چشمگیری در مدول یانگ میان گونه‌های مختلف وجود دارد. Lee et al. (2021) میانگین مدول یانگ را برای نهال‌های *Macaranga tanarius*، *Mallotus paniculatus* و *Hibiscus taiwanensis* به ترتیب ۱۲۷/۱۵، ۱۱۲/۶ و ۲۵/۲۷ مگاپاسکال گزارش کردند. متغیر بودن مدول یانگ در گونه‌های مختلف را می‌توان با تفاوت قطر ریشه در گونه‌های بررسی شده توضیح داد (Boldrin et al., 2017). Hathaway & Penny (1975) گزارش کردند که مدول یانگ با محتوای سلولز همبستگی مثبت و با نسبت لیگنین به سلولز همبستگی منفی دارد.

References

- Abdi, E. (2018). Root tensile force and resistance of several tree and shrub species of Hyrcanian forest, Iran. *Croatian Journal of Forest Engineering. Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 39(2), 255-270.

- Abdi, E., Azhdary, F., Abdulkhani, A., & Sofy Mariv, H. (2014). Tensile strength and cellulose content of Persian ironwood (*Parrotia persica*) roots as bioengineering material. *Journal of Forest Science*, 60(1), 425-430.
- Abdi, E., & Deljouei, A. (2019). Seasonal and spatial variability of root reinforcement in three pioneer species of the Hyrcanian forest. *Austrian Journal of Forest Science*, 136(3), 175-198.
- Abdi, E., Majnounian, B., Genet, M., & Rahimi, H. (2010). Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests northern Iran. *Ecological Engineering*, 36(10), 1409-1416.
- Abdi, E., Majnounian, B., Rahimi, H., & Zobeiri, M. (2009). Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran. *Journal of Forestry Research*, 20(2), 105-110.
- Abdi, E., Saleh, H. R., Majnounian, B., & Deljouei, A. (2019). Soil fixation and erosion control by *Haloxylon persicum* roots in arid lands, Iran. *Journal of Arid Land*, 11(1), 86-96.
- Afshar, S.A., Etemad, V., Abdi, E., Attarod, P., & Deljouei, A. (2020). Effect of slope on characteristics of *Quercus castaneifolia* root system. *Journal of Forest Research and Development*, 6(2), 313-327.
- Boldrin, D., Bengough, A.G., Lin, Z., & Loades, K.W. (2021). Root age influences failure location in grass species during mechanical testing. *Plant and Soil*, 461(1), 457-469.
- Boldrin, D., Leung, A.K., & Bengough, A.G. (2017). Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. *Ecological Engineering*, 109, 196-206.
- Cislaghi, A. (2021). Exploring the variability in elastic properties of roots in Alpine tree species. *Journal of Forest Science*, 67(7), 338-356.
- Deljouei, A., Abdi, E., Majnounian, B., & 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.
- Deljouei, A., Abdi, E., Schwarz, M., Majnounian, B., Sohrabi, H., & Dumroese, R.K. (2020). Mechanical characteristics of the fine roots of two broadleaved tree species from the Temperate Caspian Hyrcanian Ecoregion. *Forests*, 11(3), 345.
- Eab, K.H., Likitlersuang, S., & Takahashi, A. (2015). Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. *Soils and Foundations*, 55(5), 1270-1281.
- Gobinath, R., Ganapathy, G.P., & Akinwumi, I.I. (2021). Stabilisation of natural slopes using natural plant root as reinforcing agent, Materials. *Today: Proceedings*, 39, 493-499.
- Hairiah, K., Widiyanto, W., Suprayogo, D., & Van Noordwijk, M. (2020). Tree roots anchoring and binding soil: reducing landslide risk in Indonesian agroforestry. *Land*, 9(8), 256.
- Hathaway, R.L., & Penny, D. (1975). Root strength in some *Populus* and *Salix* clones. *New Zealand Journal of Botany*, 13(3), 333-344.
- Hollis, L.O., & Turner, R.E. (2019). The tensile root strength of *Spartina patens*: Response to atrazine exposure and nutrient addition. *Wetlands*, 39(4), 759-775.
- Kazemi, M., Abdi, E., Majnounian, B., & Yousefzadeh, H. (2014). The effect of season on resistance of Persian oak (*Quercus persica*) roots (Case study: Tabarok, Bazaft basin). *Iranian Journal of Forest*, 6(4), 435- 444.
- Keybondori, S., Majnounian, B., Abdi, E., Yousefzadeh, H., & Deljouei, A. (2018). Assessing spatial changes of roots tensile strength of *Salix purpurea* L. in riparian zone of Karun (Case study: Susan plain in Khuzestan province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 26(1), 70-80.

- Lee, J.T., Tsai, S.M., Wu, Y.J., Lin, Y.S., Chu, M.Y., & Lee, M.J. (2021). Root Characteristics and Water Erosion-Reducing Ability of Alpine Silver Grass and Yushan Cane for Alpine Grassland Soil Conservation. *Sustainability*, 13(14), 7633.
- Li, C., Jia, Z., Yuan, Y., Cheng, X., Shi, J., Tang, X., ... & Zhang, J. (2020). Effects of mineral-solubilizing microbial strains on the mechanical responses of roots and root-reinforced soil in external-soil spray seeding substrate. *Science of The Total Environment*, 723, 138079.
- Liang, T., Bengough, A.G., Knappett, J.A., MuirWood, D., Loades, K.W., Hallett, P.D., ... & Meijer, G.J. (2017). Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge. *Ecological Engineering*, 109, 207-227.
- Loades, K.W., Bengough, A.G., Bransby, M.F., & Hallett, P.D. (2013). Biomechanics of nodal, seminal and lateral roots of barley: effects of diameter, waterlogging and mechanical impedance. *Plant and Soil*, 370(1), 407-418.
- Loades, K.W., Bengough, A.G., Bransby, M.F., & Hallett, P.D. (2015). Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (*Hordeum vulgare* L.) in contrasting soil environments. *Plant and Soil*, 395(1), 253-261.
- Naghdi, R., Maleki, S., Abdi, E., Mousavi, R., & 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.
- Navarro Hevia, J., Lima Farias, T.R., de Araújo, J.C., Osorio Peláez, C., & Pando, V. (2016). Soil erosion in steep road cut slopes in Palencia (Spain). *Land degradation & development*, 27(2), 190-199.
- Maffra, C.R.B., & Sutili, F.J. (2020). The use of soil bioengineering to overcome erosion problems in a pipeline river crossing in South America. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 1-8.
- Maleki, S., Naghdi, R., Abdi, E., & Nikooy, M. (2014). Investigating the amount of reinforcement of *Alnus* subcordata root in order to use in bioengineering. *Iranian Journal of Forest*, 6(1), 49-58.
- Mao, Z., Saint-Andre, L., Genet, M., Mine, F. X., Jourdan, C., Rey, H., & Stokes, A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45, 55-69.
- Mao, Z., Wang, Y., McCormack, M.L., Rowe, N., Deng, X., Yang, X., & Stokes, A. (2018). Mechanical traits of fine roots as a function of topology and anatomy. *Annals of botany*, 122(7), 1103-1116.
- Melese, D.T. (2021). Effect of Diameter, Root Moisture Content, Gauge Length and Loading Rate on Tensile Strength of Plant Roots and Their Contribution to Slope Stability. *Lowland Technology International*, 22(4), 164-173.
- Mohammadrad, A., Abdi, E., PourHashemi, M., Majnounian, B., & Deljouei, A. (2020). Effect of oak decline phenomenon on root mechanical characteristics of Brants oak (*Quercus brantii* Lindl.). *Iranian Journal of Forest*, 12(2), 221-236.
- Moresi, F.V., Maesano, M., Matteucci, G., Romagnoli, M., Sidle, R.C., & Scarascia Mugnozza, G. (2019). Root biomechanical traits in a montane Mediterranean forest watershed: variations with species diversity and soil depth. *Forests*, 10(4), 341.
- Schwarz, M., Lehmann, P., & Or, D. (2010). Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(3), 354-367.
- Vergani, C., Schwarz, M., Soldati, M., Corda, A., Giadrossich, F., Chiaradia, E.A., & Bassanelli, C. (2016). Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. *Catena*, 143, 275-288.

Wang, X., Hong, M.M., Huang, Z., Zhao, Y.F., Ou, Y.S., Jia, H.X., & Li, J. (2019). Biomechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions. *Soil and Tillage Research*, 189, 148-157.

Ye, C., Guo, Z., Li, Z., & Cai, C. (2017). The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China. *Geomorphology*, 285, 82-93.

Zhang, L., Yan, W.M., & Leung, F.T. (2021). Probabilistic estimation of root cohesion in regards to intra-specific variability of root system. *Catena*, 196, 104-898.



Research Article

Evaluating mechanical properties of seedling roots of some tree species

S. Keybondori¹, E. Abdi^{2*}, Z. Shakeri³, and V. Etemad²

¹ Ph.D. student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

² Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

³ Researcher, Section of Social-Ecological Interactions in Agricultural Systems, Faculty of Organic Agricultural Sciences, University of Kassel, Witzenhausen, Germany

(Received: 16 November 2021; Accepted: 2 January 2022)

Abstract

The mechanical behavior of vegetation roots significantly affects the mechanism of soil reinforcement and slope stability. The aim of the present study was to determine the mechanical properties of seedling roots of some tree species in the second district of Kheyroud forest. Ten samples of each species (beech (*Fagus orientalis* Lipsky.), hornbeam (*Carpinus betulus* L.) and, maple (*Acer velutinum* Boiss.)) completely extracted from soil and all roots were collected, then their mechanical properties were measured in the laboratory. The results showed that in all species, the relation between root diameter and tensile force, was positive power law whereas the relation was negative power law for root diameter and tensile strength and also Young's modulus. Results of ANCOVA showed that tensile force, tensile strength, and Young's modulus were significantly different among species. Accordingly, the average tensile force and tensile strength for hornbeam species were 48 and 40% higher than beech and maple species, respectively and the average Young's modulus of beech species was 38% higher than hornbeam and maple species. The findings of this work show that the mechanical properties of the roots can be used as an indicator in selecting species for soil bioengineering purposes. Therefore, it is recommended that these properties be considered in soil reinforcement modeling.

Keywords: Soil protection, Tree species seedling, Young's modulus of roots, Root mechanics.