مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هجدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۵
ص ۳۴۰-۳۲۳
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2026.585088.2123
CC BY 4.0

تغییرات فصلی مقاومت مکانیکی ریشه و مقدار مسلح‌سازی خاک در جنگلکاری ۴۵ سالهٔ بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.) (جنگل خیرود، بخش پاتم)

میترا رمضانی[۱]، احسان عبدی[۲*]، آزاده دلجویی[۳] و محسن قلندر[۴]

[۱]دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۲]استاد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۳]استادیار، مرکز کسب‌وکار جنگل، دانشکدگان جنگلداری، کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آرکانزاس در مانتیسلو، مانتیسلو، آرکانزاس، آمریکا
[۴]استادیار، گروه آمار، دانشکدهٔ علوم فنی و مهندسی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۵/۲۵)

چکیده

مقدمه: بهره‌گیری از پوشش گیاهی و دانش زیست‌مهندسی خاک، یکی از روش‌های همگام با طبیعت برای کنترل فرسایش و کاهش ناپایداری دامنه‌هاست. از بین بخش‌های مختلف پوشش گیاهی شامل تاج، تنه و ریشه‌ها، سیستم ریشه در پایدارسازی و تثبیت دامنه‌ها اهمیت بیشتری دارد. عوامل بسیاری بر مقدار مسلح‌سازی ریشه‌ها تأثیر دارند که یکی از آنها که کمتر نیز بررسی شده تغییر فصل‌هاست. این پژوهش با هدف بررسی اثر فصل بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه و مقدار مسلح‌سازی خاک توسط سیستم ریشه‌ای درختان، در یک تودهٔ جنگلکاری ۴۵سالهٔ بلندمازو در جنگل خیرود در نزدیکی نوشهر انجام گرفت. این عرصه پیش از جنگلکاری، یک تودهٔ مخروبهٔ ممرز (*Carpinus betulus* L.) بود که پس از قطع یکسره، با نهال‌های بلندمازو جنگلکاری شد.

مواد و روش‌ها: ابتدا چهار پایه درخت بلندمازو به‌ترتیب با میانگین قطر برابرسینه و ارتفاع ۱۶/۵ سانتی‌متر و ۱۰ متر به‌صورت تصادفی برای نمونه‌برداری انتخاب شد. برای بررسی پراکنش جانبی سیستم ریشه‌ها، در سمت پایین شیب هر پایه یک پروفیل با فاصلهٔ افقی نیم متر از تنه و با عمق متناسب با حداکثر عمق حضور ریشه‌های جانبی حفر و پراکنش ریشه‌ها در افق‌های مختلف دیواره‌ها برداشت شد. سپس مقاومت مکانیکی چند نمونه ریشه با دامنهٔ قطری ۰/۳ تا ۲۳/۸ میلی‌متر با استفاده از دستگاه‌های ریشه‌کش درجا (در عرصه) و یونیورسال (در آزمایشگاه)، در هر دو فصل خزان (۸۶ نمونه) و رویش (۹۰ نمونه) اندازه‌گیری شد. از تلفیق داده‌های پراکنش و مقاومت مکانیکی ریشه‌ها، مقدار مسلح‌سازی حاصل از حضور ریشه‌ها در خاک با استفاده از دو مدل Wu اصلاح‌شده و RBMw محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد که شاخص‌های تعداد ریشه و نسبت سطح ریشه به سطح خاک با افزایش عمق خاک به‌صورت تابع لگاریتمی کاهش یافتند و این شاخص‌ها در لایه‌های سطحی خاک بیشترین مقدار را داشتند. نتایج نشان داد که در هر دو روش اندازه‌گیری، بین قطر ریشه و نیروی کششی رابطهٔ توانی مثبت و بین قطر ریشه و مقاومت کششی رابطهٔ توانی منفی وجود دارد. مقدار میانگین±اشتباه معیار نیروی کششی ریشه در فصل‌های رویش و خزان به‌ترتیب ۲۲/۵۱±۳۵۸/۹۶ و ۳۴/۹۵±۲۵۰/۱۲ نیوتن و مقدار میانگین±اشتباه معیار مقاومت کششی ریشه در فصل‌های رویش و خزان برای دستگاه یونیورسال به‌ترتیب ۰/۶۹±۱۲/۲۳ و ۰/۸۲±۱۸/۵۴ مگاپاسکال بود. نتایج آنالیز کوواریانس حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار در مقدار مقاومت کششی ریشهٔ درختان بین فصل‌های مختلف و بیشتر بودن مقاومت کششی در خزان بود؛ ولی مقدار نیروی کششی تفاوت معنی‌داری بین فصل‌ها نداشت. به‌طور کلی نتایج هر دو مدل نشان داد که با افزایش عمق خاک، مقدار مسلح‌سازی خاک کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار مسلح‌سازی خاک در لایه‌های سطحی و مطابق با تراکم ریشه‌ها رخ می‌دهد. میانگین مقدار مسلح‌سازی محاسبه‌شده با استفاده از مدل Wu اصلاح‌شده در فصل‌های خزان و رویش به‌ترتیب ۶۲/۵۲ و ۴۵/۲۹ و برای مدل RBMw به‌ترتیب ۵۳/۹۲ و ۴۹/۴۷ پاسکال محاسبه شد. نتایج آزمون رتبه‌ای علامت‌دار ویلکاکسون برای خروجی‌های مدل Wu حاکی از بیشتر بودن معنی‌دار مقدار مسلح‌سازی در فصل خزان و نتایج آزمون t جفتی حاکی از نبود اختلاف معنی‌دار در میانگین مسلح‌سازی ریشه بین دو فصل در مدل RBMw بود.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش نشان داد که تغییرات فصلی بر مقاومت کششی ریشه‌های بلندمازو اثر معنی‌دار دارد، به‌طوری که مقاومت کششی در فصل خزان بیشتر از فصل رویش بود، اما نیروی کششی بین دو فصل تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین با افزایش عمق خاک، نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) و در نتیجه مقدار مسلح‌سازی خاک در هر دو مدل کاهش یافت. مقایسهٔ مدل‌های Wu اصلاح‌شده و RBMw نشان داد که هر دو مدل روند مشابهی از تغییرات مسلح‌سازی را ارائه کردند، اما مدل Wu اصلاح‌شده به تغییرات فصلی حساس‌تر بود و افزایش معنی‌دار مسلح‌سازی در فصل خزان را نشان داد، درحالی که مدل RBMw تفاوت معنی‌داری را بین دو فصل آشکار نکرد. این پژوهش با تلفیق داده‌های آزمون‌های کشش آزمایشگاهی و ریشه‌کش درجا نشان داد که انتخاب مدل می‌تواند بر ارزیابی اثرهای فصلی و برآورد ظرفیت مسلح‌سازی خاک تأثیرگذار باشد. بنابراین لحاظ تغییرات فصلی در مدل‌های تحلیل پایداری شیب می‌تواند به افزایش دقت طراحی پروژه‌های زیست‌مهندسی خاک و مدیریت پایدار دامنه‌ها کمک کند.

واژه‌های کلیدی: دستگاه ریشه‌کش درجا، دستگاه یونیورسال، زیست‌مهندسی، مسلح‌سازی خاک، نسبت سطح ریشه به سطح خاک.

* نویسنده مسئول
شماره تماس: ۰۹۱۱۳۵۶۹۰۶۸
ایمیل: abdie@ut.ac.ir

مقدمه

پوشش گیاهی افزون‌بر کارکردهایی مانند تولید چوب، ترسیب کربن، ذخیرهٔ آب و تفرج، کارکردهای حفاظتی مانند کاهش فرسایش و پایدارسازی خاک دارد و بنابراین عامل مهمی در ثبات بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب می‌شود (Zhao et al., 2003). اجزای مختلف پوشش گیاهی شامل زی‌تودهٔ زیر زمین (ریشه) و روی زمین (تاج‌پوشش و ساقه)، در کنترل شکل‌های مختلف فرسایش و پایدارسازی دامنه‌ها اثرهای متفاوتی دارند. زی‌تودهٔ روی زمین اثر زیادی بر کارکردهای هیدرولوژیک و هیدرولیک و بنابراین کنترل فرسایش‌های پاشمانی، شیاری و صفحه‌ای دارد و زی‌تودهٔ زیر زمینی با کارکرد مکانیکی سبب تثبیت خاک و کنترل فرسایش خندقی و کاهش ناپایداری می‌شود (Gray & Sotir, 1996). به‌طور کلی عوامل موثر بر تأثیر ریشه‌ها در پایدارسازی دامنه شامل تعداد و تراکم ریشه‌ها، فراوانی طبقات قطری، مقدار پراکنش افقی و عمودی، مقاومت مکانیکی، ترکیب شیمیایی ریشه و اثر متقابل خاک و ریشه (Genet et al., 2005) است که این موارد نیز وابسته به شرایط محیطی مانند فصل سال، نوع خاک، ارتفاع و برای دامنه متغیر گزارش شده‌اند (Norris et al., 2008).

فصل یکی از عوامل کنترل‌کنندهٔ فرایندهای اکوسیستمی است که اثر مهمی بر پویایی رشد گیاهان و عملکرد سیستم‌های ریشه‌ای دارد. در گونه‌های درختی، به‌ویژه پهن‌برگان خزان‌کننده، تغییرات فصلی با دگرگونی در ساختار تاج پوشش، شدت تعرق، باران‌ربایی و ویژگی‌های مکانیکی ریشه همراه است (Esmaiili et al., 2026). در فصل رویش، فعالیت کامبیومی، توسعهٔ بافت‌های آوندی و تغییرات ساختاری در دیوارهٔ سلولی ریشه‌ها رخ می‌دهد. درحالی که در دورهٔ خزان، فعالیت‌های متابولیک کاهش می‌یابد و شرایط فیزیولوژیک متفاوتی حاکم می‌شود. تاج‌پوشش درختان به‌خصوص در گونه‌های همیشه‌سبز تأثیر فراوانی در فرایندهای اکوهیدرولوژی دارد و در جنگل‌های خزان‌کننده بسیاری از تأثیرات پوشش گیاهی در فصل رویش موضوعیت بیشتری دارند و با تغییر فصل و شروع خزان و خواب زمستانه، کارکردهای هیدرولوژیک زی‌تودهٔ روی زمینی درختان مانند تبخیرتعرق و باران‌ربایی به‌علت نبود تاج‌پوشش و کاهش مقدار باران‌ربایی حداقل می‌شود (Sadeghi et al., 2018)؛ اما در مقابل اثر مکانیکی سیستم ریشه‌ای در طول سال مقداری پایدارتر گزارش شده است (Norris et al., 2008). پژوهش‌های متعددی به بررسی اثر هیدرولوژیک پوشش گیاهی در فصول مختلف پرداخته‌اند، اما در مقایسه با بخش روی زمین، به الگوهای تغییرات فصلی مقاومت مکانیکی سیستم ریشه‌ای کمتر توجه شده است. بنابراین بیشتر پژوهش‌های پیشین، مقاومت مکانیکی ریشه‌ها را در یک مقطع زمانی مشخص اندازه‌گیری کرده‌اند و تحلیل جامع تغییرات بین‌فصلی، به‌ویژه در گونه‌های مختلف، همچنان با کمبود داده مواجه است. تنها در پژوهش‌های اندکی تأثیر فصل بر مقاومت مکانیکی ریشه بررسی شده که نتایج آنها نیز گاهی ناهمسان بوده است (Rossi et al., 2022; Esmaiili et al., 2026). بیشتر پژوهش‌ها مقاومت مکانیکی ریشه در فصل خزان را بیشتر از فصل رویش دانسته و دلیل را کاهش مقدار رطوبت ریشه در فصل خزان ذکر کرده‌اند (Richards & Coppin, 1990; Genet et al., 2008). پژوهش‌های قبلی در ایران نیز مقدار مقاومت مکانیکی در جنگل‌های هیرکانی و زاگرس را در فصل خزان بیشتر گزارش کرده‌اند (Kazemi et al., 2014; Esmaiili et al., 2026).

از طرفی برخی پژوهش‌های جدید همانند تحقیق Rossi et al. (2022) نشان داده‌اند که مقاومت مکانیکی ریشه‌ها در دورهٔ رشد فعال مقدار بیشتری را نشان می‌دهد (Rossi et al., 2022). این محققان افزایش مقاومت مکانیکی در فصل رویش را اغلب به تفاوت در شرایط رطوبتی خاک و مقدار آب موجود در بافت ریشه نسبت داده‌اند. بر اساس یافته‌های این

پژوهشگران، کاهش رطوبت خاک در دوره‌های گرم‌تر سال سبب کاهش محتوای آب در بافت ریشه می‌شود و این کاهش آب، سختی دیوارهٔ سلولی را افزایش می‌دهد. در این پژوهش مطرح شده است که آب در بافت‌های گیاهی می‌تواند به‌عنوان پلاستیسیته‌ساز[1] عمل کند؛ به این معنا که حضور آب موجب افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش سختی نسبی ساختار سلولی می‌شود. بنابراین در شرایطی که بافت ریشه دارای محتوای آب بیشتری باشد (مانند دوره‌های مرطوب‌تر)، مقاومت مکانیکی آن کاهش می‌یابد، درحالی که در شرایط به‌نسبت خشک‌تر، با کاهش اثر پلاستیسیته‌ساز آب، مقاومت مکانیکی ریشه افزایش پیدا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات فصلی در مقاومت مکانیکی ریشه الزاماً ناشی از تغییرات ساختاری دائمی نیست، بلکه می‌تواند تا حد زیادی تحت تأثیر وضعیت هیدراتاسیون بافت و شرایط رطوبتی محیط قرار گیرد. این یافته دقیقا با توضیحات ارائه‌شده در پژوهش Ji و همکاران (۲۰۲۵) همسو است (Ji et al., 2025). این پژوهش نشان داد که ریشه‌های قطورتر گونه‌های گیاهی در پایان فصل رشد مقاومت کششی بیشتری نسبت به فصل خزان دارند. در واقع این پژوهش نیز تغییرات فصلی مقاومت مکانیکی را به تغییرات رطوبت خاک و محتوای آب بافت ریشهٔ یکی از عوامل اصلی نسبت می‌دهد.

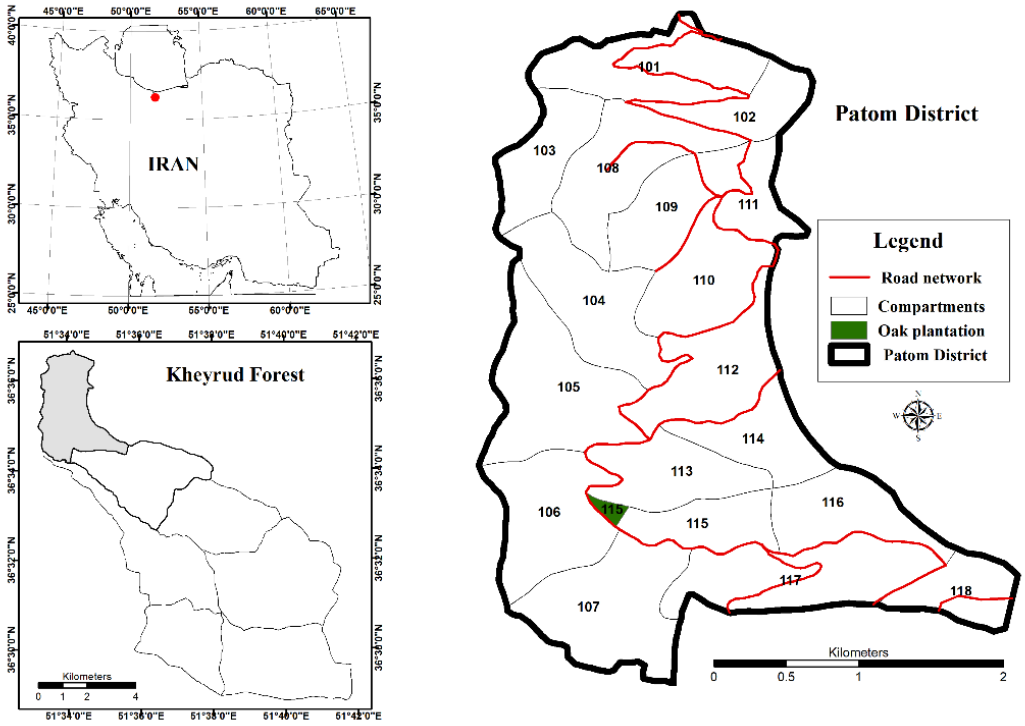
همان‌طور که بیان شد تا کنون نتایج پژوهش‌ها گاهی متناقض بوده و به همین دلیل ارائهٔ الگویی کلی برای تغییرات فصلی در اکوسیستم‌های مختلف مشکل است. همچنین در بیشتر پژوهش‌ها تنها به بررسی تفاوت مقاومت مکانیکی پرداخته شده و تأثیر تفاوت‌های احتمالی بر مقدار مسلح‌سازی کمتر بررسی شده است (Rossi et al., 2022). از منظر زیست‌مهندسی و پایدارسازی شیب، شناخت رفتار بیومکانیک گونه‌های مختلف در فصول متفاوت و تأثیر آن بر مقدار مسلح‌سازی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا انتخاب گونهٔ مناسب برای پروژه‌های تثبیت دامنه، مستلزم درک دقیق تغییرات زمانی در عملکرد مکانیکی ریشه‌ها و مقدار تأثیر مسلح‌سازی به‌ویژه در فصل بحرانی است. با توجه به موارد ذکرشده، هدف پژوهش حاضر، بررسی تغییرات مقاومت مکانیکی با تلفیق نتایج دستگاه ریشه‌کش درجا (برای ریشه‌های قطورتر) در عرصه و یونیورسال در آزمایشگاه (برای ریشه‌های نازک‌تر) و برآورد مقدار مسلح‌سازی خاک توسط سیستم ریشه‌ای ریشهٔ بلندمازوی جنگلکاری‌شده با استفاده از دو مدل Wu اصلاح‌شده (Preti, 2013) و RBMw (Schwarz et al., 2013) در دو فصل رویش و خزان است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ پژوهش، بخش اول (پاتم) جنگل آموزشی- پژوهشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران (جنگل خیرود) است. در این بخش، تیپ‌های غالب ممرزستان، راش- ممرز، بلوط- ممرز و انجیلی- ممرز است. مجموع طول جاده‌های موجود در این بخش ۱۷/۲ کیلومتر، دامنهٔ ارتفاع از سطح دریا ۹۳۴-۴۰ متر، مقدار بارش سالانه حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر و گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال، به‌ترتیب، تیر و بهمن با میانگین دمای ۲۲ و ۳ درجهٔ سانتی‌گراد است (Berenji Tehrani et al., 2015). سنگ مادر بخش پاتم آهکی و نوع خاک براساس طبقه‌بندی یونیفاید اغلب CL و CH است (Majnounian & Etter, 1992). با توجه به جنگلکاری‌های متعدد در این بخش، یکی از موفق‌ترین توده‌های جنگلکاری، شامل توده‌ای خالص، تک‌اشکوبه و ۴۵ ساله از بلندمازو، واقع در بخش غربی پارسل ۱۱۵ و در بالادست جاده، با مساحت حدود ۳ هکتار به‌عنوان محل اجرای پژوهش انتخاب شد (شکل ۱). شیب دامنه حدود ۲۰ درصد و جهت جنوبی داشته و وضعیت به‌نسبت منظم و همسال توده، بررسی را راحت‌تر می‌کند.

1. Water-induced plasticity



شکل ۱- منطقهٔ پژوهش در بخش پاتم جنگل خیرود

Figure 1. Location of the study area within the Patom District of the Kheyrud Forest, Hyrcanian Forests, northern Iran

شیوهٔ اجرای پژوهش

با بررسی اولیه، چند پایهٔ سالم بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.) که دارای ساقهٔ مستقیم و بدون تاج شکسته بودند علامت‌گذاری و از بین آنها چهار پایه به روش تصادفی ساده انتخاب شد (Abdi et al., 2026a). میانگین قطر برابرسینهٔ پایه‌های نمونه ۱۶/۵ سانتی‌متر و میانگین ارتفاع ۱۰ متر بود. برای بررسی و اندازه‌گیری پراکنش و تراکم ریشه‌ها از روش دیوارهٔ پروفیل استفاده شد و تعداد ریشه‌ها و نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR[1]) در هر افق ۱۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد (Abdi, 2014; Vergani et al., 2016). به‌دلیل اینکه بررسی تأثیر شیب بر سیستم ریشه و مسلح‌سازی جزو اهداف پژوهش حاضر نبود و نیز به‌دلیل تخریب و هزینهٔ زیاد روش دیوارهٔ پروفیل، تنها در سمت پایین هر پایه یک پروفیل با طول ۱/۱۰ و عرض ۰/۶ متر تا حداکثر عمق ریشه‌دوانی حفر شد (Abdi et al., 2010; Abdi, 2014). سپس روی دیوارهٔ هر پروفیل، افق‌های ۱۰سانتی‌متری با استفاده از میخ و ریسمان مشخص و علامت‌گذاری شد (Ji et al., 2012)، (شکل ۲). در هر یک از افق‌ها، قطر همهٔ ریشه‌های بیرون‌زده از قسمت مماس با خاک با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. حداقل و حداکثر قطر ریشه‌های جانبی متقاطع با دیواره ۲۹/۴ و ۰/۳ میلی‌متر بود. در نهایت نسبت سطح ریشه به سطح خاک هر افق از تقسیم مجموع سطح مقطع ریشه‌های بیرون‌زده هر افق تقسیم بر مساحت خاک آن افق تعیین شد (رابطهٔ ۱).

$$RAR = \frac{A_r}{A_s}$$ رابطهٔ ۱

که در آن RAR نسبت سطح ریشه به سطح خاک، A_r مجموع سطح مقطع ریشه‌ها در افق i و A_s مساحت دیوارهٔ پروفیل در افق i هم هستند.

1. Root Area Ratio



شکل ۲- وضعیت دیواره‌های پروفیل، افق‌های مشخص‌شده و ریشه‌های بیرون‌زده از دیواره‌ها
Figure 2. Soil profile wall conditions, identified soil horizons, and roots exposed along the profile walls

پس از اندازه‌گیری و برداشت پراکنش و تراکم ریشه‌ها نوبت به آزمون‌های مقاومت مکانیکی رسید. برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی ریشه‌های قطورتر در عرصه به‌صورت مستقیم از دستگاه ریشه‌کش درجا (In situ pullout) و برای ریشه‌های نازک پس از انتقال به آزمایشگاه از دستگاه یونیورسال استاندارد (Universal) استفاده شد. دامنهٔ قطر ریشه‌های آزمایش‌شده توسط دستگاه‌های یونیورسال و درجا به‌ترتیب ۰/۳ تا ۹/۳ و ۸ تا ۲۵/۱ میلی‌متر بودند. شایان ذکر است که تا کنون در پژوهش‌های انجام‌گرفته در جنگل‌های هیرکانی به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی ریشه تنها از دستگاه یونیورسال آزمایشگاهی استفاده و دامنهٔ قطر آزمایش‌شده به حداکثر ۱۰ میلی‌متر محدود می‌شود و نمونه‌ای از داده‌های دستگاه ریشه‌کش درجا با قطرهای بزرگ‌تر وجود ندارد. دستگاه ریشه‌کش درجا از یک چارچوب فلزی، وینچ برای کشیدن، جابه‌جایی‌سنج، نیروسنج و ثبت‌کنندهٔ الکترونیکی داده‌ها تشکیل شده (شکل ۳) که طی یک پروژهٔ مشترک بین دانشگاه تهران و دانشگاه برن سوئیس ساخته شد. وینچ با ظرفیت ۲/۵ تن، حسگر جابه‌حایی‌سنج دو متر و لودسل با ظرفیت یک تن در دستگاه استفاده شدند. برد الکترونیکی دستگاه نیز توسط یک شرکت دانش‌بنیان داخلی ساخته شد.



شکل ۳- شمای کلی دستگاه ریشه‌کش درجای استفاده‌شده
Figure 3. In situ root pullout apparatus used in this study

برای اجرای آزمایش‌ها در عرصه ابتدا خاک و لاشبرگ‌ها در محل اطراف ریشه کنار زده شد و به‌منظور دسترسی به ریشه‌ها یک گودال کوچک بدون آسیب رساندن به ریشه‌ها حفر شد (شکل ۴). سپس با استفاده از یک میله بدون وارد شدن آسیب به ریشه‌ها، اطراف ریشه‌ها خالی و قطر در قسمت میانهٔ ریشه مدنظر با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های ریشه با استفاده از سیم مفتول به میلهٔ فلزی تعبیه‌شده جلوی دستگاه بسته شد و با استفاده از وینچ، با سرعت یکنواخت شروع به کشیدن ریشه شد تا زمانی که ریشه گسیخته شود (شکل ۵). ازآنجا که این دستگاه نمایشگر سرعت ندارد و امکان اعمال سرعت نزدیک به دستگاه آزمایشگاهی وجود ندارد، سعی شد سرعت حدود ۱ سانتی‌متر بر دقیقه حفظ شود. نیروی وارد به هر ریشه توسط نیروسنج و جابه‌جایی توسط جابه‌جایی‌سنج ثبت و در حافظه دستگاه ذخیره شد.



شکل ۴-آشکارسازی و آماده کردن نمونه‌های ریشه

Figure 4. Exposure and preparation of root samples for tensile testing



شکل ۵- آزمایش کشش توسط دستگاه ریشه‌کش درجا

Figure 5. Tensile testing using the in-situ root pullout apparatus

تعداد ۳۵ و ۳۹ آزمایش موفق کشش ریشه توسط دستگاه ریشه‌کش درجا به‌ترتیب در دو فصل خزان (اواخر آبان) و رویش (اواخر اردیبهشت) انجام گرفت.

در روش آزمایشگاهی، ابتدا نمونه‌های سالم ریشه با طول تقریبی ۲۰۰ میلی‌متر به‌صورت تصادفی انتخاب و با استفاده از یک سیم‌چین تیز جدا شدند. سپس قطر هر نمونهٔ ریشه در بخش میانی آن اندازه‌گیری شد. بین زمان جمع‌آوری ریشه‌ها و اجرای آزمایش‌های مکانیکی ریشه، چهار تا پنج روز اختلاف زمانی وجود داشت. تیماری که به‌منظور نگهداری و آماده‌سازی نمونه‌های ریشه استفاده شد، شامل شست‌وشو و قرار دادن آنها در کیسه‌های پلاستیکی و افشاندن محلول آب و الکل ۱۵ درصد و سپس قرار دادن در دمای ۴ درجهٔ سانتی‌گراد بود (Vergani et al., 2016). نمونه‌ها در آزمایشگاه بین دو فک دستگاه یونیورسال (STM5) قرار داده شد و آزمایش‌ها با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه اجرا شدند تا قابلیت مقایسهٔ مستقیم با دیگر پژوهش‌ها فراهم شود (Vergani et al., 2016). شایان ذکر است که دقت اندازه‌گیری نیروی دستگاه ۰/۰۰۱± نیوتن و جابه‌جایی ۰/۰۰۰۱± میلی‌متر و ظرفیت لودسل ۴/۹ کیلونیوتن است. نمونهٔ ریشه‌هایی که گسیختگی آنها

در محل نزدیک فک‌ها رخ داد نامعتبر بودند و داده‌های آنها حذف شد. با تقسیم بیشینهٔ نیروی گسیختگی بر سطح مقطع هر نمونهٔ ریشه، مقاومت کششی نمونه‌ها محاسبه شد. تعداد آزمایش‌های موفق اینسترون برای هر دو فصل ۵۱ عدد بود. شایان ذکر است که آزمایش‌های فصل خزان در اواخر آبان و آزمایش‌های فصل رویش در اواخر اردیبهشت انجام گرفت. به‌منظور برآورد مسلح‌سازی از دو مدل Wu اصلاح‌شده (Esmaiili et al., 2020) و با اعمال ضریب تصحیح ۰/۴ (Preti, 2013)، (رابطهٔ ۲) و RBMw (Schwarz et al., 2013)، (رابطهٔ ۳) استفاده شد.

رابطهٔ ۲ $$C_r = kk't_r$$

که در آن C_r مسلح‌سازی ریشه به کیلوپاسکال، k ضریب در نظر گرفتن جهت تصادفی ریشه‌ها نسبت به صفحهٔ شکست (که برابر $(\sin\theta + \cos\theta\tan\phi)$ که در آن θ زاویهٔ تغییر شکل ریشه در ناحیهٔ برشی (۴۵ درجه) و φ زاویهٔ اصطکاک داخلی ذرات خاک (برای منطقهٔ پژوهش ۲۵ درجه) است) (۱/۰۲ برای جنگل خیرود)، k' ضریب اصلاح بیش برآوردی مدل (۰/۴) و t_r مقاومت کششی بسیج‌شدهٔ ریشه در واحد سطح خاک است. به‌دلیل سادگی محاسبات و شاخص‌های محدود، این مدل در نرم‌افزار اکسل اجرا شد.

رابطهٔ ۳ $$C_r = \sum_{i=1}^{N} F(\varnothing_i, \Delta x) S\left(\Sigma x^*\right)$$

که در آن C_r مسلح‌سازی ریشه، Δx جابه‌جایی به میلی‌متر و S تابعی از جابه‌جایی نرمال‌شدهٔ Δx^* است. ازآنجا که در مدل دوم (RBMw) فرمول اصلی برای محاسبه نیاز به حل شاخص‌های مختلف و محاسبات پیچیده و زیادی دارد، به‌صورت کد در نرم‌افزار R اجرا شد.

روش تحلیل

تجزیه‌وتحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار R نسخهٔ ۴.۲.۲ انجام گرفت. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی شد. در مواردی که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کردند، برای نرمال‌سازی داده‌های مربوط به مقاومت کششی ریشه از تبدیل لگاریتمی استفاده شد. به‌منظور مقایسهٔ نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه در دو فصل، آنالیز کوواریانس (قطر ریشه عامل کوواریت) انجام گرفت. برای بررسی وجود اختلاف معنی‌دار بین مقدار مسلح‌سازی در دو فصل رویش و خزان در مدل RBMw به‌دلیل نرمال بودن داده‌ها از آزمون t جفتی و در مدل Wu اصلاح‌شده به‌دلیل نرمال نبودن داده‌ها از آزمون رتبه‌ای علامت‌دار ویلکاکسون استفاده شد.

نتایج

در ادامه نتایج پژوهش به تفکیک بررسی خواهند شد.

تعداد و تراکم سطحی ریشه‌ها

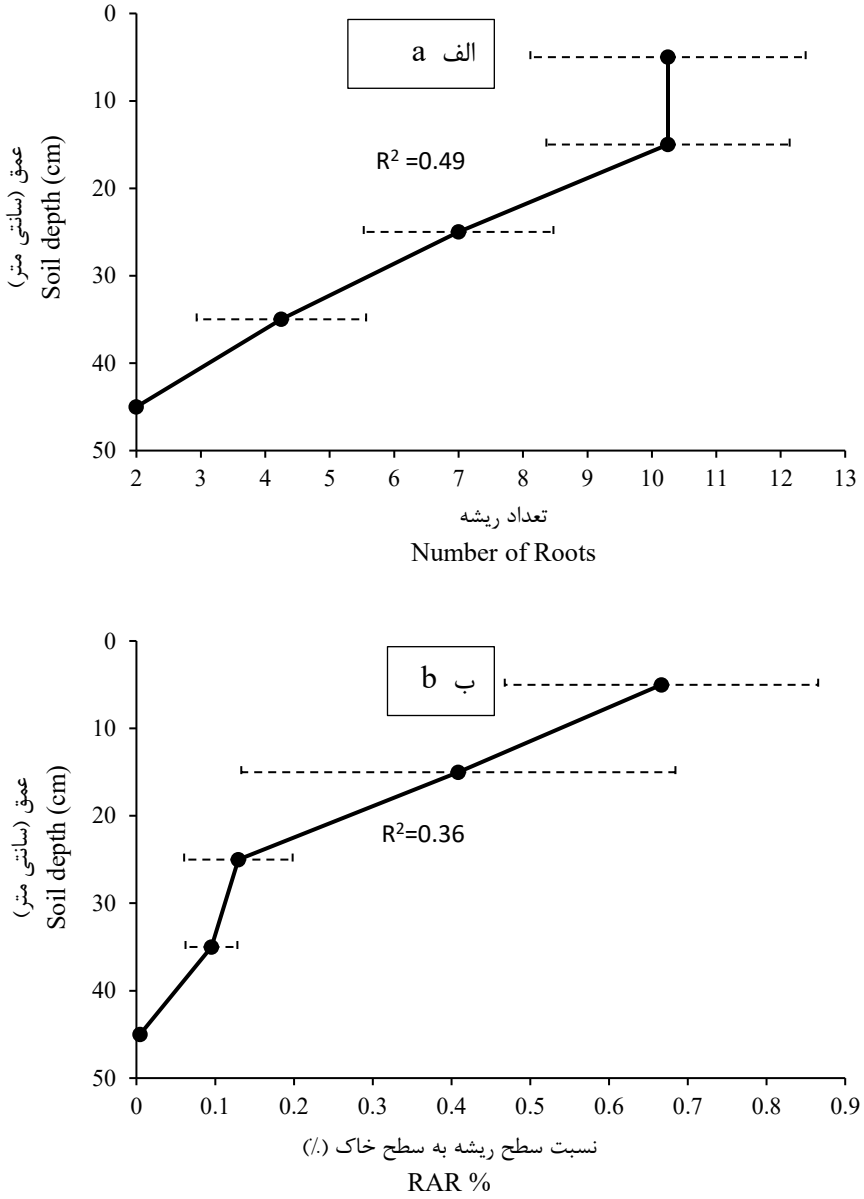
اطلاعات توصیفی ویژگی‌های تراکم ریشه‌ها در جدول ۱ آمده است.

نتایج نشان داد که تغییرات تعداد ریشه نسبت به عمق (شکل ۶ الف) کاهشی است و با تابع لگاریتمی به بهترین نحو نمایش داده می‌شود ($p<0.05, R^2=0.49$) و همچنین نسبت سطح ریشه به سطح خاک (شکل ۶ ب) به‌صورت کاهشی در رابطه با افزایش عمق تغییر کرده و از تابع لگاریتمی تبعیت می‌کند ($p<0.05, R^2=0.36$).

جدول ۱- اطلاعات توصیفی تعداد ریشه‌ها و نسبت سطح ریشه به سطح خاک در عمق‌های ۱۰ سانتی‌متری

Table 1. Descriptive statistics of root number and root area ratio across 10-cm soil depth intervals

Root density parameter	Minimum	Maximum	Mean
Number of roots	2	16	7
Root area ratio (%)	0.004	1.22	0.32



شکل ۶- تغییرات تعداد ریشه (الف) و نسبت سطح ریشه به سطح خاک (ب)، (میانگین± اشتباه معیار) با افزایش عمق
Figure 6. Variations in number of roots (a) and root area ratio (b), (mean±standard error) with increasing soil depth

مقدار واریانس کمتر داده‌ها در مورد تعداد ریشه نسبت به سطح ریشه به سطح خاک بیانگر نقش بیشتر ریشه‌های قطورتر در شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک است.

مقاومت مکانیکی

در این پژوهش از بین شاخص‌های مقاومت مکانیکی، نیروی کششی و مقاومت کششی بررسی شدند که در ادامه به‌ترتیب بررسی می‌شوند.

نیروی کششی

اطلاعات توصیفی نیروی کششی ریشه‌ها در جدول ۲ آمده است.

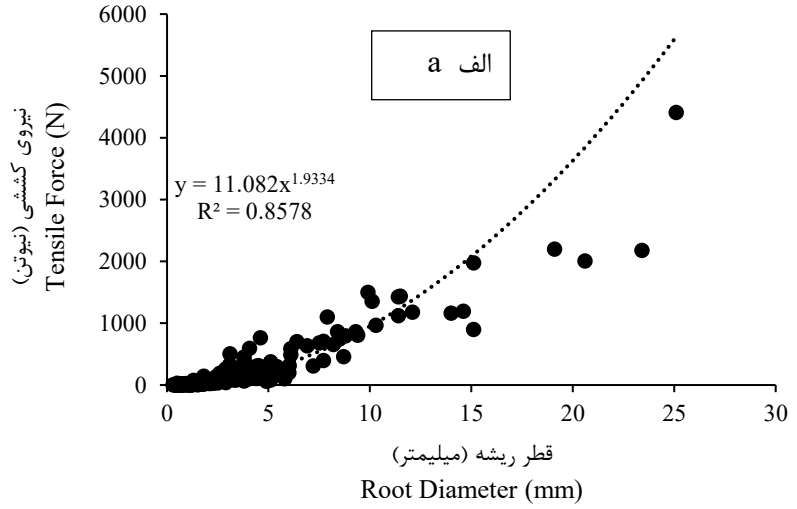
ازآنجا که مدل RBMw در قسمت مقاومت مکانیکی با داده‌های نیروی کششی کار می‌کند، داده‌های دستگاه‌های یونیورسال و بیرون کشیدن درجا با یکدیگر ادغام شدند. مقدار واریانس در داده‌ها بسیار زیاد و مقدار میانگین±اشتباه معیار نیروی کششی ریشه در فصل‌های رویش و خزان به‌ترتیب

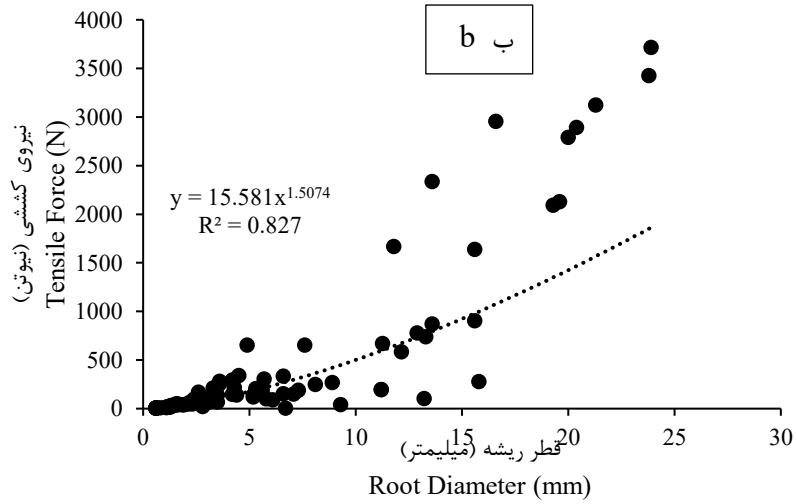
۳۵۸/۲۲±۹۶/۵۱ و ۲۵۰/۱۲±۳۴/۹۵ نیوتن بود. فاصلهٔ اطمینان ۹۵ درصد برای دو فصل رویش و خزان نیز به‌ترتیب ۳۱۸/۶۲-۳۹۹/۳۰ و ۳۱۳/۰۹-۱۸۷/۱۶ نیوتن بود. نتایج نشان می‌دهد که بین قطر و نیروی کششی ریشه در فصل‌های رویش (R^2=0.89) و خزان (R^2=0.81) رابطهٔ توانی مثبت و معنی‌دار (p<0.001) برقرار است (شکل ۷). همچنین ضرایب آلفا و بتای معادلهٔ توانی نیز معنی‌دار بودند. مقدار α و β برای فصل رویش ۱۱/۰۸ و ۱/۹۳ و برای فصل خزان ۱۵/۴۵ و ۱/۵۳ به دست آمد. همچنین نتایج آنالیز کوواریانس نشان داد که عامل کوواریت یعنی قطر ریشه معنی‌دار است (F=441.11, p<0.001)، ولی تأثیر فصل بر نیروی کششی معنی‌دار نیست (p>0.05).

جدول ۲- اطلاعات توصیفی نیروی کششی در فصل‌های رویش و خزان

Table 2. Descriptive statistics of tensile force in leaf off and leaf on periods

Season	Root diameter (mm)			Tensile force (N)		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Leaf off	0.6	23.9	6.49	5.9	3718.57	250.12
Leaf on	0.3	25.1	3.62	0.4	4408.41	358.96





شکل ۷- رابطهٔ قطر ریشه و نیروی کششی (درجا همراه با یونیورسال) در فصل (الف) رویش و (ب) خزان

Figure 7. Relationship between root diameter and tensile force measured using the in situ root pullout and universal testing machines during (a) the growing season and (b) the leaf-off season

مقاومت کششی

اطلاعات توصیفی مقاومت کششی ریشه‌ها در جدول ۳ آمده است.

مدل Wu اصلاح‌شده در قسمت داده‌های مقاومت مکانیکی از شاخص مقاومت کششی استفاده می‌کند و اغلب محدودیت قطری در مورد داده‌ها نیز وجود دارد و داده‌های قطرهای کمتر از ۱۰ یا ۲۰ میلی‌متر استفاده می‌شوند (Abdi et al., 2010). بنابراین در این مدل تنها داده‌های مقاومت کششی دستگاه یونیورسال به کار رفت. مقدار میانگین±اشتباه معیار مقاومت کششی ریشه در فصل‌های رویش و خزان برای آزمایش‌های یونیورسال به‌ترتیب ۰/۶۹±۱۲/۲۳ و ۱۸/۰±۵۴/۸۲ مگاپاسکال بود. فاصلهٔ اطمینان ۹۵ درصد برای دو فصل رویش و خزان نیز به‌ترتیب ۰۷/۸۶-۱۳/۱۰ و ۱۷/۶۹-۱۹/۹۰ مگاپاسکال بود.

نتایج نشان می‌دهد که بین قطر و مقاومت کششی ریشه در فصل‌های رویش (R^2=0.61) و خزان (R^2=0.62) رابطهٔ توانی منفی و معنی‌دار (p<0.001) برقرار است (شکل ۸). همچنین ضرایب آلفا و بتای معادلهٔ توانی نیز معنی‌دار بودند. مقدار α و β برای فصل رویش به‌ترتیب ۱۶/۶۹ و ۰/۵۷- و برای فصل خزان ۲۲/۰۶ و ۰/۲۹- به دست آمد. همچنین نتایج آنالیز کوواریانس نشان داد که هم عامل کوواریت یعنی قطر ریشه (F=96.19, p<0.001) و هم تأثیر فصل بر مقاومت کششی معنی‌دار هستند (F=84.21, p<0.001).

مسلح‌سازی

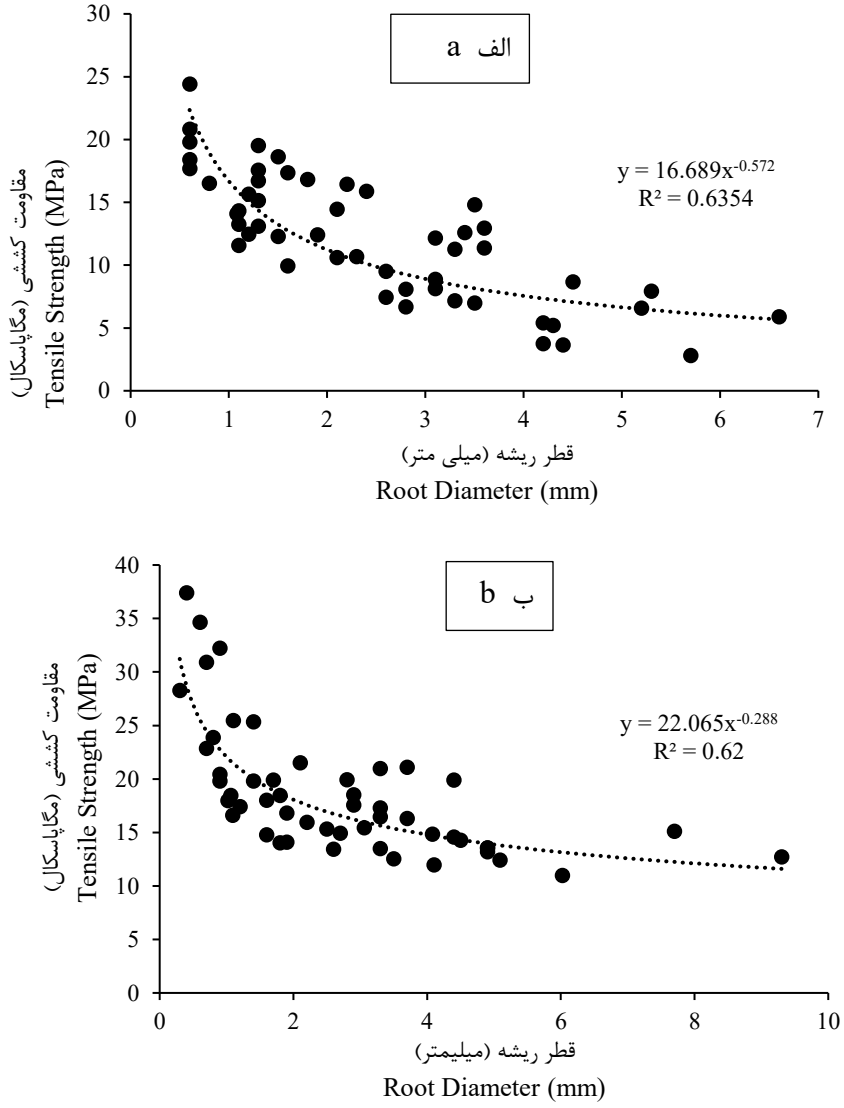
نتایج حاصل از هر دو مدل نشان داد که با افزایش عمق، مقدار مسلح‌سازی خاک در اثر حضور ریشه همانند رابطهٔ تراکم سطح ریشه کاهش یافته است. دامنهٔ اعداد مسلح‌سازی برای مدل‌های Wu اصلاح‌شده و RBMw به‌ترتیب ۱-۱۸۷ و ۱۹-۱۱۵ پاسکال بودند. نتایج به‌دست‌آمده از مسلح‌سازی خاک توسط ریشه در مدل Wu اصلاح‌شده نشان داد که میانگین مقدار مسلح‌سازی عمق‌ها در فصل‌های رویش و خزان به‌ترتیب ۴۵/۲۹ و ۶۲/۵۲ پاسکال است. نتایج آزمون رتبه‌ای علامت‌دار ویلکاکسون نشان داد که بین مسلح‌سازی دو فصل تفاوت معنی‌دار وجود دارد (Z=-3.51, p<0.001). در خصوص مدل RBMw نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق از مقدار مسلح‌سازی کاسته می‌شود و میانگین مقدار مسلح‌سازی عمق‌ها در فصل‌های رویش و خزان به‌ترتیب ۴۹/۴۷ و ۵۳/۹۲ پاسکال است. نتایج آزمون t جفتی نشان داد که بین مسلح‌سازی دو فصل تفاوت معنی‌دار وجود ندارد (t=-1.23, p=0.30).

همچنین نزدیک بودن مقادیر برآوردشده توسط دو مدل نشان داد که استفاده از ضریب اصلاح مدل Wu توانسته است تا حد زیادی بیش‌برآورد شناخته‌شدهٔ این مدل را کاهش دهد و نتایج آن را به مدلRBMw نزدیک کند.

جدول ۳- اطلاعات توصیفی مقاومت کششی در فصل‌های رویش و خزان

Table 3. Descriptive statistics of tensile strength in leaf off and leaf on periods

Season	Root diameter (mm)			Tensile strength (MPa)		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Leaf off	0.3	9.3	2.72	10.98	37.4	18.54
Leaf on	0.6	6.6	2.48	2.8	24.4	12.23



شکل ۸- رابطهٔ قطر ریشه و مقاومت کششی در فصل (الف) رویش و (ب) خزان

Figure 8. Relationship between root diameter and tensile strength during (a) the growing season and (b) the leaf-off season

بحث

نتایج پژوهش نشان داد که مقدار شاخص‌های تراکم ریشه شامل تعداد ریشه‌ها و نسبت سطح ریشه به خاک دارای واریانس زیادی است، ولی به‌طور کلی این مقادیر با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابند. شاخص‌های تعداد ریشه و نسبت سطح ریشه به سطح خاک تحت تأثیر عامل‌های محیطی و ژنتیکی از جمله مقدار آب در دسترس، دما، فصل، ارتفاع از سطح دریا، رطوبت، بافت و عمق خاک، مواد مغذی، فعالیت‌های میکروارگانیسم و ماکروارگانیسم، نوع و سن گیاه، تراکم و مقدار رقابت است (Genet et al., 2005). در پژوهش‌های گذشته مقدار گزارش‌شدهٔ تراکم ریشه درختان دامنهٔ وسیعی داشته، ولی به‌طور کلی رابطهٔ معکوس عمق خاک و تراکم ریشه در بیشتر پژوهش‌ها گزارش شده و از بین این پژوهش‌ها بیشتر آنها تابع ریاضی کاهشی را تابع لگاریتمی ذکر کرده‌اند (Mattia et al., 2005). الگوی کاهشی تراکم ریشه‌های جانبی در رابطه با عمق خاک اغلب ناشی از محدودیت در دسترسی به عناصر غذایی و اکسیژن، همراه با افزایش تراکم و فشردگی لایه‌های زیرسطحی نسبت به افق‌های سطحی ذکر شده است (Norris, 2005). همچنین باید در نظر داشت که ریشه‌های قابل بررسی

با روش پروفیل ریشه‌های جانبی هستند که به‌دلیل نقش خود به‌طور معمول عمق نفوذ زیادی ندارند و بر خلاف ریشهٔ راست محدود به لایه‌های سطحی خاک هستند (Freschet et al., 2021). به همین دلیل است که در منابع، متراکم‌ترین لایهٔ حضور این ریشه‌ها اغلب عمق ۱۰-۰ یا ۲۰-۰ سانتی‌متر ذکر شده است (Bischetti et al., 2005). شایان ذکر است که حضور بیشترین تراکم ریشه‌ها در لایه‌های سطحی خاک را می‌توان یک ایراد در زیست‌مهندسی تلقی کرد، زیرا عمق مسلح‌سازی را محدود می‌کند. از دیدگاه زیست‌مهندسی، افزون‌بر عمق پراکنش ریشه، مقدار توسعه و گسترش سیستم ریشه‌ای نیز اهمیت زیادی دارد؛ به‌طوری که تفاوت‌های گونه‌ای در تعداد، طول و حجم ریشه می‌تواند ظرفیت اشغال خاک و در نتیجه کارایی گونه‌ها را در پروژه‌های تثبیت زیستی تحت تأثیر قرار دهد (Abdi et al., 2026b). مقادیر تراکم ثبت‌شده در این پژوهش نسبت به دیگر گونه‌های جنگل هیرکانی کمتر است که ممکن است به‌دلیل معماری سیستم ریشهٔ راست در گونهٔ بلوط (Çorbacı & Ertekin, 2012) و تمایل نفوذ ریشه‌ها با زوایای زیاد در خاک که روش پروفیل توانایی بررسی مناسب آنها را ندارد باشد.

نتایج آزمایش‌های مقاومت مکانیکی نشان داد که رابطهٔ توانی مثبت بین قطر ریشه و نیروی کششی وجود دارد. در بیشتر پژوهش‌های گذشته نیز رابطهٔ قطر ریشه و نیروی کششی به‌صورت توانی مثبت گزارش شده است (Giadrossich et al., 2016, Abdi & Deljouei, 2019; Abdi, 2018). وجود رابطهٔ توانی به تأثیر توان دوم قطر ریشه در سطح مقطع ریشه دلالت دارد. البته باید در نظر داشت که بیشتر داده‌های گذشته مربوط به دستگاه یونیورسال و محدود به قطرهای کمتر از ۱۰ میلی‌متر است و داده‌های دستگاه درجا بسیار کمیاب‌ترند که در پژوهش‌های اندکی (Ngo et al., 2023; Dazio et al., 2018; Vergani et al., 2017) بررسی شده‌اند. اهمیت این داده‌ها را می‌توان با نبود سابقه‌ای از وجود آنها در مورد جنگل‌های هیرکانی نشان داد. بنابراین مقایسهٔ مستقیم میانگین‌های گزارش‌شده به‌سادگی مقدور نیست، زیرا قطر ریشه تأثیر قوی بر میانگین‌ها دارد. ضرایب تبیین مدل‌های قطر- نیروی کششی که بیشتر از ۰/۸۰ به دست آمد نشان می‌دهد که بیشتر واریانس داده‌های نیروی کششی تنها توسط قطر توجیه می‌شود و عوامل دیگر تأثیر کمی بر این شاخص دارند؛ بنابراین بررسی این شاخص نسبت به مقاومت کششی راحت‌تر است و پیچیدگی کمتری خواهد داشت. در رابطهٔ توانی، β (توان معادله) مقدار افزایش نیرو به ازای افزایش قطر ریشه و α (عرض از مبدأ معادله) به‌عنوان ضریب اندازه یا عرض از مبدأ مطرح است؛ بنابراین ریشه‌هایی قوی‌ترند که مقدار α و β آنها در معادله بزرگ‌تر باشد. مقدار ضریب α رابطهٔ توانی بین نیروی کششی ریشه و قطر ریشه در فصل‌های خزان و رویش به‌ترتیب ۱۵/۴۵ و ۱۱/۰۸ به دست آمد. مقدار ضریب α در پژوهش‌های دیگر بین ۶/۸ (Kazemi et al., 2014) تا ۵۰/۸ (Abdi, 2018) گزارش شده است. مقدار ضریب β در فصل‌های خزان و رویش به‌ترتیب ۱/۵۳ و ۱/۹۳ بود. مرور منابع نشان می‌دهد که مقدار این ضریب قبلاً از ۰/۷۹ (Kazemi et al., 2014) تا ۱/۶۶ (Abdi, 2018) گزارش شده بود. اما پژوهش‌های بعدی نشان داد که این دامنه ناقص است و با توجه به گونه و اکوسیستم ممکن است تغییر کند و به اصلاح دامنه نیاز دارد (Esmaiili et al., 2026). به‌تازگی اضافه شدن داده‌های دستگاه درجا نیز ضرورت این اصلاحات را بیشتر کرده است. اهمیت مهندسی در نظر گرفتن ریشه‌های قطورتر در مدل‌های نسل جدید در این است که می‌توانند تا حدودی بیش برآوردی مدل‌های سنتی را جبران و اعداد مسلح‌سازی را در مدل‌های نسل‌های مختلف به یکدیگر نزدیک‌تر کنند.

همچنین رابطهٔ قطر ریشه و مقاومت کششی ریشه در همهٔ تیمارها از تابع توانی منفی پیروی کرده که

پژوهش‌های قبلی علت این رابطه را بیشتر بودن نسبت سلولز به لیگنین در ریشه‌های نازک‌تر و جوان‌تر (Genet et al., 2005) ذکر کرده‌اند. Kazemi et al. (2014) در گونهٔ *Quercus brantii* Lindl. میانگین مقاومت کششی این گونه را در تابستان و زمستان به‌ترتیب ۳۳/۲۳ و ۶۴/۹۸ مگاپاسکال گزارش کردند (Kazemi et al., 2014). همچنین Abdi (2018) مقاومت کششی ریشه‌های *Quercus castaneifolia* را ۴۲/۷ مگاپاسکال گزارش کرد. در پژوهش حاضر میانگین مقاومت کششی فصل‌های خزان و رویش به‌ترتیب ۱۸/۵۴ و ۱۲/۲۳ مگاپاسکال به دست آمد. کمتر بودن مقادیر حاصل از این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین در مورد گونه‌های دارای منشأ طبیعی بلوط منطبق بر یافته‌های Esmaiili et al. (2020) است که مقدار تراکم و مقاومت مکانیکی توده‌های دست‌کاشت را نسبت به توده‌های طبیعی کمتر گزارش کرده است. از طرفی مقاومت کششی بیشتر در فصل خزان نیز منطبق بر نتایج Kazemi et al. (2014) و Esmaiili et al. (2026) است و دلیل این پدیده کمتر بودن رطوبت ریشه‌ها در فصل خزان عنوان شده است (Esmaiili et al., 2026). هرچند به‌دلیل در دسترس نبودن ترازوی دقیق (چهار صفر) پرتابل، بررسی این فرضیه در طبیعت مقدور نشد.

در رابطه با تابع توانی منفی، ضریب β عامل کنترل‌کنندهٔ مقدار کاهش مقاومت کششی ریشه در رابطه با قطر ریشه و α ضریب اندازه معرفی شده است. بنابراین گونه‌ای دارای مقاومت کششی بیشتر است که α بزرگ‌تر و β کوچک‌تری داشته باشد. ضرایب تبیین مدل‌های قطر-مقاومت کششی حدود ۲۰ درصد کمتر نسبت به رابطهٔ قطر-نیروی کششی به دست آمد که نشان می‌دهد عوامل دیگری غیر از قطر ریشه در مقدار مقاومت کششی تأثیرگذارند. در پژوهش‌های مختلف این عوامل نسبت سلولز به لیگنین (Genet et al., 2005)، آناتومی ریشه و ضخامت دیوارهٔ سلولی (Oladi et al., 2024) ذکر شده‌اند که اندازه‌گیری آنها هزینه و زمان‌بر است و به همین دلیل اندازه‌گیری آنها در پژوهش‌های زیستمهندسی با محدودیت همراه است.

تا کنون در دنیا چند پژوهش دربارهٔ تأثیر فصل بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه انجام گرفته که گاه نتایج متناقضی داشته‌اند. برای مثال برخی پژوهش‌ها مقاومت مکانیکی در فصل خزان را بیشتر (Esmaiili et al., 2026) و برخی میانگین فصل رویش را بیشتر (Ji et al., 2025) گزارش کرده‌اند. البته Ji et al. (2025) گزارش کردند که تفاوت تنها در ریشه‌های قطور و والد رتبهٔ اول دیده شد و این تفاوت را به رطوبت خاک نسبت دادند. البته نتایج اولیهٔ پژوهشی دربارهٔ مقدار رطوبت ریشه‌ها در جنگل‌های هیرکانی نشان داده که سرعت گرفتن رطوبت و از دست دادن آن در ریشه‌های نازک‌تر بیشتر و محتوای رطوبت این ریشه‌ها نیز نسبت به ریشه‌ها قطور بیشتر است (نتایج منتشرنشده). بنابراین به نظر می‌رسد که اختلاف سازوکار جذب رطوبت و تفاوت مقاومت، احتمالاً می‌تواند با توجه به نوع گونه و پراکنش طبقات قطری ریشه‌ها در آنها متفاوت باشد. از طرفی با اینکه در آزمایش‌های مقاومت مکانیکی قطر ریشه اندازه‌گیری و کنترل می‌شود، تأثیر سن و آناتومی ریشه در نظر گرفته نمی‌شود که می‌تواند عامل ایجاد اریبی در نتایج باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که برخلاف تصور کلاسیک زیست‌مهندسی (Morgan & Rickson, 2003)، امکان معرفی الگویی کلی برای تغییرات فصلی دست‌کم در آیندهٔ نزدیک متصور نیست.

مقاومت مکانیکی و مقدار مسلح‌سازی ریشه‌ها نیز بسته به نوع گونهٔ گیاهی و عامل‌های مکانی مانند محیط رشد، فصل، ارتفاع از سطح دریا و برای دامنه متغیر است. افزایش فعالیت کامبیومی، توسعهٔ بافت‌های آوندی و تغییر در ترکیب دیوارهٔ سلولی در فصل رویش می‌تواند سبب بهبود خواص مکانیکی ریشه‌ها شود (Genet et al., 2005). در مقابل کاهش محتوای آب و توقف رشد در فصل خزان ممکن است

رفتار مکانیکی ریشه را تحت تأثیر قرار دهد (Rossi et al., 2022). از این‌رو به‌دلیل پیچیدگی سازوکار مسلح‌سازی ریشه در فصول مختلف و تفاوت احتمالی در گونه‌های همیشه‌سبز و خزان‌کننده، داده‌های بیشتر برای درک تفاوت‌های بین فصلی برای برآورد دقیق ظرفیت مسلح‌سازی خاک ضروری است. مقادیر مسلح‌سازی محاسبه‌شده در پژوهش حاضر کمتر از میانگین‌های گزارش‌شده در منابع علمی است (Morgan & Rickson, 2003) که دلیل اصلی آن ممکن است تفاوت منشأ توده باشد، چراکه پژوهش حاضر در تودهٔ دست‌کاشت انجام گرفته که در منابع ذکرشده تراکم ریشه و مقاومت مکانیکی کمتری نسبت به توده‌های طبیعی دارند (Genet et al., 2008) و تراکم ریشه‌ها عامل مهمی در مقدار مسلح‌سازی خاک است. با این‌حال اعداد مسلح‌سازی پژوهش حاضر حتی از دیگر توده‌های دست‌کاشت بررسی‌شده (مانند: Esmaiili et al., 2020) نیز کمتر است که به‌دلیل تأثیر همزمان کمتر بودن تراکم احتمالاً ناشی از وجود ریشه‌های عمودنفوذ و مقاومت مکانیکی کمتر نسبت به دیگر توده‌های بررسی‌شدهٔ جنگل خیرود است. از طرفی اعداد گزارش‌شده در پژوهش حاضر میانگین مربوط به کل عمق پروفیل است و به‌دلیل اعداد کوچک عمق‌های بیشتر، عدد میانگین تحت تأثیر قرار گرفته است. یکی از دلایل محتمل این پدیده، عمق کمتر خاک راندزینی در منطقهٔ پژوهش حاضر است. نتایج تطبیقی دو مدل نشان داد که ضریب اصلاحی اعمال‌شده Preti (2013) توانست به‌خوبی نتایج مدل Wu را به مدل RBMw نزدیک کند و در واقع بیش‌برآوردی گزارش‌شدهٔ این مدل (Schwarz et al., 2013) را جبران کند. از طرفی اصلاح و کاهش مقدار خروجی مدل Wu می‌تواند عددی محافظه‌کارانه‌تر در اختیار مهندس طراح قرار دهد و تا حدی عدم قطعیت شاخص‌های ورودی مدل‌های تحلیل پایداری شیب را جبران کند (Deljouei et al., 2023).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر تغییرات فصلی بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه و مقدار مسلح‌سازی خاک توسط سیستم ریشه بلندمازو در یک توده جنگلکاری‌شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت کششی ریشه در فصل خزان به‌طور معنی‌داری بیشتر از فصل رویش است، درحالی که نیروی کششی بین دو فصل تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین کاهش تعداد ریشه و نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) با افزایش عمق، موجب کاهش ظرفیت مسلح‌سازی خاک در هر دو مدل شد و بیشترین مسلح‌سازی خاک در لایه‌های سطحی مشاهده شد.

مقایسهٔ دو مدل نشان داد که اگرچه هر دو مدل الگوی مشابهی را از کاهش مسلح‌سازی با افزایش عمق ارائه کردند، در ارزیابی اثر فصل تفاوت داشتند. مدل Wu اصلاح‌شده افزایش معنی‌دار مسلح‌سازی خاک در فصل خزان را نشان داد، درحالی که مدل RBMw اختلاف معنی‌داری بین دو فصل آشکار نکرد. این نتایج بیانگر آن است که انتخاب مدل ممکن است بر تفسیر اثرهای فصلی و برآورد ظرفیت مسلح‌سازی خاک تأثیرگذار باشد. همچنین نزدیک بودن مقادیر برآوردشدهٔ توسط دو مدل نشان داد که استفاده از ضریب اصلاح مدل Wu توانسته است تا حد زیادی بیش‌برآورد شناخته‌شدهٔ این مدل را کاهش دهد و نتایج آن را به مدل RBMw نزدیک کند.

نوآوری اصلی این پژوهش در بررسی همزمان اثر فصل بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه و برآورد ظرفیت مسلح‌سازی خاک با استفاده از دو مدل متداول زیست‌مهندسی، همراه با تلفیق داده‌های حاصل از آزمون کشش آزمایشگاهی و آزمون ریشه‌کش درجا در یک جنگلکاری بلندمازو است. همچنین این پژوهش نخستین مجموعهٔ داده از آزمون‌های کشش درجا را برای این تودهٔ جنگلکاری در جنگل‌های هیرکانی فراهم کرده و ارزیابی واقع‌بینانه‌تر عملکرد مکانیکی

ریشه‌ها به‌ویژه ریشه‌های قطورتر را که در گذشته به‌دلیل ضعف تکنیک نادیده گرفته می‌شدند ممکن ساخته است.

با وجود این، نتایج پژوهش باید با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌ها تفسیر شوند. پژوهش تنها در یک تودهٔ جنگلکاری و روی یک گونه انجام گرفت و تنها دو مقطع زمانی بررسی شد. همچنین عواملی مانند رطوبت واقعی ریشه، ویژگی‌های آناتومیکی و ترکیب شیمیایی ریشه که ممکن است بر مقاومت مکانیکی اثرگذار باشند اندازه‌گیری نشدند. بنابراین تعمیم نتایج به گونه‌ها، رویشگاه‌ها یا شرایط اقلیمی دیگر نیازمند احتیاط است.

از دیدگاه مدیریتی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نادیده گرفتن تغییرات فصلی در ارزیابی پایداری دامنه‌ها و طراحی پروژه‌های زیست‌مهندسی خاک ممکن است به برآورد نادرست ظرفیت مسلح‌سازی خاک توسط سیستم ریشه‌ای منجر شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مدل‌های تحلیل پایداری شیب و محاسبهٔ ضریب اطمینان، به‌ویژه در مناطق دارای گونه‌های خزان‌کننده، اثر فصل و تغییرات زمانی ویژگی‌های بیومکانیکی ریشه‌ها در قالب ضرایب یا شاخص‌های اصلاحی لحاظ شود.

برای پژوهش‌های آینده، بررسی تغییرات فصلی در گونه‌های مختلف جنگلی، اندازه‌گیری همزمان رطوبت بافت ریشه، ویژگی‌های آناتومیکی و ترکیب شیمیایی ریشه می‌تواند به توسعهٔ مدل‌های دقیق‌تر زیست‌مهندسی و افزایش قابلیت اعتماد آنها در طراحی پروژه‌های تثبیت دامنه کمک کند.

References

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*, *3*, 175-198.

Abdi, E. (2014). Effect of Oriental beech root reinforcement on slope stability (Hyrcanian Forest, Iran). *Journal of Forest Science, 60*(4), 166-173. https://doi.org/10.17221/93/2013-JFS

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

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. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.020

Abdi, E., Pouya, H., Karimi, Z., Rostami, Z., & Ghalandar, M. (2026a). Investigating the feasibility of using *Crataegus germanica* (L.) Kuntze and. *Crataegus monogyna* (L.) Jacq. shrubs in bioengineering projects in Hyrcanian forests, Iran: opportunities and challenges. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *34(1)*, 82-97 (In Persian).

Abdi, E., Shams, S., Etemad, V., Hosseini, S.A., Sadeghi, S.M.M., Marcu, M.V., & Deljouei, A. (2026b). Early root development of Salix alba and *Populus nigra* cuttings in a controlled nursery experiment. *Bosque (Valdivia)*, *47*, e4712. https://doi.org/10.4206/bosque.e4712

Berenji Tehrani, F., Majnounian, B., Abdi, E., & Zahedi Amiri, G. (2015). Impacts of forest road on plant species diversity in a Hyrcanian forest, Iran. *Croatian Journal of Forest Engineering, 36*(1), 63-71.

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., & Zocco, A. (2005). Root strength and root area of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, *278*, 11–22. https://doi.org/10.1007/s11104-005-0605-4

Coppin, N.J., & Richards, I.G. (1990). *Use of vegetation in Civil Engineering.* Butterworth publication, London. 272p.

Çorbacı, Ö.L., & Ertekin, M. (2012). Private plantation techniques. *Landscape planning, (13),* 319-352.

Dazio, E., Conedera, M., Schwarz, M. (2018). Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *Forest Ecology and Management*, *417*, 63–76.

Deljouei, A., Cislaghi, A., Abdi, E., Borz, S.A., Majnounian, B., & Hales, T.C. (2023). Implications of hornbeam and beech root systems on slope stability: From field and laboratory measurements to modelling methods. *Plant and Soil*, *483(1)*, 547-572. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05764-z

Esmaiili, M., Abdi, E., & Hayati, E. (2026). Seasonal modulation of root mechanical properties in contrasting tree species under uniform environmental conditions. *Trees*, *40*(3), 40-74. https://doi.org/10.1007/s00468-026-02782-7

Esmaiili, M., Abdi, E., Nieber, J.L., Jafary, M., & Majnounian, B. (2020). How roots of Picea abies and *Fraxinus excelsior* plantations contribute to soil strength and slope stability: evidence from a study case in the Hyrcanian Forest, Iran. *Soil Research*, *59*(3), 287-298. https://doi.org/10.1071/SR20083

Freschet, G.T., Pagès, L., Iversen, C.M., Comas, L.H., Rewald, B., Roumet, C., Klimešová, J., Zadworny, M., Poorter, H., Postma, J.A., & Adams, T.S. (2021) A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytologist*, *232(3)*, 973-1122. https://doi.org/10.1111/nph.17572

Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Fourcaud, T., Cai, X., Ji, J., & 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 Management, 256*(8), 1517-1526.

Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S.B., Fourcaud, T., Dumail, J.F., & Van Beek R. (2005). The influence of cellulose content on tensile strength of tree roots. *Plant and Soil*, *278*, 1–9. https://doi.org/10.1007/s11104-005-8768-6

Giadrossich, F., Cohen, D., Schwarz, M., Seddaiu, G., Contrain, N., Lubino, M., ValdesRodriguez, O.A., & Niedd, M. (2016). Modelling bio-engineering traits of Jatropha curcas L. *Ecological Engineering*, *89*, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.005

Gray, D.H., & Sotir, R.B. (1996). Biotechnical Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical guide for Erosion control. Wiley, New York, USA.

Ji, J., Kokutse, N., Genet, M., Fourcaud, T., & Zhang, Z. (2012). Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China. *Catena*, *92*, 139-154. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.12.008

Ji, K., Deng, C., Ye, L., Liu, Y., Liu, F., Mao, Z., & Zuo, J. (2025). Does root tensile strength exhibit seasonal variation? Evidence from two herbaceous species. *Plants, 14*(19), 2957. https://doi.org/10.3390/plants14192957

Kazemi, m., Abdi, E., Majnounian, B., & Yousefzadeh, h. (2014). The effect of season on resistance of Persian oak (*Quercus persica*) roots. *Iranian Journal of Forest*, *6(4)*, 435-444 (In Persian).

Majnounian, B., & Etter, H. (1992). Management plan revision for the district of Patom. *Iranian Journal of Natural Resources*, Special Issue, 104 p. (In Persian).

Mattia, C., Bischetti, G.B., & Gentile, F. (2005). Biotechnical characteristics of root system of typical Mediterranean species. *Plant and Soil*, *278*, 23–32.

Morgan, R.P., & Rickson, R.J. (2003). Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach: A Bioengineering Approach. *Taylor & Francis*. 293p. https://doi.org/10.4324/9780203362136

Ngo, H.M., van Zadelhoff, F.B., Gasparini, I., Plaschy, J., Flepp, G., Dorren, L., & Schwarz, M. (2023). Analysis of Poplar's (*Populus nigra ita*.) Root Systems for Quantifying Bio-Engineering Measures in New Zealand Pastoral Hill Country. *Forests*, *14*(6), 1240. https://doi.org/10.3390/f14061240

Norris, J.E. (2005). Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England. *Plant and Soil*, *278*, 43-53. https://doi.org/10.1007/s11104-005-1301-0

Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., Van Beek, R., Nicoll, B.C., & Achim, A. (2008). Slope Stability and Erosion Control: *Ecotechnological Solutions*, Springer, Netherlands, 288 pp.

Oladi, R., Aliverdikhani, R., & Abdi, E. (2024) Linking root xylem anatomy to tensile strength: insights from four broadleaved tree species in the Hyrcanian forests. *Plant and Soil*, 1-16. https://doi.org/10.1007/s11104-024-07148-x

Preti, F. (2013) Forest protection and protection forest: tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering. *Ecological Engineering, 61*, 633–645. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.11.009

Rossi, R., Picuno, P., Fagnano, M., & Amato, M. (2022). Soil reinforcement potential of cultivated cardoon (*Cynara cardunculus* L.): First data of root tensile strength and density, Catena, *211*(1), 106-116. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106016

Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G., Tamjidi, J., Friesen, J., & Farahnaklangroudi, M. (2018). Importance of transitional leaf states in canopy rainfall partitioning dynamics. *European Journal of Forest Research*, *137(1)*, 121-30. https://doi.org/10.1007/s10342-017-1098-4

Schwarz, M., Giadrossich, F., & Cohen, D. (2013). Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17(11)*, 4367-4377. https://doi.org/10.5194/hess-17-4367-2013

Vergani, C., Giadrossich, F., Buckley, P., Conedera, M., Pividori, M., Salbitano, F., & Schwarz, M. (2017). Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-science reviews*, *167*, 88-102. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.002

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. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.038

Zhao, C., Feng Z., & Liu, v. (2003). Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation, *Journal of Mountain Science*, *21(2)*, 157-161.

Iranian Journal of Forest
Vol. 18, No. 2, Summer 2026
pp. 323-340
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2026.585088.2123
CC BY 4.0

Seasonal Variations in Root Mechanical Properties and Root-Induced Soil Reinforcement in a 45-Year-Old *Quercus castaneifolia* C.A. Mey. Plantation

M. Ramezani[1], E. Abdi[2*], A. Deljouei[3], and M. Ghalandar[4]

[1]MS.c. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
[2]Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
[3]Assistant Prof., University of Arkansas at Monticello, College of Forestry, Agriculture and Natural Resources, Monticello, Arkansas, United States.
[4]Assistant Prof., Dept. of Mathematics and Statistics, Faculty of Basic Science and Engineering, Gonbad Kavous University, Golestan, Iran.

(Received: 6 June 2026; Accepted: 16 August 2026)

Abstract

Introduction: Nature-based solutions, particularly the use of vegetation and soil bioengineering techniques, are widely recognized as effective approaches for controlling soil erosion and improving slope stability. Among the different components of vegetation, including the canopy, stem, and root system, roots play a particularly important role in slope stabilization by mechanically reinforcing the soil. Numerous factors influence the reinforcing capacity of root systems, among which seasonal variation has received relatively little attention. Therefore, this study aimed to investigate the effect of season on root mechanical properties and root-induced soil reinforcement in a 45-year-old oak (*Quercus castaneifolia*) plantation located in the Kheyrud Forest near Nowshahr, northern Iran. The study site was previously occupied by a degraded hornbeam (*Carpinus betulus* L.) stand that had been clear-cut and subsequently replanted with oak.

Materials and Methods: Four oak trees were randomly selected for sampling, with a mean diameter at breast height (DBH) of 16.5 cm and a mean height of 10.0 m. To investigate the lateral distribution of the root system, one soil profile was excavated downslope of each tree at a horizontal distance of 0.5 m from the stem. The excavation depth corresponded to the maximum depth of lateral root occurrence, and root distribution was recorded across different soil horizons on the exposed profile wall. Subsequently, the mechanical properties of roots with diameters ranging from 0.3 to 23.8 mm were determined using both an in situ pull-out device under field conditions and a universal testing machine under laboratory conditions during the autumn (86 samples) and growing (90 samples) seasons. Finally, root-induced soil reinforcement was estimated by integrating root distribution and mechanical property data using the modified Wu model and the RBMw model.

Results: The results showed that both root number and Root Area Ratio (RAR) decreased logarithmically with increasing soil depth, with the highest values occurring in the upper soil layers. A positive power-law relationship was observed between root diameter and tensile force for both the universal testing machine and the in situ pull-out device, whereas root tensile strength exhibited a negative power-law relationship with root diameter. The mean ± standard error of root tensile force during the growing and autumn seasons was 358.96 ± 22.51 N and 250.12 ± 34.95 N, respectively. The corresponding mean ± standard error of root tensile strength measured by the universal testing machine was 12.23 ± 0.69 MPa in the growing season and 18.54 ± 0.82 MPa in autumn. Analysis of covariance (ANCOVA) revealed significant seasonal differences in root tensile strength, with significantly higher values in autumn, whereas tensile force did not differ significantly between seasons. Both reinforcement models indicated that soil reinforcement decreased with increasing soil depth, with maximum reinforcement occurring in the upper soil layers where root density was greatest. The mean soil reinforcement estimated by the modified Wu model was 62.52 Pa and 45.29 Pa during the autumn and growing seasons, respectively, whereas the corresponding values estimated by the RBMw model were 53.92 Pa and 49.47 Pa. The Wilcoxon signed-rank test applied to the modified Wu model outputs showed significantly greater soil reinforcement in autumn, whereas the paired t-test applied to the RBMw model outputs indicated no significant seasonal difference in mean soil reinforcement.

Conclusion: Seasonal variation significantly influenced the tensile strength of *Quercus castaneifolia* roots, with higher tensile strength observed during the autumn season, whereas tensile force remained unaffected by season. In addition, increasing soil depth resulted in lower Root Area Ratio (RAR) values and consequently reduced soil reinforcement in both models. Although the modified Wu and RBMw models exhibited similar trends in predicting soil reinforcement, the modified Wu model was more sensitive to seasonal variation and detected significantly greater soil reinforcement during autumn, whereas the RBMw model did not reveal significant seasonal differences. By integrating laboratory tensile tests with in situ pull-out measurements, this study demonstrated that model selection can substantially influence the evaluation of seasonal effects on root reinforcement and soil reinforcement capacity. These findings highlight the importance of incorporating seasonal variation into slope stability analyses to improve the reliability of soil bioengineering design and the sustainable management of vegetated slopes.

Keywords: In-situ pull out device, Root area ratio, Soil bioengineering, Soil reinforcement, Universal testing machine.

* Corresponding Author Phone: 09113569068 Email: abdie@ut.ac.ir