

Research Article

Investigating the feasibility of using *Crataegus germanica* (L.) Kuntze. and *Crataegus monogyna* Jacq. shrubs in bioengineering projects in Hyrcanian forests, Iran: opportunities and challenges

Ehsan Abdi^{1*}, Haniyeh Pouya², Zahra Karimi³, Zahra Rostami² and Mohsen Ghalandar⁴

1* - Corresponding author, Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: abdie@ut.ac.ir

2 - Ph.D. Student, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3 - Ph.D, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4 - Assistant Prof., Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Basic Science and Engineering, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

Received: 12.11.2025

Revised: 22.12.2025

Accepted: 28.12.2025

Abstract

Background and Objectives: Slope stability in fine-grained forest soils is strongly influenced by the biomechanical characteristics of plant root systems. This study aimed to evaluate and compare the contribution of two native shrub species in the Hyrcanian forests of Iran, medlar (*Crataegus germanica* (L.) Kuntze) and hawthorn (*Crataegus monogyna* Jacq.), to soil reinforcement and slope stability. Specifically, the research focused on quantifying root distribution, determining root strength properties, and estimating root-induced additional soil cohesion using the Wu model.

Methodology: The study was conducted in compartment number 118 of the Patom management district in the Kheyroud Forest Research and Educational Station, North of Iran. A site characterized by an approximate slope of 20%, a southern aspect, and fine-textured soils was selected for the study. To determine the root area ratio (RAR), four representative individuals of each species were selected, and root sampling was performed using the profile wall method on both upslope and downslope sides at three successive 10-cm soil depths. All exposed roots were measured, and RAR values were calculated accordingly. For mechanical tests, 146 intact root samples with diameters ranging from 0.3 to 9.5 mm were collected, and tensile force and tensile strength were measured using a universal testing machine (STM5). Root reinforcement was then estimated by incorporating the Wu model into the Mohr–Coulomb shear strength equation. Statistical analyses were performed using multi-way ANOVA, Bonferroni post hoc tests, and analysis of covariance (ANCOVA).

Results: The results indicated that RAR values significantly decreased with increasing soil depth and distance from the stem, with the highest values observed in the 0–10 cm surface layer. Although the main effect of species on RAR was not significant, the interaction between species and profile wall position was significant, indicating different root distribution patterns between the two species. Mechanical tests showed that tensile force increased with root diameter following a positive power function, whereas tensile strength decreased according to a negative power relationship. Medlar exhibited higher tensile strength than hawthorn, while both species



showed similar trends in tensile force increase. Wu model analysis revealed that maximum root-induced additional cohesion occurred in the surface soil layer (0–10 cm) and sharply declined with depth. Moreover, no significant effect of species on the added cohesion to soil was observed.

Conclusion: The results reveal that medlar and hawthorn root systems improve soil reinforcement and slope stability through distinct yet complementary reinforcement mechanisms. Given that the Wu model is more sensitive to root distribution than to root tensile properties, the absence of significant species-level differences in overall soil reinforcement is not unexpected. From a management perspective, the combined use of these two native shrub species is recommended for bioengineering-based slope stabilization projects in the Hyrcanian forests, with hawthorn being particularly suitable for controlling surface erosion and medlar contributing to deeper soil stabilization. Despite their ability to enhance soil shear strength, it should be noted that both medlar and hawthorn are slow-growing native species of the Hyrcanian forests, and their establishment and early growth rates are generally lower than those of fast-growing species. Therefore, their application in bioengineering slope stabilization projects is more appropriate as a long-term preventive strategy rather than as an immediate remedial measure.

Keywords: Root density, root mechanical strength, soil reinforcement; Wu model.

بررسی قابلیت استفاده از درختچه‌های ازگیل (*Crataegus germanica* (L.) Kuntze) و ولیک (*Crataegus monogyna* Jacq.) در پروژه‌های زیست‌مهندسی جنگل‌های هیرکانی: پتانسیل‌ها و چالش‌ها

احسان عبدی^{۱*}، هانیه پویا^۲، زهرا کریمی^۳، زهرا رستمی^۲ و محسن قلندر^۴

*۱- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: abdie@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- دکتری، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- استادیار، گروه ریاضی و آمار، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

چکیده

سابقه و هدف: پایداری شیب‌ها در نواحی جنگلی و با خاک‌های ریزدانه به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های زیست‌فنی سیستم ریشه گیاهان قرار دارد. هدف از این پژوهش، ارزیابی و مقایسه نقش دو گونه درختچه‌ای بومی جنگل‌های هیرکانی شامل ازگیل (*Crataegus germanica* (L.) Kuntze) و ولیک (*Crataegus monogyna* Jacq.)، در افزایش مسلح‌سازی خاک و بهبود پایداری دامنه‌ها بود. این پژوهش به دنبال کمی‌سازی پراکنش ریشه، تعیین مقاومت مکانیکی ریشه‌ها و برآورد چسبندگی افزوده‌شده به خاک ناشی از حضور ریشه‌ها براساس مدل Wu است.

مواد و روش‌ها: پژوهش پیش‌رو در پارسل ۱۱۸ بخش پاتم جنگل آموزشی - پژوهشی خیرود انجام شد. منطقه‌ای با شیب حدود ۲۰ درصد، جهت جنوبی و خاک‌های ریزدانه برای مطالعه انتخاب شد. برای تعیین شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR)، چهار پایه از هر گونه انتخاب شد. نمونه‌برداری ریشه با روش دیواره پروفیل در دو سمت بالادست و پایین دست پایه‌ها و در سه افق ۱۰ سانتی‌متری صورت گرفت. همه ریشه‌های نمایان‌شده در دیواره اندازه‌گیری و مقدار RAR محاسبه شد. به منظور تعیین مقاومت کششی و نیروی کششی ریشه‌ها، ۱۴۶ نمونه ریشه سالم در دامنه قطر ۰/۳ تا ۹/۵ میلی‌متر جمع‌آوری شد. سپس، آزمایش‌های کششی با دستگاه یونیورسال STM5 انجام شد. برای برآورد میزان مسلح‌سازی خاک، مدل Wu به‌عنوان یکی از مدل‌های کلاسیک مبتنی بر افزودن چسبندگی ریشه به معادله مقاومت برشی مهر-کولمب به‌کار گرفته شد. تحلیل آماری داده‌ها با ANOVA چندراهه، آزمون تعقیبی Bonferroni و تحلیل کوواریانس (ANCOVA) انجام شد.

نتایج: شاخص RAR به‌طور معنی‌داری با افزایش عمق و فاصله از یقه کاهش یافت و بیشترین مقدار آن در لایه سطحی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر مشاهده شد. تأثیر گونه بر RAR معنی‌دار نبود، اما اثرات متقابل (گونه × موقعیت دیواره) معنی‌دار شد که بیانگر پاسخ متفاوت گونه‌های مورد مطالعه به شرایط فیزیکی در دیواره‌های مختلف پروفیل است. بررسی رفتار مکانیکی ریشه‌ها نشان داد که نیروی کششی با افزایش قطر ریشه به‌صورت تابع توانی مثبت زیاد می‌شود و مقاومت کششی به‌صورت تابع توانی منفی کاهش می‌یابد. ازگیل، مقاومت کششی بیشتری نسبت به ولیک داشت، اما رفتار هر دو گونه در افزایش نیروی کششی مشابه بود. تحلیل‌های مدل Wu نشان داد که بیشترین چسبندگی اضافه‌شده ناشی از حضور ریشه‌ها در افق سطحی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. با افزایش عمق، مقدار آن به شدت کاهش یافت. همچنین، تأثیر گونه بر میزان چسبندگی افزوده‌شده معنی‌دار نبود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش بیانگر آن است که سیستم ریشه دو گونه مورد مطالعه به‌ویژه در افق‌های سطحی در مسلح‌سازی خاک و افزایش پایداری دامنه‌ها نقش‌آفرینی می‌کنند. از آنجاکه مدل Wu بیشتر به پراکنش ریشه حساس است تا مقاومت مکانیکی، عدم معنی‌داری تفاوت گونه‌ای در مقدار مسلح‌سازی قابل‌انتظار بود. با توجه به تفاوت الگوی ریشه‌دوانی و مقاومت کششی دو گونه، استفاده ترکیبی از ولیک و ازگیل در طرح‌های تثبیت شیب توصیه می‌شود. ولیک برای افزایش چسبندگی لایه‌های سطحی و کنترل فرسایش سطحی و ازگیل برای تقویت پایداری عمقی خاک مناسب است. البته باید در نظر داشت که این گونه‌ها کندرشد هستند و تأثیر مسلح‌سازی آبی آن‌ها پس از استقرار زیاد نیست، بنابراین در رویکرد زیست‌مهندسی پیشگیرانه، مفید خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: تراکم ریشه، مدل Wu، مسلح‌سازی خاک، مقاومت مکانیکی ریشه.

مقدمه

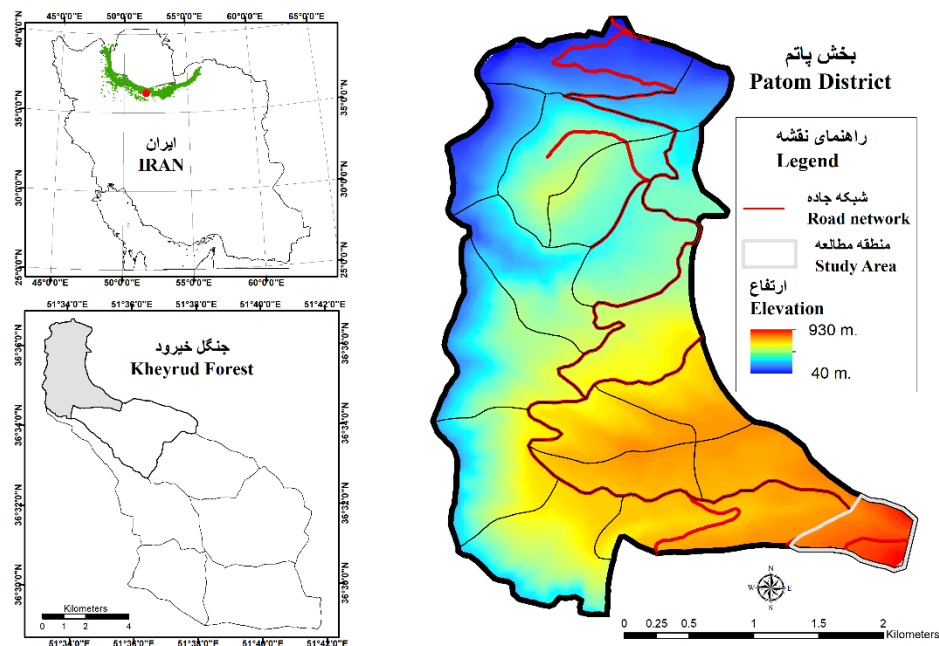
در مناطق شیب‌دار به‌ویژه در نواحی دارای خاک‌های ریزدانه، بارش‌های شدید از عوامل اصلی ناپایداری دامنه، بروز لغزش‌های سطحی و فرسایش خاک هستند. لغزش‌های سطحی که شامل جابه‌جایی لایه‌های نازک از خاک در امتداد شیب هستند، یکی از فرایندهای مهم ژئومورفولوژیک محسوب می‌شوند و می‌توانند خسارت‌های قابل‌توجهی به زیرساخت‌ها و زیست‌بوم‌ها وارد کنند (Pimentel, 2006). فرسایش خاک نیز با انتقال ذرات توسط آب، باد یا نیروی ثقل سبب کاهش حاصلخیزی و تخریب منابع خاک می‌شود. پایداری شیب، حاصل تعادل میان نیروهای محرک و مقاوم است. پوشش گیاهی از عناصر کلیدی این تعادل هستند. آن‌ها با کاهش انرژی ضربه باران، افزایش نفوذپذیری، کاهش رواناب و تنظیم چرخه رطوبت بر پایداری دامنه تأثیر می‌گذارند (Pordel et al., 2025). فرایند تبخیر- تعرق گیاهان موجب کاهش فشار منفذی و افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود (Kim et al., 2020). علاوه بر نقش آب‌شناختی، سیستم ریشه‌ای گیاهان، خاک را به‌صورت مکانیکی مسلح می‌کند و مقاومت آن را در برابر گسیختگی افزایش می‌دهد (Karimi et al., 2025). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حضور ریشه‌ها به‌طور معنی‌داری سبب افزایش مقاومت برشی و کاهش رطوبت خاک می‌شود (Rahardjo et al., 2018).

سیستم ریشه درختان شامل ریشه‌های ضخیم و نازک است که در کنار یکدیگر چسبندگی و مقاومت برشی خاک

را افزایش می‌دهند (Emadi-Tafti et al., 2021). ریشه‌های ضخیم مانند شمع عمل می‌کنند و لایه‌های خاک را به هم متصل می‌کنند، درحالی‌که ریشه‌های ریز، شبکه‌ای مترکم در لایه‌های سطحی ایجاد می‌کنند و سبب مسلح‌سازی خاک می‌شوند. کارایی مکانیکی ریشه‌ها به ویژگی‌های زیستی و مکانیکی آن‌ها وابسته است (Hairiah et al., 2020). مقاومت کششی ریشه که تابع گونه، قطر، رطوبت و شرایط محیطی است، یکی از شاخص‌های اصلی در مدل‌سازی پایداری دامنه محسوب می‌شود (Wu., 1976). درختچه‌ها با وجود عمق کمتر سیستم ریشه به‌طور معمول مقاومت مکانیکی زیادی دارند و بدون ایجاد خطرانی مانند واژگونی درختان سنگین یا تأثیر سربار، نقش مؤثری در پایداری دامنه‌ها ایفا می‌کنند. برای نمونه، Abdi (2018) نشان داد که مقاومت مکانیکی ریشه شامل نیرو و مقاومت کششی ازگیل (*Crataegus germanica* (L.) Kuntze) و ولیک (*Crataegus monogyna* Jacq.) در جنگل‌های هیرکانی با بسیاری از گونه‌های درختی قابل‌مقایسه یا حتی بیشتر است. در کنار ویژگی‌های مکانیکی، تراکم و پراکنش ریشه نیز در ظرفیت مسلح‌سازی، نقش مهمی دارند (Osman et al., 2011; Abdi, 2018). شاخص نسبت سطح ریشه به خاک (RAR) برای ارزیابی تراکم ریشه‌ها به‌کار می‌رود (Wu., 1976). همچنین، چسبندگی اضافی حاصل از حضور ریشه که در مدل‌های کلاسیک مانند مهر-کولمب در نظر گرفته می‌شود، معیاری مناسب برای سنجش

ریشه، وزن کم و مقاومت کششی مناسب می‌توانند گزینه مؤثری برای تثبیت شیب‌ها و کنترل فرسایش باشند. البته باید در نظر داشت که این گونه‌ها کندرشد بوده و تأثیر مسلح‌سازی آنی آن‌ها پس از استقرار زیاد نیست، بنابراین در رویکرد زیست‌مهندسی پیشگیرانه، مفید خواهند بود. باتوجه به موارد ذکرشده، هدف پژوهش پیش‌رو، کمی‌سازی و مقایسه میزان مسلح‌سازی خاک‌های ریزدانه جنگلی توسط دو گونه درختچه‌ای ازگیل (*Crataegus germanica*) و *Kuntze* ((*L.*) و ولیک (*Crataegus monogyna* Jacq) و ارزیابی نقش آن‌ها در بهبود پایداری دامنه‌های مستعد ناپایداری، به‌ویژه در مرحله تثبیت میان‌مدت تا بلندمدت و به‌عنوان گونه‌های پرستار در طرح‌های زیست‌مهندسی است.

تأثیر مکانیکی ریشه در افزایش مقاومت خاک است (Pollen & Simon, 2005). ترکیب این شاخص‌ها، امکان کمی‌سازی نقش گیاه در پایداری دامنه را فراهم می‌کند (Deljouei *et al.*, 2023). با وجود بررسی‌های متعدد گونه‌های درختی سوزنی‌برگ و بهن‌برگ (Abdi *et al.*, 2018; Karimi *et al.*, 2022; Deljouei *et al.*, 2023; Keybondori *et al.*, 2025; Karimi *et al.*, 2025) تاکنون پژوهش‌های کمتری بر ویژگی‌های زیست‌فنی گونه‌های درختچه‌ای متمرکز بوده‌اند. درختچه‌های بومی ازگیل و ولیک از گونه‌های شاخص جنگل‌های هیرکانی هستند که توانایی رشد در نواحی تخریب‌یافته و حاشیه جاده‌های جنگلی را دارند. این گونه‌ها به‌دلیل تراکم زیاد



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در جنگل‌های هیرکانی، جنگل خیرود و بخش پاتم

Figure 1. Location of the study area within the Hyrcanian forests, Kheyroud Forest, and the Patom management district.

دانشگاه تهران و در فاصله هفت کیلومتری شرق نوشهر قرار دارد (شکل ۱). این جنگل با وسعت تقریبی ۸۰۰۰ هکتار بخشی از جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شود. این بوم‌سازگان به‌دلیل دامنه ارتفاعی گسترده (۴۰ تا ۲۲۰۰ متر

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقه مورد مطالعه در پارسل ۱۱۸ بخش پاتم از جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود، متعلق به دانشکده منابع طبیعی

قطر یقه همه پایه‌ها در دامنه سه تا پنج سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها بین دو تا ۲/۵ متر بود. برای بررسی پراکنش سیستم ریشه از روش دیواره پروفیل استفاده شد (Giadrossi et al., 2017). در اطراف هر پایه، یک پروفیل در سمت بالا و یک پروفیل در سمت پایین درختچه‌ها در فاصله نیم‌متری از یقه حفر شد (شکل ۲). ابعاد پروفیل‌ها ۵۰×۴۰ سانتی‌متر بود. عمق هر پروفیل تا بیشینه عمق ریشه‌دوانی ادامه یافت (Naghdi et al., 2013). در هریک از افق‌ها، قطر همه ریشه‌های بیرون‌زده از دیواره با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) هر افق از تقسیم مجموع سطح مقطع ریشه‌های بیرون‌زده هر افق بر مساحت آن افق تعیین شد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$Ar = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right) \quad (1) \quad \text{رابطه}$$

$$RAR = \frac{Ar}{As} \quad (2) \quad \text{رابطه}$$

که در آن‌ها، d_i قطر ریشه i ام برحسب میلی‌متر، As مساحت خاک در هر افق دیواره پروفیل و Ar نشان‌دهنده مساحت اشغال‌شده توسط ریشه‌ها هستند (Abdi et al., 2010).



شکل ۲- حفر پروفیل در بالا و پایین پایه‌های یک نمونه درختچه (راست) و اندازه‌گیری قطر ریشه‌های بیرون‌زده از دیواره پروفیل‌ها

Figure 2. Excavation of soil profile trenches on the upslope and downslope sides of a sample shrub (right), and measurement of the diameters of roots exposed on the profile walls.

نزدیکی یقه درختچه‌ها و در عمق حدود ۳۰ سانتی‌متر

از سطح دریا) از تنوع زیاد اقلیمی، خاکی و پوشش گیاهی برخوردار است. بخش پاتم با مساحت حدود ۹۰۰ هکتار در پایین‌ترین نواحی ارتفاعی جنگل قرار دارد. خاک آن از نوع راندزین با سنگ مادر آهکی است. تیپ‌های اصلی پوشش گیاهی منطقه مذکور شامل ممرزستان، راش- ممرز، بلوط- ممرز و انجیلی- ممرز هستند. متوسط بارندگی سالانه این بخش ۱۲۰۰ میلی‌متر است. گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال به ترتیب تیر و بهمن با متوسط درجه‌حرارت‌های ۲۲ و سه درجه سانتی‌گراد هستند (Forest management plan of Patom district, 1995). ویژگی‌هایی مانند خاک‌های ریزدانه (خاک منطقه اغلب از نوع CH و CL) و عملیات عمرانی مرتبط با جاده‌سازی سبب شده است که این منطقه، مستعد لغزش‌های سطحی و ناپایداری شیب باشد.

روش پژوهش

در یک دامنه یکنواخت با شیب حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد، جهت جنوبی و ارتفاع حدود ۷۵۰ متر از سطح دریا، چهار پایه سالم از هریک از گونه‌های ولیک و ازگیل، به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب، علامت‌گذاری و کدگذاری شدند. برای رفع تفاوت اندازه پایه‌ها که می‌تواند بر میزان تأثیر در مسلح‌سازی، نقش داشته باشد (Deljouei et al., 2020)،

برای آزمایش‌های مقاومت مکانیکی ریشه، نمونه‌ها از

(چسبندگی اضافی) به کیلو پاسکال، σ تنش نرمال در صفحه برش و ϕ نشان‌دهنده زاویه اصطکاک درونی ذرات خاک به درجه هستند. C_r براساس رابطه (۴) تعیین می‌شود:

$$C_r = k \times t_r \quad \text{رابطه (۴)}$$

باتوجه به شرایط منطقه و زاویه اصطکاک داخلی ذرات خاک، ضریبی تجربی k بین یک تا $1/3$ است که با استفاده از رابطه $\sin \theta + \cos \theta \tan \phi$ برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. t_r بیانگر مقاومت کششی مؤثر ریشه در واحد سطح خاک (Mobilized root tensile strength) است (Wu., 1976) که از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$t_r = T_r \times a_r \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن، T_r متوسط مقاومت کششی نظیر قطر و a_r نسبت سطح ریشه به سطح خاک است. با در نظر گیری تنوع قطر ریشه‌ها، رابطه (۵) به صورت رابطه (۶) تغییر می‌کند.

$$t_R = \sum_{i=1}^N T_{ri} \frac{A_{ri}}{A_s} \quad \text{رابطه (۶)}$$

براساس شیب منحنی مقاومت کششی - قطر ریشه، ریشه‌ها به کلاسه‌های قطری تقسیم شدند و مقاومت کششی هر کلاسه به‌طور جداگانه محاسبه شد. نسبت سطح ریشه در هر افق برای هر کلاسه قطری به دست آمد. سپس، با مجموع حاصل ضرب متوسط مقاومت کششی هر کلاس قطری در نسبت سطح ریشه متناظرشان، میزان مقاومت کششی مؤثر ریشه در واحد سطح خاک برای هر افق محاسبه شد.

روش تحلیل

برای ارزیابی اثر نوع گونه (ازگیل و ولیک)، موقعیت مکانی (بالادست و پایین‌دست)، فاصله از دیواره (نزدیک و دور) و عمق نمونه‌برداری (سه سطح) بر شاخص نسبت

جمع‌آوری شدند. به منظور جلوگیری از پیش‌تنش، ریشه‌ها با کشیدن قطع نشدند و با سیم‌چین تیز جدا شدند. نمونه‌ها پس از شست‌وشو و حذف خاک در کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفتند. آن‌ها با محلول آب و الکل ۱۵ درصد اسپری شدند تا از پوسیدگی و تجزیه باکتریایی و قارچی جلوگیری شود و تا زمان آزمایش در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Abdi, 2018). آزمایش‌های مکانیکی با استفاده از دستگاه یونیورسال سنتام (STM5) انجام گرفت. دقت اندازه‌گیری نیرو در این دستگاه ± 0.001 نیوتن و جابه‌جایی ± 0.001 میلی‌متر بود (Karimi et al., 2022). سرعت انجام آزمایش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد (Abdi et al., 2010). دامنه قطر ریشه‌ها 0.3 تا $9/5$ میلی‌متر بود. فقط نمونه‌هایی که گسیختگی آن‌ها در حدود میانه طول ریشه رخ داده بود، برای محاسبه مقاومت استفاده شدند. از ۱۰۰ نمونه ریشه آزمایش شده برای هر گونه، ۷۶ نمونه برای ولیک و ۷۰ نمونه برای ازگیل، شرایط لازم را داشتند. مقاومت کششی ریشه (T_r) با تقسیم بیشینه نیروی لازم برای گسیختن ریشه (F_{max}) بر سطح مقطع ریشه در محل گسیختگی محاسبه شد (Leung et al., 2015) و داده‌ها به ترتیب برحسب مگاپاسکال (مقاومت) و نیوتن (نیرو) ثبت شدند. پس از جمع‌آوری داده‌های خام زیست‌فنی (پراکنش و مقاومت مکانیکی ریشه)، مقدار مسلح‌سازی خاک توسط ریشه گونه‌های مورد بررسی با استفاده از مدل «وو» (۱۹۷۶) برآورد شد (Wu., 1976). مدل Wu برپایه معادله مهر-کولمب استوار است که مقاومت برشی خاک را با استفاده از چسبندگی و زاویه اصطکاک محاسبه می‌کند. وو، تأثیر مسلح‌سازی گیاه را با افزودن یک جزء چسبندگی اضافی به معادله مهر-کولمب نشان داد (رابطه ۳).

$$S = C + C_r + \sigma \tan \phi \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، S مقاومت برشی خاک به کیلو پاسکال، C چسبندگی خاک به کیلو پاسکال، C_r مسلح‌سازی ریشه

شد. همه تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج

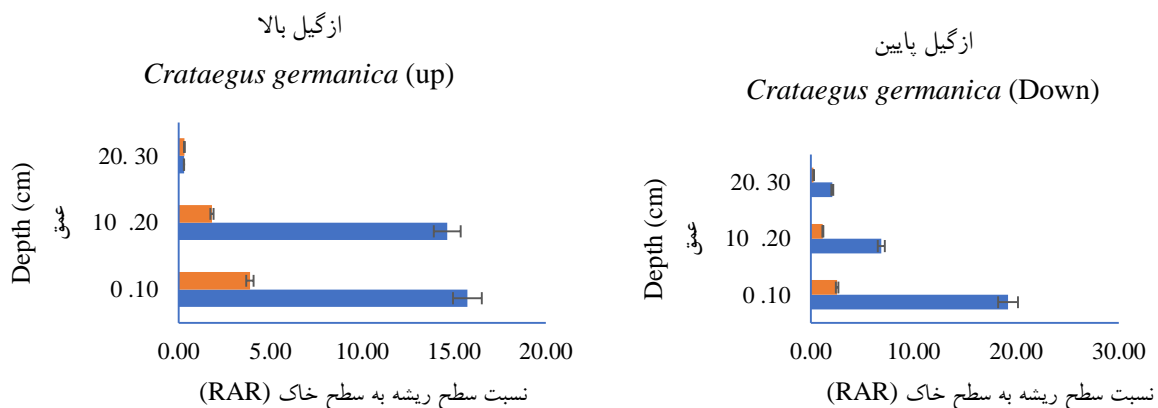
بر اساس نتایج به دست آمده از هر دو گونه درختچه‌ای، شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) با افزایش فاصله از یقه درختچه کاهش می‌یابد (جدول ۱). همچنین، با افزایش عمق خاک نیز از مقدار RAR کاسته شد (شکل‌های ۳ و ۴). بیشترین مقدار شاخص RAR در افق اول یا عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر مشاهده شد. مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین RAR برای گونه‌های ازگیل و ولیک در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ نیز میانگین و خطای معیار مقادیر RAR در افق‌های مختلف به ترتیب برای ازگیل و ولیک آمده است. کاهش مقدار شاخص RAR، حضور بیشتر ریشه‌ها در لایه‌های سطحی خاک را نشان می‌دهد.

سطح ریشه به سطح خاک (RAR) از تحلیل واریانس چندطرفه استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها نیز با استفاده از آزمون لون بررسی شد. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و فرض‌های استفاده از آزمون‌های پارامتریک برقرار است ($P > 0.05$). در صورت معنی‌داری اثرات اصلی یا متقابل، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون تعقیبی بانفرونی (Bonferroni) انجام شد. سطح معنی‌داری در همه آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. برای مقایسه نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه‌ها در دو گونه و دو موقعیت شیب از آنالیز کواریانس استفاده شد. برای مقایسه مسلح سازی خاک در سطوح مختلف متغیرهای فاصله، گونه و عمق، آنالیز واریانس چندطرفه به کار گرفته

جدول ۱- اطلاعات توصیفی نسبت سطح ریشه به سطح خاک در تیمارهای مختلف

Table 1. Descriptive statistics on the root area ratio in different treatments

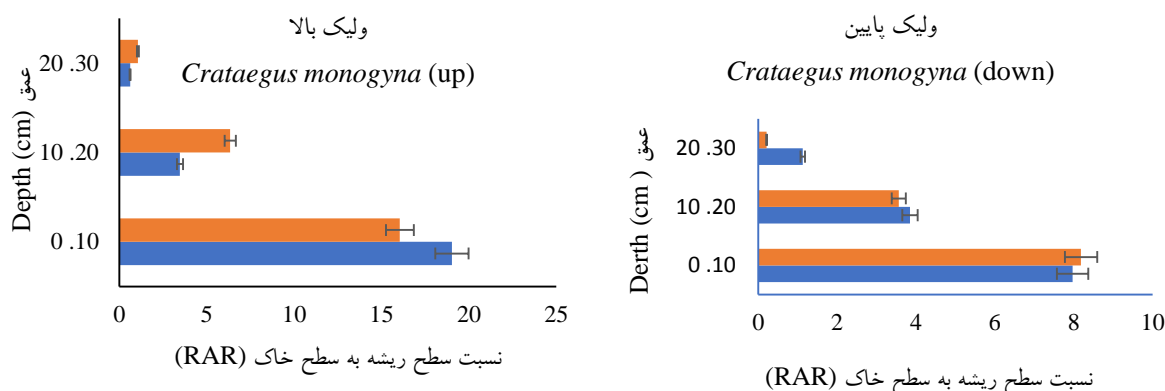
Species	Slope	Minimum (%)		Mean (%)		Maximum (%)	
		First trench	Second trench	First trench	Second trench	First trench	Second trench
<i>Crataegus germanica</i>	Up	4.95	0.42	7.92	1.49	14.81	3.41
	Down	1.29	0.2	7.03	1.05	17.91	1.96
<i>Crataegus monogyna</i>	Up	3	1.95	5.87	5.86	8.05	13.3
	Down	1.61	1.15	3.24	2.99	4.85	4.31



شکل ۳- شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک ازگیل در سمت بالا و پایین درختچه در عمق‌های مختلف و افزایش فاصله از تنه (آبی):

دیواره اول - نارنجی: دیواره دوم)

Figure 3. The RAR index of the *Crataegus germanica* at different depths and increasing distances from the shrub trunk, both above and below the shrub (First wall: blue – second wall: orange)



شکل ۴- شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک ولیک در سمت بالا و پایین درختچه در عمق‌های مختلف و افزایش فاصله از تنه درخت (آبی: دیواره اول - نارنجی: دیواره دوم)

Figure 4. The RAR index of the *Crataegus monogyna* at different depths and increasing distances from the shrub trunk, both above and below the shrub (First wall: blue - second wall: orange)

و ۴). بدین معنا که فاصله دیواره از گیاه به طور مؤثری بر توزیع ریشه‌ها تأثیر گذاشته است. به‌ویژه در نواحی نزدیک‌تر به دیواره، توسعه ریشه‌ها افزایش یافته است. در مقابل، اثر اصلی موقعیت شیب (بالادست - پایین‌دست) بر RAR معنی‌دار نبود ($P=0/263$). همچنین، هیچ‌کدام از اثرات متقابل سه‌گانه یا چهارتابی شامل این عامل به سطوح معنی‌داری نرسیدند که نشان می‌دهد جهت شیب به‌تنهایی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات RAR نداشته است.

آزمایش‌های مکانیکی ریشه

اطلاعات توصیفی مربوط به ویژگی‌های مکانیکی ریشه شامل نیروی کششی و مقاومت کششی به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. نتایج آزمایش کشش نشان داد که در هر دو گونه و در هر دو سمت شیب با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی ریشه براساس تابع توانی مثبت افزایش می‌یابد (شکل ۵). براساس نتایج آزمایش مکانیکی ریشه نیز در هر دو گونه با افزایش قطر ریشه، مقاومت کششی ریشه براساس تابع توانی منفی کاهش یافت (شکل ۷).

نتایج آزمون تحلیل واریانس چندراهه (Factorial ANOVA) نشان داد که عامل عمق خاک، تأثیر معنی‌داری بر نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) دارد ($P<0/001$, $F=10/694$). مقایسه میانگین‌ها با آزمون Bonferroni این تفاوت را تأیید کرد. به‌طوری‌که بیشترین مقدار RAR در عمق اول مشاهده شد و با افزایش عمق، مقدار RAR به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. این الگو نشان‌دهنده تمرکز بیشتر گسترش ریشه در لایه‌های سطحی خاک است که دلیل آن به‌احتمال زیاد به در دسترس بودن رطوبت و مواد معدنی در لایه سطحی برمی‌گردد. اگرچه اثر گونه بر RAR معنی‌دار نبود ($F=0/011$, $P=0/915$), اما اثرات متقابل بین گونه و دیواره (گونه \times دیواره) معنی‌دار به‌دست آمد ($F=4/317$, $P=0/039$) که بیانگر پاسخ متفاوت گونه‌های مورد مطالعه به شرایط فیزیکی در دیواره‌های مختلف پروفیل است. این تفاوت ممکن است با ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بوم‌شناسی خاص هر گونه از جمله فرم ریشه‌ای، ترجیح رطوبتی یا سازگاری با تنش‌های محیطی مرتبط باشد. عامل فاصله از دیواره نیز تأثیر معنی‌داری بر RAR داشت ($P=0/043$) (شکل‌های ۳

جدول ۲- آمار توصیفی ریشه‌های آزمایش شده شامل قطر، نیرو و ضریب رگرسیون برای نیروی کششی

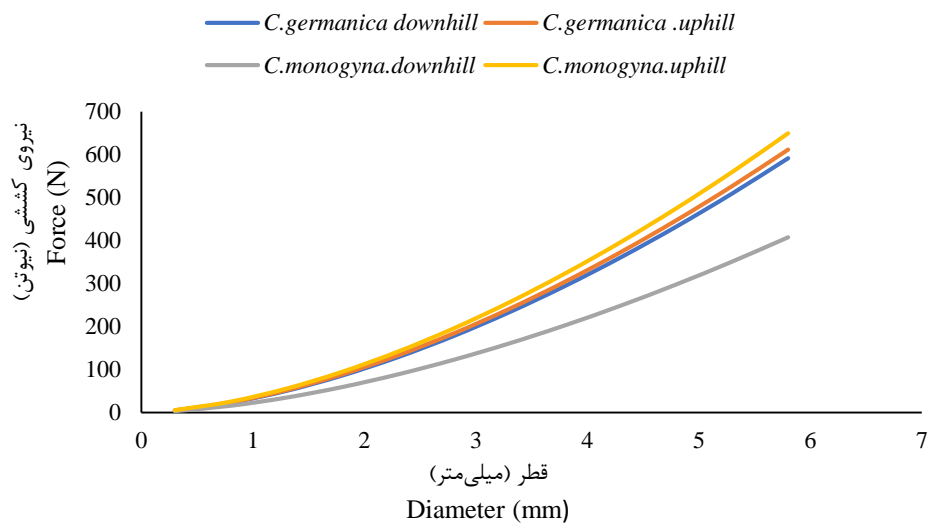
Table 2. Descriptive statistics of tested roots including diameter, tensile force, and regression coefficient for tensile force

Species	Slope	Diameter (mm)		Tensile force (N)				
		Max.	Min.	Max.	Min.	α	β	R^2
<i>Crataegus monogyna</i>	Up	5.5	0.4	341.5	8.9	33.6	1.6	0.6
	Down	5.9	0.6	547.1	13.2	33.07	1.61	0.63
<i>Crataegus germanica</i>	Up	4.8	0.5	285.4	15.3	37.19	1.53	0.31
	Down	5	0.8	487.2	23.4	19.38	1.83	0.68

جدول ۳- آمار توصیفی ریشه‌های آزمایش شده شامل قطر، نیرو و ضریب رگرسیون برای مقاومت کششی

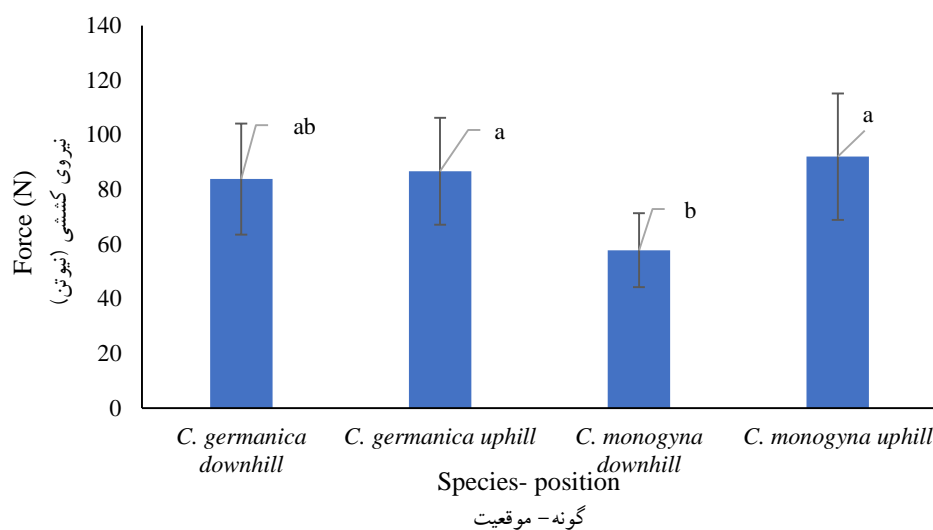
Table 3. Descriptive statistics of tested roots including diameter, tensile strength, and regression coefficient for tensile strength

Species	Slope	Diameter (mm)		Root tensile strength (M pa)				
		Max.	Min.	Max.	Min.	α	β	R^2
<i>Crataegus monogyna</i>	Up	5.5	0.4	90.36	11.01	42.81	-0.39	0.18
	Down	5.9	0.6	224.34	15.02	42.12	-0.38	0.22
<i>Crataegus germanica</i>	Up	4.8	0.5	85.95	8.91	33.05	-0.44	0.37
	Down	5	0.8	60.31	7.73	50.41	-0.67	0.52



شکل ۵- رابطه نیروی کششی با قطر ریشه (دو گونه) در بالا و پایین شیب

Figure 5. The relationship between tensile force and root diameter (for two species)



شکل ۶- آزمون تعقیبی بانفرونی برای نیروی کششی دو گونه ازگیل و ولیک در بالا و پایین شیب

حرف‌های متفاوت لاتین نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند.

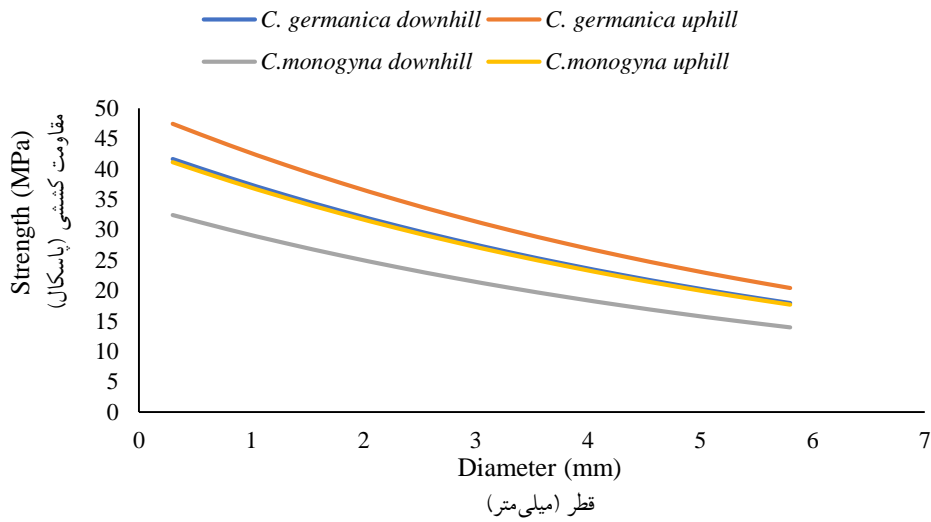
Figure 6. Bonferroni post-hoc test for comparing the tensile force of the two species, *Crataegus germanica* and *Crataegus monogyna*, at the upper and lower slope positions

Different letters indicate a significant difference between means ($P < 0.05$).

متغیر قطر ریشه به‌عنوان عامل کوواریت نیز معنی‌دار به‌دست آمد ($P < 0.001$) که نشان می‌دهد با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی افزایش می‌یابد، بنابراین قطر ریشه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین نیروی لازم شناخته می‌شود.

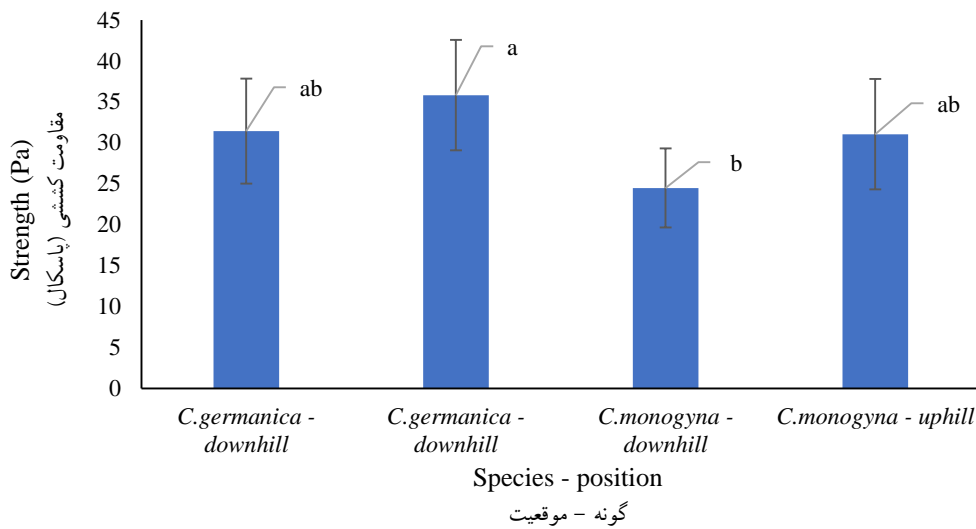
رابطه بین قطر ریشه و مقاومت کششی در همه تیمارها به‌صورت توانی کاهنده مشاهده شد (شکل ۷). نتایج آنالیز کوواریانس (قطر ریشه به‌عنوان عامل کوواریت) در شکل ۸ نشان داد که مقاومت کششی ریشه، تفاوت معنی‌داری بین ازگیل و ولیک دارد ($P = 0.02$). این تفاوت، بیانگر اختلاف در رفتار مکانیکی ریشه‌ها تحت بار کششی بین دو گونه است. همچنین، قطر ریشه نیز تأثیر معنی‌داری بر مقاومت کششی نشان داد ($P < 0.001$). به‌طوری‌که با افزایش قطر ریشه، مقاومت کششی آن افزایش یافت.

نتایج آزمون تعقیبی بانفرونی نشان داد که نیروی کششی، تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین ولیک و ازگیل در بالا و پایین شیب دارد. نیروی کششی در ازگیل، بیشتر از ولیک بود. در هر دو گونه، تفاوت معنی‌داری در بالا و پایین شیب مشاهده شد (شکل ۶). برای بررسی تأثیر گونه‌های درختچه‌ای (ازگیل و ولیک) و قطر ریشه بر نیروی کششی از تحلیل واریانس نوع سوم استفاده شد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی نشان داد که هر دو متغیر تیمار و قطر ریشه به‌صورت لگاریتمی (\log .Diameter) اثرات معنی‌داری بر نیروی کششی دارند. اثر تیمار که شامل دو گونه درختچه‌ای ازگیل و ولیک بود، معنی‌دار ($P < 0.05$) بود (شکل ۶). این موضوع نشان می‌دهد که نوع گونه درختچه‌ای به‌طور معنی‌داری بر میزان نیروی کششی ریشه تأثیرگذار است. از سوی دیگر، اثر



شکل ۷- رابطه قطر با مقاومت کششی دو گونه در بالا و پایین شیب

Figure 7. The relationship between diameter and tensile strength of two species at the top and bottom of the slope



شکل ۸- آزمون تعقیبی بانفرونی برای مقاومت کششی از گیل و ولیک در بالا و پایین شیب

حرف‌های متفاوت لاتین نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند.

Figure 8. Bonferroni test for the tensile strength of two species, *Crataegus germanica* and *Crataegus monogyna*, at the top and bottom of the slope

Different letters indicate a significant difference between means ($P < 0.05$).

مسلح‌سازی

در هر دو گونه، مقدار چسبندگی اضافه‌شده به خاک در اثر حضور ریشه با افزایش عمق خاک کاهش یافت (جدول

۴). به‌طورکلی، بیشترین چسبندگی اضافه‌شده به خاک در اثر حضور ریشه در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر بود که بیشترین پراکنش ریشه نیز در این لایه مشاهده شد.

جدول ۴- مقادیر مسلح‌سازی (kPa) توسط مدل Wu در تیمارهای مختلف

Table 4. Soil reinforcement (kPa) estimated by the Wu model under different treatments

Species	Slop	Depth	Mean Wu (kPa)
<i>Crataegus monogyna</i>	Up	0-10	9.4
		10-20	2.57
		20-30	0.48
	Down	0-10	4.80
		10-20	2.13
		20-30	0.44
<i>Crataegus germanica</i>	Up	0-10	4.37
		10-20	3.62
		20-30	0.21
	Down	0-10	4.89
		10-20	1.48
		20-30	0.48

Wu با افزایش عمق بیانگر نقش حیاتی ریشه‌های سطحی در تقویت پایداری خاک و شیب‌ها است.

بحث

کمی‌سازی نقش پوشش گیاهی در تقویت و مسلح‌سازی خاک، نیازمند ارزیابی دقیق پراکنش ریشه و مقاومت مکانیکی آن گونه است (Abdi, 2023). شاخص نسبت سطح ریشه به خاک (RAR) در اغلب پژوهش‌ها به‌عنوان معیار اصلی پراکنش ریشه به‌کار رفته و متأثر از فاصله از تنه و عمق خاک است (De Baets et al., 2008). نتایج پژوهش پیش‌رو نیز مانند یافته‌های Karimi و همکاران (۲۰۲۲) و Deljouei و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که با افزایش عمق شاخص RAR کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار آن در لایه سطحی خاک قرار دارد. به‌صورت مشابه، کاهش RAR با فاصله بیشتر از تنه نیز گزارش شده است و علت آن به کاهش رطوبت، مواد غذایی و تهویه در عمق‌های پایین‌تر برمی‌گردد. در بررسی ویژگی‌های مکانیکی، دامنه نیروی کششی در ولیک ۸/۳ تا ۵۴۷/۱ نیوتن و در ازگیل ۱/۳ تا ۴۸۷/۲ نیوتن به‌دست آمد. رابطه توانی مثبت بین

براساس آزمون تعقیبی (Post Hoc) عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر به‌طور معنی‌داری نسبت به دو عمق دیگر، بیشینه میانگین Wu را به‌خود اختصاص داد. همچنین، تجزیه و تحلیل واریانس چندطرفه (Three-way ANOVA) به‌منظور بررسی اثرات اصلی و متقابل گونه درختچه‌ای، عمق خاک و موقعیت مکانی (بالا و پایین شیب) بر شاخص مسلح‌سازی ریشه‌ای (Wu) انجام شد. براساس جدول اثرات بین‌گروهی (Tests of Between-Subjects Effects)، عامل عمق خاک، تأثیر معنی‌داری بر Wu داشت ($P=0/001$)، درحالی‌که اثرات اصلی گونه ($P=0/296$) و موقعیت مکانی (بالا یا پایین شیب) به‌طور جداگانه بر Wu معنی‌دار نبودند ($P=0/513$). همچنین، هیچ‌یک از اثرات متقابل دوطرفه و سه‌طرفه بین عوامل مذکور معنی‌دار نبودند ($P>0/05$). میانگین‌های تعدیل‌شده (Estimated Marginal Means) برای سطوح مختلف عمق نشان داد که بیشترین مقدار Wu (۱۷/۲۶۸) در عمق سطحی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر حاصل شده است. این میانگین به‌طور قابل‌توجهی از عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر (میانگین = ۹/۵۲۴) و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر (میانگین = ۱/۴۸۲) بیشتر بود. کاهش محسوس در مقدار

هستند که به‌ویژه در مناطقی که مشکل دام وجود دارد، می‌توانند نقش مهمی در احیای مناطق داشته باشند. مشاهده‌های میدانی در جنگل خیرود و بخش پاتم به‌عنوان منطقه مورد مطالعه نشان داد که زادآوری گونه‌های تندرشد مانند توسکا و افرا در اغلب موارد، شانس برای استقرار ندارند. به‌طوری‌که اثری از زادآوری این گونه‌ها که از افق چرای دام خارج شده باشند، دیده نمی‌شود. برعکس در قسمت‌هایی که ولیک و ازگیل مستقر شده‌اند، تراکم زیادی از این دو گونه درختچه‌ای مشاهده می‌شود و گاهی، نهال‌های درختی نیز در میان آن‌ها مستقر و رشد یافته‌اند و از گزند چرای دام در امان مانده‌اند. داشتن دو شاخصه گونه پرستار و نیز مستقر شدن در قسمت‌های تخریب‌شده بیانگر قابلیت بسیار خوب این دو گونه برای پروژه‌های تثبیت خاک و زیست‌مهندسی با رویکرد پیشگیرانه و مسلح‌سازی میان‌مدت تا بلندمدت است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های ریخت‌شناسی و مکانیکی سیستم ریشه گونه‌های بومی ازگیل و ولیک، نقش مؤثری در تقویت مکانیکی خاک و بهبود پایداری دامنه‌ها با خاک ریزدانه جنگلی دارند. شاخص نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) در هر دو گونه با افزایش عمق و فاصله از تنه کاهش یافت. بیشترین تراکم ریشه‌ها در لایه سطحی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر مشاهده شد که بیانگر نقش کلیدی ریشه‌های سطحی در کنترل ناپایداری‌ها و لغزش‌های کم‌عمق است. همچنین، تراکم بیشتر ریشه‌ها در نزدیکی تنه و در موقعیت بالادست می‌تواند در طراحی الگوی کاشت و فاصله‌گذاری گونه‌ها در شیب‌های ناپایدار مورد توجه قرار گیرد. اگرچه تفاوت معنی‌داری در مقدار کلی RAR بین دو گونه مشاهده نشد، اما الگوی پراکنش ریشه‌ها متفاوت بود. به‌طوری‌که ولیک، شبکه‌ای متراکم از ریشه‌های نازک و اغلب افقی در لایه‌های سطحی خاک داشت، درحالی‌که ازگیل، ریشه‌های ضخیم‌تر و به‌نسبت عمیق‌تری ایجاد کرد. نتایج آزمون‌های کششی نشان داد که نیروی کششی ریشه با

قطر ریشه و نیروی کششی در پژوهش حاضر با نتایج گزارش‌شده توسط Genet و همکاران (۲۰۰۵) و Moresi و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. این ارتباط اغلب به تغییرات نسبت سلولز و لیگنین در ریشه‌های نازک و ضخیم مرتبط است. آزمون مقاومت کششی نیز همانند نتایج پژوهش‌های Li و همکاران (۲۰۲۰) و Asgari و همکاران (۲۰۲۳)، روند کاهش مقاومت با افزایش قطر ریشه را نشان داد. دامنه مقاومت کششی ریشه در این پژوهش برای ازگیل ۴/۰۱ تا ۳۳۱/۲۱ مگاپاسکال و برای ولیک ۵/۳۹ تا ۲۲۴/۳۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد که تفاوت آن‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های گونه‌ای، تنوع درون‌گونه‌ای، شرایط شیب، سلامت پایه و عوامل محیطی باشد. از نظر مسلح‌سازی خاک، بیشترین مقدار چسبندگی افزوده‌شده ناشی از ریشه‌ها در لایه سطحی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر مشاهده شد و با افزایش عمق، مشابه روند کاهش RAR، میزان تقویت آن کاهش یافت. میانگین افزایش چسبندگی در ازگیل ۲۵۸/۳۱ و در ولیک ۳۲۶/۷۲ کیلوپاسکال بود. این الگو با نتایج Abdi و همکاران (۲۰۱۰) سازگار است که بیشترین مسلح‌سازی را در ۱۰ سانتی‌متر نخست خاک و کمترین را در عمق‌های پایین گزارش کردند. باتوجه‌به نتایج پراکنش و مقاومت مکانیکی ریشه‌ها مشخص شد که مدل Wu بیشتر به پراکنش ریشه، حساسیت دارد تا مقاومت مکانیکی، بنابراین علی‌رغم معنی‌داری تفاوت مقاومت کششی بین دو گونه، تفاوت مسلح‌سازی آن‌ها معنی‌دار نشد. هر دو گونه از نظر عمق ریشه‌دوانی محدود هستند و اغلب در کنترل ناپایداری‌های سطحی مؤثرند. اعداد مسلح‌سازی مربوط به این دو گونه درختچه‌ای قابل‌مقایسه با اعداد گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین در مورد گونه‌های درختچه‌ای در نقاط دیگر جهان است (Tosi, 2007; Burylo et al., 2011). با این حال، باید توجه داشت که ازگیل و ولیک از گونه‌های بومی اما کندرشد جنگل‌های هیرکانی ایران هستند، بنابراین قابلیت استفاده از آن‌ها را برای پایدارسازی آبی محدود می‌کند. این دو گونه اغلب به‌عنوان گونه‌های پرستار، شاخص مناطق تخریب‌شده

توجه داشت که ازگیل و ولیک از گونه‌های بومی کندرشد جنگل‌های هیرکانی هستند و نرخ استقرار و رشد اولیه آن‌ها در مقایسه با گونه‌های تندرشد محدودتر است، از این رو کاربرد این گونه‌ها در پروژه‌های زیست‌مهندسی تثبیت شیب اغلب در افق زمانی میان‌مدت تا بلندمدت و با رویکرد پیشگیرانه قابل توصیه است. همچنین، استفاده ترکیبی از آن‌ها همراه با گونه‌های پیشرو و تندرشد می‌تواند راهکاری مناسب برای دستیابی به پایداری اولیه و پایدارسازی بلندمدت دامنه‌ها باشد.

افزایش قطر افزایش و مقاومت کششی کاهش می‌یابد و ازگیل به‌طور کلی مقاومت کششی بیشتری نسبت به ولیک داشت. این تفاوت‌ها، بیانگر نقش مکمل دو گونه در تقویت مکانیکی خاک است. برآورد مسلح‌سازی خاک با استفاده از مدل Wu نشان داد که بیشترین چسبندگی افزوده‌شده ناشی از ریشه‌ها در لایه سطحی صفر تا ۱۰ سانتی‌متر حاصل می‌شود و با افزایش عمق به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این نتایج تأیید می‌کند که مدل Wu حساسیت بیشتری به پراکنش ریشه نسبت به مقاومت مکانیکی آن دارد. با وجود قابلیت این دو گونه در افزایش مقاومت برشی خاک، باید

References

- 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., 2023. Soil bioengineering in Iran: Lessons from the past and prospects for the future. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(3): 257-265 (In Persian with English summary).
- Abdi, E., Majnounian, B., Genet, M. and 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: 1409-1416.
- Asgari, M., Javanmiri Pour, A., Abdi, E., Etemad, V., Ahmadaali, K., Zare, S. and Afsharsadr, A., 2023. Evaluation of age and moisture stress on the mechanical properties of *Pinus eldarica* Medw. seedling roots for plantation. *Iranian Journal of Forest*, 16(1): 37-53 (In Persian with English summary).
- Burylo, M., Hudek, C. and Rey, F., 2011. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena*, 84(1-2): 70-78.
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J. and Muys, B., 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305: 207-226.
- Deljouei, A., Abdi, E., Schwarz, M., Majnounian, B., Sohrabi, H. and 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.
- Deljouei, A., Cislighi, A., Abdi, E., Borz, S.A., Majnounian, B. and 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.
- Emadi-Tafti, M., Ataie-Ashtiani, B. and Hosseini, S.M., 2021. Integrated impacts of vegetation and soil type on slope stability: A case study of Kheyroud Forest, Iran. *Ecological Modelling*, 446: 109498.
- Forest management plan of Patom district, 1995. University of Tehran, Karaj, Iran, 170 pp.
- 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.
- Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Cislighi, A., Vergani, C., Hubble, T., ... and Stokes, A., 2017. Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: A review. *Ecological Engineering*, 109: 256-271.
- Hairiah, K., Widianto, W., Suprayogo, D. and Van Noordwijk, M., 2020. Tree roots anchoring and binding soil: Reducing landslide risk in Indonesian agroforestry. *Land*, 9(8): 256.
- Karimi, Z., Abdi, E. and Deljouei, A., 2025. Mechanical response of *Avicennia marina* roots to changes in stand density and soil depth in coastal areas. *Journal of Forest and Wood Products*, 78(3): 223-234 (In Persian with English summary).
- Karimi, Z., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shirvany, A., Schwarz, M. and Hales, T.C., 2022. Vegetation-induced soil stabilization in coastal area: An example from a natural mangrove forest. *Catena*, 216: 106410.
- Keybondori, S., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shakeri, Z. and Etemad, V., 2025. Soil-

- bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in the steep Hyrcanian forests of northern Iran. *Ecological Engineering*, 214: 107569.
- Kim, Y., Rahardjo, H. and Tsen-Tieng, L.D., 2020. Stability analysis of laterally loaded trees based on tree-root-soil interaction. *Urban Forestry and Urban Greening*, 49: 126639.
 - Leung, F.T.Y., Yan, W.M., Hau, B.C.H. and Tham, L.G., 2015. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability. *Catena*, 125: 102-110.
 - Li, C., Jia, Z., Yuan, Y., Cheng, X., Shi, J., Tang, X., ... and 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.
 - 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.
 - Osman, N., Abdullah, M.N. and Abdullah, C.H., 2011. Pull-out and tensile strength properties of two selected tropical trees. *Sains Malaysiana*, 40(6): 577-585.
 - Pimentel, D., 2006. Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1): 119-137.
 - 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: W07025.
 - Pordel, N., Hosseinzadeh, J., Heydari, M. and Omidipour, R., 2025. Assessment of aggregate stability in relation to physiographic characteristics and canopy density in the Zagros Forests, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 33(3): 191-206 (In Persian with English summary).
 - Rahardjo, H., Satyanaga, A., Wang, C.L., Wong, J.L.H. and Lim, V.H., 2018. Effects of unsaturated properties on stability of slope covered with *Caesalpinia crista* in Singapore. *Environmental Geotechnics*, 7(6): 393-403.
 - Tosi, M., 2007. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87(4): 268-283.
 - Wu, T.H., 1976. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Geotechnical Engineering Report No. 5*, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 93p.