



University of Tehran

Root system architecture of Beech (*Fagus orientalis*) seedlings: applications in bioengineering

Mitra Ramezani¹ | Ehsan Abdi²

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mitramezani@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: abdie@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 07 November 2025
Revised: 14 December 2025
Accepted: 27 December 2025
Published online: 09 February 2026

Keywords:
Maximum rooting depth,
Mechanical strength,
Root mat,
Shovelomics,
Slope stabilization.

ABSTRACT

Plant root architecture is crucial for stability, as well as for the absorption of water and nutrients and the stabilization of soil. In this study, root architecture was investigated in the context of its application in soil bioengineering. To achieve this, 69 beech seedlings (28 seedlings from a hill with a 10% slope and 41 seedlings from a 60% slope) were extracted from the soil using the Shovelomics method. Four primary characteristics of the root system were analyzed and ranked, and mechanical strength tests were also conducted on root samples. The findings indicated that the ratio of maximum rooting depth to stem length on slopes of 10% and 60% was 32.23% and 28.94%, respectively. Furthermore, the ratio of root system diameter (i.e., root mat) to seedling crown diameter was 43.80% and 63.38% for the 10% and 60% slopes, respectively. ANCOVA results revealed that while stem length was a significant covariate, slope did not significantly influence root depth but had a significant effect on root system diameter. A positive correlation was also observed between seedling height and maximum rooting depth. The most frequent root architecture patterns observed on both slopes were classified as VH, followed by V, which are considered suitable for slope stabilization. The mechanical resistance of the seedlings fell within the range documented for mature oriental beech trees. Further ANCOVA results indicated that slope did not significantly affect the mechanical resistance of roots. Understanding root system architecture can greatly assist in the selection of bioengineering systems and in assessing the suitability of each species for specific applications.

Cite this article: Ramezani, M., Abdi, E. (2026). Root system architecture of Beech (*Fagus orientalis*) Seedlings: Applications in bioengineering. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (4), 433-442. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.405812.1378>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.405812.1378>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

وب‌گاه نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

تعیین معماری سیستم ریشه نهال‌های راش از منظر زیست‌مهندسی خاک

میترا رضانی^۱ | احسان عبدی^{۲*}

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mitramezani@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه: abdie@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

کلیدواژه:

پایدارسازی شیب،
حداکثر عمق ریشه‌دوانی،
شاولومیکس،
قطر سیستم ریشه،
مقاومت مکانیکی.

معماری سیستم ریشه نقش مهمی در پایداری گیاه، جذب آب و عناصر غذایی و تثبیت خاک دارد. روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی معماری ریشه وجود دارد که پژوهش حاضر معماری را از منظر کاربرد در زیست‌مهندسی بررسی می‌کند. بدین‌منظور ۶۹ نهال گونه راش (*Fagus orientalis*) از دامنه‌های با شیب ۱۰ و ۶۰ درصد با روش شاولومیکس از خاک استخراج و به آزمایشگاه منتقل شدند. چهار ویژگی سیستم ریشه شامل درصد پراکنش تعداد ریشه‌ها در افق‌های متوالی، حداکثر عمق ریشه‌دوانی، میزان گستره ریشه‌های جانبی و تیپ اصلی پراکنش ریشه بررسی و رتبه‌بندی شدند. همچنین آزمایش‌های مقاومت مکانیکی روی نمونه ریشه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که میانگین نسبت عمق نفوذ ریشه به طول ساقه در شیب‌های ۱۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۳۲/۲۳ و ۲۸/۹۴ درصد و همبستگی آنها نیز مثبت و معنی‌دار بود. همچنین نسبت قطر سیستم ریشه به قطر تاج نهال در شیب‌های ۱۰ و ۶۰ درصد به ترتیب ۴۳/۸۰ و ۶۳/۳۸ درصد بود. نتایج آنالیز کوواریانس نشان داد که شیب دامنه تأثیر معنی‌داری بر عمق نفوذ ریشه نداشته ولی تأثیر بر قطر سیستم ریشه معنی‌دار بود. بیشترین فراوانی الگوی معماری ریشه در هر دو شیب، تیپ‌های عمودی یا افقی (VH) و پس از آن تیپ عمودی (V) بود که الگوهای مناسبی برای پایدارسازی شیب می‌باشند. مقادیر میانگین مقاومت مکانیکی ریشه‌های نهال‌ها در دامنه گزارش شده برای درختان بالغ راش شرقی می‌باشند و نتایج نشان داد که شیب دامنه تأثیر معنی‌دار بر مقاومت مکانیکی ریشه‌ها ندارد. آگاهی از تیپ معماری سیستم ریشه می‌تواند در انتخاب و طراحی سیستم‌های زیست‌مهندسی کمک شایانی نماید و شایستگی هر گونه برای کاربرد مورد نظر را مشخص کند.

استناد: رضانی؛ میترا، عبدی؛ احسان (۱۴۰۴). تعیین معماری سیستم ریشه نهال‌های راش از منظر زیست‌مهندسی خاک. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۴)، ۴۴۲-۴۳۳.

DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.405812.1378>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.405812.1378>



۱. مقدمه

ایجاد تغییر و دخالت انسان در عرصه‌های شیب‌دار طبیعی می‌تواند باعث به هم خوردن تعادل نیروهای مقاوم و محرک و در نتیجه بروز ناپایداری‌ها شود. بنابراین در مناطق کوهستانی، شکل‌های مختلف فرسایش از جمله ناپایداری‌ها از عوامل اصلی نابودی اکوسیستم‌ها و تخریب منابع طبیعی است و چنین ناپایداری‌هایی تهدیدی جدی برای حیات بشر نیز به‌شمار می‌آید. دامنه‌های پرشیب، حاشیه رودخانه‌ها و مناطق مستعد برای فرسایش مانند شیب‌های با پوشش گیاهی تنک و خاک فرسایش‌پذیر، مستعد ناپایداری و در معرض فرسایش شدید هستند [۱]. در این بین، زیرساخت‌های انسان‌ساخت می‌توانند مشکل را تشدید کنند. یکی از رایج‌ترین اجزای انسان‌ساخت، زیرساخت‌هایی مانند جاده‌ها هستند که موجب بروز مشکلاتی نظیر ناپایداری و افزایش نرخ فرسایش شده و تعادل بوم‌سازگان طبیعی را برهم می‌زند. جنگل‌های هیرکانی نیز از این امر مستثنی نیستند و ترکیب بارندگی زیاد و وجود خاک ریزدانه باعث حساسیت دوچندان این اکوسیستم به ناپایداری‌ها شده است. یکی از راهکارهای در دسترس برای کنترل ناپایداری و فرسایش، استفاده از پوشش گیاهی است که با اجزای مختلف خود می‌تواند نیروهای محرک و ویرانگر مکانیکی را تا حدی کنترل کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که برای تثبیت دامنه‌های ناپایدار به‌خوبی می‌توان از پوشش گیاهی استفاده کرد [۱] و بنابراین امروزه در دنیا استفاده از پوشش گیاهی به‌منظور کنترل فرسایش و تثبیت دامنه‌ها رایج شده و به‌سرعت در حال پیشرفت است [۲، ۳]. اجزای مختلف پوشش گیاهی شامل زیست‌توده زیرزمین (ریشه) و روی‌زمین (تنه و تاج‌پوشش)، با شیوه‌های متفاوت و مکمل در پایداری دامنه‌ها نقش مهمی دارند. خاک مقاومت خوبی در برابر فشار داشته و ریشه‌ها در برابر تنش کششی مقاوم هستند [۴]. بنابراین، وجود ریشه در خاک، ماده ترکیبی مسلح شده‌ای را تشکیل می‌دهد که ویژگی‌های مثبت هر دو ماده اولیه را از خود نشان می‌دهد. همچنین ریشه‌های گیاهان با جذب رطوبت از خاک، سبب کاهش فشار آب منفذی مثبت شده و با پیوند دادن ذرات خاک، باعث افزایش چسبندگی ذرات خاک و پایداری خاکدانه‌ها می‌شوند [۳]. بنابراین، سیستم ریشه با افزایش مقاومت برشی خاک، نقش مهمی در افزایش چسبندگی و تثبیت خاک در مناطق مستعد فرسایش دارند [۵]. تأثیر ریشه‌ها در پایداری دامنه‌ها به عوامل مختلفی از قبیل پراکنش، تراکم، معماری، قطر، ترکیب شیمیایی ریشه‌ها و مقاومت مکانیکی ریشه‌ها بستگی دارد. این ویژگی‌ها نیز بسته به عوامل مکانی مانند محیط رشد، فصل، ارتفاع منطقه، جهت دامنه و نوع خاک و گونه گیاهی متغیر هستند [۶].

یکی از مهمترین ویژگی‌های ریشه‌ها، معماری سیستم ریشه^۱ است که به‌دلیل پنهان بودن در زیر خاک و دشواری استخراج سیستم ریشه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. معماری سیستم ریشه، آرایش فضایی، شکل و ساختار دقیق سیستم ریشه تک گیاه را توصیف می‌کند [۷]. در طبیعت، توسعه معماری ریشه با بیرون آمدن ریشه اولیه از بذر و رشد رو به پایین آن در خاک آغاز می‌شود و به‌دنبال آن ریشه‌های جانبی درست زیر محل اتصال ریشه اولیه توسعه می‌یابند. با توسعه ریشه راست^۲، سرعت رشد در نهایت کاهش می‌یابد، زیرا نوک ریشه در خاک‌های عمیق‌تر با شرایط نامساعد خاک مواجه می‌شود، بنابراین تخصیص منابع تغییر می‌کند و سرعت رشد ریشه‌های جانبی افزایش می‌یابد. معماری سیستم ریشه در درجه اول به ویژگی‌های ژنتیکی گیاه بستگی دارد و تفاوت‌های ژنتیکی باعث می‌شود که سیستم‌های ریشه گیاهان مختلف، حالت‌های گسترش منحصر به فرد و حالت‌های انشعاب‌دهی خاصی را نشان دهند [۷]. بیشتر دانش موجود مربوط به معماری سیستم ریشه، از محصولات زراعی مانند برنج و ذرت به‌دست آمده و درک دانشمندان از معماری سیستم ریشه هنوز ناکافی است، به‌خصوص برای گیاهان چوبی که اجزای اصلی جنگل‌ها هستند و سیستم‌های ریشه‌ای بزرگ و گسترده آنها در اعماق زمین پنهان شده‌اند و این امر دشواری بررسی معماری آنها را افزایش می‌دهد. بسیاری از پژوهش‌ها، نقش محوری معماری سیستم ریشه را در انجام وظایف مختلف گیاهی و خدمات اکوسیستمی ارائه شده توسط سیستم‌های ریشه نشان داده‌اند. این وظایف و خدمات طیفی از تبادلات خاک-گیاه (آب، مواد مغذی، ترکیبات آلی)، انتقال درون ریشه‌ای منابع مختلف و مولکول‌های سیگنال‌دهنده و همچنین نقش‌های مکانیکی ریشه‌ها مانند ایجاد لنگر درخت، حفاظت از خاک در برابر فرسایش و ناپایداری را شامل می‌شود [۸].

¹ Root system architecture (RSA)

² Tap root

معماری سیستم ریشه اغلب با توجه به هدف، توسط ویژگی‌های مختلفی توصیف می‌شود، زیرا هیچ مجموعه قطعی از ویژگی‌ها وجود ندارد که تمام جنبه‌های معماری سیستم ریشه را در بر بگیرد. از بین طبقه‌بندی‌های مختلف معماری سیستم ریشه، طبقه‌بندی براساس کاربرد در کنترل فرسایش و زیست‌مهندسی خاک که توسط Yen (۱۹۸۷) معرفی گردید [۹]، کاربرد فراوانی در زیست-مهندسی دارد. این پژوهشگر سیستم ریشه ۱۰۸ گونه چوبی که برای حفاظت خاک کاربرد دارند را بررسی و به پنج تیپ معماری یگانه تقسیم کرد که هر یک کاربرد مشخصی در زیست‌مهندسی دارند. دیگر پژوهشگران نیز با استفاده از این روش، اقدام به تیپ‌بندی سیستم ریشه گیاهان مختلف برای استفاده کاربردی در زیست‌مهندسی کردند. از آن جمله در جدیدترین پژوهش‌ها: سیستم ریشه سه گونه درختچه‌ای و دو گونه علفی کشور چین بررسی و تیپ ریشه درختچه‌ها به ترتیب *Caragana* (VH)، *(korshinskii Kom)* R، *(Zygophyllum xanthoxylon)* H و *(Nitraria tangutorum)* و تیپ گونه‌های علفی *(Elymus nutans)* M گزارش شد [۱۰]. Saifuddin و همکاران (۲۰۲۲) معماری سیستم ریشه دو گونه درختی و دو گونه درختچه‌ای مالزی را بررسی و تیپ ریشه گونه‌های درختی را به ترتیب *VH* (*Leucaena leucocephala*) و *H* (*Acacia mangium*) و گونه‌های درختچه‌ای را *M* (*Dillenia suffruticosa*, *Melastoma malabathricum*) گزارش کردند [۱۱]. Mairaing و همکاران (۲۰۲۴) نیز معماری سیستم ریشه ده گونه درختی تایلند را بررسی و پنج گونه را دارای سیستم *H*، دو گونه سیستم *VH*، دو گونه سیستم *R* و یک گونه را دارای سیستم *M* گزارش کردند [۱۲]. همان‌طور که مشخص است، بدون در نظر گرفتن نوع گیاه (درخت، درختچه و یا علفی)، سیستم ریشه می‌تواند تیپ‌های معماری مختلفی داشته باشد که شناخت آنها می‌تواند زمینه کاربرد صحیح آنها در زیست‌مهندسی را فراهم سازد. با وجود انجام پژوهش‌های فراوان در دنیا با هدف تیپ‌بندی معماری سیستم ریشه گیاهان برای استفاده در زیست‌مهندسی، و نیز با توجه به وضعیت نامناسب ایران در کنترل فرسایش و هدررفت خاک، متأسفانه تاکنون اطلاعاتی در مورد تیپ معماری ریشه گیاهان از منظر زیست‌مهندسی در ایران منتشر نشده است. بنابراین، با توجه به موارد ذکر شده و عدم وجود اطلاعات در خصوص معماری سیستم ریشه گونه‌های مهم جنگل‌های شمال، هدف اصلی این مطالعه بررسی و تعیین معماری سیستم ریشه نهال راش با استفاده از طبقه‌بندی براساس کاربرد در زیست‌مهندسی خاک است. هدف فرعی پژوهش حاضر نیز مطالعه ویژگی‌های مکانیکی ریشه نهال‌های راش و بررسی تأثیر شیب دامنه بر آنها است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد پژوهش

این پژوهش در بخش پاتم، جنگل آموزشی-پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شد. خاک این منطقه عمدتاً رسی و سیلتی و در طبقه‌بندی یونیفاید *CH*، *CL*، *MH* و *ML* می‌باشد. همان‌طور که از کلاسه‌ها پیداست خمیرایی خاک می‌تواند از کم تا زیاد باشد که شستشوی خاک از سیستم ریشه را هنگام خارج کردن از خاک دشوار می‌کند. به دلیل حضور دام در جنگل، موفقیت زادآوری در بخش پاتم اندک و منحصر به قسمت‌هایی می‌شود که دام دسترسی کمتری دارد. متوسط بارندگی حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر و حداقل و حداکثر بارندگی مربوط به اردیبهشت و مهر ماه و به ترتیب برابر ۶۱ و ۲۵۴ میلی‌متر می‌باشد [۱۳]. گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال، به ترتیب، تیر و بهمن با متوسط دمای ۲۲ و ۳ درجه سانتی‌گراد است. با جنگل‌گردشی، دو دامنه با شیب متوسط ۱۰ و ۶۰ درصد در پارسل ۱۱۶ که نهال‌های راش روی آنها حضور داشتند، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. مساحت این پارسل ۴۲ هکتار، ارتفاع از سطح دریا حدود ۸۰۰-۷۴۰ متر و تیپ‌های غالب راش-ممرز و ممرز آمیخته می‌باشد [۱۳]. بخش پاتم عمدتاً دارای شبکه جاده‌های درجه دو به طول حدود ۱۲۵۰۰ متر و سه جاده فرعی درجه سه به طول کل ۴۷۰۰ متر می‌باشد.

۲-۲. روش پژوهش

در روی دو دامنه با شیب متوسط ۱۰ و ۶۰ درصد، به ترتیب ۲۸ و ۴۱ نهال راش با ارتفاع کمتر از دو متر به صورت تصادفی انتخاب شدند. بعد از مشخص شدن نمونه‌ها، مطابق روش شاولومیکس اقدام به خارج کردن سیستم ریشه نهال‌ها به صورت نزدیک به

کامل از خاک شد [۱۴]. روند اجرای روش به‌ترتیب شامل: انتخاب پایه نمونه تیپیک به‌صورت تصادفی، حفر خاک اطراف سیستم ریشه گیاه با کمک بیل دستی، خارج کردن استوانه‌ای از خاک که حاوی سیستم ریشه به‌صورت تقریباً کامل باشد [۱۴]، شستن و جدا کردن خاک از سیستم ریشه، هوا خشک کردن سیستم ریشه به‌مدت ۱۰-۵ دقیقه و در پایان شماره‌گذاری نمونه‌ها و انتقال آنها به آزمایشگاه بود. در مواردی که خاک چسبندگی بالایی داشت و به‌راحتی از سیستم ریشه جدا نمی‌شد، نمونه همراه با خاک به‌مدت چند روز در آب اشباع و سپس خاک شسته و حذف می‌شد. لازم به ذکر است که روش شاولومیکس با توجه به هدف مطالعه که تیپ‌بندی سیستم ریشه براساس کاربرد در زیست‌مهندسی بود، مقداری تعدیل شد و از اندازه‌گیری زوایای انشعاب و شدت انشعاب‌دهی چشم‌پوشی شد. در مورد هر نهال ویژگی‌هایی مانند: ارتفاع ساقه، قطر یقه، تعداد شاخه، عرض تاج، قطر سیستم ریشه و عمق نفوذ ریشه راست، اندازه‌گیری و ثبت شد. در روش Yen (۱۹۸۷) [۹]، بر مبنای رتبه‌بندی چهار ویژگی سیستم ریشه شامل: الف) درصد پراکنش تعداد ریشه‌ها در افق‌های متوالی، ب) حداکثر عمق توسعه ریشه‌ها (حداکثر عمق ریشه‌دوانی)، ج) گستره افقی ریشه‌های جانبی و د) تیپ اصلی پراکنش ریشه، پنج معماری یگانه سیستم ریشه تعیین می‌شوند که هر یک کاربرد مشخصی در زیست‌مهندسی دارند. درصد پراکنش تعداد ریشه‌ها در افق‌های ۳۰ سانتی‌متری شامل سه رتبه: ۱) بیش از ۸۰ درصد ریشه‌ها از سطح خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متری پراکنش یافته‌اند، ۲) بیش از ۸۰ درصد ریشه‌ها از سطح خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری پراکنش یافته‌اند و ۳) بیش از ۲۰ درصد ریشه‌ها پایین‌تر از عمق ۶۰ سانتی‌متر پراکنش دارند، است. حداکثر عمق توسعه ریشه‌ها نیز شامل سه رتبه: ۱) کم عمق (۶۰-۰ سانتی‌متر)، ۲) متوسط (۹۰-۶۱ سانتی‌متر) و ۳) عمیق (بیش از ۹۰ سانتی‌متر) است. گستره افقی ریشه‌های جانبی شامل دو رتبه: ۱) گستره کم (ریشه‌های جانبی تا فاصله ۱/۵ متر از تنه توسعه نیافته‌اند) و ۲) گستره زیاد (ریشه‌های جانبی تا فاصله ۱/۵ متر از تنه توسعه یافته‌اند) است. تیپ اصلی پراکنش ریشه شامل هفت رتبه به‌ترتیب: ۱) بیشتر ریشه‌های اصلی موازی با سطح خاک امتداد دارند، ۲) بیشتر ریشه‌های اصلی به‌صورت افقی امتداد دارند، ۳) برخی از ریشه‌های اصلی موازی و برخی به‌صورت افقی با سطح خاک امتداد دارند، ۴) بیشتر ریشه‌های اصلی به‌صورت مورب و زاویه عمود نسبت به شیب امتداد دارند، ۵) ریشه راست یا ریشه آویزان وجود دارد و ریشه‌های جانبی به‌صورت گسترده و موازی یا افقی در لایه بالایی و میانی رشد می‌کنند، ۶) ریشه راست یا ریشه آویزان وجود دارد و ریشه‌های جانبی اندک و گستره کمی دارند و ۷) وسعت ریشه‌های اصلی کم و این ریشه‌ها به صورت گسترده و انبوه در زیر کنده رشد می‌کنند، است. از آنجا که روش Yen (۱۹۸۷) [۹]، برای درختان بالغ توسعه داده شد، در اعداد آستانه این روش نیز تغییراتی اعمال شد تا برای نهال‌ها قابل استفاده باشد. بدین‌منظور، توزیع درصد تعداد ریشه‌های درشت در سه افق ۳۰ سانتی‌متری به سه افق ۱۵ سانتی‌متری (۱۵-۰، ۳۰-۱۵ و ۴۵-۳۰) تغییر یافت. معیار حداکثر عمق ریشه‌دوانی تا عمق بیش از ۹۰ سانتی‌متر نیز به عمق بیش از ۴۰ سانتی‌متر (کمتر از ۲۰، ۴۰-۲۰ و بیش از ۴۰) تعدیل شد. گسترش افقی نیز در فاصله‌های ۵ و ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تیپ‌های معماری سیستم ریشه این روش برای کاربرد در زیست‌مهندسی شامل: تیپ افقی^۱ یا H، تیپ زاویه راست^۲ یا R، تیپ عمودی یا افقی^۳ یا VH، تیپ عمودی^۴ یا V و تیپ حجیم^۵ یا M هستند. تیپ‌های H، VH و R مناسب پایدارسازی شیب‌ها و مقاوم به باد، تیپ‌های H و M مناسب برای مسلح‌سازی خاک و تیپ V هم مقاوم به باد ذکر شده است [۱۰ و ۱۵].

پس از بررسی معماری، آزمایش مقاومت مکانیکی نیز روی نمونه ریشه‌ها انجام شد. بدین‌منظور، نمونه‌ها با دامنه قطر ۰/۱ تا ۴/۸ میلی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر از سیستم‌های ریشه جدا و با استفاده از دستگاه یونیورسال استاندارد مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. نمونه‌های ریشه بین دو فک دستگاه یونیورسال STM5 قرار داده شد و آزمایش کشش ریشه با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه [۳] انجام شد. نمونه ریشه‌هایی که گسیختگی در آنها نزدیک فک‌ها اتفاق افتاد نامعتبر بوده و داده‌های آنها حذف شد [۱۶]. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، نیروی کششی (حداکثر نیروی لازم برای گسیختن نمونه) و مقاومت کششی (حداکثر نیرو تقسیم بر

¹Pendent root²Horizontal type³Right type⁴Vertical or horizontal type⁵Vertical type⁶Massive type

سطح مقطع نمونه) بودند. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک، همگنی واریانس از آزمون لون، مقایسه تیمارها از تحلیل کوواریانس (عوامل کوواریت شامل ارتفاع نهال در تحلیل‌های زیستی و قطر نمونه ریشه‌ها در تحلیل‌های مکانیکی) و برای بررسی همبستگی از آزمون اسپیرمن استفاده شد.

۳. یافته‌های پژوهشی و بحث

۳-۱. ویژگی‌های زیستی و معماری سیستم ریشه

اطلاعات توصیفی نهال‌های مورد بررسی به تفکیک شیب در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج تحلیل نهال‌های تیمار شیب ۱۰ درصد نشان داد که میانگین $\pm 8/0/22/32$ و با مدیان ۳۱ و مد ۳۰ درصد است. همچنین نسبت قطر سیستم ریشه به قطر تاج نهال به عنوان یک نسبت مهم برای برآورد قطر سیستم ریشه، $36/18 \pm 8/43$ و با مدیان $86/44$ و مد ۵۰ درصد است. در مورد نهال‌های روی شیب ۶۰ درصد، نسبت عمق نفوذ ریشه به طول ساقه $63/28 \pm 94/28$ و با مدیان $69/27$ و مد ۴۰ درصد است. همچنین نسبت قطر سیستم ریشه به قطر تاج نهال $82/37 \pm 38/63$ و با مدیان $28/54$ و مد ۵۰ درصد است. در پژوهش‌های پیشین، تنوع گونه‌ها در حداکثر عمق ریشه‌دوانی در مقیاس جهانی بسیار زیاد و از عمق $0/3$ تا بیش از ۷۰ متر متغیر ولی بیشترین فراوانی در عمق یک متر مشاهده شده است [۱۷]. حداکثر عمق ریشه‌دوانی گاهی حتی می‌تواند برابر یا بیشتر از حداکثر ارتفاع ساقه باشد و به شدت به نوع اکوسیستم و شکل رشد گیاه وابسته است [۱۸]. نتایج اولیه آماربرداری خسارت^۱ حدود ۵۰ درصد ریشه‌کن شده در منطقه نکا جنگل‌های هیرکانی نشان داد که حداکثر عمق ریشه‌دوانی به طور متوسط پنج درصد ارتفاع ساقه بود. با توجه به ضریب کاهش قطری ریشه‌های گسیخته شده، می‌توان برآورد کرد که در صورت خارج کردن کامل سیستم ریشه، این عدد حدود $5/6$ درصد ارتفاع ساقه خواهد بود. داده‌های آماربرداری خسارت ۱۴۹ درصد ریشه‌کن شده در جنگل خیرود (نوشهر) نیز نشان داد که حداکثر عمق ریشه‌دوانی برای گونه‌های راش، ممرز، توسکا و افرا پلت به ترتیب $7/6$ ، $3/8$ و $7/8$ درصد ارتفاع ساقه است. بنابراین، حداکثر عمق ریشه‌دوانی بسته به شرایط آب و هوایی و خاک و بین گونه‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد [۱۹]. دلیل اختلاف زیاد این نسبت بین نهال‌های پژوهش حاضر و آماربرداری درختان بادافتاده، می‌تواند این نکته باشد که راست‌ریشه در اوایل رشد نهال، توسعه بالایی دارد ولی با گذشت زمان از رشد آن کاسته شده و توسعه ریشه‌های جانبی شدت می‌گیرد [۱۵]، همچنین درختان در طول زندگی متناسب با تنش‌ها و میزان عناصر غذایی و آب در دسترس، تغییراتی در سیستم ریشه ایجاد می‌کنند [۱۵]. نتایج آنالیز کوواریانس برای بررسی تأثیر شیب دامنه بر عمق نفوذ ریشه (حداکثر عمق ریشه‌دوانی) نشان داد که قطر یقه به عنوان عامل کوواریت معنی‌دار نبود در حالی که ارتفاع نهال عامل کوواریت معنی‌داری بود ($P < 0/01$ و $F = 13/47$). تیمار شیب دامنه نیز بر حداکثر عمق ریشه‌دوانی معنی‌دار نبود ($P > 0/05$ و $F = 0/13$). از طرفی نتایج آنالیز کوواریانس برای بررسی تأثیر شیب دامنه بر قطر سیستم ریشه نشان داد که عوامل کوواریت قطر یقه و ارتفاع نهال معنی‌دار نبودند ولی تأثیر شیب معنی‌دار بود ($P < 0/01$ و $F = 7/31$) و قطر سیستم ریشه در شیب بالاتر (۶۰ درصد) بیشتر بود، که می‌تواند باعث ایجاد لنگر و استحکام بیشتر برای گیاه شود. نتایج آزمون همبستگی روی کل داده‌ها نیز نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین حداکثر عمق ریشه‌دوانی و ارتفاع نهال وجود دارد ($P < 0/01$ و $r = 0/43$)، اما همبستگی بین قطر تاج و قطر سیستم ریشه معنی‌دار نبود. قابل ذکر است که، با وجود اینکه تأثیر عوامل مختلف محیطی بر حداکثر عمق ریشه‌دوانی بررسی شده است (مانند: شکل زیستی، رطوبت در دسترس، نوع خاک و اقلیم)، اما گزارشی در مورد تأثیر شیب بر این پارامتر در منابع مشاهده نشد.

درصد فراوانی رتبه‌های نهال‌ها به تفکیک شیب دامنه، برای چهار ویژگی معماری سیستم ریشه از نظر زیست‌مهندسی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که توصیف رتبه‌های هر معیار در قسمت روش توضیح داده شد.

¹Damage survey

جدول ۱. اطلاعات توصیفی ویژگی‌های نمونه‌ها به تفکیک شیب‌های مختلف دامنه

آماره	ارتفاع ساقه نهال (متر)	قطر یقه نهال (سانتی‌متر)	قطر سیستم ریشه (سانتی‌متر)	عمق نفوذ ریشه (سانتی‌متر)	قطر تاج نهال (سانتی‌متر)
میانگین	۱/۰۶	۱۰/۳۲	۱۳/۷۳	۳۲/۶۲	۳۵/۷۱
انحراف از معیار	۰/۳۹	۲/۸۹	۳/۷۶	۷/۵۲	۱۲/۶۷
حداقل	۰/۵۰	۶/۰	۶/۰	۲۲	۱۲
حداکثر	۱/۶۰	۱۹/۵	۲۰	۵۲	۶۱
میانه	۱/۰	۱۰/۰۵	۱۵	۳۱	۳۵/۵
مد	۱/۰	۸/۲	۱۵	۳۰	۳۰
میانگین	۱/۲۲	۹/۲۸	۱۶/۶۸	۳۳/۹۵	۲۹/۹۰
انحراف از معیار	۰/۳۲	۲/۴۷	۵/۰۲	۹/۸۲	۱۱/۹۲
حداقل	۰/۷	۵/۳	۶/۰	۱۶	۸/۰
حداکثر	۲/۰	۱۶/۷	۲۶	۷۸	۵۱
میانه	۱/۲	۹/۲	۱۸	۳۵	۲۸
مد	۱/۰	۶/۵	۱۸	۳۶	۱۸

شیب ۱۰ درصد

شیب ۶۰ درصد

جدول ۲. درصد فراوانی رتبه‌های سیستم ریشه نهال‌ها در مورد هر ویژگی به تفکیک شیب دامنه

رتبه ویژگی						
ویژگی	یک	دو	سه	چهار	پنج	شش
درصد پراکنش ریشه‌ها	۳/۵	۲۱/۵	۷۵	—	—	—
حداکثر عمق ریشه‌دوانی	۰	۸۲	۱۸	—	—	—
گستره جانبی	۴۶/۵	۵۲/۵	—	—	—	—
تیپ اصلی پراکنش	۰	۰	۰	۶۱	۳۲	۷
درصد پراکنش ریشه‌ها	۰	۲/۵	۹۷/۵	—	—	—
حداکثر عمق ریشه‌دوانی	۲/۵	۸۳	۱۴/۵	—	—	—
گستره جانبی	۲۷	۷۳	—	—	—	—
تیپ اصلی پراکنش	۰	۰	۰	۲/۵	۸۳/۵	۷

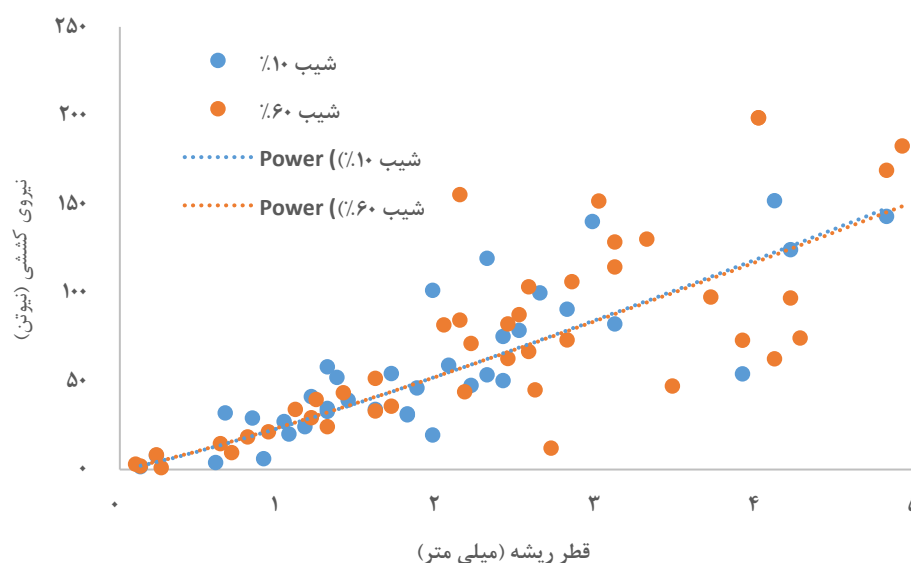
شیب ۱۰ درصد

شیب ۶۰ درصد

در مرحله بعد با توجه به رتبه‌های به‌دست آمده و جدول‌های کلاسه‌بندی Yen (۱۹۸۷) [۹]، تیپ‌بندی معماری سیستم ریشه انجام شد. نتایج نشان داد که در کلاسه شیب ۱۰ درصد، معماری VH در ۶۱ درصد، V در ۳۶ درصد و M در ۳ درصد نهال‌ها مشاهده شد. در کلاسه شیب ۶۰ درصد نیز معماری VH، سهم ۹۰ درصدی، R و M هر یک سهم ۲/۵ درصدی و V نیز پنج درصد فراوانی داشتند. بدون در نظر گرفتن شیب، تیپ ۵۱ نهال یا ۷۴ درصد کل نهال‌ها، VH بود و این نوع معماری نوع غالب در نهال‌های راش بود. در پژوهش‌های اخیر نیز تیپ VH را یکی از تیپ‌های رایج معماری برای درختان گزارش کرده‌اند که منطبق با یافته‌های پژوهش حاضر است [۱۱ و ۱۲]. لازم به ذکر است که گونه‌های مختلف می‌توانند تیپ‌های متفاوتی داشته باشند و ممکن است در بررسی دیگر گونه‌های جنگلی هیرکانی تیپ‌های دیگری مشاهده شود. در مورد معماری سیستم ریشه در زیست-مهندسی، تیپ‌های H، VH و R مناسب برای پایدارسازی شیب و دارای مقاومت نسبت به باد، و تیپ‌های H و M مناسب برای مسلح‌سازی خاک و تیپ V مقاوم در برابر باد ذکر شده‌اند [۱۷]. بنابراین از آنجا که درصد بالایی از نهال‌های راش الگوی VH نشان دادند، می‌توانند گزینه‌ای مطلوب برای پایدارسازی شیب‌ها و ترانشه‌های جاده‌های جنگلی باشند. همچنین Wang و همکاران (۲۰۲۰) ریشه‌های نوع R و V را مؤثرترین معماری ریشه در شرایط اشباع خاک برای پایداری دامنه‌ها تعیین کردند [۲۰]. علاوه بر این، برای جنگلکاری در مناطق با شیب ملایم نوع H و مناطق پرشیب نوع V و R را پیشنهاد نمودند [۲۰]. Saifuddin و Osman (۲۰۱۴) و Fu و همکاران (۲۰۱۶) نیز معماری نوع VH و ریشه‌های دارای سلولز بالاتر را مناسب‌ترین نوع برای پایدارسازی شیب معرفی کردند [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۲۱].

۳-۲. ویژگی‌های مکانیکی ریشه

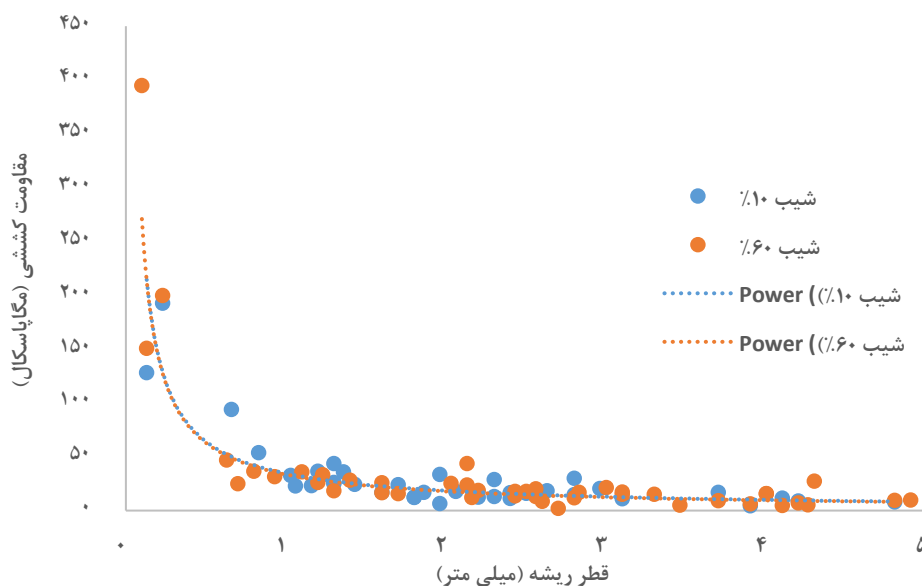
در مجموع، آزمایش کشش بر روی ۸۱ نمونه ریشه با موفقیت انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی به‌صورت تابع توانی مثبت افزایش می‌یابد (شکل ۱). میانگین نیروی کششی در نمونه‌های شیب ۱۰ و ۶۰ درصد، به‌ترتیب ۵۶/۷۱ و ۷۲/۰۷ نیوتن بود. بیشترین نیروی کششی ثبت‌شده در شیب‌های ۱۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۱۵۱/۹ و ۱۹۸/۷ نیوتن بود. رابطه بین نیروی کششی و قطر ریشه و برازش مدل توانی در شکل (۱) نشان داده شده است. ضریب تعیین مدل برای شیب ۱۰ درصد برابر ۰/۷۶ و برای ۶۰ درصد، ۰/۸۰ بود که نشان‌دهنده معنی‌داری مدل توانی است. البته امروزه وجود رابطه توانی مثبت به‌صورت یک قاعده پذیرفته شده درآمده است [۳]. مقادیر میانگین نیروی کششی نهال‌ها نسبت به مقادیر میانگین ثبت شده برای درختان بالغ راش شرقی (۷۴/۹۲ نیوتن) در پژوهش‌های پیشین قابل ملاحظه و مقایسه می‌باشند [۲۲].



شکل ۱. رابطه توانی مثبت بین نیروی کششی و قطر ریشه در شیب‌های ۱۰ و ۶۰ درصد

براساس نتایج آنالیز کوواریانس، قطر ریشه به‌عنوان عامل کوواریت، تأثیر معنی‌داری بر نیروی کششی دارد ($P < 0.001$) و $F = 132.16$ ، در حالی که، تأثیر شیب دامنه بر نیروی کششی معنی‌دار نبود. دلیل معنی‌دار نبودن شیب دامنه می‌تواند به جوان بودن ریشه‌ها و لیگنینی نشدن [۱۹] و وزن پایین و تأثیر اندک تنش ثقل بر نهال‌ها مرتبط باشد. در مورد مقاومت کششی، نتایج بیانگر کاهش مقاومت با افزایش قطر ریشه به‌صورت تابع توانی منفی بود که با پژوهش‌های قبلی مطابقت دارد [۶، ۷]. میانگین مقاومت کششی نمونه‌های شیب ۱۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۳۰/۲۶ و ۳۴/۳۹ مگاپاسکال ثبت شد. بیشینه مقاومت کششی در شیب ۱۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۱۹۲/۵۵ و ۳۹۴/۷۰ مگاپاسکال و در توده متراکم، ۳۰/۴۷ و ۳۹۴/۷۰ مگاپاسکال بود. مقادیر مقاومت کششی نهال‌ها نسبت به مقادیر میانگین گزارش شده برای درختان بالغ راش (۳۰/۴۷ مگاپاسکال) قابل مقایسه می‌باشند [۲۲]. نمودار روابط قطر و مقاومت کششی در شکل (۲) نشان داده شده است. ضریب تعیین مدل برای شیب ۱۰ درصد برابر ۰/۷۱ و برای ۶۰ درصد ۰/۷۲ بود که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل توانی است.

نتایج آنالیز کوواریانس نشان داد که قطر ریشه به‌عنوان عامل کوواریت تأثیر معنی‌داری بر مقاومت کششی داشت ($P < 0.001$) و $F = 31.46$ ، اما تأثیر شیب دامنه بر نیروی کششی معنی‌دار نبود. در این خصوص، مطابق آنچه پیشتر در مورد معنی‌دار نشدن تأثیر شیب روی نیروی کششی مطرح شد، در مورد مقاومت کششی هم صادق خواهد بود. بدین معنی که وزن ناچیز نهال باعث می‌شود تأثیر تنش ثقل بر نهال‌ها اندک باشد.



شکل ۲. رابطه توانی منفی بین مقاومت کششی و قطر ریشه در شیب‌های ۱۰ و ۶۰ درصد

۴. نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که میزان توسعه نسبی جانبی و عمقی سیستم ریشه نهال‌های راش در مقایسه با درختان بالغ گسترده‌تر و قابل توجه است. همچنین نتایج نشان داد که شیب دامنه تأثیر معنی‌دار بر حداکثر عمق ریشه‌دوانی ندارد ولی تأثیر بر گسترش افقی معنی‌دار است. بیشترین فراوانی تیپ معماری ریشه در هر دو شیب دامنه، به‌ترتیب کلاسه VH و پس از آن V بود که الگوهای مناسبی برای هدف پایدارسازی شیب می‌باشند. مقادیر میانگین نیروی کششی و مقاومت کششی نمونه ریشه‌های نهال‌ها قابل توجه و نزدیک به اعداد گزارش شده در مورد درختان بالغ راش شرقی می‌باشند که نشان‌دهنده قابلیت مناسب نهال‌ها برای مسلح‌سازی و پایدارسازی است. همچنین به دلیل اندک بودن وزن نهال‌ها و در نتیجه اندک بودن تنش ثقل بر روی آنها و نیز لیگنینی نشدن بافت ریشه‌های نهال‌ها، شیب دامنه تأثیر معنی‌دار بر مقاومت مکانیکی ریشه‌ها نداشت. آگاهی از تیپ معماری سیستم ریشه می‌تواند در انتخاب و طراحی سیستم‌های زیست‌مهندسی کاربرد داشته باشد و بنابراین پیشنهاد می‌شود حداقل تیپ معماری سیستم ریشه نهال‌های درختان و درختچه‌های مهم هیرکانی تعیین شوند. لازم به ذکر است که Yen (۱۹۸۷) با مقایسه وضعیت معماری، ۱۰۸ گونه مختلف توانست کلاسه رتبه‌های چهار ویژگی اصلی را تعریف کند، اما در پژوهش حاضر تنها یک گونه بررسی شد که به همین دلیل تعیین آستانه‌ها با مقداری عدم قطعیت روبه‌رو خواهد بود. بنابراین برای اطمینان بیشتر می‌توان تعدادی گونه در شرایط یکسان را بررسی و کلاسه‌های نهایی برای جنگل‌های هیرکانی را پیشنهاد داد.

۵. منابع

- [1] Ip, J. (2011). The Role of Roots in Slope Stability. University of British Columbia, Forestry Undergraduate Theses, 19 p.
- [2] Gray, D.H. & Sotir, R.B. (1996). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. John Wiley & Sons.
- [3] Bischetti, G.B., Bassanelli, C., Chiaradia, E.A., Minotta, G. & Vergani, C. (2016). The effect of gap openings on soil reinforcement in two conifer stands in northern Italy. *Forest Ecology and Management*, 359(1), 286-299.
- [4] Wu, W. (2016). Recent Advances in Modelling Landslides and Debris Flows. Springer, Netherlands, 322 p.

- [5] Sun, H.L., Li, S.C., Xiong, W.L., Yang, Z.R. & Cui, B.S. (2008). Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. *Ecological Engineering*, 32(1), 60-67.
- [6] 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. [7] Zhiyong, Z.H.A.N.G., Baomin, F.A.N., Chao, S.O.N.G., Xiaoxian, Z.H.A.N.G., Qingwen, Z. H.A.O. & Bing, Y.E. (2022). Advances in root system architecture: functionality, plasticity, and research methods. *Journal of Resources and Ecology*, 14(1), 15-24
- [8] Dumroese, R.K., Terzaghi, M., Acevedo, M., Lasserre, B., Scippa, G.S., Baggett, L. S., Chiatante, D. & Montagnoli, A. (2022). Root system architecture of *Pinus ponderosa* three decades after copper root pruning in a container nursery. *New Forests*, 53(6), 983-1001.
- [9] Yen, C.P. (1987). Tree root patterns and erosion control. Proceeding of the international workshop on soil erosion and its counter-measures. p. 92-111.
- [10] Fu, J.T., Hu, X.S., Brierley, G., Qiao, N., Yu, Q.Q., Lu, H. J., Li, G.R. & Zhu, H.L. (2016). The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, Northeast Qinghai, China. *Journal of Mountain Science*, 13(5), 785-801.
- [11] Saifuddin, M., Osman, N. & Khandaker, M.M. (2022). Evaluation of root profiles and engineering properties of plants for soil reinforcement. *Journal of Tropical Forest Science*, 34(2), 176-186.
- [12] Mairaing, W., Jotisankasa, A., Leksungnoen, N., Hossain, M., Ngernsaengsaruy, C., Rangsiwanichpong, P., Jarunee Pilumwong, J., Pramusandi, S., Semmad, S., & Ahmmed, A.N.F. (2024). A biomechanical study of potential plants for erosion control and slope stabilization of highland in Thailand. *Sustainability*, 16(15), 6374.
- [13] Majnounian, B. & Etter, H. (1992). Management plan revision for the district of Patom. *Iranian Journal of Natural Resources*, Special Issue, 104 p.
- [14] Trachsel, S., Kaeppler, S.M., Brown, K.M. & Lynch, J.P. (2011). Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant Soil*, 341(1), 75-87.
- [15] Morgan, R.P. & Rickson, R. J. (2003). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Taylor & Francis. 306 p.
- [16] Zhang, C., Chen, L., Jiang, J. & Zhou, S. (2012). Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots. *Trees*, 26(5), 1577-1584.
- [17] Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B. & Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 114, 10572-10577.
- [18] Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. & Schulze, E.D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3), 389-411.
- [19] Tobin, B., Čermák, J., Chiatante, D., Danjon, F., Di Iorio, A., Dupuy, L., Eshel, A., Jourdan, C., Kallikokoski, T., Laiho, R., Nadezhdina, N., Nicoll, B., Pagès, L., Silva, J. & Spanos, I. (2007). Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosystems*, 141(3), 481-501.
- [20] Wang, X., Ma, C., Wang, Y., Wang, Y., Li, T., Dai, Z. & Li, M. (2020). Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite. *Landslides*, 17(8), 1965-1977.
- [21] Saifuddin, M. & Osman, N. (2014). Evaluation of hydro-mechanical properties and root architecture of plants for soil reinforcement. *Current Science*, 845-852.
- [22] 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.