Iranian Journal of Forest and Poplar Research Vol. 31 No. 3, 2023 DOI: 10.22092/ijfpr.2023.363095.2113
Vol. 31, No. 3, Page 257-265 (2023) DOR: 20.1001.1.17350883.1402.31.3.6.1

Soil bioengineering in Iran: Lessons from the past and prospects for the future

E. Abdi

Associate Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
E-mail: abdie@ut.ac.ir

Received: 11.07.2023 Accepted: 15.08.2023

Abstract

Background and objectives: Soil bioengineering techniques offer multifaceted benefits and find applications across diverse landscapes. These approaches are notable for their high sustainability, adaptability to environmental changes, and effective reestablishment. While existing bioengineering studies focus largely on assessing root systems for soil stabilization, it remains pivotal to estimate key biotechnical characteristics, such as root distribution and mechanical strength, for various plant species. These insights serve as crucial inputs for developing robust soil reinforcement models.

Methodology: Root system distribution and mechanical strength data are integral for accurate reinforcement estimation. In Iran, conventional methods such as profile trenching and soil core sampling were employed for destructive sampling to investigate root system distribution and density. This focused on several tree species, including *Fagus orientalis* Lipsky, *Carpinus betulus* L., *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Acer velutinum* Boiss., *Quercus castaneifolia* C.A.Mey., *Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey., *Fraxinus excelsior* L., *Picea abies* (L.) H.Karst., *Quercus brantii* Lindl., *Quercus libani* Oliv., *Haloxylon persicum* Bunge ex Boiss. & Buhse, Salix alba L., *Tamarix hispida* Willd., and *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. The mechanical properties of root samples from various species and habitats were investigated in a laboratory setting using a universal device. A novel in-situ pullout device with a 10-kilonewton capacity was employed in Iran to measure mechanical resistance in mangrove forests.

Results: Findings indicated that the mean root area ratio, a density indicator, ranged from 0.15% to 2.6%. Various factors significantly influenced root area ratio values, including species, slope gradient, health status, human intervention, stress direction, altitude, trunk diameter, age, and horizontal and vertical distances from the trunk. Mechanical resistance values were impacted by factors such as health status, pollarding, slope gradient, wind direction, season, altitude, age, and trunk diameter. Generally, higher slope gradients, trunk diameters, elevations, and ages increased root density, while diseases, pests, and pollarding treatments decreased it. Mechanical resistance values varied with factors such as season, trunk diameter, elevation, and the presence of stressors like slope and prevailing wind. In Iran, mean tensile force, tensile strength, and pullout resistance ranged between 17-145 N, 3-45 MPa, and 1.19 kN, respectively.

Conclusion: Iran possesses essential data for applying classical models of soil reinforcement across various plant species. To enhance models, the use of in-situ pullout apparatus for assessing root mechanical characteristics in their natural environment is recommended. Despite the wealth of Iranian bioengineering literature, knowledge gaps persist, particularly in root architecture, distribution, and density, with a need for data on whole tree extraction and the development of allometric models for soil bioengineering applications.

Keywords: Pullout resistance, root architecture, root distribution, tensile force, tensile strength.

زیست‌مهندسی در ایران: تجربه‌های گذشته و چشم‌انداز آینده

احسان عبدی

دانشیار، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: abdie@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

چکیده

سابقه و هدف: تکنیک‌های زیست‌مهندسی با کارکردهای چندگانه و قابلیت استفاده در سطوح وسیع، مزایایی مانند پایداری بالا در طول زمان، قابلیت خودتجدیدی، خودترمیمی و سازگاری با تغییرات محیطی دارند. بیشتر پژوهش‌های زیست‌مهندسی بر سیستم ریشه و نقش آن در تثبیت و مسلح‌سازی خاک متمرکز بوده است، بنابراین برآورد ویژگی‌های زیست‌فنی (شامل پراکنش و مقاومت مکانیکی) ریشهٔ گونه‌های مختلف به‌عنوان ورودی مدل‌های برآورد مسلح‌سازی، اهمیت زیادی دارد.

مواد و روش‌ها: برآورد مسلح‌سازی، نیازمند داده‌های پراکنش و مقاومت مکانیکی است. تاکنون در ایران برای بررسی پراکنش و تراکم سیستم ریشه، اغلب از روش‌های مخرب نمونه‌برداری دیواره پروفیل و هستهٔ خاک با تأکید بر برخی گونه‌های درختی (راش، ممرز، توسکا، افرا پلت، بلندمازو، انجیلی، ون، نوئل، بلوط ایرانی، بلوط وی‌ول، زرد تاغ، بید، گز و حرا) استفاده شده است. پروفیل‌های مورد استفاده با ابعاد ثابت و در بالا یا پایین‌دست نمونه‌های روی شیب و یا در پایین‌دست و در دو یا سه فاصله افقی از تنه حفر شده‌اند. ویژگی‌های مکانیکی چندین هزار نمونه ریشه از گونه‌های درختی مذکور در رویشگاه‌ها (هیرکانی، زاگرس، بیابانی، کران‌آبی و کِشَندی) و تیمارهای متفاوت نیز در آزمایشگاه توسط دستگاه اینسترون استاندارد اندازه‌گیری و بررسی شده‌اند. نمونه‌های ریشه برای آزمایش مکانیکی، با حفر چاله‌هایی نزدیک به پایه‌ها استخراج و در فاصلهٔ انتقال از عرصه به آزمایشگاه، ریشه‌ها برای جلوگیری از پوسیدگی قارچی و خشک‌شدن، با محلول الکل ۱۵ درصد مرطوب و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام آزمایش نگهداری می‌شوند. به‌تازگی فقط در یک پژوهش جدید در ایران، دستگاه ریشه‌کش درجا با توان ۱۰ کیلونیوتن برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی در جنگل‌های کشندی استفاده شده است.

نتایج: با جمع‌بندی داده‌های به‌دست‌آمده، دامنهٔ میانگین نسبت سطح ریشه به سطح خاک به‌عنوان شاخص تراکم، بسیار وسیع و حدود ۰/۱۵ تا ۲/۶ درصد بوده است. عوامل زیادی مانند نوع گونه، تنوع درون گونه‌ای، مقدار شیب، وضعیت سلامت پایه‌ها، دخالت‌های انسانی، جهت اعمال تنش غالب، ارتفاع از سطح دریا و کلاسهٔ قطری تنه درختان، سن و فاصله‌های افقی و عمودی از تنه بر مقدار این شاخص، تأثیر معنی‌دار دارند. نتایج نشان داده‌اند که افزایش در شیب، قطر تنه، ارتفاع از سطح دریا و سن باعث افزایش تراکم ریشه می‌شود، درحالی‌که بیماری، آفات و گلازنی، کاهش تراکم ریشه‌ها را به‌دنبال دارد. مقدار مقاومت مکانیکی، تابع نوع گونه، آفات و بیماری‌ها، گلازنی، شیب، باد غالب، فصل، ارتفاع از سطح دریا، سن و کلاسه قطری تنه است. به‌طورکلی، فصل خزان، افزایش قطر تنه و ارتفاع از سطح دریا و وجود تنش‌های شیب و باد غالب باعث افزایش مقاومت مکانیکی و بروز بیماری و آفات و گلازنی باعث کاهش مقدار این پارامتر می‌شوند. در ایران، دامنهٔ میانگین نیروی کششی، مقاومت کششی و مقاومت به بیرون کشیدن (فقط در یک پژوهش) به‌ترتیب حدود ۱۷ تا ۱۴۵ نیوتن، سه تا ۴۵ مگاپاسکال و ۱/۱۹ کیلونیوتن گزارش شده‌اند.

نتیجه‌گیری: باتوجه‌به موارد ذکرشده، اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌های کلاسیک مسلح‌سازی در ایران حداقل درمورد برخی گونه‌ها وجود دارد، اما چنانچه هدف، استفاده از مدل‌های نوین باشد، بهتر است از دستگاه ریشه‌کش درجا برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی استفاده شود. درضمن، درمورد معماری، پراکنش و تراکم ریشه‌ها نیز هنوز دو کمبود اطلاعاتی در پژوهش‌های زیست‌مهندسی ایران دیده می‌شود که شامل کسب داده‌ها از روش استخراج کامل درخت و در مرحلهٔ بعد، توسعهٔ مدل‌های آلومتریک مختص زیست‌مهندسی هستند.

واژه‌های کلیدی: پراکنش ریشه، معماری ریشه، مقاومت به بیرون کشیدن، مقاومت کششی، نیروی کششی.

مقدمه

دانش زیست‌مهندسی، قدمتی چندهزارساله و پیشینه‌ای به‌اندازهٔ تاریخ توسعه جوامع انسانی دارد. توسعه جوامع و به‌دنبال آن، زیرساخت‌ها، با به‌هم زدن تعادل نیروها در طبیعت، سبب افزایش نیروهای مخرب و ایجاد خسارت به زیرساخت‌ها و محیط اطراف می‌شود. در طول تاریخ، مهندسان به‌طور سنتی استفاده از مصالح بی‌جان را برای بازگرداندن تعادل انتخاب می‌کرده‌اند، اما امروزه شیوه‌ها و روش‌های جایگزین مبتنی بر پوشش‌گیاهی نیز به‌شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند (Lewis, 2000). علمی که پوشش‌گیاهی را ازنظر فنی و به‌عنوان مصالح بررسی می‌کند، زیست‌مهندسی نام دارد و به‌صورت استفاده از اجزای زیستی گیاه به‌تنهایی یا در ترکیب با مصالح غیرزیستی به‌عنوان مصالح و برای اهداف مهندسی تعریف می‌شود.

به‌نظر می‌رسد که باتوجه‌به تاریخچه و سیر تحول زیست‌مهندسی می‌توان تکامل این دانش را به چهار مرحله تقسیم کرد. اول، زیست‌مهندسی باستانی که مربوط به استفادهٔ ساده از گیاهان برای کنترل فرسایش بود و مبدأ آن به پیش از میلاد و کشور چین برمی‌گردد. دوم، زیست‌مهندسی کلاسیک که از قرن ۱۶ میلادی آغاز و شامل جمع‌آوری و تدوین تدریجی تکنیک‌های زیست‌مهندسی ساده و استفاده در سطوح کوچک در اروپا بود. سوم زیست‌مهندسی تجربی- علمی که از دهه ۱۹۳۰ در آلمان و با ایجاد مؤسسه تحقیقات توسعه تکنیک‌های زیست‌مهندسی و استفاده از نتایج آن در ساخت اتوبان‌ها و سطوح وسیع آغاز شد (Lewis, 2000). چهارم، زیست‌مهندسی نوین که از سال ۱۹۶۴ و به‌دنبال اثبات علمی و کمّی تأثیر ریشه درختان بر پایداری دامنه‌ها و نشان دادن همبستگی مستقیم بین زمان بهره‌برداری و افزایش تعداد زمین‌لغزش‌ها آغاز شد و با جمع‌آوری داده‌های کمّی زیست‌فنی و توسعهٔ رابطه‌ها و مدل‌های زیست‌مهندسی ادامه یافت. تا پیش از پیدایش زیست‌مهندسی نوین، برخی ویژگی‌های مثبت مصالح زیستی تاحدودی آشکار بود، اما کمّیت و اندازهٔ آن‌ها مشخص نبود. همانند مهندسی عمران کلاسیک که مقاومت و ویژگی مصالح به‌طور کامل شناخته‌شده نبودند، بنابراین تکنیک‌های اولیه اغلب تجربی و بر آزمون‌وخطا استوار بودند. پس از شروع مرحله چهارم، ناگزیر، علم مقاومت مصالح (Strength of material) رشتهٔ عمران به زیست‌مهندسی نیز راه یافت و به‌عنوان علم شناخت ویژگی‌های مهندسی پوشش‌گیاهی (Engineering properties of vegetation) مطرح شد، بنابراین از آن زمان به بعد، محدودیت اصلی استفاده از زیست‌مهندسی، کمبود یا نقصان دانش در زمینهٔ کمّی‌سازی ویژگی‌های مهندسی پوشش‌گیاهی در هر منطقه بود. هرچند در ایران نیز از سال‌های دور، دانش بومی به‌کارگیری مصالح زیستی وجود داشته است، اما شاید بتوان مبدأ مرحلهٔ چهارم تحول را پژوهش Stiri (۱۹۹۶) دانست که نمونه‌های ریشهٔ اقاقیا را به‌صورت مصنوعی در نمونه‌های خاک دست‌خورده قرار داد و آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌ها انجام داد. نتایج آن پژوهش نشان داد که با افزایش تراکم ریشه در واحد سطح، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش، اما با افزایش درصد رطوبت خاک این مقادیر کاهش می‌یابند. هرچند که پژوهش‌های بعدی نشان دادند که ریشه‌ها، تأثیر چندانی در زاویه اصطکاک داخلی ذرات خاک ندارند.

تکنیک‌های زیست‌مهندسی با کارکردهای چندگانه و قابل‌استفاده در سطوح وسیع، مزیت‌های مختلفی مانند پایداری زیاد در طول زمان، قابلیت خودتجدیدی، خودترمیمی و سازگاری با تغییرات محیطی بدون از دست‌دادن ویژگی مهندسی دارند (Lewis, 2000). البته این تکنیک‌ها زمانی ارجح‌اند که ایمنی انسان، مدنظر و اولویت فوری نباشد. زیرا تکنیک‌های زیست‌مهندسی، راه‌حلی آنی تلقی نمی‌شوند. چنانچه گیاهان به دو قسمت کلی زیست‌توده رو و زیرزمین تقسیم شوند. قسمت زیرزمینی یا سیستم ریشه ازنظر فنی، وظیفهٔ تثبیت و مسلح‌سازی خاک به‌عنوان بستر رویش و قسمت روزمینی، نقش تعدیل و جذب انرژی جنبشی نیروهای فرساینده آب و باد را برعهده دارند (Abdi, 2018). برآیند این کارکردها، افزایش پایداری شیب و کاهش نرخ فرسایش خواهد بود. ازنظر علمی، اثرات مهندسی پوشش‌گیاهی در سه دستهٔ آب‌شناختی، هیدرولیک و مکانیک تقسیم‌بندی می‌شوند

(Morgan & Rickson, 2003). تمرکز تأثیرهای آب‌شناختی بر تنظیم رطوبت خاک و تأخیر در رسیدن به رطوبت اشباع، تمرکز تأثیرهای هیدرولیک بر جذب انرژی جنبشی آب و باد و درنتیجه، کاهش تنش برشی آن‌ها و درنهایت، تمرکز تأثیرهای مکانیک در زمینه برهم‌کنش سیستم ریشه- تاج با شیب و خاک روی دامنه‌ها هستند.

مروری بر پژوهش‌های انجام‌گرفته در دنیا نشان می‌دهد که سمت و سوی بیشتر پژوهش‌های زیست‌مهندسی بر سیستم ریشه و نقش آن در تثبیت و مسلح‌سازی خاک (نقش مکانیکی) بوده است. به‌نظر می‌رسد در ایران نیز جهت پژوهش‌ها با این روند مطابقت دارد. ریشه و خاک به‌عنوان دو نوع مصالح ساختمانی با ویژگی‌هایی متفاوت، زمانی که در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند با پوشاندن نقاط ضعف یکدیگر (نقطه ضعف ریشه: تنش فشاری و ضعف خاک: تنش کششی) و به اشتراک گذاشتن نقاط قوت (نقطه قوت ریشه: مقاومت کششی زیاد و خاک: مقاومت فشاری زیاد)، نوعی مادة کامپوزیت را شکل می‌دهند که ویژگی فنی شبیه بتن مسلح از خود نشان می‌دهد. در این ماتریس، تنش‌ها به ریشه‌ها انتقال می‌یابند و ریشه‌ها با تحمل مقداری از تنش‌ها باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شوند. مقدار مقاومت افزایش‌یافته به عواملی ازجمله: تراکم و مقاومت مکانیکی ریشه‌ها، زاویه‌های ریشه‌ها نسبت به صفحه برش، مقدار انشعاب‌های ریشه، چسبندگی سیستم خاک- ریشه (Giadrossich *et al.*, 2017) و از همه مهم‌تر، رطوبت خاک بستگی دارد.

همواره، کسب اطلاعات با صحت و هزینه مناسب از سیستم ریشه به‌عنوان نیمة پنهان گیاه (Hidden half)، چالشی بزرگ در پژوهش‌های زیست‌مهندسی بوده است. ازطرفی به‌دلیل تأثیر قوی محیط بر نحوة توسعه و نیز بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه، نتایج اغلب قابل‌تعمیم به مناطق دیگر نیست. بلکه برای مدل‌سازی صحیح باید اطلاعات ویژگی‌های مهندسی گیاه از منطقة هدف وجود داشته باشند. در ادامه، ابتدا کلیات ویژگی‌های زیست‌فنی به‌تفکیک ویژگی‌های زیستی و مکانیکی ریشه به‌عنوان داده‌های اصلی زیست‌مهندسی بررسی می‌شود. سپس، برخی یافته‌های مربوط به ایران (پژوهش‌هایی که داده‌های خام آن‌ها برای استخراج برخی آمار توصیفی در اختیار نگارنده بود) به‌طور خلاصه ارائه خواهند شد. در انتهای مقاله نیز جمع‌بندی و پیشنهاد اولویت‌هایی برای پژوهش‌های آینده ارائه شده است.

بدنه مقاله

معماری، تراکم و پراکنش سیستم ریشه

اطلاعات مربوط به معماری، تراکم و پراکنش به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های زیستی ریشه‌ها، قسمت اصلی داده‌های مورد نیاز برای تحلیل نقش ریشه در افزایش مقاومت برشی و پایداری خاک هستند (Giadrossich *et al.*, 2017). روش‌های بررسی سیستم ریشه به دو دستة کلی مخرب (Destructive) و غیرمخرب (Non-destructive) تقسیم می‌شوند. رایج‌ترین روش غیرمخرب، استفاده از رادار نفوذ به زمین (Ground penetrating radar) است که چون برای برداشت ریشه‌های قطور (بیشتر از حدود چهار تا پنج سانتی‌متر) و در خاک‌های درشت‌دانه کاربرد دارد، در زیست‌مهندسی مورد توجه قرار نگرفته است (Phillips *et al.*, 2023). روش‌های مخرب نیز به دو دسته کلی شامل روش استخراج کامل (Whole extraction) و روش‌های نمونه‌گیری تقسیم می‌شوند. روش استخراج کامل سیستم ریشه، بیشترین اطلاعات را در اختیار قرار می‌دهد، اما هزینه و زمان زیادی برای استخراج کامل هر پایه نیاز است. مطابق پژوهش Phillips و همکاران (۲۰۲۳)، خارج کردن کامل سیستم ریشة یک درخت سوزنی‌برگ به‌نسبت بزرگ به تجهیزات مناسب و یک تا دو هفته کار یک اکیپ چهارنفره نیاز خواهد داشت. داده‌های خروجی شامل: معماری سیستم ریشه، مجموع طول ریشه‌ها، پراکنش ریشه‌ها، تیپ سیستم ریشه‌دوانی و رابطة دقیق پراکنش ریشه‌ها با افزایش عمق و فاصله افقی هستند. تنها ایراد این روش این است که به‌طور معمول، امکان خارج کردن ریشه‌های ریز (نازک‌تر از چند میلی‌متر) وجود ندارد. گفتنی است که تاکنون، روش استخراج کامل درختان در ایران برای اهداف زیست‌مهندسی استفاده نشده است (درمورد نهال برخی گونه‌ها انجام شده است).

متداول‌ترین روش‌های نمونه‌گیری مورد استفاده شامل دیوارة پروفیل (Trench profile method) و هستة خاک (Soil core) هستند (Salimi Zand *et al.*, 2017). پروفیل‌ها در انواع مختلفی شامل پروفیل پیوسته یا پروفیل با ابعاد ثابت که در یک یا چند فاصله افقی از تنه حفر می‌شوند (Giadrossich *et al.*, 2017)، مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱). درمورد پروفیل‌ها، ریشه‌های جانبی بیرون‌زده از دیواره‌ها، شمارش و موقعیت، عمق و قطر آن‌ها ثبت می‌شود، بنابراین این روش، توانایی برآورد مستقیم طول، حجم ریشه‌ها و مقدار زیست‌توده را ندارد. در مقابل، استفاده از سیلندر برای برداشت هسته‌های خاک، توانایی برداشت لایه‌های عمیق‌تر از ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر را ندارد، اما برآوردی از مقدار طول، حجم و زیست‌توده در واحد حجم را امکان‌پذیر می‌کند و تخریب کمتری نسبت به پروفیل دارد.

شکل ۱- پروفیل پیوسته (راست) و پروفیل‌های با ابعاد ثابت در سه فاصله از تنه (چپ)

Figure 1. Continuous (right) and fixed dimension trenches at three distances from the trunk (left)

در برخی کشورهای دنیا، استفاده از رابطه‌های آلومتریک نیز برای برآورد ویژگی‌های سیستم ریشه متداول است. متأسفانه هم‌اکنون در ایران، چنین رابطه‌هایی در زمینة زیست‌مهندسی در دسترس نیست. هرچند که در خصوص ترسیب کربن، معادله‌هایی توسعه یافته است. معدود داده‌های موجود در ایران نیز نشان داده‌اند که همخوانی خوبی بین رابطه‌های موجود در منابع و رابطه‌های به‌دست‌آمده در ایران وجود ندارد. برای مثال Morgan و Rickson (۲۰۰۳) بر مبنای داده‌های برداشت‌شده از آشفتگی‌ها (مثل بادافتادگی) گزارش کردند که رابطة بین قطر دایرة سیستم ریشه‌های جانبی بیرون‌زده از خاک (Diameter of root mat, D_r) و ارتفاع درخت (H) به صورت $D_r=H$ تا $D_r=2H$ است (البته نوع گونه ذکر نشده است)، درحالی‌که در خصوص گونه‌های راش (*Fagus orientalis* Lipsky) و ممرز (*Carpinus betulus* L.) بادافتاده در جنگل خیرود، رابطه به صورت $D_r=0.11H$ به‌دست‌آمده است (داده‌های منتشرنشده Abdi, 2023). گفتنی است که در منابع خارجی، رابطه‌های آلومتریک به‌طور معمول بین قطر برابر سینه یا قطر یقه به‌عنوان متغیر مستقل و مجموع طول ریشه‌ها، بیشینه پراکنش افقی و عمودی سیستم ریشه و مقدار زیست‌توده به‌عنوان متغیرهای وابسته، توسعه یافته و استفاده شده‌اند (Phillips *et al.*, 2023). نکته مهم دیگر اینکه سیستم ریشه به‌منظور بقا، الگوی توسعه و مقدار مقاومت قسمت‌های مختلف خود را مطابق با تنش‌های محیطی و تغییرات آن‌ها در طی زمان تنظیم می‌کند. یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی، شیب است. سیستم ریشه درختان روی شیب، شکل خاص نامتقارنی به نام بادبزن دوطرفه (Bilateral fan shape) به‌خود می‌گیرد که گسترش بیشتری در جهت موازی شیب نسبت به جهت عمود بر شیب خواهد داشت (Chiatante *et al.*, 2003)، بنابراین کوهستانی بودن جنگل‌ها نیز بر پیچیدگی مدل‌های آلومتریک خواهد افزود و مدل‌های مربوط به جنگل‌های مسطح حتی از یک گونه ثابت، دیگر در

جنگل‌های کوهستانی قابل‌استفاده نخواهند بود.

در خصوص تراکم و پراکنش ریشه‌ها، تاکنون چندین پژوهش در ایران و با روش‌های دیوارهٔ پروفیل و هستهٔ خاک و با تأکید بر برخی گونه‌های درختی (راش، ممرز، توسکا، افرا پلت، بلندمازو، انجیلی، ون، نوئل، بلوط ایرانی، بلوط وی‌ول، زرد تاغ، بید، گز و حرا) انجام شده‌اند. جمع‌بندی نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که دامنهٔ میانگین نسبت سطح ریشه به سطح خاک ((Root Area Ratio (RAR) به‌عنوان شاخصی از تراکم ریشه‌ها، حدود ۰/۱۵ تا ۲/۶ درصد بوده است. عوامل زیادی مانند نوع گونه و حتی تنوع درون گونه‌ای (Deljouei *et al.*, 2023)، مقدار شیب دامنه (Deljouei *et al.*, 2023)، وضعیت سلامت پایه‌ها (Mohammadrad *et al.*, 2016)، گلازنی (Salimi Zand *et al.*, 2017) جهت اعمال تنش غالب (Abdi *et al.*, 2019)، ارتفاع از سطح دریا و کلاسهٔ قطری تنهٔ درختان (Deljouei *et al.*, 2023)، سن (Afshar Sadr *et al.*, 2020) و فاصله‌های افقی و عمودی از تنه (Deljouei *et al.*, 2023)، اثرات معنی‌داری بر مقدار این شاخص داشته‌اند. به‌طورکلی، نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش در شیب، قطر تنه، ارتفاع از سطح دریا و سن سبب افزایش تراکم ریشه می‌شود. در مقابل، کاهش تراکم ریشه‌ها به‌علت بیماری، آفات و گلازنی رخ می‌دهد.

ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها

مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی ریشه شامل نیروی کششی (Tensile force)، مقاومت کششی (Tensile strength)، مدول یانگ (Young's modulus) و مقاومت به بیرون کشیدن (Pullout resistance) هستند. برای اندازه‌گیری نیرو و مقاومت کششی در آزمایشگاه از دستگاه اینسترون استاندارد و برای اندازه‌گیری مقاومت به بیرون کشیدن در عرصه از دستگاه ریشه‌کش درجا (In situ pullout) استفاده می‌شود (شکل ۲). استفاده از مدل‌های جدید برآورد مسلح‌سازی (مانند RBMw)، نیازمند دسترسی به داده‌های نیروی کششی و مقاومت به بیرون کشیدن به‌جای مقاومت کششی (ورودی در مدل‌های کلاسیک) هستند.

در خصوص استفاده از دستگاه اینسترون آزمایشگاهی، طول نمونه‌های ریشه به‌طور معمول ۴۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر (Phillips *et al.*, 2023) و در ایران ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر (طول آزاد بین فک‌ها) در نظر گرفته شده است. کمینهٔ قطر ریشه‌های مورد آزمایش به‌طور معمول ۰/۱ میلی‌متر و بیشینه آن وابسته به اندازه فک دستگاه و به‌طور معمول تا ۲۰ میلی‌متر است. البته تا پیش از سال ۲۰۰۵ به‌ندرت ریشه‌های نازک‌تر از یک تا دو میلی‌متر آزمایش می‌شدند (Genet *et al*,. 2005). نمونه‌ها از زمان جمع‌آوری تا انجام آزمایش در دمای چهار درجه سانتی‌گراد و با تیمار محلول آب و الکل ۱۵ درصد به‌صورت اسپری کردن نگهداری می‌شوند (Bischetti *et al.*, 2005). سرعت انجام آزمایش اغلب ۱۰ میلی‌متر در دقیقه (Bischetti *et al.*, 2005: Mattia *et al.*, 2005) انتخاب می‌شود تا قابلیت مقایسهٔ مستقیم بین نتایج پژوهشگران را فراهم کند. گفتنی است که افزایش سرعت آزمایش سبب افزایش مقاومت کششی خواهد شد (Cofie & Koolen, 2001) که در بررسی تأثیر ریشه بر کنترل لغزش‌های سریع کاربرد دارد.

دستگاه ریشه‌کش درجا از یک چهارچوب فلزی، وینچ برای کشیدن، جابه‌جایی‌سنج، نیروسنج و ثبت‌کنندهٔ الکترونیکی داده‌ها تشکیل شده است. تاکنون در دنیا، بیشینهٔ قطر ریشه‌های آزمایش‌شده توسط این دستگاه ۶۰ میلی‌متر گزارش شده است (Giadrossich *et al.*, 2017)، اما در جنگل‌های کِشَندی (Mangrove forests) در ایران، بیشینهٔ قطر آزمایش‌شده حدود ۳۰ میلی‌متر بوده است (داده‌های منتشرنشده Karimi, 2023). برخلاف دستگاه اینسترون که قابلیت اندازه‌گیری چسبندگی سیستم ریشه– خاک را ندارد، در استفاده از دستگاه ریشه‌کش درجا، ریشه در خاک و در محیط طبیعی آزمایش می‌شود. به‌طوری‌که در صورت وجود انشعاب‌ها، گسیختگی به‌صورت متوالی و تا انجام گسیختگی کامل ادامه خواهد یافت.

شکل ۲- اینسترون 5 kN (راست) و ریشه‌کش درجا 10 kN (چپ)

Figure 2. Universal testing machine, 5 kN (right) and In situ pullout device, 10 kN (left)

مرور نتایج پژوهش‌های مختلف در دنیا نشان می‌دهد که دامنهٔ [میانگین] مقاومت کششی به‌عنوان ورودی اصلی مدل‌های کلاسیک مسلح‌سازی، حدود پنج تا ۷۰ مگاپاسکال برای گونه‌ها و مناطق مختلف دنیا گزارش شده است (Phillips *et al.*, 2023). دلیل وجود این دامنهٔ وسیع، تأثیر عوامل مختلف در مقاومت کششی ازجمله: نوع گونه، ژنتیک، عوامل محیطی مانند نوع خاک، عناصر غذایی، رطوبت خاک و تنش‌های محیطی مانند شیب و بادهای غالب عنوان شده است (Bischetti *et al.*, 2005: Genet *et al*,. 2005: Hales & Miniat, 2017: Phillips *et al.*, 2023).

تاکنون در ایران، چندین هزار نمونه ریشه از گونه‌ها (راش، ممرز، توسکا، افرا پلت، بلندمازو، انجیلی، ون، نوئل، بلوط ایرانی، بلوط وی‌ول، زرد تاغ، بید، گز، حرا) در رویشگاه‌ها (هیرکانی، زاگرس، بیابانی، کران‌آبی (Riparian) و کشندی) و تیمارهای متفاوت در آزمایشگاه بررسی شده‌اند. دامنهٔ میانگین نیروی کششی، مقاومت کششی و مقاومت به بیرون کشیدن (فقط در یک پژوهش: Karimi, 2023) به‌ترتیب ۱۷ تا ۱۴۵ نیوتن، سه تا ۴۵ مگاپاسکال و ۱/۱۹ کیلونیوتن گزارش شده است. همچنین نتایج نشان‌دهندهٔ وجود تفاوت‌های معنی‌دار ویژگی‌های مکانیکی ریشه بر اثر: نوع گونه (Abdi, 2018)، سوزنی یا پهن‌برگ بودن (Esmaiili *et al.*, 2020) تأثیر آفات و بیماری‌ها (Mohammadrad *et al.*, 2020)، گلازنی (Salimi Zand *et al.*, 2017)، تنش شیب (Deljouei *et al.*, 2023)، تنش باد غالب (Abdi *et al.*, 2019)، فصل (Abdi & Deljouei, 2019)، ارتفاع از سطح دریا (Deljouei *et al.*, 2023) و کلاسه قطری تنه (Deljouei *et al.*, 2023) هستند. به‌طورکلی، فصل خزان، افزایش قطر تنه و ارتفاع از سطح دریا و وجود تنش‌های شیب و باد غالب سبب افزایش مقاومت مکانیکی می‌شود، درحالی‌که بروز بیماری و آفات و گلازنی، کاهش مقدار این پارامترها را در پی دارد. سوزنی‌برگان نیز به‌طورکلی، قوی‌تر از پهن‌برگان گزارش شده‌اند.

جمع‌بندی

تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و ملاحظات محیط‌زیستی، اهمیت زیست‌مهندسی و پذیرش اجتماعی آن را دوچندان کرده‌اند (Lewis, 2000)، بنابراین تمرکز پژوهش‌ها بر این زمینه به‌سرعت در حال افزایش است (Mickovski, 2021). لازمهٔ استفاده صحیح از این تکنیک‌ها، دسترسی به اطلاعات مناسب از ویژگی‌های مهندسی پوشش‌گیاهی به‌عنوان مصالح زیستی است. به‌منظور کمی‌سازی تأثیر پوشش‌گیاهی بر افزایش مقاومت خاک باید شاخص‌هایی مانند معماری، تراکم،

پراکنش و مقاومت مکانیکی سیستم ریشه برآورد شوند. ازآنجایی‌که تاکنون در ایران، روش استخراج کامل درمورد درختان انجام نشده است، اطلاعات مناسبی در زمینهٔ معماری ریشه وجود ندارد. فقط از مشاهدهٔ درختان بادافتاده می‌توان استنباطی کلی در این زمینه داشت، اما تیپ‌بندی دقیق ریشهٔ گونه‌ها به پنج تیپ اصلی زیست‌مهندسی (H، VH، V، R و M) هنوز در ایران مقدور نشده است. البته در خصوص نهال‌های راش (*F. orientalis*)، پیش‌پژوهش‌هایی انجام و تیپ ریشه‌ها اغلب VH (Vertical and horizontal type) تعیین شده است (داده‌های منتشرنشده Ramezani, 2023)، اما ممکن است درختان بالغ راش از الگوی دیگری تبعیت کنند. گفتنی است که در زیست‌مهندسی کاربردی برای هرکدام از این تیپ‌ها، کارکرد متفاوتی مانند مسلح‌سازی، پایدارسازی یا استفاده به‌عنوان بادشکن پیشنهاد شده است (Yen, 1987)، بنابراین چنین زمینه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک اولویت پژوهشی کاربردی در زیست‌مهندسی هدف‌گذاری شود. نقطهٔ ضعف دیگر در ایران، فقدان وجود مدل‌های آلومتریک به‌عنوان گزینه‌ای سریع برای برآورد ویژگی‌های زیستی سیستم ریشه و استفاده در مدل‌سازی‌های زیست‌مهندسی است، بنابراین در پروژه‌های ملی و با بودجه مناسب می‌توان تعدادی رابطه‌های کاربردی و حداقل برای برخی گونه‌های مهم را توسعه داد تا در محاسبه‌ها و مدل‌سازی‌ها، تسهیل ایجاد شود.

در خصوص برآورد ویژگی‌های مکانیکی، اغلب پژوهش‌های زیست مهندسی ایران با استفاده از دستگاه اینسترون انجام شده است. تاکنون فقط یک پژوهش با استفاده از دستگاه ریشه‌کش درجا در جنگل‌های حرای قشم انجام شده است (Karimi, 2023)، بنابراین داده‌های مناسب مدل‌های نوین (RBM و RBMw) هنوز در ایران اندک هستند. جمع‌آوری داده‌های کافی با این نوع دستگاه‌ها برای گونه‌های مهم می‌تواند استفاده از مدل‌های نوین برای برآورد مسلح‌سازی را امکان‌پذیر کند. البته در شرایط فعلی می‌توان برای حل مقطعی مشکل بیش‌برآوردی مدل‌های کلاسیک (Wu, Wu & Waldron) از ضریب‌های کاهش پیشنهادشده برای این مدل نیز استفاده کرد (Esmaiili *et al.*, 2020). نکته مهم دیگر اینکه با قطورتر شدن ریشه‌ها، مقدار مقاومت ریشه از قدرت چسبندگی سیستم ریشه- خاک بیشتر می‌شود. درنتیجه، ریشه به‌جای گسیختن، تمایل به سر خوردن پیدا می‌کند. تاکنون آستانه قطری بین گسیختن و سر خوردن گزارش نشده است. حتی بین پژوهشگران بر سر بیشینه قطر برای در نظر گرفتن در مدل‌های مسلح‌سازی، اختلاف‌نظر وجود دارد، بنابراین خروجی‌های مدل، همواره عدم قطعیت دارند. چنانچه پیشنهاد شده است که در مدل‌سازی‌های زیست‌مهندسی برای پروژه‌های اجرایی بهتر است که اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت نیز انجام گیرد (Morgan & Rickson, 2003).

منابع مورد استفاده

- 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. and Deljouei, A., 2019. Seasonal and spatial variability of root reinforcement in three pioneer species of the Hyrcanian forest. Austrian Journal of Forest Science, 136(3): 175-189.
- Abdi, E., Saleh, H.R., Majnonian, B. and Deljouei, A., 2019. Soil fixation and erosion control by *Haloxylon persicum* roots in arid lands, Iran. Journal of Arid Land, 11(1): 86-96.
- Abdi,E., 2023. Damage inventory of windthrown samples of beech and hornbeam . Unpublished manuscript. University of Tehran, Karaj, Iran.
- Afshar Sadr, A., Etemad, V., Abdi, E., Attarod, P. and Deljouei, A., 2020. Effect of slope on characteristics of *Quercus castaneifolia* root system. Journal of Forest Research and Development, 6(2): 313-327 (In Persian with English summary).
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P. and Zocco, A., 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). Plant and Soil, 278: 11-22.
- Chiatante, D., Scippa, S.G., Di Iorio, A. and Sarnataro, M., 2003. The influence of steep slopes on root system development. Journal of Plant Growth Regulation, 21(2): 247-260.
- Cofie, P. and Koolen, A.J., 2001. Test speed and other factors affecting the measurements of tree root properties used in soil reinforcement models. Soil and Tillage Research, 63(1-2): 51-56.

- Deljouei, A., Cislaghi, 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(1-2): 547-572.
- Esmaiili, M., Abdi, E., Nieber, J.L., Jafary, M. and 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.
- 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, 258(2): 1-9.
- Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Cislaghi, 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.
- Hales, T.C. and Miniat, C.F., 2017. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability. Earth Surface Processes and Landforms, 42(5): 803-813.
- karimi, Z., 2023. Pullout test of *Avicennia marina* root samples in mangrove forest of Iran. Unpublished manuscript. University of Tehran, Karaj, Iran.
- Lewis, L., 2000. Soil bioengineering: An alternative for roadside management, a practical guide. San Dimas Technology & Development Center, USDA Forest Service, San Dimas, California, 47p.
- Mattia, C., Bischetti, G.B. and Gentile F., 2005. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. Plant and Soil, 278(1): 23-32.
- Mickovski, S.B., 2021. Re-thinking soil bioengineering to address climate change challenges. Sustainability, 13(6): 3338.
- Mohammadrad, A., Abdi, E., Majnounian, B. and Yousefzadeh, H., 2016. The effect of pollarding on tensile strength of Persian oak (Case Study: Dinarkooh, Ilam). Iranian Journal of Forest, 8(3): 291-300 (In Persian with English summary).
- Mohammadrad, A., Abdi, A., Pourhashemi, M., Majnounian, B. and Deljouei, A., 2020. Effect of oak decline phenomenon on root mechanical characteristics of Brant`s oak (*Quercus brantii* Lindl.). Iranian Journal of Forest, 12(2): 219-231 (In Persian with English summary).
- Morgan, R.P. and Rickson, R.J., 2003. Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach. Taylor and Francis, London, 288p.
- Phillips, C., Bloomberg, M., Marden, M. and Lambie, S., 2023. Tree root research in New Zealand: a retrospective 'review' with emphasis on soil reinforcement for soil conservation and wind firmness. New Zealand Journal of Forestry Science, 53: 6.
- Ramezani, M., 2023. Root growth pattern of beech saplings. Unpublished manuscript. University of Tehran, Karaj, Iran.
- Salimi Zand, M., Abdi, E., Majnunian, B. and Hoseini, S.A., 2017. Effect of pollarding on biotechnical characteristics and reinforcement amount of Lebanon oak (*Quercus libani* Oliv.) roots. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 25(2): 298-309 (In Persian with English summary).
- Stiri, Gh., 1996. Use of bioengineering methods in stabilization of slopes. M.Sc. thesis, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 80p (In Persian).
- Yen, C.P., 1987. Tree root patterns and erosion control. Proceedings of the International Workshop on Soil Erosion and its Countermeasures. Bangkok, Thailand, 92-111.