



University of Tehran

Mechanical response of *Avicennia marina* roots to changes in stand density and soil depth in coastal areas

Zahra Karimi¹ | Ehsan Abdi^{2*} | Azadeh Deljouei³

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: karimi.zahra74@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
3. School of Forestry, Northern Arizona University, Flagstaff, Arizona, USA. Email: a.deljouei@ufl.edu

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 28 July 2025
Revised: 17 September 2025
Accepted: 10 October 2025
Published online: 22 November 2025

Keywords:
Eco-engineering,
Qeshm Island,
Root tensile force,
Soil stabilization,
Tensile strength.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the mechanical properties of mangrove roots, including tensile force and tensile strength, under two different stand densities (dense and semi-dense) and at three soil depths. Root samples were collected using the soil core method at depths of 0–10, 10–20, and 20–30 cm. Mechanical tests were conducted with a universal testing machine on roots of various diameters, and the relationships among diameter, tensile force, and tensile strength were analyzed using a power function model. The results revealed that tensile force increased with root diameter following a positive power function, while tensile strength decreased according to a negative power function. Based on ANCOVA results, stand density significantly affected both mechanical parameters (tensile force: $p = 0.003$; tensile strength: $p = 0.018$). Roots from dense stands exhibited higher values of tensile force and tensile strength. In contrast, soil depth did not exert a significant influence on these traits, which may be attributed to uniform environmental stresses or structural adaptations of *Avicennia marina* roots in surface soil layers. Overall, the findings suggest that increasing mangrove forest density—independent of root number—enhances the mechanical resistance of the root system and improves soil stabilization capacity in coastal habitats. The outcomes of this research can serve as a scientific basis for designing and implementing eco-engineering projects aimed at shoreline protection in southern Iran.

Cite this article: Karimi, Z., Abdi, E., 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. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.399605.1361>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.399605.1361>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

پاسخ مکانیکی ریشه‌های گونه حرا به تغییر تراکم توده و عمق خاک در سواحل

زهره کریمی^۱ | احسان عبدی^{۲*} | آزاده دلجویی^۳

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: karimi.zahra74@ut.ac.ir

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

۳. مدرسه جنگلداری، دانشگاه آریزونا شمالی، فلگ استاف، آریزونا، آمریکا. رایانامه: a.deljouei@ufl.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

کلیدواژه:

تثبیت خاک،

جزیره قشم،

زیست‌مهندسی،

مقاومت کششی،

نیروی کششی ریشه.

جنگل‌های مانگرو، به‌ویژه گونه حرا (*Avicennia marina*)، نقش کلیدی در تثبیت زیستی سواحل و کاهش فرسایش در مناطق جزر و مدی دارند. این پژوهش با هدف بررسی ویژگی‌های مکانیکی ریشه این گونه شامل نیروی کششی و مقاومت کششی در دو توده با تراکم متفاوت (تراکم و نیمه‌تراکم) و سه عمق مختلف خاک انجام شد. نمونه‌برداری از ریشه‌ها به روش هسته‌برداری و در اعماق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متر صورت گرفت. سپس آزمایش‌های مکانیکی با دستگاه یونیورسال بر روی ریشه‌های با قطرهای مختلف انجام و روابط بین قطر، نیروی کششی و مقاومت کششی با مدل تابع توانی تحلیل گردید. نتایج نشان داد با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی به‌صورت تابع توانی مثبت افزایش و مقاومت کششی به‌صورت تابع توانی منفی کاهش نشان داد. براساس نتایج تحلیل کوواریانس (ANCOVA)، تراکم توده، تأثیر معنی‌داری بر هر دو شاخص مکانیکی (نیروی کششی $p=0.003$ و مقاومت کششی $p=0.018$) داشت به‌طوری‌که ریشه‌های توده تراکم مقادیر بالاتری از نیروی کششی و مقاومت کششی از خود نشان دادند. در مقابل، تغییر عمق خاک تأثیر قابل توجهی بر این ویژگی‌ها نداشت که می‌تواند ناشی از یکنواختی تنش‌های محیطی یا سازگاری ساختاری ریشه‌های حرا در لایه‌های سطحی باشد. به طور کلی، یافته‌ها بیانگر آن است که افزایش تراکم جنگل‌های مانگرو، حتی بدون لحاظ کردن تعداد ریشه‌ها، سبب ارتقای مقاومت مکانیکی سیستم ریشه‌ای و بهبود توان تثبیت خاک در زیستگاه‌های ساحلی می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی در طراحی و اجرای طرح‌های زیست‌مهندسی برای حفاظت سواحل جنوبی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: کریمی؛ زهره، عبدی؛ احسان، دلجویی؛ آزاده (۱۴۰۴). پاسخ مکانیکی ریشه‌های گونه حرا به تغییر تراکم توده و عمق خاک در سواحل. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب،

۷۸ (۳)، ۲۲۳-۲۳۴. DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.399605.1361>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.399605.1361>



۱. مقدمه

فرسایش ساحلی یکی از مخاطرات روبه‌رشد و جدی برای جوامع ساحلی به‌شمار می‌رود، اما به‌دلایل گوناگون، کنترل این پدیده مخرب همچنان با چالش‌های فراوانی همراه است [۱]. با افزایش سطح آب دریاها و شدت طوفان‌ها در پی تغییرات اقلیمی، پیش‌بینی می‌شود که این معضل در دهه‌های آینده حتی با شدت بیشتری بروز کند. در این میان، استفاده از پوشش گیاهی یا به‌عبارتی تکنیک زیست‌مهندسی، به‌عنوان رویکردی پایدار و دوستدار محیط‌زیست، جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی مهندسی عمران در حفاظت از سواحل، به‌ویژه در مقیاس‌های وسیع، است. پوشش گیاهی نوار ساحلی با تعدیل شدت جزر و مد و امواج، فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نقش مهمی در تثبیت سواحل ایفا می‌کند [۲]. درختان مانگرو با کاهش انرژی جنبشی امواج از طریق تغییر دینامیک هیدرولیکی آنها، می‌توانند سرعت فرسایش را کاهش دهند و به پایداری خط ساحلی کمک کنند [۳].

مطالعات مختلفی بر نقش مؤثر مانگروها در حفاظت از سواحل تأکید داشته‌اند. برای مثال Mickovski و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که استفاده از راهکارهای زیست‌مهندسی، در مقایسه با سازه‌های مهندسی، نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است، بلکه مزایای اکولوژیک متعددی همچون افزایش تنوع زیستی، ترسیب کربن و بهبود کیفیت آب را نیز به‌همراه دارند [۴]. مانگروها که بوم سازگان‌های جنگلی منحصر به فردی در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری هستند، با قابلیت رشد در آب‌های شور، خدمات متنوعی ارائه می‌دهند و همچون دیوارهای طبیعی در برابر امواج بلند عمل می‌کنند [۵، ۶، ۷]. این درختان با کاهش سرعت جریان‌های آبی و جلوگیری از نفوذ آنها به نواحی ساحلی، از فرسایش شدید خاک جلوگیری می‌کنند [۸]. یافته‌های Justine و همکاران (۲۰۲۵) نیز نشان می‌دهد که جنگل‌های مانگرو قادرند تا ۷۰ درصد از انرژی امواج را کاهش داده و به‌طور مؤثری از سواحل در برابر فرسایش و طوفان‌ها محافظت کنند [۹].

ریشه گیاهان با انتقال تنش برشی ایجاد شده در خاک و بسیج کردن نیروی کششی خود، موجب افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود [۱۰]. مقاومت برشی عاملی کلیدی در کنترل و مقابله با تنش برشی و در نتیجه فرسایش خاک است. به‌طور کلی، فرآیند مسلح‌سازی خاک توسط ریشه‌های گیاهان تابعی از تراکم و ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها است [۱۱]. در این بین، ویژگی‌های مکانیکی ریشه، نقش کلیدی در درک و کمی‌سازی اثرات مسلح‌سازی دارند و به‌عنوان داده‌های ورودی مهم در مدل‌سازی تثبیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. تاکنون دو پارامتر نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه به‌عنوان مهمترین ویژگی‌های مکانیکی در مدل‌ها بکار رفته‌اند [۱۲]. نیروی کششی ریشه به معنای بیشینه نیروی لازم برای گسیخته شدن ریشه است و مقاومت کششی نیز از تقسیم این نیروی بیشینه به سطح مقطع عرضی هر نمونه ریشه به‌دست می‌آید [۱۳].

تاکنون پژوهش‌های متعددی به بررسی ویژگی‌های مکانیکی ریشه گونه‌های گیاهی در حوزه زیست‌مهندسی پرداخته‌اند [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. با این حال، تغییرپذیری زیاد ویژگی‌های مکانیکی ریشه همچنان یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه به‌شمار می‌رود. به‌طور کلی این ویژگی‌ها به‌شدت متأثر از نوع گونه گیاهی، اقلیم، شرایط رویشگاهی از جمله ویژگی‌های توده و خاک هستند [۱۸]. برای مثال، مطالعات Esmaeili و همکاران (۲۰۱۷) و نیز Lee و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که بین گونه‌های مختلف گیاهی و در شرایط رویشگاهی گوناگون، تفاوت قابل توجهی در نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه وجود دارد [۱۹، ۲۰]. به‌طور کلی می‌توان گفت که نیروی کششی ریشه با افزایش قطر ریشه به‌صورت توانی مثبت افزایش می‌یابد، در حالی که مقاومت کششی ریشه با افزایش قطر ریشه، به‌صورت تابع توانی منفی کاهش پیدا می‌کند [۲۱].

باوجود نقش شناخته شده جنگل‌های حرا در تثبیت سواحل، تاکنون مطالعات بسیار اندکی به بررسی ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌های این گیاه و تأثیر آن در تثبیت خاک پرداخته‌اند [۱۶]. به‌ویژه، مقایسه سیستماتیک در زمینه مقایسه خصوصیات مکانیکی ریشه‌ها میان جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم حرا، آن هم در لایه‌های مختلف خاک مورد توجه قرار نگرفته است. در این مطالعه، با هدف تولید داده‌های کمی مرتبط و ارزیابی نقش تراکم جنگل‌ها در حفاظت ساحلی، تراکم جنگل‌ها (متراکم و نیمه‌متراکم) به‌عنوان یکی از متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده است. سواحل جنوبی ایران با حدود ۲۰ هزار هکتار از جنگل‌های پراکنده حرا، به‌ویژه در جزیره قشم و مناطق پیرامونی، میزبان یکی از مهمترین بوم سازگان‌های مانگرو منطقه هستند که نقش حیاتی در حفاظت از سواحل و

تأمین معیشت جوامع محلی ایفا می‌کنند [۲۲]. با توجه به اهمیت این جنگل‌ها و تهدیداتی نظیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی، درک عمیق‌تر از نقش مکانیکی ریشه‌های حرا در پایداری خاک ضروری به‌نظر می‌رسد. در همین راستا، این پژوهش با هدف بررسی و مقایسه توانایی تثبیت خاک در جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم گونه حرا *Avicennia marina* طراحی شده است. بدین منظور، دو توده‌متراکم و نیمه‌متراکم و دارای شرایط رویشگاهی مشابه (ارتفاع از سطح دریا، شیب، نوع خاک، زمین‌شناسی) انتخاب شدند و ویژگی‌های مکانیکی ریشه شامل نیروی کششی و مقاومت کششی در هر یک از آنها اندازه‌گیری و تحلیل شد.

این مطالعه به دنبال پاسخ به دو پرسش اصلی است: (۱) آیا بین نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه‌ها در جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم حرا تفاوت معنی‌دار وجود دارد؟ (۲) نیروی کششی ریشه‌ها و مقاومت کششی ریشه‌ها با تغییر عمق خاک چگونه تغییر می‌کند؟ یافته‌های این پژوهش می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای ورودی مدل‌های زیست‌مهندسی جنگل‌های حرا فراهم سازد و مبنایی برای استفاده از این جنگل‌ها به‌عنوان راهکاری طبیعی در حفاظت ساحلی ارائه دهد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد پژوهش

این پژوهش در جنگل‌های مانگرو واقع در سواحل شمالی جزیره قشم، در استان هرمزگان، انجام شد. جنگل‌های مانگرو قشم با وسعت تقریبی ۶۷۵۰ هکتار، یکی از مهم‌ترین رویشگاه‌های حرا در کشور محسوب می‌شوند [۲۳]. اقلیم منطقه، خشک و نیمه‌گرمسیری است و میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر گزارش شده است. در حالی که تبخیر سالانه از بارش بیشتر است. رطوبت نسبی منطقه به‌طور میانگین، حدود ۶۴ درصد بوده و دمای هوای منطقه بین ۱۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. منطقه تحت تأثیر جزر و مد شدید قرار دارد، به‌طوری که دامنه نوسانات بین ۴/۶ متر در فصول بهار و پاییز تا ۰/۳ متر در زمستان و تابستان متغیر است؛ در زمان جزر و مد بالا، بخش قابل توجهی از تاج درختان مانگرو به‌طور کامل در زیر آب فرو می‌رود. ارتفاع درختان مانگرو در این منطقه معمولاً بین ۳ تا ۴ متر است. خاک منطقه دارای بافتی بسیار ریز شامل ترکیبی از لوم، ماسه و رس است و pH آن حدود ۷/۶۷ اندازه‌گیری شده است. ظرفیت نگهداری رطوبت خاک در حالت اشباع به ۵۶/۸ درصد می‌رسد [۲۴]. همچنین، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک حدود ۵/۶۳ دسی‌زیمنس بر متر و شوری آب بین ۵/۳۷ تا ۵/۳۸ قسمت در هزار گزارش شده است [۲۲].

۲-۲. روش مطالعه

در گام نخست، به‌منظور شناسایی توده‌های مانگرو با تراکم‌های متفاوت و درعین‌حال مجاور یکدیگر، از مصاحبه با افراد محلی و کارشناسان منابع طبیعی استفاده شد. سپس با بازدید میدانی، دو توده که در فاصله نزدیک به هم قرار داشتند و تنها از نظر تراکم متفاوت بودند، انتخاب گردیدند، به‌طوری که یکی از توده‌ها دارای تراکم بالاتر (۱۷۵ پایه در ۱۰۰۰ مترمربع) و دیگری تنک‌تر (۱۰۴ پایه در ۱۰۰۰ مترمربع) بود. در هر یک از توده‌ها، پنج پایه سالم به‌صورت کاملاً تصادفی و با فاصله از مرز مشترک دو توده برای نمونه‌برداری انتخاب شدند تا اختلاف احتمالی میان آنها با صحت بیشتری نمایان شود. برای انجام آزمایش‌های مکانیکی، برداشت ریشه‌ها از طریق نمونه‌برداری به روش هسته خاک و در اعماق مختلف انجام گرفت [۱۶]. به این منظور، سیلندری با قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر (با حجم داخلی ۷۸۵ سانتی‌متر مکعب) در سه عمق ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- سانتی‌متری خاک به‌کار گرفته شد. پس از نمونه‌برداری، هسته‌ها روی الک با قطر مش ۲ میلی‌متر، شسته شده و خاک از سطح ریشه‌ها جدا گردید [۲۵]. ریشه‌های تمیزشده سپس با محلول الککل ۱۵ درصد تیمار، کدگذاری و در کیسه‌های بسته‌بندی نگهداری شدند. تمامی نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش‌های مکانیکی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند [۲]. در آزمایشگاه، ریشه‌های سالم و از نظر ظاهری یکنواخت با طول تقریبی ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شدند. قطر وسط آنها با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری گردید. آزمایش‌های مکانیکی با استفاده از دستگاه یونیورسال (STM5، ساخت ایران)، با دقت اندازه‌گیری ± 0.01 نیوتون و جابجایی در واحد طول ± 0.001 میلی‌متر انجام شد. سرعت بارگذاری براساس منابع معتبر، ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. تنها ریشه‌هایی که گسیختگی آنها در بخش میانی بین دو فک دستگاه رخ داده بود، معتبر تلقی شده و در تحلیل‌های آماری استفاده شدند. در مجموع از ۱۱۰ نمونه آزمایش‌شده در توده متراکم، ۶۱ نمونه و از ۱۰۵ نمونه مربوط به توده نیمه‌متراکم، ۷۸ نمونه واجد شرایط تحلیل نهایی بودند.

۳-۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از انجام آزمون‌های آماری، نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف - اسمیرنوف بررسی شد. در مواردی که داده‌ها نرمال بودند از آزمون‌های پارامتری و در موارد نرمال نبودن از آزمون‌های غیرپارامتری (کروسکال-والیس) استفاده شد. برای مدل‌سازی رابطه بین نیروی کششی و مقاومت کششی با قطر ریشه، از مدل توانی استفاده شد. به منظور ارزیابی صحت در پیش‌بینی تغییرات نیروی کششی و مقاومت کششی، مقادیر ضرایب تبیین (R^2) محاسبه شد [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. با توجه به نقش مؤثر قطر ریشه در مقاومت مکانیکی، برای بررسی وجود یا عدم وجود اختلاف معنی‌دار در نیروی کششی و مقاومت کششی بین دو توده، از آنالیز کوواریانس (ANCOVA) استفاده شد [۱۴، ۱۵]. به منظور بررسی تأثیر عمق خاک بر نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه‌ها در هر توده به صورت جداگانه، از آزمون کروسکال-والیس (Kruskal-Wallis) استفاده شد. سطح معنی‌داری در تمامی آزمون‌ها پنج درصد در نظر گرفته شد. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

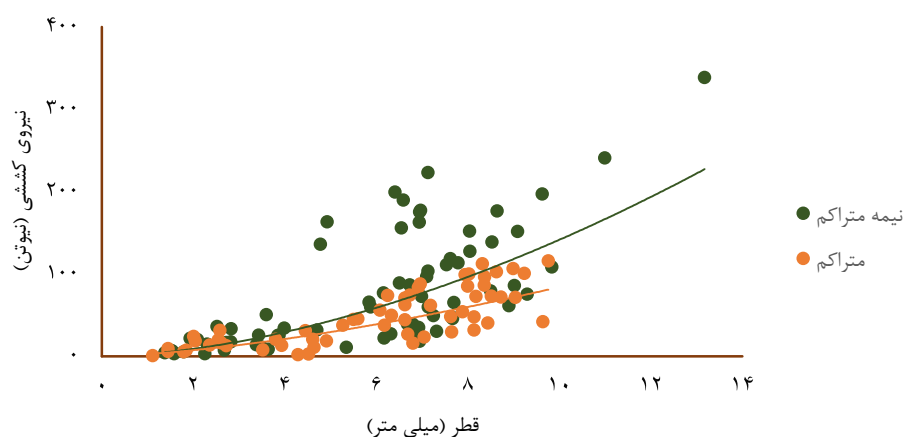
۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. نیروی کششی و مقاومت کششی

در مجموع، آزمایش کشش بر روی ۱۳۹ نمونه ریشه با موفقیت انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی به صورت تابع توانی مثبت افزایش یافت. میانگین نیروی کششی در توده متراکم برابر با ۴۶/۹۲ نیوتن و در توده نیمه متراکم برابر با ۷۹/۰۴ نیوتن بود. بیشترین نیروی کششی ثبت شده در توده نیمه متراکم ۳۳۸/۷ نیوتن و در توده متراکم ۱۱۵/۶ نیوتن بود (جدول ۱). رابطه بین نیروی کششی و قطر ریشه با مدل تابع توانی برازش شد (شکل ۱). ضریب تعیین مدل برای توده متراکم برابر ۰/۶۳ و برای نیمه متراکم برابر ۰/۵۳ بود که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل توانی است.

جدول ۱. میانگین، کمینه و بیشینه، قطر و نیروی کششی ریشه در دو توده متراکم و نیمه متراکم

	نیمه متراکم		متراکم	
	قطر (میلی‌متر)	نیروی کششی (نیوتن)	قطر (میلی‌متر)	نیروی کششی (نیوتن)
میانگین	۵/۹۸	۷۹/۰۴	۶/۰۸	۴۶/۹۲
بیشینه	۱۳/۱۸	۳۳۸/۷	۱۱/۳۱	۱۱۵/۶
کمینه	۱/۳۸	۲/۸	۱/۱۲	۰/۶
میانه	۶/۶۸	۵۹/۸	۶/۶۳	۴۱/۷



شکل ۱. رابطه نیروی کششی ریشه با قطر ریشه در جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم

ضرایب مدل (α و β) برای هر توده در جدول ۲ گزارش شده است. مقادیر β مثبت در هر دو توده به ترتیب ۱/۵۱ و ۱/۷۱ مؤید رابطه افزایشی بین قطر ریشه و نیروی کششی هستند.

جدول ۲. ضرایب الفا و بتا در تابع توانی رابطه قطر و نیروی کششی در جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم

توده	α	β	R^2
نیمه متراکم	۲/۷۰	۱/۷۱	۰/۵۳
متراکم	۲/۵۵	۱/۵۱	۰/۶۳

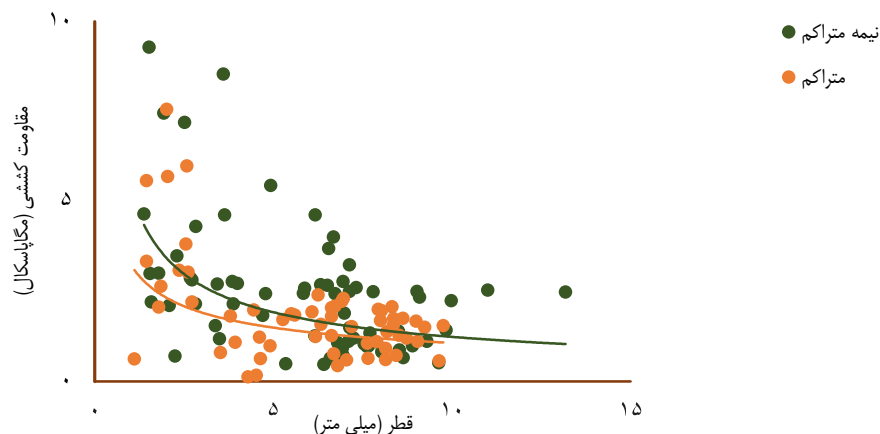
در بررسی مقاومت کششی، نتایج بیانگر کاهش مقاومت با افزایش قطر ریشه به صورت تابع توانی منفی بود. در توده متراکم، میانگین مقاومت کششی، برابر ۱/۸۶ مگاپاسکال و در توده نیمه متراکم، ۲/۳۸ مگاپاسکال ثبت شد (جدول ۳). بیشینه مقاومت در توده نیمه متراکم، ۹/۲۸ مگاپاسکال و در توده متراکم، ۷/۵۶ مگاپاسکال بود. نمودارهای روابط قطر و مقاومت کششی در شکل ۲ و ضرایب مدل در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. میانگین، کمینه و بیشینه، قطر و مقاومت کششی ریشه در دو توده متراکم و نیمه متراکم

نیمه متراکم		متراکم	
قطر (میلی متر)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	قطر (میلی متر)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۵/۹۸	۲/۳۸	۵/۹۳	۱/۸۶
۱۳/۱۸	۹/۲۸	۹/۷۶	۷/۵۶
۱/۳۸	۰/۴۳	۱/۱۱	۰/۱۲
۸/۶۸	۲/۲۰	۶/۶۳	۱/۶۷

جدول ۴. ضرایب الفا و بتا در تابع توانی رابطه قطر و مقاومت کششی در جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم

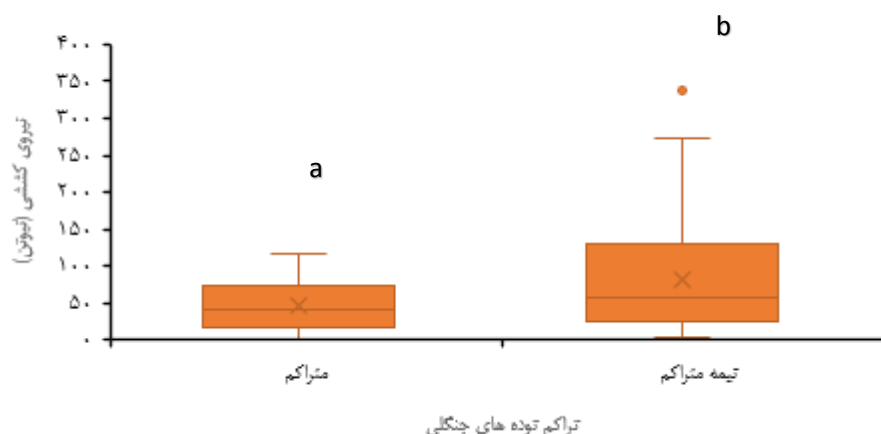
توده	α	β	R^2
نیمه متراکم	۵/۳۳	-۰/۶۳	۰/۲۷
متراکم	۳/۲۵	-۰/۴۸	۰/۳۰



شکل ۲. رابطه مقاومت کششی ریشه با قطر ریشه در جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم

ضریب β منفی در هر دو توده ($-۰/۴۸$ و $-۰/۶۳$) تأیید می‌کند که افزایش قطر، موجب کاهش مقاومت کششی می‌شود. ضریب تعیین در مدل نیز برای توده متراکم و نیمه متراکم به ترتیب برابر $۰/۳۰$ و $۰/۲۷$ بوده است.

در شکل ۳ توزیع و تغییرات میانگین نیروی کششی برای دو توده نشان داده شده است. بر این اساس توزیع میانگین نیروی کششی برای توده‌ها متفاوت بود. براساس نتایج آنالیز کوواریانس، قطر ریشه به عنوان عامل کوواریت، تأثیر معنی‌داری بر نیروی کششی دارد ($P < ۰/۰۰۱$ و $F = ۱۴۴/۳۶$)، همچنین اثر متغیر نوع توده بر نیروی کششی معنی‌دار بود ($P = ۰/۰۰۳$ و $F = ۹/۰۷$). بدین ترتیب نیروی کششی عمدتاً تحت تأثیر قطر ریشه قرار دارد و به طور خاص، نیروی کششی جنگل‌های با تراکم کمتر به طور متوسط، $۰/۴۰۳$ واحد کمتر از گروه متراکم‌تر بود ($P = ۰/۰۰۳$). همچنین در شکل ۵ توزیع و تغییرات میانگین مقاومت کششی برای توده‌های مختلف نشان داده شده است. براساس توزیع میانگین، مقاومت کششی برای توده‌ها متفاوت بود. آنالیز کوواریانس نشان داد که اثر متغیر توده بر مقاومت کششی معنی‌دار است ($P = ۰/۰۱۸$ و $F = ۵/۷۰$). اثر قطر ریشه تأثیر معنی‌دار بر مقاومت کششی دارد و طبق تابع توانی منفی کاهش می‌یابد ($F = ۲۷/۳۶$ و $P < ۰/۰۰۱$). نتایج نشان داد که با افزایش هر میلی‌متر در قطر ریشه، مقدار لگاریتم مقاومت کششی به طور میانگین، $۰/۱۱۷$ واحد کاهش می‌یابد ($P < ۰/۰۰۱$ و $SE = ۰/۰۲۲$). همچنین، مقاومت کششی در جنگل با تراکم کمتر به طور متوسط، $۰/۲۸۴$ واحد کمتر از جنگل متراکم‌تر بود ($P = ۰/۰۱۸$). نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی ریشه گونه حرا در دو توده جنگلی با تراکم متفاوت، تفاوت‌های معنی‌داری از نظر نیروی کششی و مقاومت کششی دارند، به ویژه زمانی که تأثیر قطر ریشه به عنوان متغیر کوواریت در نظر گرفته شود. آزمایش‌ها در هر دو منطقه مورد مطالعه، رابطه توانی مثبت بین قطر ریشه و نیروی کششی را نشان داد که با یافته‌های سایر پژوهش‌ها [۱۶، ۱۵] همخوانی دارد. این الگو تأییدی است بر آنکه افزایش قطر ریشه موجب بهبود ظرفیت انتقال تنش‌های کششی از خاک به ریشه شده و در نتیجه، موجب افزایش توان ریشه در برابر گسیختگی می‌گردد. ضریب α برای جنگل‌های متراکم‌تر، $۲/۸۷$ و برای جنگل‌های کم تراکم‌تر، $۳/۱۷$ ، و ضریب β به ترتیب $۱/۴۱$ و $۱/۵۲$ محاسبه شد. در مقایسه با مطالعه Lee و همکاران (۲۰۲۱) که ضریب α را بین $۲۳/۴۱$ – $۷/۲۸$ و ضریب β را بین $۱/۷۳$ – $۱/۴۶$ برای نهال‌ها گزارش کردند، مقادیر به دست آمده در پژوهش حاضر کمتر است که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های گونه‌ای، تفاوت‌های اقلیمی و شرایط رویشگاهی خاص مانگرو باشد [۲۶].

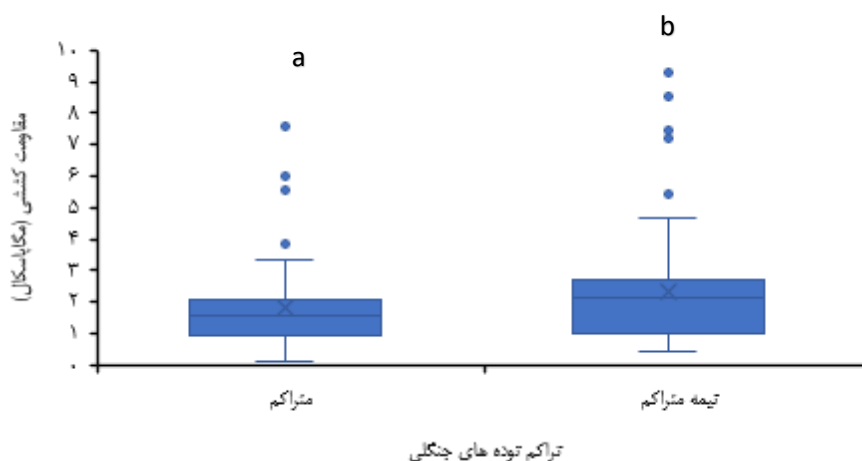


شکل ۳. توزیع و تغییرات میانگین نیروی کششی ریشه در دو توده متراکم و نیمه متراکم (حروف مختلف نشان دهنده اختلاف معنی‌دار است)

نتایج مربوط به مقاومت کششی ریشه نشان داد که با افزایش قطر ریشه، کاهش مقاومت کششی بر اساس تابع توانی منفی مشاهده شد که پدیده‌ای شناخته شده در زیست‌مهندسی محسوب می‌شود و به دلیل افزایش سطح مقطع و تغییر در نسبت بافت‌های مکانیکی (نظیر چوب پنبه‌ای یا اسکالرانشیمی) قابل توضیح است. این الگو نیز با یافته‌های پژوهش‌های پیشین همسو است [۱۱، ۲۷]. مقدار ضریب α برای مناطق متراکم‌تر و با تراکم کمتر به ترتیب $۳/۶۶$ و $۵/۰۷$ و مقدار ضریب β به ترتیب $-۰/۵۸$ و $-۰/۶۰$

به‌دست آمد. ضریب‌های α و β به‌دست آمده از مدل تابع توانی در هر دو منطقه، الگوی مشابهی را تأیید می‌کنند. مقادیر این ضرایب نسبت به مطالعات مشابه در مناطق دیگر کمتر بوده که می‌تواند ناشی از شرایط اکولوژیک، گونه‌ای یا فیزیولوژیکی متفاوت باشد. Edri Aznani و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی چهار گونه گیاهی مختلف، مقدار ضرایب α و β متفاوتی را گزارش کردند [۲۸]. مقایسه این مقادیر با نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که گونه حرا از نظر مقاومت کششی در محدوده میانی گونه‌های مورد مطالعه قرار دارد.

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که عوامل محیطی می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر خصوصیات مکانیکی ریشه‌ها داشته باشند. یکی از یافته‌های کلیدی پژوهش، تأثیر مثبت تراکم توده بر میزان نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه‌ها بود (شکل ۴). این امر می‌تواند به تعاملات اکولوژیک میان درختان در توده‌های متراکم نسبت داده شود که منجر به رقابت برای منابع و در نتیجه توسعه ریشه‌ای عمقی‌تر و مقاوم‌تر شده است. همچنین، به‌نظر می‌رسد در توده‌های متراکم‌تر، شبکه ریشه‌ای به‌لحاظ ساختاری پیوسته‌تر بوده و در انتقال تنش‌ها عملکرد بهتری دارد. Boldrin و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که پاسخ‌های متفاوت گیاهان به شرایط محیطی می‌تواند دلیل تفاوت در مقاومت کششی گونه‌ها باشد [۱۸]. همچنین، Loades و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که تنوع قطر ریشه، سن گونه و تنش‌های غیرزیستی نیز می‌توانند بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها تأثیر بگذارند [۲۹]. Wang و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که شرایط هیدرولوژیکی محیط، به‌ویژه دوره‌های خشکی و غرقابی، می‌تواند بر ساختار بافتی ریشه‌های مانگرو و در نتیجه مقاومت مکانیکی آنها تأثیر بگذارد [۳۰].



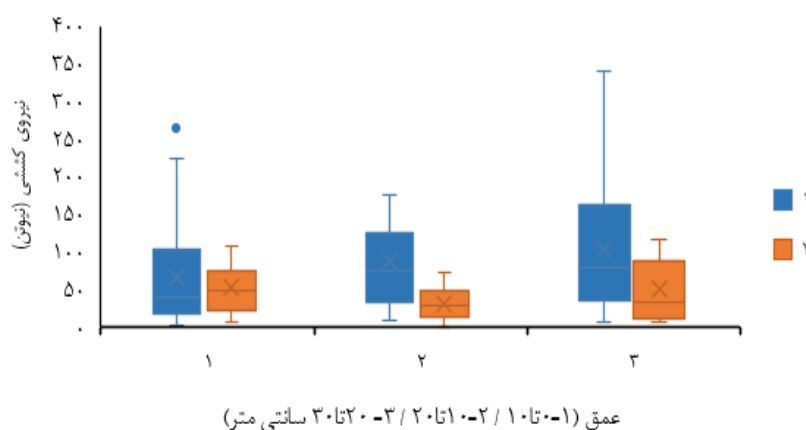
شکل ۴. توزیع و تغییرات میانگین مقاومت کششی ریشه در جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم (حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار است)

۲-۳. نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه در عمق‌های مختلف

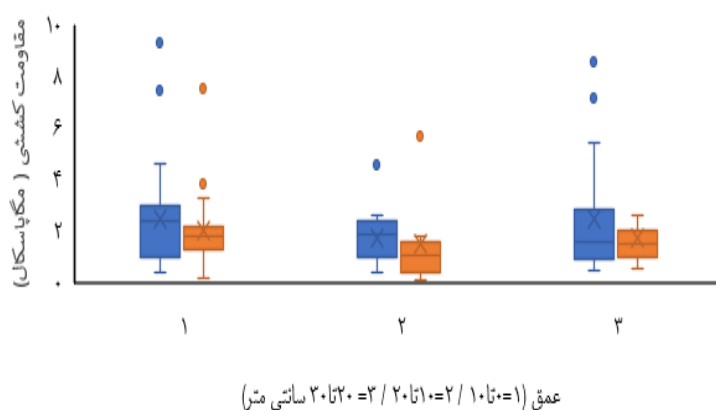
تغییرات نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه در عمق‌های مختلف از سطح خاک در دو توده متراکم و نیمه متراکم حرا در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

نتایج آزمون Kruskal-Wallis نشان داد که در توده‌های مورد مطالعه (متراکم و نیمه متراکم)، عمق خاک تأثیر معنی‌داری بر نیروی کششی ریشه‌ها نداشت ($P=0/418$). این موضوع می‌تواند بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت نیروها و تنش‌ها در سه عمق مورد بررسی (۱۰-، ۲۰- و ۳۰ سانتی‌متر) باشد که منجر به عدم تفاوت معنی‌دار در ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها در لایه‌های مختلف خاک شده است.

نتایج آزمون Kruskal-Wallis نشان داد که دو توده مورد مطالعه (متراکم و نیمه متراکم)، عمق، تأثیر معنی‌داری بر مقاومت کششی ریشه‌ها نداشت ($P>0/059$). این موضوع ممکن است نشان‌دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت تنش‌ها در سه عمق مورد بررسی باشد که باعث عدم تفاوت معنی‌دار در ویژگی‌های مکانیکی ریشه شده است.



شکل ۵. تأثیر عمق و تراکم توده‌ها بر نیروی کششی ریشه جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم (آبی رنگ = نیمه‌متراکم، نارنجی‌رنگ = متراکم)



شکل ۶. تأثیر عمق و تراکم توده‌ها بر مقاومت کششی ریشه جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم (آبی رنگ = نیمه‌متراکم، نارنجی‌رنگ = متراکم)

یافته‌های این پژوهش نشان داد که عمق خاک در محدوده ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر، تأثیر معنی‌داری بر نیروی کششی و مقاومت مکانیکی ریشه‌های گونه حرا نداشت. این نتیجه با برخی مطالعات پیشین هم‌راستا است به‌ویژه آن دسته از پژوهش‌هایی که نشان داده‌اند در برخی خاک‌های ساحلی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سطحی ممکن است تفاوت محسوسی نداشته باشند. ساختار سطحی و گسترش جانبی ریشه‌های حرا که در راستای مقابله با نیروهای دینامیکی نظیر امواج و جزر و مد تکامل یافته‌اند، نیز می‌تواند عاملی برای عدم وابستگی شدید مقاومت کششی به عمق خاک باشد. در شرایط اقلیمی خاص جزیره قشم، که با نوسانات شدید سطح ایستابی، شوری بالا و تغییرپذیری در میزان اشباع خاک همراه است، نبود تفاوت معنی‌دار میان عمق‌های مختلف می‌تواند نشان‌دهنده همگن بودن نسبی تنش‌های محیطی در این بازه عمقی باشد. از سوی دیگر، احتمال دارد ساختار ریشه‌های گونه حرا به گونه‌ای سازگار شده باشد که توزیع نیروهای مکانیکی را در لایه‌های سطحی خاک یکنواخت نگاه دارد، که این امر نشان‌دهنده تطابق فیزیولوژیک و اکولوژیک این گونه با شرایط خاص زیستگاه‌های جزر و مدی است. در مقابل، تفاوت معنی‌دار بین توده‌های با تراکم متفاوت، تأکید بر اهمیت ساختار پوشش گیاهی در بهبود پایداری مکانیکی خاک دارد. تراکم بالاتر منجر به توسعه بهتر سیستم ریشه‌ای، همپوشانی بیشتر ریشه‌ها، و در نهایت افزایش نیروی مقاومت در برابر تنش‌های محیطی می‌شود. این نتیجه با گزارش‌های مشابه در زمینه تأثیر پوشش گیاهی بر مقاومت برشی خاک و پایداری بسترهای رسوبی هم‌خوانی دارد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که تراکم توده جنگلی نقش مؤثری در ویژگی‌های مکانیکی ریشه گونه حرا دارد. در توده‌های متراکم، میزان نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه‌ها به طور معنی‌داری بیشتر از توده‌های نیمه‌متراکم بود. این اختلاف، به‌ویژه زمانی که قطر ریشه به‌عنوان متغیر کوواریت در نظر گرفته شد، همچنان معنی‌دار باقی ماند که بیانگر اثر مستقل تراکم بر عملکرد مکانیکی سیستم ریشه‌ای است. به‌نظر می‌رسد، تقویت سازه‌ای ریشه‌ها در توده‌های متراکم ناشی از رشد متقابل و تعاملات فشرده میان ریشه‌ها باشد که موجب توسعه بهتر شبکه مکانیکی زیرسطحی شده است. از سوی دیگر، تأثیر عمق خاک (در بازه ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) بر نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. این یافته نشان می‌دهد که تنش‌های محیطی در این محدوده عمقی نسبتاً یکنواخت توزیع شده‌اند، یا آنکه ریشه‌های حرا به‌گونه‌ای تطابق یافته‌اند که خصوصیات مکانیکی خود را در این لایه‌های خاکی به‌طور نسبتاً یکنواخت حفظ می‌کنند. در مناطق جزر و مدی مانند جزیره قشم، که تغییرات مکرر در رطوبت، شوری و تهویه خاک وجود دارد، این یکنواختی می‌تواند نتیجه‌ای از فشارهای سازگاری بلندمدت در ساختار ریشه‌ها باشد. در جمع‌بندی، می‌توان گفت:

- افزایش تراکم توده‌ای به طور مستقیم موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی سیستم ریشه شده و احتمالاً ظرفیت تثبیت خاک را افزایش می‌دهد.
- عمق خاک در محدوده بررسی‌شده تأثیر معنی‌داری بر نیروی کشش و مقاومت کششی نداشته و این ویژگی در سطوح عمقی مختلف نسبتاً پایدار باقی مانده است.

یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای طراحی و اجرای طرح‌های زیست‌مهندسی ساحلی در مناطق مانگرو استفاده شود. به‌ویژه، در برنامه‌های جنگل‌کاری و احیای جنگل‌های حرای در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، انتخاب تراکم بهینه توده‌ها می‌تواند گامی مؤثر در کاهش فرسایش، تثبیت بستر و افزایش پایداری اکولوژیک مناطق ساحلی باشد.

۵. منابع

- [1] Van Rijn, L.C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54, 867-887.
- [2] Mitra, A. (2020). *Mangrove Forests in India: Exploring Ecosystem Services*. Springer International Publishing A.G, Cham, Switzerland, p. 353.
- [3] Smee, D.L. (2019). Coastal ecology: living shorelines reduce coastal erosion. *Current Biology*, 29, 411-413.
- [4] Mickovski, S.B. (2021). Re-thinking soil bioengineering to address climate change challenges. *Sustainability*, 13(6), 3338.
- [5] Rezaii, Y. (1993). Study on pharmacognosy effect of *Avicennia marina*. Ph.D. Thesis, Pharmaceutics College, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
- [6] Bell, J. & Lovelock, C.E. (2013). Insuring mangrove forests for their role in mitigating coastal erosion and storm-surge: an Australian case study. *Wetlands*, 33(2), 279-289.
- [7] Thompson, B.S., Primavera, J.H. & Friess, D.A. (2017). Governance and implementation challenges for mangrove forest payments for ecosystem services (PES): empirical evidence from the Philippines. *Ecosystem Services*, 23, 146-155.
- [8] Gedan, K.B., Kirwan, M.L., Wolanski, E., Barbier, E.B. & Silliman, B.R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7-29.
- [9] Justine, Y.E.D. & Seenath, A. (2025). Vegetative nature-based solutions for coastal flood risk management: benefits, challenges, and uncertainties. *Ocean & Coastal Management*, 261, 107520.
- [10] Melese, D.T. (2021). Effect of diameter, root moisture content, gauge length and loading rate on tensile strength of plant roots and their contribution to slope stability. *Lowland Technology International*, 22(4), 164-173.

- [11] Zhong, R., He, X., Bao, Y., Tang, Q., Gao, J., Yan, D., Wang, M. & Li, Y. (2016). Estimation of soil reinforcement by the roots of four postdam prevailing grass species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Mountain Science*, 13(3), 508-521.
- [12] Liang, T., Bengough, A.G., Knappett, J.A., Muir-Wood, D., Loades, K.W., Hallett, P.D. & Meijer, G.J. (2017). Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge. *Ecological Engineering*, 109, 207-227.
- [13] Abdi, E., Azhdary, F., Abdulkhani, A. and Sofy Mariv, H. (2014). Tensile strength and cellulose content of Persian ironwood (*Parrotia persica*) roots as bioengineering material. *Journal of Forest Science*, 60(1), 425-430.
- [14] 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.
- [15] Deljouei, A., Abdi, E., Schwarz, M., Majnounian, B., Sohrabi, H. & Dumroese, R.K. (2020). Mechanical characteristics of the fine roots of two broadleaved tree species from the temperate Caspian Hyrcanian ecoregion. *Forests*, 11(3), 345.
- [16] Karimi, Z., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shirvany, A., Schwarz, M. & Hales, T.C. (2022). Vegetation-induced soil stabilization in coastal area: an example from a natural mangrove forest. *Catena*, 216, 106410.
- [17] Keybondori, S., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shakeri, Z. & Etemad, V. (2025). Soil-bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in the steep Hyrcanian forests of Northern Iran. *Ecological Engineering*, 214, 107569.
- [18] Boldrin, D., Bengough, A.G., Lin, Z. & Loades, K.W. (2021). Root age influences failure location in grass species during mechanical testing. *Plant and Soil*, 461(1), 457-469.
- [19] Esmaeili, M., Abdi, E., Jafari, M. & Majnounian, B. (2017). Comparison of biotechnical characteristics of roots of ash (*Fraxinus excelsior*) and spruce (*Picea abies*) species in afforested areas. *Forest Research and Development*, 3(3), 237-247. (In Persian)
- [20] Lee, J.T., Tsai, S.M., Wu, Y.J., Lin, Y.S., Chu, M.Y. & Lee, M.J. (2021). Root characteristics and water erosion-reducing ability of alpine silver grass and Yushan cane for alpine grassland soil conservation. *Sustainability*, 13(14), 7633.
- [21] 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.
- [22] Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T. & Pourhashemi, M. (2014). *Forests of Iran: A treasure from the past, a hope for the future*. Springer.
- [23] Khodadadi-Jokari, K. (2003). The final report on hydrobiology of Laft and Khamir (Khooran estuaries), Hormozgan Province. Project No. 83/757. Persian Gulf and Oman Sea Ecology Research Center, Ecology Department, Iran.
- [24] Mohammadizadeh, M., Farshchi, P., Danehkar, A., Mahmoodi-Madjdabadi, M., Hassani, M. and Mohammadizadeh, F. (2009). Interactive effect of planting distance, irrigation type and intertidal zone on the growth of grey mangrove seedlings in Qeshm Island, Iran. *Journal of Tropical Forest Science*, 21, 147-155.
- [25] Hales, T.C. & Miniati, C.F. (2017). Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 803-813.
- [26] Zhang, L., Yan, W.M. & Leung, F.T. (2021). Probabilistic estimation of root cohesion in regards to intra-specific variability of root system. *Catena*, 196, 104898.
- [27] De Baets, S., Poeson, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J. & Muys, B. (2007). Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305(8), 207-226.
- [28] Mohamad Edri Aznan, M.E., Rahman, Z.A., Tarmidzi, S.N., Idris, W.M.R., Lihan, T. & Abdul Kadir, A. (2024). Growth characteristics and root tensile strength variability in selected potential shrub species for slope bio-engineering applications. *Sains Malaysiana*, 53(12), 3845-3857.

- [29] Loades, K.W., Bengough, A.G., Bransby, M.F. & Hallett, P.D. (2013). Biomechanics of nodal, seminal and lateral roots of barley: effects of diameter, waterlogging and mechanical impedance. *Plant and Soil*, 370(1), 407-418.
- [30] Wang, B. & Wang, S. (2023). Shear strength analysis and slope stability study of straight root herbaceous root soil composite. *Applied Sciences*, 13(23), 12632.