

تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش سیستم ریشه در جنگل کاری‌های توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C. A. Mey.)

محبوبه فسحت^{۱*}، حسن اکبری^۲، احسان عیدی^۳، شعبان قلندر آیشی^۴ و فیلیپو جیادروسچ^۵

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

پست الکترونیک: mhfohat60@gmail.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- دانشیار، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

۵- استاد، بخش هیدرولیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ساساری، ساساری، ایتالیا

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵

چکیده

حفاظت خاک توسط گیاهان تاحد زیادی به ویژگی‌های زیست‌فنی سیستم ریشه آن‌ها بستگی دارد. یکی از این ویژگی‌ها، الگوی پراکنش ریشه‌ها در خاک یا نسبت سطح ریشه به سطح خاک (RAR) است. هدف از پژوهش پیش‌رو، بررسی تأثیر عامل ارتفاع از سطح دریا بر پراکنش مکانی ریشه درختان جنگل‌کاری‌شده توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) در سه حد ارتفاعی پایین‌بند، میان‌بند و بالابند در حوزه طرح جنگل‌داری نکا- ظالمروود در استان مازندران بود. هفت اصله درخت در هر ارتفاع به‌روش کاملاً تصادفی انتخاب شدند. به‌منظور اندازه‌گیری RAR با استفاده از روش مقطع پروفیل در اطراف هر پایه، دو پروفیل در سمت بالا و دو پروفیل در سمت پایین هر درخت حفر شد. ابعاد پروفیل‌ها ۱۰۰ × ۵۰ سانتی‌متر مربع بودند که به فاصله‌های افقی ۰/۵ و ۱/۵ متر از تنه درخت (دو مقطع) حفر شدند. دیواره‌ها به افق‌های ۱۰ سانتی‌متری تقسیم شده و قطر همه ریشه‌های بیرون‌زده اندازه‌گیری شد. براساس نتایج، در هر سه ارتفاع با افزایش عمق و فاصله از درخت، RAR به‌صورت رابطه‌نمایی کاهش یافت. نتایج به‌دست آمده از آنالیز کوواریانس نشان داد که پراکنش ریشه‌ها در هر سه ارتفاع، اختلاف معنی‌داری داشتند. به‌طور کلی، با افزایش ارتفاع از سطح دریا به تراکم ریشه‌ها افزوده شد. درصد بیشتر RAR در برخی از موقعیت‌ها در ارتفاع پایین‌بند ممکن است به‌دلیل محدودیت عمق خاک در این ارتفاع باشد.

واژه‌های کلیدی: روش مقطع پروفیل، مهندسی زیستی، نسبت سطح ریشه به سطح خاک.

مقدمه

هرگونه اقدامی هستند و بدون وجود آن‌ها، جنگل‌داری و مدیریت جنگل غیرقابل‌تصور است (Lotfalian & Parsakhoo, 2012). به‌طور کلی، شیب‌های ناپایدار از طریق نابودی شبکه جاده جنگلی و اختلال در دسترسی به

جاده‌های جنگلی از زیرساخت‌های مهمی هستند که فعالیت‌های جنگل‌داری را ممکن می‌کنند (Eker & Aydin, 2016). این جاده‌ها، دروازه‌های ورود به جنگل برای

مسلم سازی کاهش می‌یابد (Abernethy & Rutherford, 2000).

روش‌های مهندسی زیستی به دلیل بررسی مسائل اقتصادی و محیطی به میزان زیادی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Heidarian *et al.*, 2018). از آنجایی که اطلاعات زیست‌فنی گونه‌ها، محلی و مختص منطقه مورد پژوهش است، برای طراحی مهندسی مناسب، اطلاعات مربوط به همان منطقه ارجحیت دارد. همچنین، بیشتر پژوهش‌های مهندسی زیستی انجام شده در ایران در مناطق پایین‌بند و میان‌بند متمرکز بوده‌اند. به عنوان نمونه، Abdi و همکاران (۲۰۱۰) در ارتفاع پایین‌بند، ویژگی‌های مهندسی زیستی سه گونه راش، ممرز و انجیلی را ارزیابی کردند. Naghdi و همکاران (۲۰۱۳) در ارتفاع میان‌بند به بررسی میزان مسلح سازی توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) در جنگل‌کاری‌های استان گیلان پرداختند. Esmaili و همکاران (۲۰۱۷) در ارتفاع میان‌بند، ویژگی‌های مهندسی زیستی دو گونه جنگل‌کاری شده ون و نوئل و Deljouei و همکاران (۲۰۱۹) در ارتفاع پایین‌بند، پراکنش مکانی ریشه ممرز را بررسی کردند. با این وجود، اطلاعات مربوط به منطقه بالا‌بند و تفاوت بین مناطق با ارتفاع‌های مختلف در کشور به‌ندرت بررسی شده است.

توسکای بیلاقی از درختان ارزنده و بومی جنگل‌های هیرکانی است که پرتولید و تندرشد است و قابلیت‌های بالقوه‌ای برای اهداف مهندسی زیستی دارد (Naghdi *et al.*, 2013). توسکای بیلاقی به‌طور معمول به‌عنوان گونه‌ای پیشگام و آغازکننده توالی ثانویه، بیشتر در مناطق باز و اطراف جاده‌ها در خاک‌های واریزه‌ای رشد می‌کند. این گونه به تدریج شرایط را برای حضور گونه‌های دیگر در مرحله‌های بعدی توالی فراهم می‌کند (Sabati, 1994). بیشتر از ۹۰ درصد ریشه‌های توسکای بیلاقی تا عمق ۸۰ سانتی‌متری خاک پراکنش دارند (Naghdi *et al.*, 2013). سیستم ریشه‌ای این گونه به‌صورت شبکه مترامکی است که به میزان قابل توجهی شاخص RAR را افزایش می‌دهد (Pourmalekshah *et al.*, 2019). هدف از پژوهش

جنگل باعث ایجاد مشکلات متعددی برای مدیریت این بوم‌سازگان‌ها می‌شوند. عواملی مانند جاده‌سازی نامناسب، تبدیل جنگل‌ها و آتش‌سوزی می‌توانند پایداری شیب را تحت تأثیر قرار دهند (Sidle *et al.*, 2006).

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی است که همواره در سراسر جهان رخ می‌دهد. پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق کوهستانی، نقش مهمی در پایداری شیب‌ها و محافظت از خاک در مقابل فرسایش و زمین‌لغزش دارند (Schwarz *et al.*, 2016). به همین دلیل از پوشش گیاهی به‌طور گسترده برای مسلح‌سازی شیب‌ها و کنترل زمین‌لغزش استفاده می‌شود، زیرا سیستم ریشه گیاهان، مقاومت کششی خاک را با مهارگذاری (Soil Anchorage) لایه‌های خاک و تعدیل ویژگی‌های آب‌شناختی افزایش می‌دهد (Wang *et al.*, 2019). به‌طور کلی، توانایی پوشش گیاهی در جلوگیری از فرسایش خاک و زمین‌لغزش‌های کم‌عمق مربوط به اثرات مثبت آب‌شناختی و مکانیک ریشه‌ها است (Fan & Su, 2008). افزایش درصد ریشه‌های نازک باعث کاهش هدررفت خاک به‌صورت نمایی می‌شود که در این مورد، تأثیر ریشه‌های جانبی و سطحی بیشتر از ریشه‌های عمقی گزارش شده است (Abdi & Majnounian, 2019). توزیع نسبت سطح ریشه به سطح خاک (Root Area Ratio: RAR)، ارتباط قوی با محتوای رطوبت خاک دارد و به مقدار قابل ملاحظه‌ای با توجه به موقعیت درخت روی شیب تغییر می‌کند (Ji *et al.*, 2012). پراکنش عمودی RAR در ریشه‌های نازک به شرایط محلی همچون محتوای رطوبت خاک (Yanagisawa & Fujita, 1999) و درجه حرارت یا محتوای مواد غذایی ریشه (Neukirchen *et al.*, 1999) بستگی دارد. الگوی پراکنش (تراکم) و مقاومت ریشه‌ها از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر میزان مسلح‌سازی خاک هستند که به نوع گونه، ژنتیک گیاه و عوامل محیطی بستگی دارند (Abdi & Majnounian, 2019). بنابراین میزان مسلح‌سازی یک گونه در مناطق مختلف می‌تواند متفاوت و متأثر از میزان ریشه‌ها در عمق‌های مختلف خاک باشد (Bischetti *et al.*, 2005). اما به‌طور کلی با افزایش عمق خاک و فاصله از تنه،

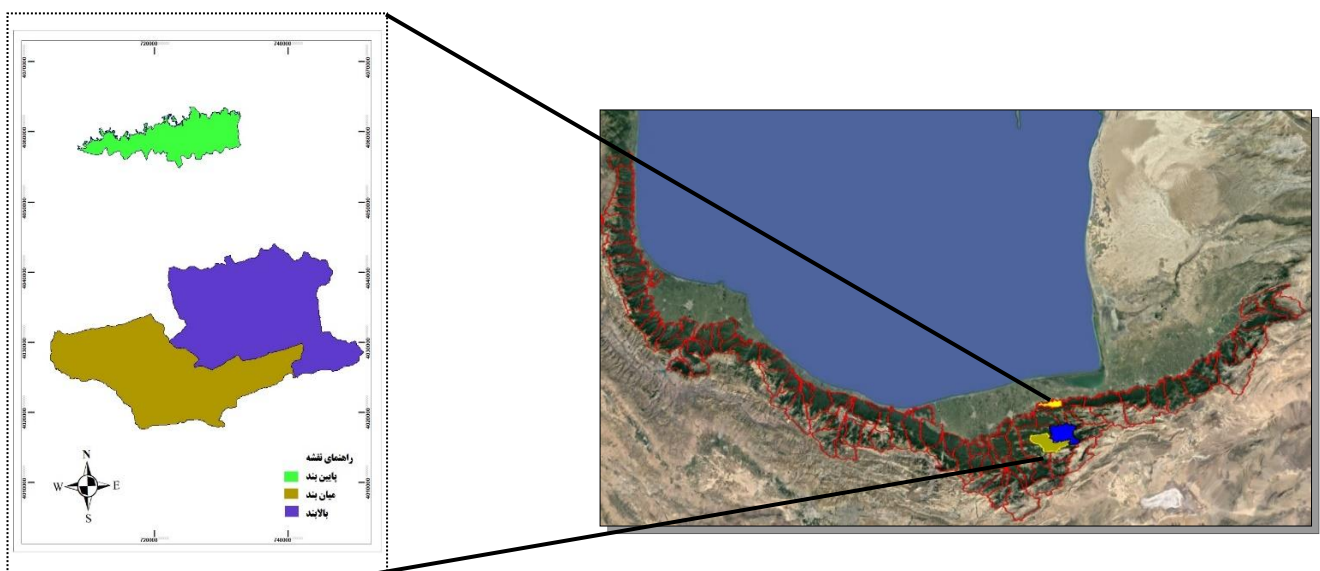
میان‌بند در بخش دو، سری چهار و پارسل ۱۰ قرار دارد. این منطقه در طول جغرافیایی "۳۵' ۲۸° ۵۳" تا "۳۵' ۳۱" ۵۳° شرقی و عرض "۵۱' ۲۰" ۳۶° تا "۲۱' ۲۴" ۳۶° شمالی قرار دارد. کمینه و بیشینه ارتفاع از سطح دریا در پارسل ۱۰ به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۳۷۰ متر هستند. توده مورد بررسی در ارتفاع ۱۱۰۰ متر از سطح دریا و جهت عمومی شمال شرقی- شمال قرار دارد. ارتفاع بالابند در بخش هشت، سری سه و پارسل ۲۷ انتخاب شد. این منطقه در طول جغرافیایی "۳۰' ۵۳" تا "۴۵' ۵۳" شرقی و عرض "۲۵' ۳۶" تا "۳۰' ۳۶" شمالی قرار دارد. ارتفاع از سطح دریا در پارسل ۲۷ بین ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ متر متغیر است. توده مورد بررسی در ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا و جهت عمومی شمال شرقی قرار دارد. برای حذف اثر عامل جهت جغرافیایی، توده‌هایی انتخاب شدند که جهت جغرافیایی آن‌ها، شمال شرقی بود. در هر سه توده مورد بررسی، درختان نمونه در طبقه قطری ۲۵ سانتی‌متری و بر روی شیب ۱۵ تا ۲۰ درصد قرار داشتند. جنگل‌کاری‌ها در هر سه ارتفاع در دهه ۶۰ انجام شده بود. طبق اطلاعات کتابچه طرح، بافت خاک در هر سه توده مورد بررسی از نوع رس لوم و لای رس است.

پیش‌رو، مقایسه تأثیر سه ارتفاع پایین‌بند، میان‌بند و بالابند بر الگوی پراکنش سیستم ریشه توسکای بیلاقی بود. به نظر می‌رسد که توسکای بیلاقی به‌عنوان گونه‌ای پیشگام در جنگل‌های شمال کشور، مورد مناسبی به‌منظور دستیابی به اهداف این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌های طرح جنگلداری نکا- ظالمروود وابسته به حوزه مدیریت اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران انجام شد. به‌منظور مقایسه اثر عامل ارتفاع از سطح دریا بر پراکنش ریشه درختان توسکای بیلاقی، سه منطقه ارتفاعی شامل پایین‌بند، میان‌بند و بالابند در نظر گرفته شد (شکل ۱). منطقه پایین‌بند در بخش سه، سری سه و پارسل ۱۵ قرار دارد. این منطقه در طول جغرافیایی "۱۵' ۵۳" تا "۲۶' ۵۳" شرقی و عرض "۳۰' ۳۶" تا "۴۰' ۳۶" شمالی واقع شده است. دامنه ارتفاعی بخش سه بین ۳۹ تا ۸۲۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. توده مورد بررسی در ارتفاع ۴۰۰ متر بالاتر از سطح دریا و جهت عمومی شمال‌شرقی- شمال واقع شده است. منطقه



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در طرح جنگلداری نکا- ظالمروود، استان مازندران

روش پژوهش

به منظور برداشت ویژگی‌های زیست‌فنی، هفت پایه توسکای بیلاقی به روش کاملاً تصادفی در هرکدام از سه منطقه بالابند، پایین‌بند و میان‌بند انتخاب شد. محل حفر پروفیل‌ها با استفاده از طناب بر روی زمین مشخص شد تا کار حفر آن‌ها به صورت دقیق‌تر انجام گیرد. برای اندازه‌گیری RAR، روش مقطع پروفیل انتخاب شد (Bischetti *et al.*, 2005). در فاصله‌های ۰/۵ و ۱/۵ متری از درختان نمونه، دو پروفیل در بالای شیب و دو پروفیل در پایین شیب به اندازه‌های ۱۰۰ × ۵۰ سانتی‌متر مربع تا بیشینه عمق ریشه‌دوانی حفر شد. بر روی همه دیواره‌های پروفیل‌ها (دیواره‌های اول تا چهارم به ترتیب

در فاصله‌های ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو متری از درخت) لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری با استفاده از ریسمان مشخص و علامت‌گذاری شد (Ji *et al.*, 2012). تعداد کل پروفیل‌های مورد بررسی ۸۴ پروفیل و تعداد کل دیواره‌های مورد بررسی ۱۶۸ دیواره می‌باشد. در هر یک از افق‌ها، قطر همه ریشه‌های بیرون‌زده با استفاده از کولیس (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. درنهایت، RAR برای هر افق از هر دیواره در هر پروفیل از تقسیم مجموع سطح مقطع ریشه‌های بیرون‌زده هر افق بر مساحت آن افق تعیین شد. شاخص RAR به عنوان نسبت مجموع سطح مقطع ریشه به سطح توده خاکی تعریف می‌شود (رابطه ۱).

$$RAR = \sum_{i=1}^n \frac{A_{root}}{A_{soil}} = \sum_{i=1}^n \frac{\pi r^2}{A_{soil}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: r بیانگر شعاع ریشه‌ها (میلی‌متر مربع) و A_{soil} و A_{root} به ترتیب نشان‌دهنده مساحت اشغال‌شده توسط ریشه‌ها و مساحت خاک در هر لایه از دیواره پروفیل هستند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-سمیرنوف استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، روش آنالیز کوواریانس به کار گرفته شد، به طوری که عمق خاک به عنوان متغیر همبسته در نظر گرفته شد. برای انجام آزمون پسین از آزمون توکی استفاده شد. همه تجزیه و تحلیل‌ها در نرم‌افزار R نسخه ۳/۶ انجام گرفت.

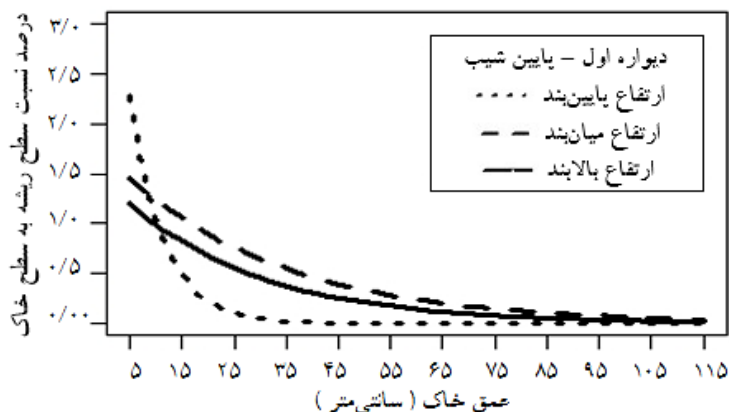
نتایج

تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر RAR

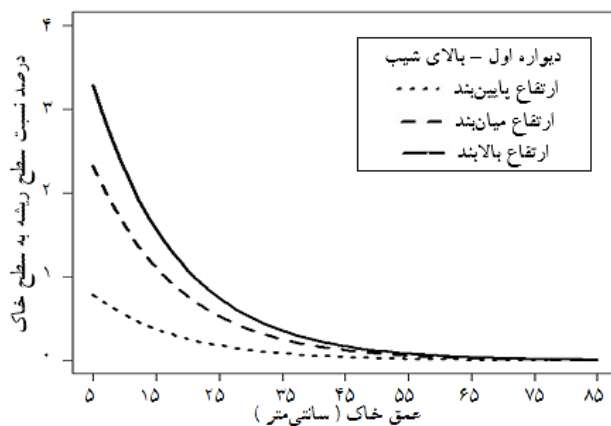
در فاصله اول (فاصله ۰/۵ متری از درختان نمونه) و پایین شیب، اثرات متقابل دو متغیر ارتفاع از سطح دریا و

عمق خاک بر شاخص RAR معنی‌دار شد ($p < 0.001$). همچنین، مقدار آن در عمق‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در ارتفاع پایین‌بند بیشتر از ارتفاع‌های میان‌بند و بالابند به دست آمد. با افزایش عمق خاک از درصد RAR به طور نمایی کاسته شد. شیب این کاهش در ارتفاع پایین‌بند، شدیدتر از ارتفاع‌های بالابند و میان‌بند بود، به طوری که مقدار آن در عمق بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر در پایین‌بند به صفر نزدیک می‌شد (شکل ۲).

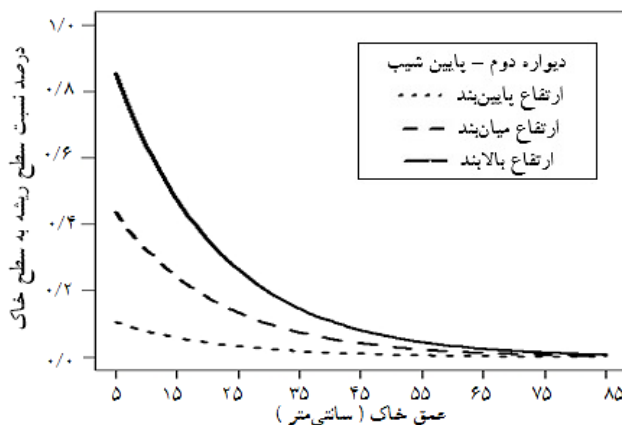
در فاصله اول و بالای شیب، اثرات دو متغیر ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار شد، به طوری که با افزایش عمق از مقدار آن به طور نمایی کاسته شد. مقایسه توده‌های مستقر در ارتفاع‌های مختلف نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، درصد RAR افزایش می‌یافت. براساس نتایج آزمون توکی، اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین درصد RAR در ارتفاع پایین‌بند با ارتفاع‌های میان‌بند و بالابند مشاهده شد (شکل ۳).



شکل ۲- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله اول و پایین شیب



شکل ۳- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله اول و بالای شیب

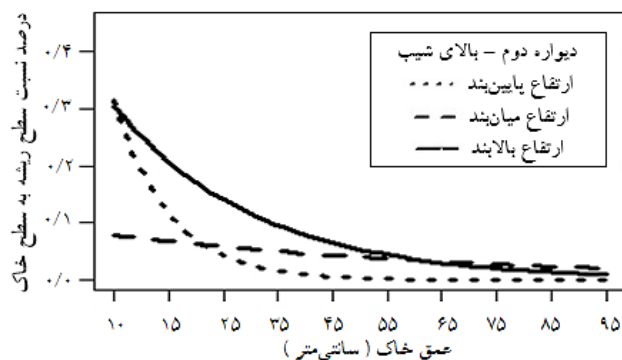


شکل ۴- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله دوم و پایین شیب

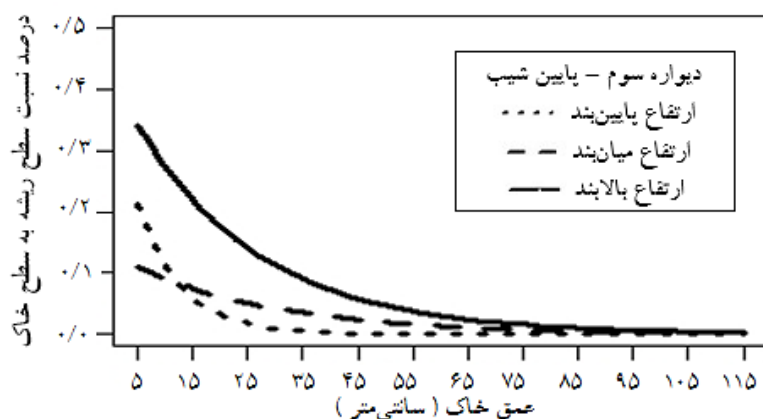
معنی‌داری شد ($p < 0/001$)، به طوری که مقدار این شاخص در عمق‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در ارتفاع پایین بند برابر یا بزرگ‌تر از مقدار آن در ارتفاع‌های میان‌بند و بالابند به دست آمد، اما در عمق‌های بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر، درصد RAR در ارتفاع پایین‌بند کمتر از ارتفاع‌های دیگر بود. به طور کلی، با افزایش عمق خاک از مقدار این شاخص به طور نمایی کاسته شد. با این وجود، شیب کاهش در ارتفاع پایین‌بند، شدیدتر از ارتفاع‌های میان‌بند و بالابند بود، به طوری که همانند فاصله اول، درصد RAR در عمق بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر در ارتفاع پایین‌بند به صفر نزدیک می‌شد (شکل ۵).

در فاصله دوم (فاصله یک متری از درختان نمونه) و جهت پایین شیب، اثرات دو متغیر ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR معنی‌دار شد ($p < 0/001$)، به طوری که با افزایش عمق از مقدار آن به طور نمایی کاسته شد. همچنین، با افزایش ارتفاع از سطح دریا، درصد RAR افزایش یافت. براساس نتایج آزمون توکی، اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد بین مقدار این شاخص در ارتفاع پایین‌بند با ارتفاع‌های میان‌بند و بالابند وجود دارد (شکل ۴).

در فاصله دوم و جهت بالای شیب، اثرات متقابل دو متغیر ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR



شکل ۵- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله دوم و بالای شیب



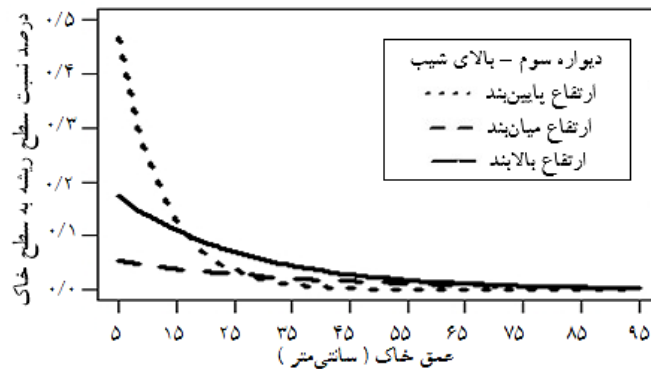
شکل ۶- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله سوم و پایین شیب

متری از درختان نمونه) و پایین شیب، اثرات متقابل دو متغیر

نتایج دیگر نشان داد که در فاصله سوم (فاصله ۱/۵

ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR معنی دار شد ($p < 0/001$). با افزایش عمق از مقدار RAR به طور نمایی کاسته شد. با این وجود، شیب کاهش در ارتفاع پایین‌بند بیشتر از ارتفاع‌های دیگر بود، به طوری که مقدار آن در پایین‌بند برای عمق‌های بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر به صفر نزدیک می‌شد. لازم به ذکر است که در فاصله سوم و پایین شیب، بیشینه درصد RAR تا عمق ۲۰ سانتی‌متر و بیشتر از آن به ترتیب در ارتفاع‌های پایین‌بند و بالابند مشاهده شد (شکل ۷).

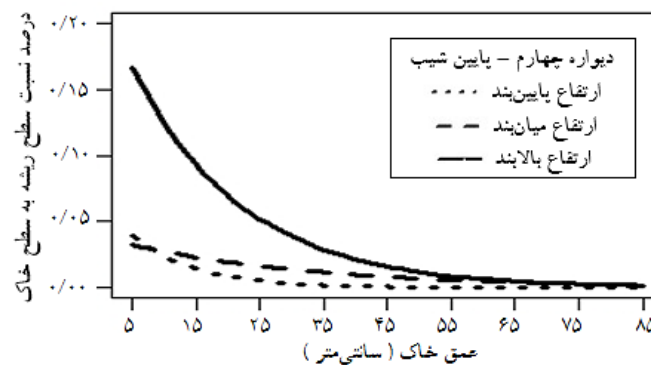
ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR معنی دار بود ($p < 0/001$). با افزایش عمق از مقدار این شاخص به طور نمایی کاسته شد. با این وجود، شیب کاهش در ارتفاع پایین‌بند بیشتر از ارتفاع‌های دیگر بود، به طوری که همانند فاصله‌های اول و دوم، مقدار آن در عمق بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر به صفر نزدیک می‌شد. لازم به ذکر است که برای فاصله سوم و پایین شیب و در همه عمق‌ها، بیشینه درصد RAR در ارتفاع بالابند به دست آمد (شکل ۶). در فاصله سوم و پایین شیب، اثرات متقابل دو متغیر



شکل ۷- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله سوم و بالای شیب

به دست آمد، به طوری که همانند فاصله‌های دیگر، مقدار آن در پایین‌بند برای عمق بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر به صفر نزدیک می‌شود. در فاصله چهارم و پایین شیب، بیشینه RAR در همه عمق‌ها متعلق به ارتفاع بالابند بود (شکل ۸).

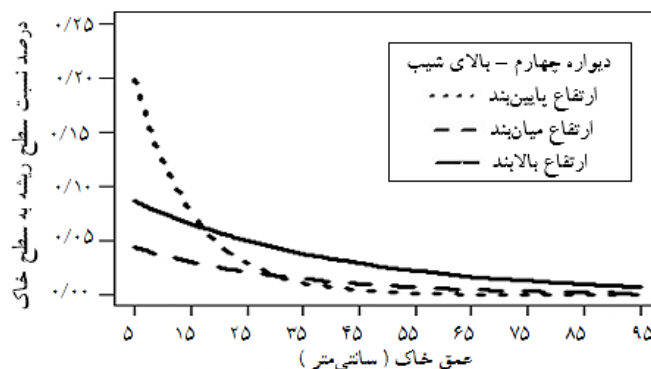
در فاصله چهارم (فاصله دو متری از درختان نمونه) و پایین شیب، اثرات متقابل دو متغیر ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR معنی دار شد ($p < 0/05$). با افزایش عمق از مقدار این شاخص به طور نمایی کاسته شد. درصد RAR در ارتفاع پایین‌بند کمتر از ارتفاع‌های دیگر



شکل ۸- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله چهارم و پایین شیب

آمد. با افزایش عمق خاک از مقدار آن به طور نمایی کاسته شد. در این فاصله نیز همانند فاصله‌های دیگر، درصد RAR در ارتفاع پایین‌بند و در عمق بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر به صفر نزدیک می‌شد (شکل ۹).

همانند نتایج دیگر در فاصله چهارم و بالای شیب نیز اثرات متقابل دو متغیر ارتفاع از سطح دریا و عمق خاک بر درصد RAR معنی‌داری شد ($p < 0/01$)، به طوری که بیشینه آن در عمق کمتر از ۲۰ سانتی‌متر در ارتفاع پایین‌بند و در عمق بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر در ارتفاع بالا‌بند به دست



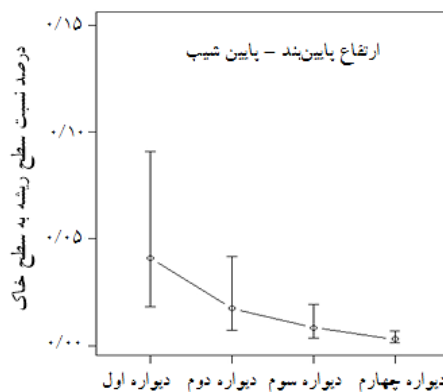
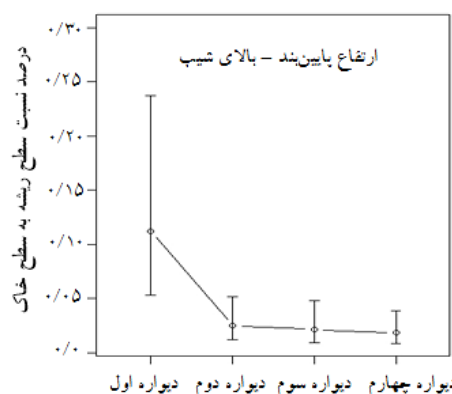
شکل ۹- اثر ارتفاع از سطح دریا بر الگوی پراکنش ریشه در فاصله چهارم و بالای شیب

از درخت نیز در هر دو جهت شیب اثر معنی‌داری بر درصد RAR داشت ($p < 0/001$) (شکل ۱۰). براساس نتایج آزمون توکی، دیواره اول- دوم، اول- چهارم در هر دو جهت شیب و دیواره دوم- چهارم فقط در پایین شیب و دیواره اول- دوم فقط در بالای شیب اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان دادند.

تأثیر عمق خاک و فاصله افقی بر RAR

ارتفاع پایین‌بند

نتایج آنالیز کوواریانس نشان داد که در ارتفاع پایین‌بند در هر دو جهت بالا و پایین شیب، اثر عمق خاک بر درصد RAR معنی‌دار بود، به طوری که با افزایش عمق خاک، مقدار آن به طور نمایی کاهش یافت ($p < 0/001$). عامل فاصله



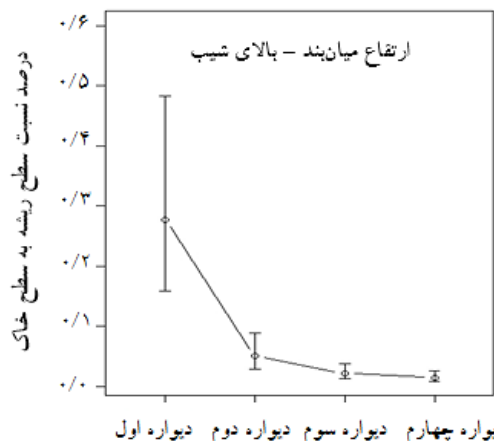
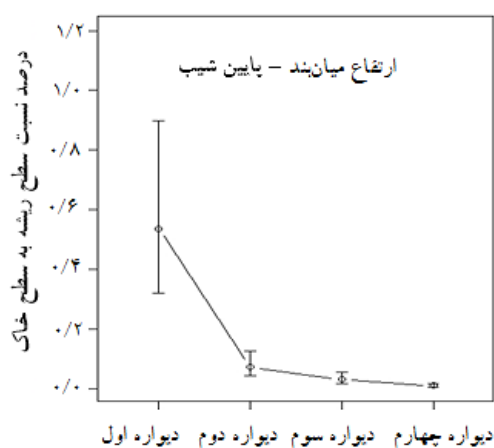
شکل ۱۰- تأثیر فاصله افقی بر تراکم ریشه در ارتفاع پایین‌بند

(بارها نشان‌دهنده حدود اطمینان ۹۵ درصد میانگین پیش‌بینی شده مدل هستند.)

ارتفاع میان‌بند

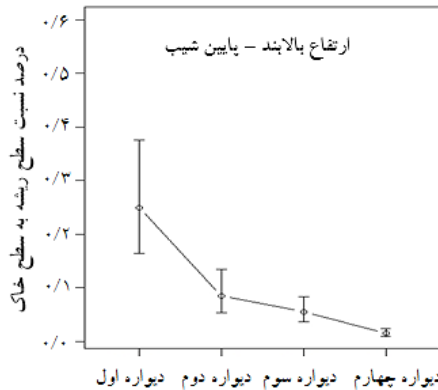
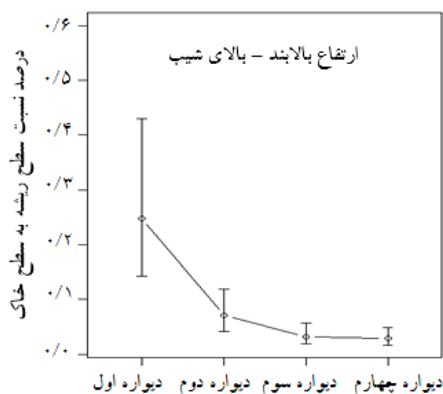
نتایج دیگر مربوط به آنالیز کوواریانس حاکی از آن بود که در ارتفاع میان‌بند و در هر دو جهت بالا و پایین شیب، عامل‌های عمق خاک و فاصله از درخت بر درصد RAR اثر معنی‌داری داشتند ($p < 0.001$)، به طوری‌که با افزایش عمق خاک و فاصله از درخت، مقدار آن به طور نمایی

کاهش یافت (شکل ۱۱). بر اساس نتایج آزمون توکی، دیواره اول- دوم، اول- سوم، اول- چهارم و دوم- چهارم در هر دو جهت بالا و پایین شیب و دیواره‌های سوم- چهارم فقط در پایین شیب اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان دادند.



شکل ۱۱- تأثیر فاصله افقی بر تراکم ریشه در ارتفاع میان‌بند

(بارها نشان‌دهنده حدود اطمینان ۹۵ درصد میانگین پیش‌بینی شده مدل هستند.)



شکل ۱۲- تأثیر فاصله افقی بر تراکم ریشه در ارتفاع بالابند

(بارها نشان‌دهنده حدود اطمینان ۹۵ درصد میانگین پیش‌بینی شده مدل هستند.)

ارتفاع بالابند

بر اساس نتایج آنالیز کوواریانس در ارتفاع بالابند در هر

دو جهت بالا و پایین شیب با افزایش عمق خاک، درصد RAR به طور نمایی کاهش یافت ($p < 0.001$). عامل

بیشترین مقدار این نسبت برای گونه مذکور را به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۳/۵۴ درصد برآورد کردند. در پژوهش Kazemi و همکاران (۲۰۱۷) دامنه این شاخص برای بلوط ایرانی بین ۰/۰۰۰۲ و ۲۷/۹۳ درصد گزارش شد. Esmaili و همکاران (۲۰۲۰) دامنه این شاخص برای ون و نوئل را به ترتیب ۰/۰۰۰۰۱۷ تا ۴/۰۳ و ۰/۰۰۰۰۶۷ تا ۷/۴۹ درصد به دست آوردند. دلیل اختلاف بیشینه RAR در پژوهش‌های مذکور با پژوهش پیش‌رو را می‌توان به تفاوت در شرایط محیطی، نوع خاک و نوع گونه نسبت داد. یکی دیگر از دلیل‌های تفاوت در مقدار RAR، عامل‌های ژنتیکی است که سیستم ریشه را در گونه‌های درختی تحت تأثیر قرار می‌دهند (Mattia et al., 2005). Wang و همکاران (۲۰۱۹) و Bischetti و همکاران (۲۰۰۵) بیشینه این شاخص را در ۳۰ سانتی‌متر اول خاک و John و همکاران (۲۰۰۱)، Abdi و همکاران (۲۰۱۰) و Majnounian و همکاران (۲۰۱۴) در ۱۰ سانتی‌متری اول خاک مشاهده کردند. Kazemi و همکاران (۲۰۱۷) بیشترین و کمترین درصد RAR را به ترتیب برای عمق‌های صفر تا ۱۰ و ۵۰ سانتی‌متری به دست آوردند. به‌طور کلی، با افزایش عمق خاک، تراکم ریشه کم می‌شود، زیرا در عمق‌های بیشتر، قابلیت دسترسی ریشه به عناصر مغذی، نفوذپذیری، هوای خاک (خلل و فرج) و عمق خاک حاصل‌خیز کاهش می‌یابند. درصد بیشتر RAR در برخی از موقعیت‌ها در ارتفاع پایین‌بند ممکن است به دلیل محدودیت عمق خاک در این ارتفاع باشد. همچنین، با نزدیک شدن به سنگ مادری، تراکم خاک افزایش می‌یابد (Zavala-González et al., 2020) شرایط اقلیمی (Tobin et al., 2007) با تأثیر گذاشتن بر رطوبت ریشه، نوع رویشگاه و عمق خاک سبب می‌شود که در عمق‌های بیشتر خاک، مقدار RAR کاهش یابد (Zhang et al., 2015).

نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو نشان داد که با افزایش فاصله از تنه درخت، درصد RAR کاهش یافت. Genet و همکاران (۲۰۰۸) و Vergani و همکاران (۲۰۱۴) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. کاهش RAR با افزایش فاصله از درخت در پژوهش پیش‌رو از تابع نمایی پیروی می‌کرد، به‌طوری‌که میزان این کاهش در ارتفاع پایین‌بند، از دیواره

فاصله از درخت نیز اثر معنی‌داری بر درصد RAR نشان داد ($p < 0/001$) (شکل ۱۲). بر اساس نتایج آزمون توکی، دیواره اول با دیواره‌های دیگر در هر دو جهت بالا و پایین شیب و دیواره‌های دوم-چهارم و سوم-چهارم فقط در پایین شیب اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان دادند.

بحث

ریشه‌های گیاهان، نقش کلیدی در پایداری شیب‌ها بازی می‌کنند (Moresi et al., 2019). آن‌ها بیشتر تمایل دارند که در نزدیکی سطح زمین رشد کنند، زیرا مقدار مواد غذایی، آب و هوا در آنجا بیشتر است (Chiaradia et al., 2012). وجود برخی تنش‌ها در لایه‌های پایین‌تر خاک بر قطر و تعداد ریشه‌ها تأثیر می‌گذارند که نوعی سازگاری در پاسخ به شرایط محیطی است (Di Iorio et al., 2005). براساس نتایج پژوهش پیش‌رو، بخش اعظم ریشه‌ها به‌ویژه در ارتفاع پایین‌بند در لایه‌های سطحی خاک قرار دارند و درصد RAR با افزایش عمق کاهش می‌یابد. کاهش تراکم ریشه با افزایش عمق خاک توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Bischetti et al., 2005, 2009; Preti & Giadrossich, 2009; Abdi et al., 2010; Ji et al., 2012; Majnounian et al., 2014; Heidarian et al., 2018; Deljouei et al., 2019; Moresi et al., 2019). در پژوهش پیش‌رو، بیشینه درصد RAR در جهت بالا و پایین شیب برای ارتفاع پایین‌بند به ترتیب برابر با ۶/۲۵ و ۹/۷ درصد، در ارتفاع میان‌بند ۷/۹۸ و ۱۹/۴ درصد و در ارتفاع بالا‌بند ۲۴/۰۶ و ۱۵/۹ درصد به دست آمد. Naghdi و همکاران (۲۰۱۳) بیشترین مقدار RAR را در یک جنگل کاری ۱۵ ساله توسکای بیلاقی ۰/۴۸۸ درصد گزارش کردند. همچنین، کمترین و بیشترین مقدار RAR در پژوهش Abernethy و Rutherford (۲۰۰۱) به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۷۵۶ درصد برای یک گونه اکالیپتوس محاسبه شد. Abdi و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی ویژگی‌های زیست‌فنی انجیلی، کمترین و

اول به دوم $0.05 \pm 71/5$ درصد، از دیواره دوم به سوم $0.11 \pm 30/87$ درصد و از دیواره سوم به چهارم برابر با $0.12 \pm 29/9$ درصد بود. این مقادیر برای ارتفاع میان‌بند به ترتیب $0.063 \pm 84/76$ ، $0.00033 \pm 56/74$ و $0.051 \pm 53/59$ درصد و برای ارتفاع بالابند نیز $0.14 \pm 68/33$ ، $0.046 \pm 42/63$ و $0.134 \pm 52/65$ درصد به دست آمد. Esmaili و همکاران (۲۰۲۰) این مقدار کاهش را از دیواره اول به دوم، بیشتر از ۵۰ درصد گزارش کردند. در پژوهش Majnounian و همکاران (۲۰۱۴) با افزایش عمق و نیز فاصله از درختان، مقدار RAR به صورت تابع توانی کم شد. این کاهش در پژوهش Avani و همکاران (۲۰۱۴) از تابع نمایی و در پژوهش‌های Mattia و همکاران (۲۰۰۵)، Preti و Giadrossich (۲۰۰۹)، Deljouei و همکاران (۲۰۱۹) و Esmaili و همکاران (۲۰۲۰) از تابع لگاریتمی پیروی می‌کرد. دلیل این تفاوت‌ها را می‌توان به نوع گونه، شرایط محیطی و ویژگی‌های خاک نسبت داد (Stokes et al., 2008).

در پژوهش پیش‌رو، بیشینه عمق ریشه‌دوانی حدود یک متر بود. همچنین، میانگین عمق نفوذ ریشه در سه ارتفاع پایین‌بند، میان‌بند و بالابند به ترتیب ۵۵، ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متر به دست آمد. Esmaili و همکاران (۲۰۲۰) بیشینه عمق ریشه‌دوانی را ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و Maleki و همکاران (۲۰۱۴) ۱۰۰ سانتی‌متر گزارش کردند. این اختلاف‌ها ممکن است ناشی از تفاوت در شرایط محیطی، نوع گونه، ویژگی‌ها و عمق خاک باشند. مقایسه RAR در ارتفاع‌های مختلف بیانگر آن است که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، درصد RAR بیشتر می‌شود. این افزایش را می‌توان با دسترسی بیشتر به آب و مواد مغذی، بارندگی سالانه زیادتر و ویژگی‌های خاک از جمله عمق بیشتر خاک با افزایش ارتفاع از سطح دریا مرتبط دانست (Finér et al., 2011; Mao et al., 2012). هنگامی که آب خاک بیشتر باشد، ریشه‌ها در عمق بیشتری نفوذ می‌کنند (Laio et al., 2006) و تعداد ریشه‌های نازک نیز افزایش می‌یابد (Stokes et al., 2009). همچنین، مقدار RAR با افزایش میزان بارندگی زیاد می‌شود

اثرات متقابل ریشه و خاک تأثیر زیادی بر افزایش پایداری شیب دارد (Xu et al., 2019). آگاهی از الگوی پراکنش سیستم ریشه‌ای برای گونه‌هایی که درصد فراوانی زیادی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه دارند، نقش گیاهان در پایدارسازی دامنه‌ها را آشکار کرده و سبب بهبود مدل سازی پایداری خاک در دامنه‌های ناپایدار جنگلی و در نتیجه، مدیریت صحیح‌تر می‌شوند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا به میانگین عمق نفوذ ریشه و بیشینه RAR افزوده می‌شود. این نتیجه حاکی از اهمیت پراکنش بیشتر ریشه‌ها در ارتفاع‌های بالاتر به منظور پایداری و افزایش مقاومت برشی خاک است. در ارتفاع‌های مختلف لازم است که پراکنش ریشه‌ها و پیرو آن، مسلح‌سازی ریشه‌ها بررسی شود، زیرا مقدار آن در ارتفاع‌های مختلف بسیار متفاوت است و این نکته در مدل‌های مسلح‌سازی باید در نظر گرفته شود. با آگاهی از اینکه هر گونه در چه ارتفاعی، بیشترین مقدار پراکنش RAR را دارد، می‌توان برای پایداری دامنه‌ها و کنترل فرسایش خاک، گونه مناسب را انتخاب کرد.

منابع مورد استفاده

- Abdi, E. and Majnounian, B., 2019. Forest Road Maintenance. University of Tehran Press, Tehran, 327p (In Persian).
- Abdi, E., Majnounian, B., Rahimi, H., Zobeiri, M. and Habibi Bibalani, Gh., 2010. Investigation of biotechnical properties of *Parottia persica* in order to use in bioengineering (Case study: Patom district of Kheyroud forest). Journal of natural Environment (Iranian Journal of Natural Resources), 36(10): 53-62 (In Persian).
- Abernethy, B. and Rutherford, I.D., 2000. The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. Earth Surface Processes and Landforms, 25(9): 921-937.
- Abernethy, B. and Rutherford, I.D., 2001. The

در پژوهش پیش‌رو، بیشینه عمق ریشه‌دوانی حدود یک متر بود. همچنین، میانگین عمق نفوذ ریشه در سه ارتفاع پایین‌بند، میان‌بند و بالابند به ترتیب ۵۵، ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متر به دست آمد. Esmaili و همکاران (۲۰۲۰) بیشینه عمق ریشه‌دوانی را ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و Maleki و همکاران (۲۰۱۴) ۱۰۰ سانتی‌متر گزارش کردند. این اختلاف‌ها ممکن است ناشی از تفاوت در شرایط محیطی، نوع گونه، ویژگی‌ها و عمق خاک باشند. مقایسه RAR در ارتفاع‌های مختلف بیانگر آن است که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، درصد RAR بیشتر می‌شود. این افزایش را می‌توان با دسترسی بیشتر به آب و مواد مغذی، بارندگی سالانه زیادتر و ویژگی‌های خاک از جمله عمق بیشتر خاک با افزایش ارتفاع از سطح دریا مرتبط دانست (Finér et al., 2011; Mao et al., 2012). هنگامی که آب خاک بیشتر باشد، ریشه‌ها در عمق بیشتری نفوذ می‌کنند (Laio et al., 2006) و تعداد ریشه‌های نازک نیز افزایش می‌یابد (Stokes et al., 2009). همچنین، مقدار RAR با افزایش میزان بارندگی زیاد می‌شود

اثرات متقابل ریشه و خاک تأثیر زیادی بر افزایش پایداری شیب دارد (Xu et al., 2019). آگاهی از الگوی پراکنش سیستم ریشه‌ای برای گونه‌هایی که درصد فراوانی زیادی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه دارند، نقش گیاهان در پایدارسازی دامنه‌ها را آشکار کرده و سبب بهبود مدل سازی پایداری خاک در دامنه‌های ناپایدار جنگلی و در نتیجه، مدیریت صحیح‌تر می‌شوند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا به میانگین عمق نفوذ ریشه و بیشینه RAR افزوده می‌شود. این نتیجه حاکی از اهمیت پراکنش بیشتر ریشه‌ها در ارتفاع‌های بالاتر به منظور پایداری و افزایش مقاومت برشی خاک است. در ارتفاع‌های مختلف لازم است که پراکنش ریشه‌ها و پیرو آن، مسلح‌سازی ریشه‌ها بررسی شود، زیرا مقدار آن در ارتفاع‌های مختلف بسیار متفاوت است و این نکته در مدل‌های مسلح‌سازی باید در نظر گرفته شود. با آگاهی از اینکه هر گونه در چه ارتفاعی، بیشترین مقدار پراکنش RAR را دارد، می‌توان برای پایداری دامنه‌ها و کنترل فرسایش خاک، گونه مناسب را انتخاب کرد.

- Finér, L., Ohashib, M., Noguchic, K. and Hiranod, Y., 2011. Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 261(2): 265-277.
- Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Fourcaud, T., Cai, X., Ji, J. and Mickovski, S., 2008. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and Management*, 256(8): 1517-1526.
- Heidarian, T., Ghasemi Aghbash, F. and Pazhouhan, I., 2018. The role of native species of *Quercus brantii* and *Crataegus aronia* in soil reinforcement in Zagros forests. *Austrian Journal of forest Science*, 135(4): 283-296.
- Ji, J., Kokutse, N., Genet, M., Fourcaud, T. and Zhang, Z., 2012. Effects of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platyclusus orientalis*), stands on the Loess Plateau, China. *Catena*, 92: 139-154.
- John, B., Harendra, N. P. and Tripathi, R.S., 2001. Vertical distribution and seasonal changes of fine and coarse root mass in *Pinus kesiya* Royle Ex. Gordon forest of three different ages. *Acta Oecologica*, 22: 293-300.
- Kazemi, M., Abdi, E., Majnounian, B. and Yousefzadeh, H., 2017. The effect of Persian oak species (*Quercus persica*) in soil reinforcement (Case Study: Tabarok, Bazaft basin). *Forest and Wood Products*, 70(1): 31-38 (In Persian).
- Laio, F., D'Odorico, P. and Ridolfi, L., 2006. An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties. *Geophysical Research Letters*, 33: L18401.
- Leuschner, C. and Hertel, D., 2003. Fine root biomass of temperate forests in relation to soil acidity and fertility, climate, age and species. *Progress in Botany*, 64: 405-438.
- Lotfalian, M. and Parsakhoo, A., 2012. *Forest Roads Network Planning*. Ayiizh Publications, Tehran, 168p (In Persian).
- Majnounian, B., Abdi, E., Foshat, M. and Sufi Mariv, H., 2014. Determining biomechanical properties of poplar (*Populus nigra*) for soil bioengineering purposes. *Journal of Forest and Wood Products (Iranian Journal of Natural Resources)*, 67(1):13-19 (In Persian).
- Mao, Z., Saint-André, L., Genet, M., Mine, F.-X., Jourdan, C., Rey, H., Courbaud, B. and Stokes, A., 2012. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15(1): 63-79.
- Avani, N., Lateh, H. and Habibi Bibalani, Gh., 2014. Root distribution of *Accacia mangium* Willd. and *Macaranga tanarius* L. of rainforest. *Bangladesh Journal of Botany*, 43(2): 141-145.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T. and Morlotti, E., 2009. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324(1-2): 71-89.
- 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(1-2): 11-22.
- Chiaradia, E.A., Bischetti, G.B. and Vergani, C., 2012. Incorporating the effect of root systems of forest species into spatially distributed models of shallow landslides. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 2(3): 107-118.
- Deljouei, A., Abdi, E., Majnounian, B. and Schwarz, M., 2019. Roots spatial distribution of *Carpinus betulus* in lowland Hyrcanian forests (Kheyroud forest, Nowshahr). *Journal of Forest Research and Development*, 4(4): 477-488 (In Persian).
- Di Iorio, A., Lasserre, B., Scippa, G.S. and Chiatante, D., 2005. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany*, 95(2): 351-361.
- Eker, R. and Aydin, A., 2016. Landslide susceptibility assessment of forest roads. *European Journal of Forest Engineering*, 2(2): 54-60.
- Esmaili, M., Abdi, E., Jafary, M. and Majnounian, B., 2017. Comparison of biotechnical characteristics of root in two forest plantations of *Fraxinus excelsior* and *Picea abies*, J. of Forest Research and Development, 3(3): 237-247. (In Persian).
- Esmaili, 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.
- Fan, C.G. and Su, C.F., 2008. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. *Ecological Engineering*, 33(2): 157-166.
- Finér, L., Helmisaari, H.S., Löhmus, K., Majdi, H., Brunner, I., Børja, I., ... and Vanguelova, E., 2007. Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Plant Biosystems*, 141(3): 394-405.

- protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 324: 1-30
- Stokes, A., Norris, J.E., van Beek, L.P.H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S.B., ... and Fourcaud, T., 2008. How vegetation reinforces soil on slopes: 65-118. In: Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B.C. and Achim, A. (Eds.). *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 287p.
 - Tobin, C., Cermak, J., Chiatante, D., Danjon, F., Diorio, A., Dupuy, L., Eshel, A., Jourdan, C., Kallikowski, T., Laiho, R., Nadezhdina, N., Nicoll, B., Pages, L., Silva, J. and Spanos, I., 2007. Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosystems*, 141(3): 481-501.
 - Vergani, C., Schwarz, M., Cohen, D., Thormann, J.J. and Bischetti, G.B., 2014. Effects of root tensile force and diameter distribution variability on root reinforcement in the Swiss and Italian Alps. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(11): 1426-1440.
 - Wang, X., Hong, M.M., Huang, Z., Zhao, Y.F., Ou, Y.S., Jia, H.X. and Li, J., 2019. Biomechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions. *Soil & Tillage Research*, 189: 148-157.
 - Xu, R., Li, X., Yang, W., Jiang, C. and Rabiei, M., 2019. Use of local plants for ecological restoration and slope stability: a possible application in Yan'an, Loess Plateau, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 2106-2128.
 - Yanagisawa, N. and Fujita, N., 1999. Different distribution patterns of woody species on a slope in relation to vertical root distribution and dynamics of soil moisture profiles. *Ecological Research*, 14: 165-177.
 - Zavala-González, R.G., Cantú-Silva, I. and González-Rodríguez, H., 2020. The effect of root native tree species on soil shear strength on hillslopes of Sierra Madre Oriental, Mexico. Preprint, 21p.
 - Zhang, C., Jiang, J., Ma, J., Zhang, X., Yang, Q., Ouyang, Q. and Lei, X., 2015. Evaluating soil reinforcement by plant roots using artificial neural networks. *Soil Use and Management*, 31: 408-416.
 - 45: 55-69.
 - Mattia, C., Bischetti, G.B. and Gentile, F., 2005. Biotechnical characteristics of root system of typical Mediterranean species. *Plant and Soil*, 278: 23-32.
 - Moresi, F.V., Maesano, M., Matteucci, G., Romagnoli, M., Sidle, R.C. and Scarascia Mugnozza, G., 2019. Root biomechanical traits in a montane Mediterranean forest watershed: Variations with species diversity and soil depth. *Forests*, 10(4): 341.
 - Naghdi, R., Maleki, S., Abdi, E., Mousavi, R. and Nikooy, M., 2013. Assessing the effect of *Alnus* roots on hillslope stability in order to use in soil bioengineering. *Journal of Forest Science*, 59(11): 417-423.
 - Neukirchen, D., Himken, M., Lammel, J., Czypionka-Krause, U. and Olf, H.W., 1999. Spatial and temporal distribution of the root system and root nutrient content of an established *Miscanthus* crop. *European Journal of Agronomy*, 11(3-4): 301-309.
 - Pourmalekshah, A.A.M.A., Moayeri, M.H. and Parsakhoo, A., 2019. Effect of the root biotechnical characteristics of *Alnus subcordata*, *Paulownia fortunei* and *Populus deltoids* on the soil mechanics. *Journal of Forest Science*, 65(7): 283-290.
 - Preti, F. and Giadrossich, F., 2009. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(9): 1713-1726.
 - Sabeti, H., 1994. *Forests, Trees and Shrubs of Iran*. Published by Yazd University, Yazd, 884p (In Persian).
 - Schwarz, M., Phillips, C., Marden, M., McIvor, I.R., Douglas, G.B. and Watson, A., 2016. Modelling of root reinforcement and erosion control by 'Veronese' poplar on pastoral hill country in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 46: 4.
 - Sidle, R.C., Ziegler, A.D., Negishi, J.N., Nik, A.R., Siew, R. and Turkelboom, F., 2006. Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224(1-2): 199-225.
 - Stokes, A., Atger, C., Bengough, A.G., Fourcaud, T. and Sidle, R.C., 2009. Desirable plant root traits for

The effect of altitude on the distribution pattern of the root system of the Caucasian alder (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) plantations in Iran

M. Foshat ^{1*}, H. Akbari ², E. Abdi ³, Sh. Ghalandarayeshi ⁴ and F. Giadrossich ⁵

1* - Corresponding author, Ph.D. Student, Department of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mhfohat60@gmail.com

2- Associate Prof., Department of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Associate Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

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

5- Prof., Section Hydraulics, Faculty of Agricultural, University of Sassari, Sassari, Italy

Received: 26.09.2020

Accepted: 23.12.2020

Abstract

The extent to which plants can protect soil largely depends on the biotechnical characteristics of their root system. One of these characteristics is the root distribution pattern in the soil or the Root Area Ratio (RAR). The aim of this study was to investigate the effect of altitude on the root spatial distribution of Caucasian alder (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) trees in lower, middle and upper altitudes in the Neka-Zalrud forestry plan in the Mazandaran province, Iran. At each site, seven trees were completely randomly sampled. In order to investigate and measure RAR, two soil profiles were dug at both up and down sides of tree samples (with 50×100 cm² dimensions) using the profile trench method at the horizontal distance of 0.5 and 1.5 m from the tree stem. On wall trenches, 10 cm horizons were identified, on which all intersecting roots were measured and RAR was calculated in each horizon. At all three altitudes, RAR decreased exponentially with increasing depth and distance from the tree. The results of ANCOVA showed that the distribution of roots at all three altitudes was significantly different. In overall, the density of the roots increased along with increasing altitude above sea level. Higher percentages of RAR in some locations at lowland heights were probably due to limited soil depth at this height.

Keywords: Bioengineering, root area ratio, wall trench method.