فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۲۵ شماره ۳، صفحه ۳۸۵-۳۷۶، (۱۳۹۶)
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijfpr.2017.112872

تأثیر کوبیدگی خاک بر سیستم ریشه نونهال‌های توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C. A. Mey.)

مقداد جورغلامی *[۱]، آزاده دلجویی [۲] و الهه‌السادات حسینی علا [۳]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: mjgholami@ut.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- کارشناسی ارشد مهندسی جنگل، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۹

چکیده

کوبیدگی خاک یکی از عامل‌های ایجاد تنش است که تأثیر منفی بر رشد گیاه دارد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر کوبیدگی خاک بر سیستم ریشه نونهال‌های توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) در شرایط کنترل شده بود. بذرهای توسکای ییلاقی پس از کاشت در گلدان‌های پلاستیکی، در خاک لومی تا لوم- رسی و رژیم رطوبتی ثابت و در شش سطح کوبیدگی خاک مورد بررسی قرار گرفتند و فاکتورهای قطر یقه، طول، زی‌توده و نسبت‌های تخصیص سیستم ریشه نونهال‌ها اندازه‌گیری و محاسبه شدند. بر اساس نتایج، فاکتورهای بررسی شده با افزایش جرم مخصوص خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند و به‌جز نسبت طول ریشه جانبی به اصلی به‌صورت تابع درجه دوم کاهش‌یابنده بودند. مقایسه مقادیر در تیمار شاهد نسبت به تیمار با کوبیدگی شدید، ۳۶ درصد کاهش در میانگین طول ریشه جانبی، ۳۱ درصد کاهش در میانگین طول ریشه اصلی، ۳۷ درصد کاهش در میانگین قطر ریشه اصلی، ۲۷ درصد کاهش در میانگین زی‌توده ریشه و ۳۶ درصد کاهش در میانگین زی‌توده خشک ریشه را نشان داد. درمجموع، نتایج حاکی از تأثیر منفی تنش کوبیدگی بر ویژگی‌های سیستم ریشه‌ای نونهال‌های توسکای ییلاقی بود.

واژه‌های کلیدی: جرم مخصوص، خاک، زی‌توده، نسبت‌های تخصیص.

مقدمه

استفاده از فناوری پیشرفته در مدیریت مکانیزه و مدرن امروزی جنگل به‌منظور توسعه توده‌های جنگلی در تمام مراحل رشد و تجدید حیات آن‌ها روندی رو به رشد داشته است (Kormanek, 2013) که در رأس آن‌ها استفاده از تراکتورها و ماشین‌های جنگلی برای دستیابی به مواد خام و چوب‌آلات را می‌توان نام برد. استفاده از چنین ماشین‌آلاتی در مقایسه با روش‌های دستی- مکانیکی موجود، سبب افزایش کارایی می‌شوند و خطرات کار در جنگل را کاهش می‌دهند. در عین حال، این ماشین‌ها نیازهای اکولوژیکی درختان را درنظر نمی‌گیرند و اثرات منفی بر خاک جنگل می‌گذارند (Majnounian *et al.*, 2009). به نظر بیشتر پژوهش‌گران، تخریب در جنگل به‌دلیل حضور ماشین‌های بهره‌برداری به‌ویژه ماشین‌های چوبکشی انجام می‌شود که تأثیر معنی‌داری بر کاهش کیفیت چوب، زوال سلامت جنگل و تغییر ویژگی‌های خاک دارد (Ulrich *et al.*, 2003; Kormanek, 2013). بیشتر به‌هم‌خوردگی‌های ایجاد شده در جنگل در نزدیکی محل مسیرهای چوبکشی دیده

می‌شود، به‌طوری‌که تا فاصله ۱۵ متری در دو سمت مسیرهای چوبکشی، رشد درختان ۱۰ تا ۱۵ درصد (Kormanek *et al.*, 2015a) و تولید جنگل تا ۱۷ درصد کاهش می‌یابد (Ulrich *et al.*, 2003).

تعداد زیاد ماشین‌آلات و عبور آن‌ها از عرصه‌های جنگلی سبب تغییرات نامطلوبی در اکوسیستم جنگل می‌شود که یکی از این دگرگونی‌ها، کوبیدگی خاک جنگل است (Majnounian & Jourgholami, 2013). اصلی‌ترین اثری که کوبیدگی خاک می‌تواند بر تولید جنگل بگذارد، کاهش قابل توجه تولید محصولات جنگل است (Whalley *et al.*, 2008). هرچند که در اندک مطالعاتی، پژوهش‌گران به این نتیجه دست یافته‌اند که بر اثر کوبیدگی خاک، تولید محصولات درختان جنگلی در خاک‌هایی با جرم مخصوص زیاد افزایش نشان داده است (Bejarano *et al.*, 2010) که در ارتباط با نوع سیستم ریشه‌ای درختان و توانایی آن‌ها در نفوذ به درون خاک‌های کوبیده می‌باشد (Chen & Weil, 2010).

یکی از ویژگی‌های مهم تعیین کننده گسترش ریشه‌ها در داخل خاک، کوبیدگی خاک است (Konôpka *et al.*, 2008). کوبیدگی خاک در اثر عبور ماشین‌آلات سنگین که از عامل‌های شناخته شده در افزایش جرم مخصوص و کاهش خلل و فرج خاک می‌باشد، به‌طور قابل ملاحظه‌ای رشد ریشه‌ها را محدود می‌کند (Kobaissi *et al.*, 2013; Twum & Nii-Annang, 2015). به‌عنوان مثال، جرم مخصوص و مقاومت خاک تحت تأثیر عبور ماشین‌آلات بسیار بیشتر از خاک‌هایی است که عبور و مرور در آن‌ها کمتر است و کوبیدگی وجود ندارد؛ در نتیجه افزایش جرم مخصوص خاک منجر به ایجاد تغییرات در شکل ریشه و ارتباطات ریشه- خاک می‌شود (Twum & Nii-Annang, 2015). علاوه‌براین، ممکن است تراکم زیاد خاک مقاومت در برابر نفوذ ریشه را افزایش دهد و در نهایت، توسعه و تکثیر ریشه را دچار مشکل کند. بنابراین، پراکنش ریشه‌ها و زی‌توده را در لایه‌های خاک تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، کوبیدگی خاک باعث ممانعت از عبور آب شده که منجر به محدودیت دسترسی ریشه‌ها به مواد غذایی و جذب آن‌ها می‌شود و در مجموع بر رشد گیاه تأثیرگذار خواهد بود. با این حال، تأثیر کوبیدگی خاک بر رشد ریشه و زی‌توده در گونه‌های درختی مختلف در چنین خاک‌هایی به مقدار قابل توجهی متفاوت است (Rosolem *et al.*, 2002).

کوبیدگی خاک بر ویژگی‌های رشد و یا مورفولوژی گیاهان نیز اثرگذار است (Alameda & Villar, 2009, 2012; Alameda *et al.*, 2011; Tracy *et al.*, 2012). از جمله این اثرات می‌توان به کاهش طول ساقه و وزن خشک ریشه اشاره کرد. بررسی تنش کوبیدگی در شرایط گلخانه‌ای و گلدانی بر نهال‌های جنگلی حاکی از افزایش وزن خشک و طول ریشه‌ها پس از انتقال به محیط طبیعی بود (Sardabi, 2003; Bejarano *et al.*, 2010). برخی پژوهشگران نیز به بررسی تأثیر تراکم خاک بر رشد نهال‌های گونه‌های درختی جنگل در نهالستان پرداخته‌اند (Blouin *et al.*, 2008; Kormanek *et al.*, 2015a). نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این بود که تغییر در جرم مخصوص خاک به‌طور معنی‌داری بر ویژگی‌های رویشی گیاهان تأثیر می‌گذارد.

از عامل‌های محیطی مهم در جنگل، بررسی رفتار تجدید حیات گونه‌های مختلف جنگلی با توجه به شرایط خاکی ایجاد شده در مسیرهای چوبکشی است، چرا که این مسیرها منجر به ایجاد خاک با ویژگی‌های منحصر به‌فرد می‌شوند. شکل‌گیری شرایط خاکی جدید و تفاوت آن با مناطق بکر و دست‌نخورده از عامل‌های مهم در استقرار گونه‌های جنگلی است. از جمله گونه‌های رایج در شمال کشور می‌توان به توسکا اشاره کرد که گونه‌ای با نیاز نوری زیاد بوده و به‌عنوان گونه‌ای پیشگام در جنگل شناخته می‌شود. این گونه به‌طور معمول پس از بروز آشفتگی‌هایی در توده و خاک جنگل ظاهر می‌شود. اگرچه مطالعات بسیاری در رابطه با پاسخ گیاهان در برابر کوبیدگی خاک وجود دارد، اما مطالعات اندکی در رابطه با اثر کوبیدگی خاک بر ویژگی‌های ساختاری و ریخت‌شناسی ریشه و ویژگی‌های فیزیولوژی و رشد گیاهان انجام شده است. از سوی دیگر، در داخل کشور

مطالعه در رابطه با گونه‌های درختی به‌ندرت انجام شده است و مطالعات رایج در رابطه با گونه‌های زراعی (Akhavan *et al.*, 2012; Ghorbanian *et al.*, 2014) بوده است. از این‌رو، هدف این پژوهش بررسی تغییرات سیستم ریشه‌ای نهال‌های توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) تحت تنش کوبیدگی خاک و در شرایط گلخانه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه گروه باغبانی و فضای سبز دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. بذرها با ویژگی‌های ریخت‌شناسی برتر از مرکز بذر آمل تهیه شدند. در اواخر زمستان ۱۳۹۲، بذرهای توسکای ییلاقی در ۱۸ گلدان پلاستیکی با ابعاد ۲۰×۱۵ سانتی‌متر در خاکی با بافت لومی تا لوم- رسی (مخلوط کردن خاک به‌طور یکنواخت انجام شد تا بافت خاک برای همه تیمارها یکسان باشد) کاشته شدند. خاک‌ها از نظر رطوبتی وضعیت مشابهی داشتند (بدون اضافه کردن کود) و بذرها در عمق یک تا سه میلی‌متری کاشته شدند و به مدت ۷۰ روز به‌صورت روزانه با استفاده از سیستم آبیاری بارانی آبیاری شدند. سپس نونهال‌ها وزن شده و قطر و ارتفاع هر کدام اندازه‌گیری شد.

برای بازکاشت و اعمال تیمار کوبیدگی، نونهال‌ها در اواخر اردیبهشت به گلدآن‌هایی با ابعاد ۳۰×۲۰ سانتی‌متر منتقل شدند. خاک گلدآن‌ها به سه لایه مساوی تقسیم شد و توسط چکش پروکتور اصلاح شده با وزن ۴/۷۴ کیلوگرم و ارتفاع سقوط ۴۵/۷ سانتی‌متر، به هر لایه به‌ترتیب یک، دو، چهار، شش و هشت ضربه با سه تکرار وارد شد (Alameda & Villar, 2009; Bejarano *et al.*, 2010). شرایط گلخانه از نظر نور، آبیاری، رطوبت و دما برای همه نونهال‌ها یکسان بود. برای کاشت مرحله دوم از نهال‌های تقریباً یکسان و هم‌اندازه استفاده شد تا از بروز خطا جلوگیری شود.

همچنین، تیمار بدون ضربه (تیمار شاهد) که فقط خاک با فشار دست در گلدان پر شده بود، نیز هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت. در پایان دوره رشد، نونهال‌ها برداشت شده و برای هر نونهال، سه اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک در هر ۰/۵ سانتی‌متر با استفاده از نفوذسنج دستی اندازه‌گیری و برای هر گلدان، میانگین این سه قرائت، محاسبه شد. برداشت از هر نونهال، با خارج کردن دقیق گیاه از گلدان و شستن ریشه در یک ظرف آب انجام شد. پس از خشک شدن ریشه‌ها، حداکثر طول و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، در ابتدای دوره (اواخر اردیبهشت) و انتهای دوره (اواخر شهریور) خصوصیات ریخت‌شناسی ریشه از جمله قطر (با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر)، طول (با استفاده از خط‌کش مدرج با دقت ۰/۱ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد و اندام‌های تازه گیاه در کیسه‌های پلاستیکی به‌همراه کاغذ مرطوب قرار داده شده و به آزمایشگاه منتقل شد.

به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک، ریشه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد آون به مدت حداقل دو روز خشک شده، وزن خشک ریشه‌های اصلی و جانبی ثبت شد و نسبت وزن خشک به وزن تر محاسبه شد. همچنین، برای هر تکرار از هر تیمار، یک نهال از خاک خارج شده و پس از شستشوی خاک اطراف ریشه، طول بلندترین ریشه اصلی و جانبی اندازه‌گیری شد. سپس، نرخ رشد نسبی بر اساس زی‌توده محاسبه شد (Hunt, 1990; Jourgholami *et al.*, 2016).

به‌منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری، بعد از اعمال ضربات چکش، نمونه‌ها با استفاده از سیلندرهای فولادی نمونه‌گیری (طول ۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۵ سانتی‌متر) از داخل گلدان برداشت شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون خشک شدند و دوباره عمل توزین نمونه‌ها انجام شد تا جرم مخصوص ظاهری با استفاده از رابطه ۱به‌دست آید.

رابطه (۱) $$\text{جرم مخصوص ظاهری خاک خشک} = \frac{\text{وزن خاک خشک}}{\text{حجم کل خاک}} = \frac{M_s}{v_t}$$

که در آن: وزن سیلندر خالی- وزن خاک و سیلندر در حالت خشک شده = وزن خاک خشک و حجم استوانه = حجم کل خاک است.

در نهایت، شاخص‌های رشد شامل قطر و طول ریشه اصلی و جانبی، وزن اولیه و خشک آن‌ها محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ابتدا با آزمون کولموگروف- سمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی و از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل شد. به‌منظور بررسی اثر کوبیدگی خاک بر متغیرهای رشد نهال از تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. در صورتی‌که اثر هر یک از عامل‌ها در تجزیه واریانس یک‌طرفه معنی‌دار بود، از آزمون مقایسه‌ای چندگانه دانکن برای گروه‌بندی استفاده شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 17 و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج

نتایج اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک در تیمارهای مختلف

تیمار	مقاومت به نفوذ (مگاپاسکال)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	تخلخل (درصد)
سطح اول (شاهد)	۰/۳۸ ± ۰/۰۳	۱/۰۸ ± ۰/۰۳	۵۴/۰۴ ± ۱/۲۸
سطح دوم	۰/۶۵ ± ۰/۱۰	۱/۱۴ ± ۰/۰۲	۵۱/۳۵ ± ۰/۸۹
سطح سوم	۰/۹۵ ± ۰/۱۱	۱/۲۱ ± ۰/۰۳	۴۸/۳۷ ± ۱/۰۷
سطح چهارم	۱/۲۷ ± ۰/۰۸	۱/۲۶ ± ۰/۰۶	۴۶/۳۸ ± ۲/۶۶
سطح پنجم	۱/۵۱ ± ۰/۱۴	۱/۳۴ ± ۰/۰۴	۴۳/۱۲ ± ۱/۶۱
سطح ششم	۱/۹۳ ± ۰/۱۳	۱/۳۸ ± ۰/۰۳	۴۱/۳۶ ± ۱/۱۵

نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه اثر افزایش مقاومت به نفوذ خاک بر صفات ریشه نونهال‌ها در جدول ۲ ارایه شده است. بر اساس نتایج، اثر افزایش مقاومت به نفوذ خاک بر طول ریشه جانبی، وزن خشک ریشه اصلی و وزن خشک کل ریشه، از نظر آماری معنی‌دار بود. تمام پاسخ‌های ریخت‌شناسی (اندازه) و پارامترهای رشد (زی‌توده) سیستم ریشه نونهال‌ها، از نظر آماری به‌طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش شدت تراکم کاهش یافته بود (جدول ۳). مقایسه مقادیر پاسخ متغیرهای ریخت‌شناسی در تیمار شاهد (بدون کوبیدگی) نسبت به تیمار با کوبیدگی شدید، ۳۶ درصد کاهش در میانگین طول ریشه جانبی (از ۳۰/۴۷ سانتی‌متر به ۱۹/۲۰ سانتی‌متر)، ۳۱ درصد کاهش در میانگین طول ریشه اصلی (از ۱۵سانتی‌متر به ۱۰/۲۳ سانتی‌متر)، ۳۷ درصد کاهش در میانگین قطر ریشه اصلی (از ۱۳/۳ میلی‌متر به ۸/۳۳ میلی‌متر) و همچنین مقایسه مقادیر پارامترهای زی توده در تیمار شاهد نسبت به تیمار کوبیدگی شدید خاک، ۲۷ درصد کاهش در میانگین زی‌توده ریشه (از ۳۱/۹۱ گرم به ۲۳/۲۹ گرم) و ۳۶ درصد کاهش در میانگین زی‌توده خشک ریشه (از ۲۲/۴۶ گرم به۲۶ /۱۴ گرم) را نشان داد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه اثر افزایش مقاومت به نفوذ خاک بر صفات ریشه نونهال‌های توسکای ییلاقی

صفت	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
قطر ریشه اصلی (میلی‌متر)	۱۰۴/۶۶	۵	۲۰/۹۳	۲/۳۰	۰/۱۱^{ns}
طول ریشه جانبی (سانتی‌متر)	۴۵۳/۵۴	۵	۹۰/۷۱	۵/۹۶	۰/۰۰۵**
طول ریشه اصلی (سانتی‌متر)	۵۰/۷۲	۵	۱۰/۱۴	۲/۰۶	۰/۱۴۱^{ns}
وزن تر ریشه اصلی (گرم)	۸۵/۸۹	۵	۱۷/۱۸	۱/۴۹	۰/۲۶۵^{ns}
وزن خشک ریشه اصلی (گرم)	۸۱/۱۳	۵	۱۶/۲۳	۴/۷۲	۰/۰۱۳*
وزن تر ریشه جانبی (گرم)	۲۶/۸۷	۵	۵/۳۷	۱/۲۰	۰/۳۶۵^{ns}
وزن خشک ریشه جانبی (گرم)	۲۲/۳۴	۵	۶/۸۴	۲/۶۵	۰/۰۷۷^{ns}
نسبت طول ریشه به وزن ریشه	۰/۳۷	۵	۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۹۵۷^{ns}
نرخ زی‌توده ریشه (RMR)	۰/۰۰	۵	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۹۲^{ns}
نسبت وزن ریشه‌های جانبی به مجموع وزن خشک ریشه	۰/۰۳	۵	۰/۰۱	۰/۲۷	۰/۹۲۲^{ns}
نسبت طول ریشه جانبی به ریشه اصلی	۰/۸۴	۵	۰/۱۷	۰/۶۹	۰/۶۴۲^{ns}
وزن تر کل ریشه (g)	۱۸۷/۵۱	۵	۳۷/۵۰	۱/۴۴	۰/۲۷۹^{ns}
وزن خشک کل ریشه (g)	۲۱۵/۵۶	۵	۴۳/۱۱	۵/۴۷	۰/۰۰۷**

** اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار
حروف لاتین مشابه بیانگر معنی‌دار نبودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

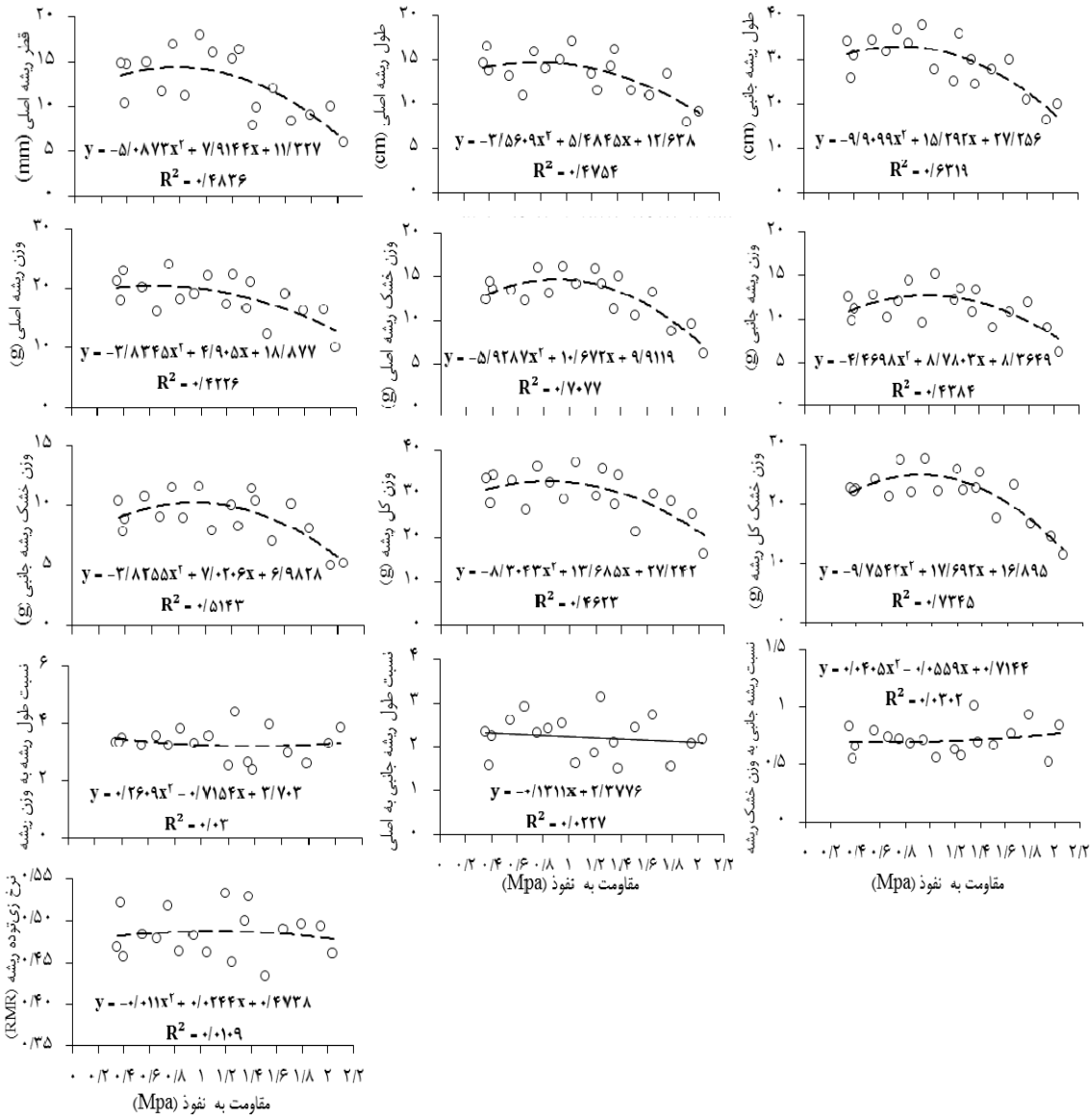
جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر افزایش مقاومت به نفوذ خاک بر صفات ریشه نونهال توسکای ییلاقی در تیمارهای مختلف

صفت	شدت کوبیدگی					
	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم	سطح پنجم	سطح ششم
	۱۳/۳۰^{ab}	۱۴/۵۳^{a}	۱۵/۰۷^{a}	۱۳/۱۷^{ab}	۱۰/۱۰^{ab}	۸/۳۳^{b}
طول ریشه جانبی (سانتی‌متر)	۳۰/۴۷^{a}	۳۴/۵۰^{a}	۳۳/۳۳^{a}	۳۰/۴۳^{a}	۲۷/۵۰^{a}	۱۹/۲۰^{b}
طول ریشه اصلی (سانتی‌متر)	۱۵/۰۰^{a}	۱۳/۴۰^{ab}	۱۵/۴۰^{a}	۱۳/۱۰^{ab}	۱۲/۹۰^{ab}	۱۰/۲۳^{b}
وزن تر ریشه اصلی (گرم)	۲۰/۷۶ ^{a}	۲۰/۱۳^{a}	۱۹/۷۸^{a}	۱۸/۷۰^{a}	۱۷/۵۰^{a}	۱۴/۲۳^{a}
وزن خشک ریشه اصلی (گرم)	۱۳/۴۶^{a}	۱۳/۹۲^{a}	۱۴/۴۹^{a}	۱۳/۸۱^{a}	۱۲/۹۲^{a}	۸/۱۷^{a}
وزن تر ریشه جانبی (گرم)	۱۱/۱۶^{a}	۱۱/۶۷^{a}	۱۳/۰۴^{a}	۱۲/۲۶^{a}	۱۱/۰۶^{a}	۹/۰۶^{a}
وزن خشک ریشه جانبی (گرم)	۹/۰۰^{a}	۱۰/۴۰^{a}	۹/۴۵^{a}	۹/۸۸^{a}	۹/۱۵^{a}	۶/۰۹^{b}
نسبت طول ریشه به وزن ریشه	۳/۳۸	۳/۳۳	۳/۵۵	۳/۱۸	۳/۱۱	۳/۲۶
نرخ زی‌توده ریشه (RMR)	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۸۴
نسبت وزن ریشه‌های جانبی به مجموع وزن خشک ریشه	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۷۱	۰/۷۶
نسبت طول ریشه جانبی به ریشه اصلی	۲/۰۶	۲/۶۱	۲/۲۰	۲/۳۷	۲/۲۲	۱/۹۴
وزن تر کل ریشه (g)	۳۱/۹۱^{a}	۳۱/۸۰^{a}	۳۲/۸۲^{a}	۳۰/۸۶^{a}	۲۸/۵۶^{a}	۲۳/۲۹^{a}
وزن خشک کل ریشه (g)	۲۲/۴۶^{a}	۲۴/۳۲^{a}	۲۳/۹۴^{a}	۲۳/۶۸^{a}	۲۲/۰۷^{a}	۱۴/۲۶^{b}

** اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار
حروف لاتین مشابه بیانگر معنی‌دار نبودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

نتایج نشانگر این بود که تمامی روابط پاسخ‌های ریخت‌شناسی، پارامترهای رشد ریشه، نسبت طول ریشه

جانبی به اصلی، نرخ زی‌توده ریشه و افزایش مقاومت به نفوذ خاک به‌صورت رابطه درجه دوم کاهش‌یابنده بود. شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت به نفوذ، متغیرهای مورد بررسی ریشه نونهال‌ها شامل قطر ریشه اصلی، طول ریشه اصلی، طول ریشه جانبی، متغیر نسبت طول ریشه به وزن ریشه و نسبت ریشه جانبی به وزن خشک ریشه، از تیمار شاهد تا سطح سوم و چهارم کوبیدگی ابتدا با آهنگ کندی افزایش یافت و در ادامه تا سطح ششم به‌صورت روند کاهشی بود. همچنین، با افزایش مقاومت به نفوذ، تمام پارامترهای زی‌توده، ابتدا تا سطح چهارم و پنجم کوبیدگی خاک با آهنگ کندی افزایش یافته و در ادامه تا سطح ششم به‌صورت روند کاهشی بود. این روند در آزمون گروه‌بندی میانگین‌ها در تیمارهای مختلف کوبیدگی نیز مشاهده شد که بر اساس آن، تفاوت قابل توجهی در همه پاسخ‌های ریخت‌شناسی بین تیمارهای شاهد، کوبیدگی کم، کوبیدگی متوسط و کوبیدگی شدید خاک وجود داشت.



شکل ۱- ارتباط بین مقاومت به نفوذ و متغیرهای سیستم ریشه نونهال‌های توسکای ییلاقی

بحث

تنش مکانیکی وارد بر خاک تأثیر کم اما معنی‌داری بر متغیرهای مرتبط با سیستم ریشه داشت، با این حال مقدار آن‌ها را در مقایسه با خاک‌هایی که تحت تنش کوبیدگی نبودند، به مقدار زیاد کاهش داد که مطابق با نتایج بدست آمده از سایر پژوهشگران (Lambers *et al.*, 1998; Alameda *et al.*, 2011) است. توسکا از جمله درختان تندرشد است و در جنگل‌های هیرکانی جزو گونه‌های پیشگام محسوب می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تمام متغیرهای ریخت‌شناسی و رشد نونهال‌های توسکای ییلاقی تا سطح سوم تراکم خاک (یک مگاپاسکال) افزایش رشد و سپس کاهشی حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد داشتند. از آنجا که این گونه سرعت رشد زیادی دارد، احتمال آن وجود دارد که سیستم ریشه‌ای توانسته بر تراکم خاک غلبه و حتی افزایش رشد داشته باشد که گاهی به‌دلیل افزایش سطح تماس ریشه و خاک می‌باشد، اما در نهایت، تمام متغیرهای ریخت‌شناسی و رشد نونهال توسکا با فشردگی شدید خاک (۱/۲ مگاپاسکال) کاهش رشد پیدا کردند که به‌دلیل کاهش نسبت تخلخل، ظرفیت نگهداری آب، اکسیژن و دسترسی به آب و مواد غذایی مورد نیاز گیاه است (Tirado-Corbala & Slater, 2010; Alameda *et al.*, 2011). کوبیدگی خاک جرم مخصوص خاک را افزایش می‌دهد (Twum & Nii-Annang, 2015)، در نتیجه خلل و فرج موجود در خاک کاهش می‌یابد که تأثیر منفی بر رشد گیاهان به‌ویژه سیستم ریشه خواهد داشت (Kormanek *et al.*, 2015a). افزایش کوبیدگی خاک بر اثر عبور و مرور ماشین‌آلات جنگلی، به‌دلیل کاهش اکسیژن در لایه‌های بالایی خاک منجر به کاهش تعداد ریشه‌ها می‌شود (Pulido *et al.*, 2016). باور عمومی بیشتر پژوهش‌گران این است که غلظت O_2 در خاک‌های با تراکم زیاد به‌شدت کاهش می‌یابد و رشد گیاهان در اثر کمبود O_2 محدود خواهد شد (Fair, 2005). به‌علاوه، پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که کاهش رشد گیاهان در نتیجه محدودیت انتشار گازهایی چون O_2 است (Kuzovkina *et al.*, 2004; Fair, 2005). در شرایط محدودیت O_2، درختان قادر به زنده‌مانی هستند، اما احتمال تغییر سیستم ریشه‌ای در آن‌ها وجود دارد و به‌صورت سیستم‌های کم‌عمق تبدیل می‌شوند.

کاهش قطر و طول ریشه‌ها در اثر کوبیدگی خاک که در پژوهش پیش‌رو به‌دست آمد، هم‌سو با نتایج سایر پژوهش‌ها است (Mosena & Dillenburg, 2004; Bejarano *et al.*, 2010; Kormanek *et al.*, 2015b) که یکی از دلایل آن، کاهش رشد سلول‌های ریشه و در نهایت، کاهش مقدار رشد ریشه‌ها است (Alameda & Villar, 2012). اگرچه در برخی منابع به افزایش رشد ریشه‌ها در اثر کوبیدگی خاک با شدت متوسط در شرایط گلخانه و عرصه اشاره شده است (Mosena & Dillenburg, 2004; Alemeda & Villar, 2009; Bejarano *et al.*, 2010)، اما به‌طورکلی کوبیدگی خاک رابطه منفی با متغیرهای رشد و زی‌توده ریشه دارد (Fair, 2005) و منجر به کاهش تراکم ریشه و عمق ریشه‌دوانی (طول ریشه) می‌شود (Kozlowski, 1999). یکی از دلایل کاهش زی‌توده ریشه در خاک‌های متراکم، ظرفیت نگهداری آب است. بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده، وزن خشک ریشه‌ها در عمق ۱۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد که از دلایل اصلی آن رطوبت زیاد خاک و در نتیجه حضور اتیلن با غلظت زیاد است (Jackson, 1997). این گاز منجر به ایجاد ریشه‌های کوتاه‌تر و قطورتر شده و از رشد اندام‌های هوایی ممانعت می‌کند (Morgan *et al.*, 1993). ریشه‌های کوتاه‌تر با زی‌توده کمتر در خاک‌های کوبیده شده، منجر به کاهش نفوذ ریشه‌ها و دسترسی محدود به مواد غذایی و کاهش جذب آب می‌شوند (Blouin *et al.*, 2008).

طویل شدن ریشه را می‌توان از طریق سرعت تولید ردیف‌هایی از سلول و سرعت طویل شدن سلول در نوک ریشه تعیین کرد. فشارهای مکانیکی ناشی از کوبیدگی خاک به‌دلیل جلوگیری از طویل شدن سلول، کل طول ریشه و طویل شدن ریشه را کاهش می‌دهند. در شرایط وجود فشار مکانیکی، به‌طور معمول به‌دلیل توسعه شعاعی سلول‌های پوستی، قطر ریشه افزایش می‌یابد و غلظت مواد محلول در

سلول‌های ریشه نیز بیشتر می‌شود (Lambers *et al.*, 1998). ریشه‌های محکم و ضخیم که در اثر توسعه شعاعی ریشه ایجاد می‌شوند، فشار بیشتری به خاک اطراف وارد می کنند. همان‌طور که نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد، کوچک بودن ریشه در شرایط فشردگی خاک ممکن است برای جذب آب و مواد غذایی زیان‌آور باشد و از این طریق سرعت رشد گیاه را کاهش دهد. ریشه‌های گیاه فشردگی خاک را درک می‌کنند و علایم بازدارنده‌ای نیز به برگ‌ها ارسال می‌کنند که موجب واکنش پیش‌خوری می‌شود (Stirzaker *et al.*, 1996).

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کوبیدگی خاک اثر منفی و شدیدی بر سیستم ریشه نونهال‌های توسکای ییلاقی داشت. ریشه‌های کوتاه و کم‌عمق در شرایط خشکی قادر به جذب آب از لایه‌های عمقی خاک نخواهند بود. از این‌رو، عملکرد نهال‌ها در خاک‌های کوبیده و دارای جرم مخصوص ظاهری زیاد کاهش خواهد یافت. کاهش معنی‌دار قطر، طول، زی‌توده و کلیه متغیرهای اندازه‌گیری شده در این پژوهش به‌خوبی نشان داد که این تغییرات در اثر وارد شدن صدمه به سیستم ریشه بوده و عملکرد فیزیولوژیکی آن را دچار اختلال کرده است. خاک‌های کوبیده به‌طور گسترده اندام‌های زیرزمینی گیاهان و درختان را تحت تأثیر قرار می‌دهند و یکی از عامل‌های مهم که منجر به تغییرات در رشد ریشه گیاهان می‌شود، مقاومت مکانیکی بیان شده است. با استناد به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش باید هنگام کار در جنگل و استفاده از ماشین‌آلات، در حین عملیات از ایجاد کوبیدگی زیاد و بیشتر از سطح چهارم ممانعت شود تا اثر منفی بر رشد درختان و زادآوری نداشته باشد و تجدید حیات در جنگل به خطر نیافتد. خاک‌های به‌هم‌خورده برای حفظ رشد ریشه‌ها در حد مطلوب نیازمند مدیریت صحیح هستند و اجرای شیوه‌های مدیریتی باید با هدف عدم برهم‌خوردگی و تخریب خاک انجام شود.

سپاسگزاری

این مقاله از نتایج طرح پژوهشی به شماره ۹۳۰۱۴۷۲۶ تهیه شده است که با کمک مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا شده است. بدین‌وسیله، نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌کنند.

References

- Akhavan, S., Shabanpour, M. and Esfahani, M., 2012. Soil compaction and texture effects on the growth of roots and shoots of wheat. Journal of Water and Soil, 26(3): 727-735 (In Persian).
- Alameda, D. and Villar, R., 2009. Moderate soil compaction: implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. Soil and Tillage Research, 103: 325-331.
- Alameda, D. and Villar, R., 2012. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions. Environmental and Experimental Botany, 79: 49-57.
- Alameda, D., Anten, A., Niels, P.R. and Villar, R., 2011. Soil compaction effects on growth and root traits of Tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. Soil and Tillage Research, 120: 121-129.
- Bejarano, M.D., Villar, R., Murillo, A.M. and Quero, J.L., 2010. Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd. (Fagaceae) seedlings. Soil and Tillage Research, 110: 108-114.
- Blouin, V.M., Schmidt, M.G., Bulmer, C.E. and Krzic, M., 2008. Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. Forest Ecology and Management, 255: 2444-2452.
- Chen, G.H. and Weil, R.R., 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. Plant and Soil, 331: 31-43.
- Fair, B.A., 2005. Growth response and adaptability of *Acer rubrum* and *A. xfreemanii* cultivars to soil compaction. Ph.D. thesis, Faculty of Horticulture and Crop Science, Ohio State University, Ohio, 260p.
- Ghorbanian, M., Liaghat, M. and Nouri, H., 2014. Effect of soil texture and bulk density on evapotranspiration and crop coefficient of forage Maize. Iranian Journal of Water Research in Agriculture, 28(2): 453-463 (In Persian).
- Hunt, R., 1990. Basic Growth Analysis: Plant Growth Analysis for Beginners. Unwin Hyman

237. In: Pech, J.C., Latche, A. and Balague, C. (Eds.). Cellular and Molecular Aspects of the Plant Hormone Ethylene. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 388p.
- Mosena, M. and Dillenburg, L.R., 2004. Early growth of Brazilian Pine (*Araucaria angustifolia* [Bertol.] Kuntze) in response to soil compaction and drought. Plant and Soil, 258: 293-306.
- Pulido, M., Schnabel, S., Contador, J.F.L. and Mellado, I.M., 2016. Soil compaction related to grazing and its effects on herbaceous roots frequency and soil organic matter content in rangelands of SW Spain. Abstracts of EGU General Assembly Conference. Austria, 17-22 Apr. 2016: 18.
- Rosolem, C.A., Foloni, J.S.S. and Tiritan, C.S., 2002. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. Soil and Tillage Research, 65(1): 109-115.
- Sardabi, H., 2003. The effect of compaction stress and soil humidity on growth and rooting of olive in greenhouse. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 12(3): 413-426 (In Persian).
- Stirzaker, R.J., Passjoura, J.B. and Wilms, Y., 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. Plant and Soil, 185: 151-162.
- Tirado-Corbala, R. and Slater, B.K., 2010. Soil compaction effects on the establishment of three tropical tree species. Arboriculture & Urban Forestry, 36(4): 164-170.
- Tracy, S.R., Black, C.R., Roberts, J.A., Sturrock, C., Mairhofer, S., Craigon, J. and Mooney, S.J., 2012. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. Annals of Botany, 110(2): 1-9.
- Twum, E.K.A. and Nii-Annang, S., 2015. Impact of soil compaction on bulk density and root biomass of *Quercus petraea* L. at Reclaimed Post-Lignite mining site in Lusatia, Germany. Applied and Environmental Soil Science, 2015: 5p.
- Ulrich, R., Neruda, J. and Valenta, J., 2003. The impact of selected machines carriageable system on forest soil. Acta Scientiarum Polonorum, 11(53): 229-235.
- Whalley, W.R., Watts, C.W., Gregory, A.S., Mooney, S.J., Clark, L.J. and Whitmore, A.P., 2008. The effect of soil strength on the yield of wheat. Plant and Soil, 306: 237-247.

Publishing, London, 112p.
- Jackson, M.B., 1997. Hormones from roots as signals for the shoots of stressed plants. Trends in Plant Sciences, 2: 22-28.
- Jourgholami, M., Khoramizadeh, A. and Zenner, E.K., 2016. Effects of soil compaction on seedling morphology, growth, and architecture of chestnut-leaved oak (*Quercus castaneifolia*). iForest, 10: 145-153.
- Kobaissi, A.N., Kanso, A.A., Kanbar, H.J. and Kazpar, V.A., 2013. Morpho-physiological changes caused by soil compaction and irrigation on *Zea mays*. Eurasian Journal of Soil Science, 2: 114-121.
- Konôpka, B., Pagès, L. and Doussan, C., 2008. Impact of soil compaction heterogeneity and moisture on maize (*Zea mays*) root and shoot development. Plant, Soil and Environment, 54: 509-519.
- Kormanek, M., 2013. Determination of the impact of soil compaction on germination and seedling growth parameters of common beech in the laboratory conditions. Acta Scientarium Polonorum, 12(1): 15-27.
- Kormanek, M., Banach, J. and Sowa, P., 2015b. Effect of soil bulk density on forest tree seedlings. International Agrophysics, 29: 67-74.
- Kormanek, M., Glab, T., Banach, J. and Szewczyk, G., 2015a. Effects of soil bulk density on sessile oak *Quercus petraea* Liebl. seedlings. European Journal of Forest Research, 134(6): 969-979.
- Kozlowski, T.T., 1999. Soil compaction and growth of woody plants. Scandinavian Journal of Forest Research, 14: 596-619.
- Kuzovkina, Y.A., Knee, M. and Quigley, M.F., 2004. Effects of soil compaction and flooding on the growth of 12 willow (Salix L.) species. Journal of Environmental Horticulture, 22(3): 155-160.
- Lambers, H., Chapin, F.S. and Pons, T.L., 1998. Plant Physiological Ecology. Springer-Verlag, Berlin, 540p.
- Majnounian, B. and Jourgholami, M., 2013. Effects of rubber-tired cable skidder on soil compaction in Hyrcanian forest. Croatian Journal of Forest Engineering, 34(1): 123-135.
- Majnounian, B., Jourgholami, M., Zobeiri, M. and Feghhi, J., 2009. Assessment of forest harvesting damage to residual stands and regenerations- a case study of Namkhaneh district in Kheyrud forest. Environmental Sciences, 7(1): 33-44 (In Persian).
- Morgan, P.W., Sarquis, J.L., He, C., Jordan, W.R. and Drew, M.C., 1993. Regulation of ethylene synthesis in maize root responses to stress: 232-

Impact of soil compaction on root system of Caucasian aldar (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) seedlings

M. Jourgholami [1*], A. Deljouei [2] and E.S. Hosseini Ala [3]

1*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Forestry and Forest Economics, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mjgholami@ut.ac.ir

2- Ph.D. Student Forest Engineering, Department of Forestry and Forest Economics, University of Tehran, Karaj, Iran

3- M.Sc. Forest Engineering, Department of Forestry and Forest Economics, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 08.05.2016 Accepted: 19.09.2016

Abstract

Soil compaction, as one of the causes of stress, has a negative impact on plant growth. The aim of this study was to evaluate the effect of soil compaction on root system of Caucasian alder (*Alnus subcordata* C. A. Mey.) seedlings in controlled condition. After sowing of alder seeds in plastic pots in loamy or clay-loamy soils with constant moisture regimes, the reaction of seeds were evaluated under six levels of soil compaction. Collar diameter, length, biomass, and allocation ratio of root system were measured and calculated. According to the results, the studied parameters decreased significantly by increasing soil bulk density and their trend were downward quadratic, except ratio of lateral root length to main root length. Thirty six percent decrease in the mean of lateral root length, 31% decrease in the mean of main root length, 37% reduction in the mean diameter of main root and 27% fell down in the mean value of root dry biomass was recorded in treatments with different levels of soil compaction in compare to the control treatment. In general, results indicate that compaction tension has negative effect on the characteristics in the root system of Caucasian alder seedlings.

Keywords: Allocation ratios, biomass, bulk density, soil.