

جنگل و فرآورده‌های چوب. مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰

ص ۳۱۳-۳۲۶

تأثیر کوبیدگی خاک بر متغیر زی توده و رشد نهال بلندمازو در شرایط گلخانه‌ای

- ❖ **مقداد جورغلامی***؛ دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **آزاده خرمی زاده**؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **شکوه سلطانیپور**؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

چکیده

استفاده از ماشین‌آلات سنگین برای فعالیت‌های جنگل مانند عملیات بهره‌برداری در طول چند دهه گذشته افزایش یافته است که همین امر پیامدهای منفی بر اکوسیستم خاک جنگل شامل کوبیدگی، به هم خوردگی و شیب شدن خاک را در پی داشته است. این تحقیق در پی اثبات این فرضیه است که افزایش مقاومت به نفوذ با تحت تأثیر قراردادن الگوهای اندام هوایی و زیرزمینی، سبب ایجاد اثرهای منفی بر متغیرهای مورفولوژی نهال (اندازه) و رشد (زی توده) می‌شود. در این تحقیق چهار تیمار کوبیدگی خاک اعمال شده تا یک طیف پیوسته از کوبیدگی با استفاده از افزایش وزن مخصوص ظاهری ایجاد شود (تیمار شاهد بدون کوبیدگی و سطح دوم تا سطح چهارم کوبیدگی به ترتیب با ۳، ۵ و ۷ ضربه چکش). اثرهای کوبیدگی خاک در خاکی با بافت لومی تا رسی - لومی با شرایط بهینه از نظر آب (آبیاری روزانه) در یک مقیاس پیوسته مقاومت به نفوذ (۰/۱ تا ۱/۰ مگاپاسکال) بر متغیرهای رشد نهال‌های گونه بلندمازو در شرایط گلخانه بررسی شد. با افزایش مقاومت به نفوذ، متغیرهای رشد شامل اندازه نهال (طول و قطر ساقه، طول برگ، طول و قطر ریشه اصلی و طول ریشه جانبی) و زی توده (اندام هوایی و ریشه) از نظر آماری به طور معنی‌داری کاهش یافتند. پارامترهای رشد با افزایش کوبیدگی خاک به صورت رابطه‌ای غیرخطی تغییر یافتند. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رشد ریشه و ارتفاع نهال بلندمازو با هر گونه افزایش در مقاومت خاک محدود می‌شود.

واژگان کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، مقاومت به نفوذ، مورفولوژی نهال، نرخ رشد نسبی.

مقدمه

تخریب خاک عبارتی است که اغلب برای توضیح شرایط کلی خاک در یک توده جنگلی بعد از عملیات بهره‌برداری استفاده می‌شود، اگرچه شرایط مختلف دیگری شامل گلی و لغزنده شدن خاک، به هم خوردگی، شیاری شدن و جابه‌جایی خاک نیز ممکن است رخ دهد [۱]. وقتی که خاک کوبیده می‌شود، در نتیجه نزدیک شدن ذرات خاک به هم و کاهش فضاهای خالی، کوبیدگی خاک افزایش می‌یابد [۲]. کوبیدگی حجم فضاهای خالی یا منافذ را در خاک کاهش می‌دهد، به‌ویژه حفره‌های درشت خاک که از مؤلفه‌های مؤثر بر انتشار گازها در درون خاک‌اند. در هنگام کوبیدگی خاک، نسبت فضای منافذ بزرگ کاهش و نسبت منافذ کوچک افزایش می‌یابد [۳-۵]؛ به‌همین دلیل کل حفره‌های خاک دست‌نخورده باقی می‌ماند یا به‌مقدار کم کاهش می‌یابد [۶]. کوبیدگی شدید خاک که حد بحرانی کوبیدگی نامیده می‌شود (زمانی که وزن مخصوص ظاهری خاک بیش از ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است)، به‌طور معمول به نقصان در کارکردهای فیزیولوژیکی در گیاهان منجر می‌شود، زیرا دسترسی آب، عناصر غذایی، هورمون‌های رشد و کربوهیدرات‌ها به بافت‌های مرستمی تغییر می‌کند که مقدمه‌ای بر کاهش رشد گیاهان است [۷].

محدودیت رشد ریشه به دلیل استحکام زیاد خاک در خاک‌های کوبیده‌شده نیز ممکن است به کمبود آب گیاه منجر شود [۳-۵]. به‌طور کلی، فرض بر این است که کوبیدگی خاک، با توجه به افزایش مقاومت بستر نفوذ، بر رشد ریشه و در نتیجه رشد گیاه اثر منفی دارد [۱، ۷]. نتایج تحقیقی نشان داد که نفوذ

ریشه پسته با کوبیدگی خاک رابطه منفی دارد [۸]. به‌طور مشابه، در گونه بلوط برگ‌ریز^۱ کوبیدگی خاک سبب کاهش طول ریشه می‌شود. در شرایط کمبود آب، گیاهان با نسبت وزن ریشه کمتر یا ریشه کوتاه‌تر، با کسری آب بیشتری مواجه می‌شوند که به‌طور جدی ممکن است زنده ماندن نهال‌ها را محدود کند [۹]. نتایج در اکوسیستم‌های مدیترانه‌ای نشان داد که نسبت وزن به ریشه دارای اهمیت زیادی است و گونه‌هایی با نسبت وزن ریشه بیشتر، بقای بیشتری در فصل تابستان دارند، زیرا ریشه‌ها، قابلیت نفوذ بیشتری در خاک دارند [۱۰].

نرخ رشد نسبی، که به‌عنوان افزایش زی‌توده در هر واحد از زی‌توده و زمان تعریف می‌شود نیز ممکن است با قطعیت کمتری تحت تأثیر کوبیدگی خاک قرار داشته باشد [۱۱]. نرخ رشد نسبی زیاد می‌تواند مناسب باشد، زیرا اجازه می‌دهد تا مقدار بیشتری زی‌توده در زمان کمتر تولید شود [۱۱] و به این ترتیب گیاه منابع بیشتری (نور، آب و مواد مغذی) به‌دست آورد و ظرفیت رقابتی بیشتری داشته باشد [۱۲، ۱۳]. نتایج تحقیق در گونه بلوط برگ‌ریز نشان داد که زی‌توده کل گونه بلوط برگ‌ریز تحت تأثیر هر دو عامل نور و کوبیدگی خاک قرار می‌گیرد [۱۴].

کوبیدگی خاک بر نسبت ریشه‌های نازک، طول ریشه و نسبت آوندهای چوبی ریشه نهال زبان‌گنجشک^۲ تأثیر منفی می‌گذارد و در نتیجه، کوبیدگی خاک اثر مهمی بر آناتومی و مورفولوژی ریشه در مرحله نونهالی زبان‌گنجشک دارد که عواقب آن در فیزیولوژی و رشد گیاه تأثیرگذار است [۱۵]. نتایج تحقیقی در سوئد نشان

1. *Quercus pyrenaica*
2. *Fraxinus ngustifolia*

زی‌توده کل نهال (رشد) و همه اجزای آن (اندام هوایی و ریشه) می‌شود.

مواد و روش‌ها

خاک طبیعی استفاده‌شده در این آزمایش از بخش نمخانه جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود واقع در نوشهر به گلخانه منتقل شده است تا حتی‌الامکان سعی شود خصوصیات خاک مورد بررسی با خصوصیات خاک منطقه یکسان باشد. خاک مورد آزمایش از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و به‌صورت مخلوطی از لایه A و B از یک منطقه برداشت شد تا تأثیر نوع خاک و بافت آن بر نتایج تحقیق حداقل شود. نهال‌ها در گلخانه در خاکی با بافت لومی تا لومی-رسی و رژیم رطوبتی ثابت رشد (بین ۳۰ تا ۴۰ درصد) داده شدند، تا از اثرهای بافت متفاوت خاک یا رطوبت متفاوت خاک بر کوبیدگی خاک، اجتناب شود [۷، ۹]. آزمایش‌ها در گلخانه با کنترل دما در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی انجام گرفت و آب مورد نیاز نهال‌ها به‌صورت روزانه و یکنواخت با استفاده از سیستم آبیاری بارانی تأمین شد. گلدان‌ها از جنس پلاستیک با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شدند تا از محدودیت فضا برای کاهش رشد ریشه جلوگیری شود [۱۵]. در این تحقیق چهار تیمار کوبیدگی خاک اعمال شد تا یک طیف پیوسته از کوبیدگی با استفاده از افزایش وزن مخصوص ظاهری ایجاد شود. یکی از تیمارها شاهد بود که فاقد کوبیدگی بود؛ بدین ترتیب سطح اول کوبیدگی (بدون کوبیدگی) با پر کردن گلدان با خاک کوبیده نشده و به‌صورت دستی اعمال شده است [۱۴]. سطح دوم تا سطح چهارم کوبیدگی به‌ترتیب با ۳، ۵ و ۷ ضربه چکش تراکم با ارتفاع سقوط ۲۰ سانتی‌متری و وزن ۲/۵ کیلوگرم در

داد که رشد ارتفاعی سالیانه نهال‌های پیسه‌آ، به‌دلیل کوبیدگی شایان توجه و همچنین صدمه به ریشه، ۲۵ درصد کاهش یافت [۱۶]. در اثر کوبیدگی خاک، هشت فاکتور تعریف‌شده رشد در نهال‌های کاج ساحلی^۱ و نوئل کانادایی^۲ کاهش یافتند. این فاکتورها شامل عمق ریشه، کل وزن گیاه، وزن شاخه‌ها، وزن ریشه، قطر ساقه، طول شاخه‌ها، زنده‌مانی نهال و نسبت وزن ریشه به اندام هوایی [۱۷] هستند. در بیشتر گیاهان رابطه معکوس غیرخطی بین درجه افزایش طولی ریشه و استحکام خاک وجود دارد [۱۸]. وقتی که ریشه‌ها وارد خاک با استحکام می‌شوند، نرخ افزایش طولی آن کاهش پیدا می‌کند، اما در مقابل گسترش شعاعی آن افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقی در جنگل‌های شمال ایران نشان داد که کوبیدگی خاک مسیرهای اسکیدرو هرچگونه تأثیر معنی‌داری بر نرخ جوانه‌زنی گونه‌های افرا و توسکا در مقایسه با تیمار شاهد نداشته، اما رشد ریشه نونهال‌ها در پاسخ به کوبیدگی خاک کاهش یافته و از حساسیت پذیری بیشتری برخوردار بوده است [۱۹]. شایان ذکر است که اثرهای کوبیدگی بر رویش ساقه نونهال‌ها در بین دو گونه متفاوت بود. تا کنون در ایران، هیچ مطالعه‌ای در مورد اثر کوبیدگی خاک بر سرعت رشد نسبی گونه‌های درختی و اجزای تشکیل‌دهنده آن در شرایط گلخانه‌ای انجام نگرفته است. در این مطالعه تطبیقی، نهال‌های گونه بلندمازو برای آزمایش تأثیر نوع گونه در پاسخ به کوبیدگی خاک، رشد داده شدند. این تحقیق در پی اثبات این فرضیه است که افزایش مقاومت به نفوذ خاک، سبب کاهش تمامی اندازه‌های نهال در قسمت بالای سطح زمین و زیر زمین (مورفولوژی) و

1. *Pinus contorta*
2. *Picea glauca*

برداشت شده و برای هر نهال، مقاومت به نفوذ خاک در هر ۰/۵ سانتی‌متر [۷] با استفاده از نفوذسنج دستی در سه تکرار اندازه‌گیری و برای هر گلدان، میانگین این سه قرائت، محاسبه شد. برداشت از هر نهال، با استخراج دقیق گیاه از گلدان و شستن ریشه در یک ظرف آب انجام گرفت. ریشه‌ها به آرامی خشک شدند و حداکثر طول ریشه و وزن تر نهال اندازه‌گیری و سپس برگ، ساقه و ریشه به تفکیک وزن شدند. اندام‌های تازه گیاه در کیسه‌های پلاستیکی به همراه کاغذ مرطوب قرار داده شد و به آزمایشگاه انتقال یافت و در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دست‌کم دو روز خشک شد تا زی‌توده خشک به دست آید [۷].

نرخ رشد نسبی براساس زی‌توده با استفاده از روش کلاسیک زیر محاسبه شد [۲۰]:

$$(2) \quad \text{نرخ رشد نسبی} = (M_2 - M_1) / (T_2 - T_1) = \text{زی‌توده}$$

در رابطه ۲، M_1 و M_2 به ترتیب وزن خشک گیاه اولیه و نهایی و T_1 و T_2 ابتدا و ابتدای دوره رشد است. ماده خشک نهایی برای هر نهال در برداشت بعد از دوره رشد، وزن خشک اولیه برای هر نهال از ضرب وزن تر اولیه در درصد ماده خشک و وزن تر اولیه برای هر بوته، از توزین هر نهال در زمان کاشت به دست آمد. محتوای ماده خشک (وزن خشک / وزن تر) از گیاهان (۱۰ تا ۱۵ نهال) در ابتدای آزمایش و همچنین متغیرهای مربوط به مورفولوژی و رشد بعد از پایان دوره رویش اندازه‌گیری و محاسبه شدند. این مطالعه در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار درجه کوبیدگی خاک در پنج تکرار انجام گرفت. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، نرمال بودن داده‌ها بررسی و از آن اطمینان حاصل شد. به منظور بررسی اثر کوبیدگی

گلخانه اعمال شد. تعداد کل گلدان‌ها ۲۰ عدد است که در چهار سطح کوبیدگی خاک با پنج تکرار مطالعه شد. به منظور تعیین وزن مخصوص ظاهری، بعد از اعمال ضربات چکش، نمونه‌ها با استفاده از سیلندرهای فولادی نمونه‌گیری (طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۵ سانتی‌متر) از داخل گلدان برداشت شدند. در مرحله بعد این 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 گرفت تا وزن مخصوص ظاهری خشک به دست آید [۷]. وزن مخصوص ظاهری خشک از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$(1) \quad \text{وزن خاک خشک} / \text{حجم کل خاک} = \text{وزن مخصوص ظاهری خاک خشک}$$

در رابطه ۱، وزن خاک خشک = وزن خاک و سیلندر در حالت خشک شده - وزن سیلندر خالی است و حجم استوانه همان حجم کل خاک است.

گونه پهن برگ انتخاب شده در این تحقیق، گونه بلندمازو^۱ است. در تاریخ ۲۵ آذر سال ۱۳۹۱ بذرهای با اندازه یکسان کاشته شدند و دو هفته پس از آن یعنی در تاریخ ۹ دی اولین بذرها شروع به جوانه زدن کردند.

در ۲۹ بهمن، نهال‌ها به گلدان‌های بزرگ‌تر منتقل شدند و تیمارهای کوبیدگی روی آنها اجرا شد، البته در گلدان اول تیمار کوبیدگی روی گلدان‌ها انجام نگرفت. شرایط گلخانه از نظر نور، آبیاری، رطوبت و دما برای همه نهال‌ها یکسان بود. برای کاشت مرحله دوم از نهال‌های تقریباً یکسان و هم‌اندازه استفاده شد تا از بروز خطا جلوگیری شود. در پایان دوره رشد، نهال‌ها

نرخ رشد نسبی براساس زی توده

با افزایش مقاومت به نفوذ خاک در مقایسه با تیمار شاهد، نرخ رشد نسبی براساس زی توده خشک کاهش می‌یابد (شکل ۱ الف). دوره رویش در این تحقیق ۱۷۶ روز در نظر گرفته شد که از اواخر بهمن شروع شد و تا اواخر مرداد سال بعد ادامه یافت. نرخ رشد نسبی در یک دوره ۱۷۶ روزه از ۰/۳۴ گرم در روز در تیمار شاهد به ۰/۱۲ گرم در روز در کوبیدگی شدید خاک کاهش یافت. آزمون گروه‌بندی میانگین‌ها (دانکن) نشان داد که بین تیمار شاهد و سه سطح کوبیدگی خاک از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۱ ب).

خاک بر متغیرهای رشد نهال از تجزیه واریانس یکطرفه استفاده شد. در صورتی که اثر هر عامل در تجزیه و تحلیل واریانس یکطرفه معنی‌دار باشد، از آزمون مقایسه‌ای چندگانه دانکن برای گروه‌بندی استفاده می‌شود. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 17.0 و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

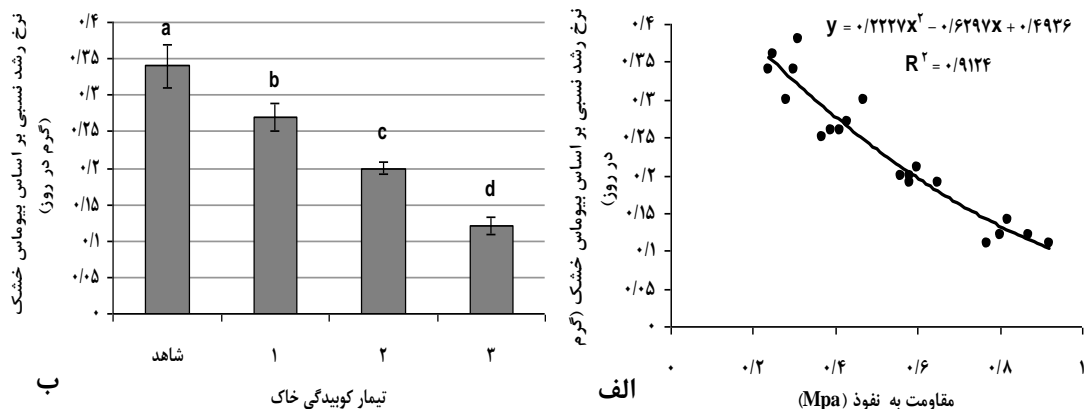
نتایج و بحث

کوبیدگی خاک

جدول ۱ میانگین و انحراف از معیار دو شاخص میانگین مقاومت به نفوذ و میانگین وزن مخصوص ظاهری خشک خاک در تیمارهای بررسی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. میانگین (\pm انحراف از معیار) شاخص‌های کوبیدگی خاک در تیمارهای بررسی شده

تیمار	میانگین مقاومت به نفوذ (Mpa)	میانگین وزن مخصوص ظاهری خشک (g.cm^{-3})
شاهد	0.27 ± 0.03	1.16 ± 0.14
۱	0.41 ± 0.04	1.29 ± 0.09
۲	0.59 ± 0.03	1.42 ± 0.11
۳	0.84 ± 0.06	1.51 ± 0.08

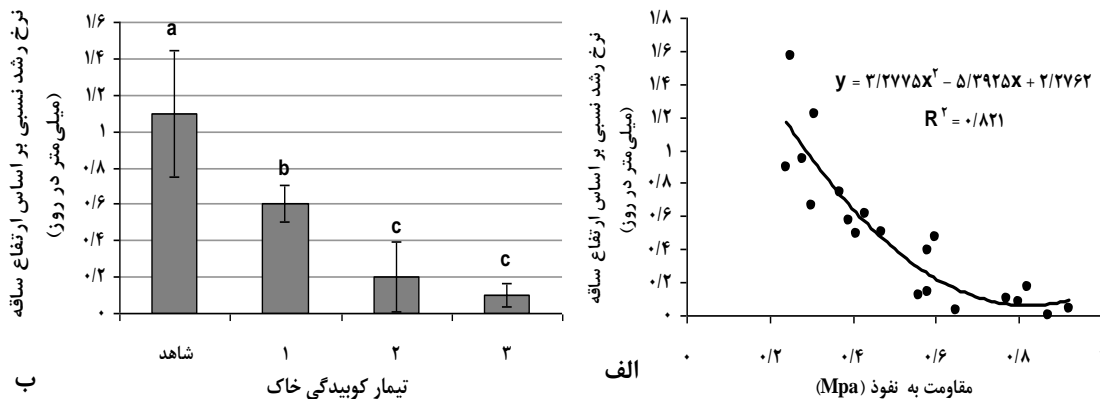


شکل ۱. نرخ رشد نسبی براساس زی توده خشک و ارتباط آن با افزایش مقاومت به نفوذ خاک (الف) و مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازۀ نشان داده شده) نرخ رشد نسبی با افزایش مقاومت به نفوذ خاک با آزمون دانکن (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانه معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. اعداد ۱، ۲، ۳ در شکل ب بیانگر سه تیمار سطح دوم تا چهارم است.

نرخ رشد نسبی براساس ارتفاع ساقه

با افزایش مقاومت به نفوذ خاک در مقایسه با تیمار شاهد، نرخ رشد نسبی براساس ارتفاع ساقه به صورت رابطه درجه دوم کاهش می‌یابد (شکل ۲ الف) به این صورت که در کوبیدگی کم و متوسط کاهش شدید دارد و بین کوبیدگی متوسط و شدید، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و پس از کاهش شدید در کوبیدگی کم و متوسط، مقدار کاهش ثابت می‌شود، یعنی بعد از کوبیدگی شدید، با افزایش کوبیدگی میزان کاهش نرخ رشد ثابت می‌ماند. دوره رویش در این تحقیق ۱۷۶ روز در نظر گرفته شد که از اواخر بهمن شروع شد و تا

اواخر مرداد سال بعد ادامه یافت. نرخ رشد نسبی در یک دوره ۱۷۶ روزه از ۱/۱ میلی‌متر در روز در تیمار شاهد به ۰/۱ میلی‌متر در کوبیدگی شدید خاک کاهش یافت. آزمون گروه‌بندی میانگین‌ها (دانکن) نشان داد که بین تیمار شاهد و سطح اول کوبیدگی خاک از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد و بین تیمار سطح سه و چهار کوبیدگی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد (شکل ۲ ب). جدول ۲ متغیرهای رشد اندازه‌گیری شده در گونه بلندمازو در تیمارهای مختلف کوبیدگی خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نرخ رشد نسبی براساس ارتفاع ساقه و ارتباط آن با افزایش مقاومت به نفوذ خاک (الف) و مقایسه میانگین و انحراف معیار (بازۀ نشان داده‌شده) نرخ رشد نسبی با افزایش مقاومت به نفوذ خاک با آزمون دانکن (ب). حروف لاتین نامتشابه نشانه معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. اعداد ۱، ۲، ۳ در شکل ب بیانگر سه تیمار سطح دوم تا چهارم است.

جدول ۲. متغیرهای رشد اندازه‌گیری شده در نهال‌ها در تیمارهای مختلف کوبیدگی خاک*

متغیر رشد	تیمار کوبیدگی	میانگین	انحراف از معیار	متغیر رشد	تیمار کوبیدگی	میانگین	انحراف از معیار
شاهد	۷۹/۷۷ ^a	۵/۴۷	طول	شاهد	۲۹/۳۲ ^a	۴/۰۶	۶/۱۲
وزن کل نهال (g)	۱	۶۴/۱۵ ^b	۲/۸۴	۱	۱۹/۰۶ ^b	۱/۵۳	۱/۷۸
	۲	۵۲/۱۵ ^c	۱/۷	۲	۱۴/۹ ^c	۱	۳/۳۵
	۳	۳۸/۲۸ ^d	۲/۵۴	۳	۱۲/۷۸ ^c	۱/۴۱	۱/۱۳
وزن کل خشک نهال (g)	شاهد	۶۵/۶۹ ^a	۵/۷۷	شاهد	۳۴/۲ ^a	۳/۲۷	۳/۳۶
	۱	۵۲/۵ ^b	۳/۱۵	۱	۱۷/۴ ^b	۱/۳۴	۴/۳۸
	۲	۴۰/۴ ^c	۱/۴۷	۲	۱۱/۶ ^c	۰/۸۹	۳/۶۲
	۳	۲۶/۹۸ ^d	۲/۰۷	۳	۱۰/۲ ^c	۰/۸۴	۲/۱۷

ادامه جدول ۲. متغیرهای رشد اندازه‌گیری شده در نهال‌ها در تیمارهای مختلف کوبیدگی خاک*

متغیر رشد	تیمار کوبیدگی	میانگین	انحراف از معیار	متغیر رشد	تیمار کوبیدگی	میانگین	انحراف از معیار	متغیر رشد	تیمار کوبیدگی	میانگین	انحراف از معیار
شاهد	۳/۹۹ ^a	۲/۴۷	شاهد	شاهد	۱۸/۸ ^a	۳/۱۱	شاهد	شاهد	۱۸/۸ ^a	۳/۹۹ ^a	۲/۴۷
وزن	۱	۲۶/۷ ^b	۱/۶۷	قطر ریشه	۱	۱۴/۸ ^b	۰/۸۴	قطر ریشه	۱	۲۶/۷ ^b	۱/۶۷
قسمت هوایی (g)	۲	۲۲/۱۲ ^c	۱/۷۹	اصلی (mm)	۲	۱۰/۸ ^c	۰/۸۴	اصلی (mm)	۲	۲۲/۱۲ ^c	۱/۷۹
۳	۱۷/۹۵ ^d	۱	شاهد	۳	۹/۸ ^c	۰/۸۴	شاهد	۳	۹/۸ ^c	۱۷/۹۵ ^d	۱
وزن	شاهد	۳۹/۳۲ ^a	۴/۰۸	شاهد	شاهد	۴۶/۷۸ ^a	۳/۸۲	شاهد	شاهد	۳۹/۳۲ ^a	۴/۰۸
خشک	۱	۲۹/۹۱ ^b	۳/۷۸	وزن کل	۱	۳۷/۴۶ ^b	۱/۷۴	وزن کل	۱	۲۹/۹۱ ^b	۳/۷۸
کل ریشه (g)	۲	۲۳/۷۴ ^c	۱/۷۵	ریشه (g)	۲	۳۰/۰۳ ^c	۲/۳۳	ریشه (g)	۲	۲۳/۷۴ ^c	۱/۷۵
۳	۱۵/۰ ^d	۲/۰۶	شاهد	۳	۲۰/۳۳ ^d	۱/۹۵	شاهد	۳	۱۵/۰ ^d	۲/۰۶	

* اعداد ۱، ۲، ۳ در جدول بیانگر سه تیمار سطح دوم تا چهارم کوبیدگی است. حروف لاتین نامتشابه نشانه معنی دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

مورفولوژی نهال (اندازه)

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس یکطرفه اثر افزایش مقاومت به نفوذ بر متغیرهای رشد نهال‌های گونه بلندمازو را نشان می‌دهد. براساس جدول تجزیه واریانس اثر افزایش مقاومت به نفوذ خاک بر همه متغیرهای رشد از نظر آماری معنی دار است. نتایج نشان داد که با افزایش شدت کوبیدگی خاک، همه متغیرهای مورفولوژیکی نهال بلندمازو به صورت شایان توجهی (جدول ۳، $P \leq 0,001$) کاهش یافت که از نظر آماری نیز معنی دار است. مقایسه مقادیر پاسخ متغیرهای مورفولوژیکی در تیمار شاهد (بدون کوبیدگی) نسبت به تیمار با کوبیدگی شدید، ۶۱ درصد کاهش میانگین طول ساقه (از ۲۸/۱ سانتی متر به ۱۰/۹ سانتی متر)، ۵۸ درصد کاهش میانگین قطر ساقه (از ۲۴ میلی متر تا ۱۰ میلی متر)، ۴۸ درصد کاهش میانگین طول برگ (از ۳۳/۶ سانتی متر به ۱۷/۶ سانتی متر)، ۵۶ درصد کاهش متوسط طول ریشه اصلی (۲۹/۳-۱۲/۸ سانتی متر)، ۴۸ درصد کاهش متوسط قطر اصلی ریشه (از ۱۸/۸ میلی متر به ۹/۸ میلی متر)، و ۷۲ درصد کاهش متوسط

طول ریشه جانبی (از ۵۲/۶ سانتی متر به ۱۴/۸

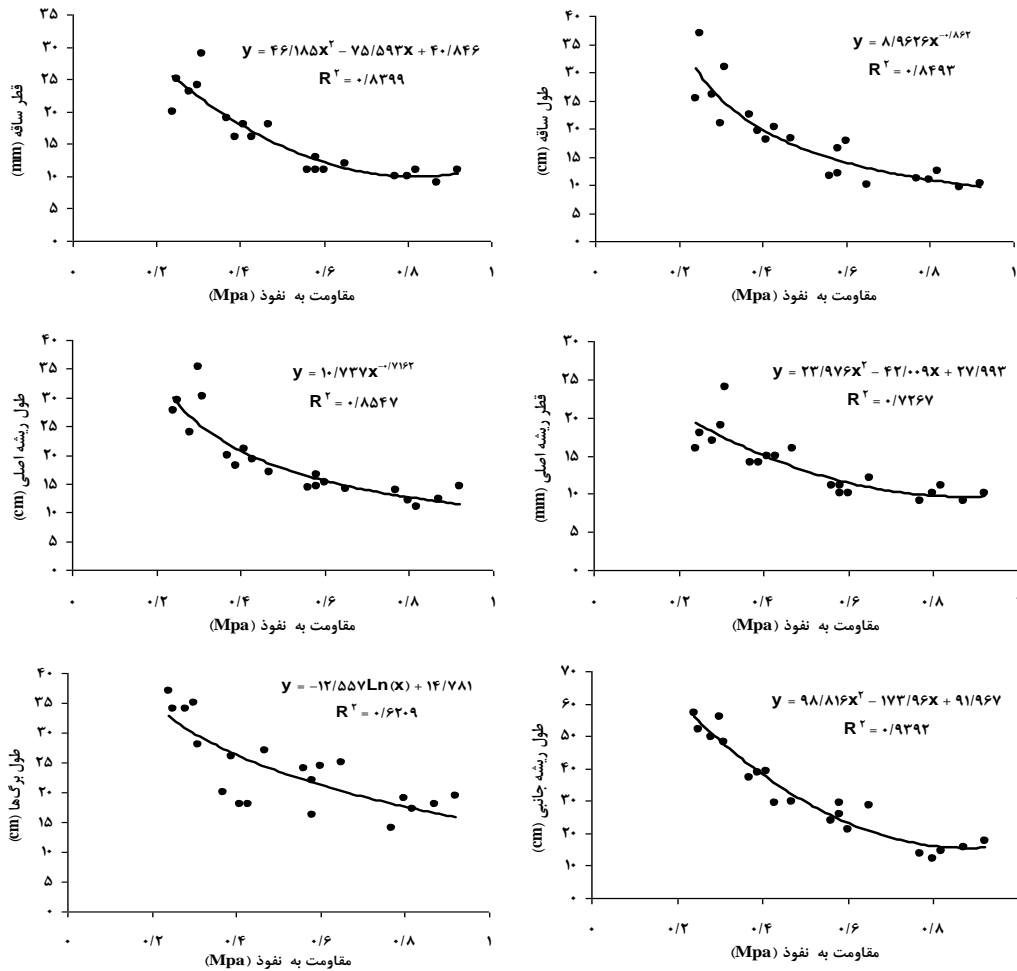
سانتی متر) را نشان داد.

شکل ۳ بیان می‌کند که ارتباط بین همه متغیرهای مورفولوژیکی و افزایش مقاومت به نفوذ خاک به صورت تابع نمایی کاهش یافته است که نشان می‌دهد بیشترین مقدار افزایش متغیرهای رشد در تیمار شاهد و کوبیدگی کم خاک رخ داده و با افزایش شدت کوبیدگی خاک، از میزان آن کم شده است. همچنین این روند در آزمون‌های گروه بندی میانگین‌ها در تیمارهای مختلف کوبیدگی مشاهده می‌شود که در آن، آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت چشمگیری در همه پاسخ‌های مورفولوژی بین تیمارهای شاهد، کوبیدگی کم و تیمار کوبیدگی متوسط خاک نشان داد، اما تفاوت آماری معنی داری بین تیمار کوبیدگی متوسط خاک و تیمار کوبیدگی شدید خاک، در هر یک از پاسخ‌های مورفولوژیکی به جز متوسط طول ریشه جانبی تشخیص داده نشد (شکل ۴). علاوه بر این، میانگین طول برگ در بین تیمارهای کوبیدگی با شدت کم، متوسط و زیاد خاک از نظر آماری دارای تفاوت معنی داری نیست (شکل ۴).

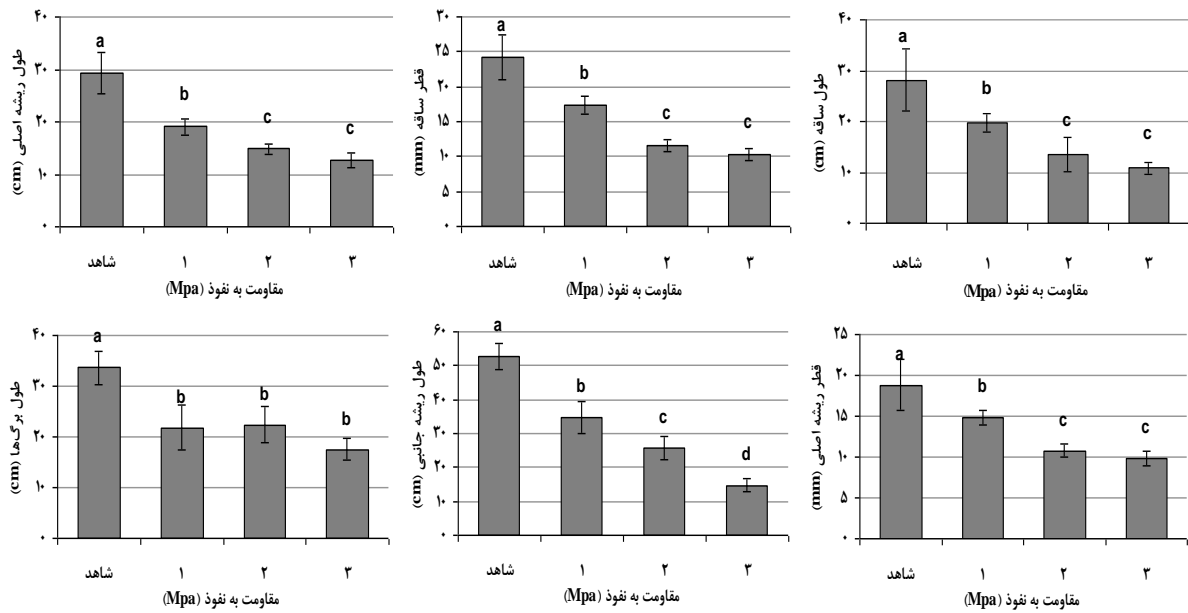
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس یکطرفه اثر افزایش مقاومت به نفوذ بر متغیرهای رشد نهال‌های گونه بلندمازو

منبع تغییرات	متغیر وابسته (متغیر رشد)	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مقاومت به نفوذ (Mpa)	طول ساقه (cm)	۸۷۵/۱	۳	۲۹۱/۷	۲۱/۹	**
	طول برگ‌ها (cm)	۷۰۵/۶	۳	۲۳۵/۲	۱۹/۵	**
	طول ریشه جانبی (cm)	۳۸۴۲/۴	۳	۱۲۸۰/۸	۹۷	**
	طول ریشه اصلی (cm)	۸۱۰	۳	۲۷۰	۴۹/۵	**
	قطر ساقه (mm)	۶۱۰/۵	۳	۲۰۳/۵	۵۸/۱	**
	قطر ریشه اصلی (mm)	۲۵۳/۸	۳	۸۴/۶	۲۸/۷	**
	وزن ریشه اصلی (g)	۷۵۸/۴	۳	۲۵۲/۸	۴۰/۶	**
	وزن خشک ریشه اصلی (g)	۶۰۹/۳	۳	۲۰۳/۱	۲۱/۹	**
	وزن ریشه جانبی (g)	۲۳۲/۵	۳	۷۷/۵	۴۰/۲	**
	وزن خشک ریشه جانبی (g)	۲۳۷/۶	۳	۷۹/۲	۵۰/۵	**
	وزن قسمت هوایی (g)	۶۲۴	۳	۲۰۸	۶۳/۶	**
	وزن خشک قسمت هوایی (g)	۵۷۴/۲	۳	۱۹۱/۴	۵۶/۲	**
	وزن کل نهال (g)	۴۶۶۶/۸	۳	۱۵۵۵/۶	۱۳۱/۵	**
	وزن کل خشک نهال (g)	۴۱۵۰/۸	۳	۱۳۸۳/۶	۱۱۱/۳	**

** معنی‌دار بودن متغیرها در سطح احتمال ۹۹ درصد.



شکل ۳. ارتباط بین مقاومت به نفوذ و متغیرهای رشد ساقه در گونه بلندمازو. در هر نمودار ضریب همبستگی و رابطه رگرسیونی آن نیز آورده شده است.



شکل ۴. مقایسه میانگین متغیرهای رشد با افزایش مقاومت به نفوذ خاک با آزمون دانکن. حروف لاتین نامتشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است. اعداد ۱، ۲، ۳ در شکل بیانگر سه تیمار سطح دوم تا چهارم کوبیدگی است.

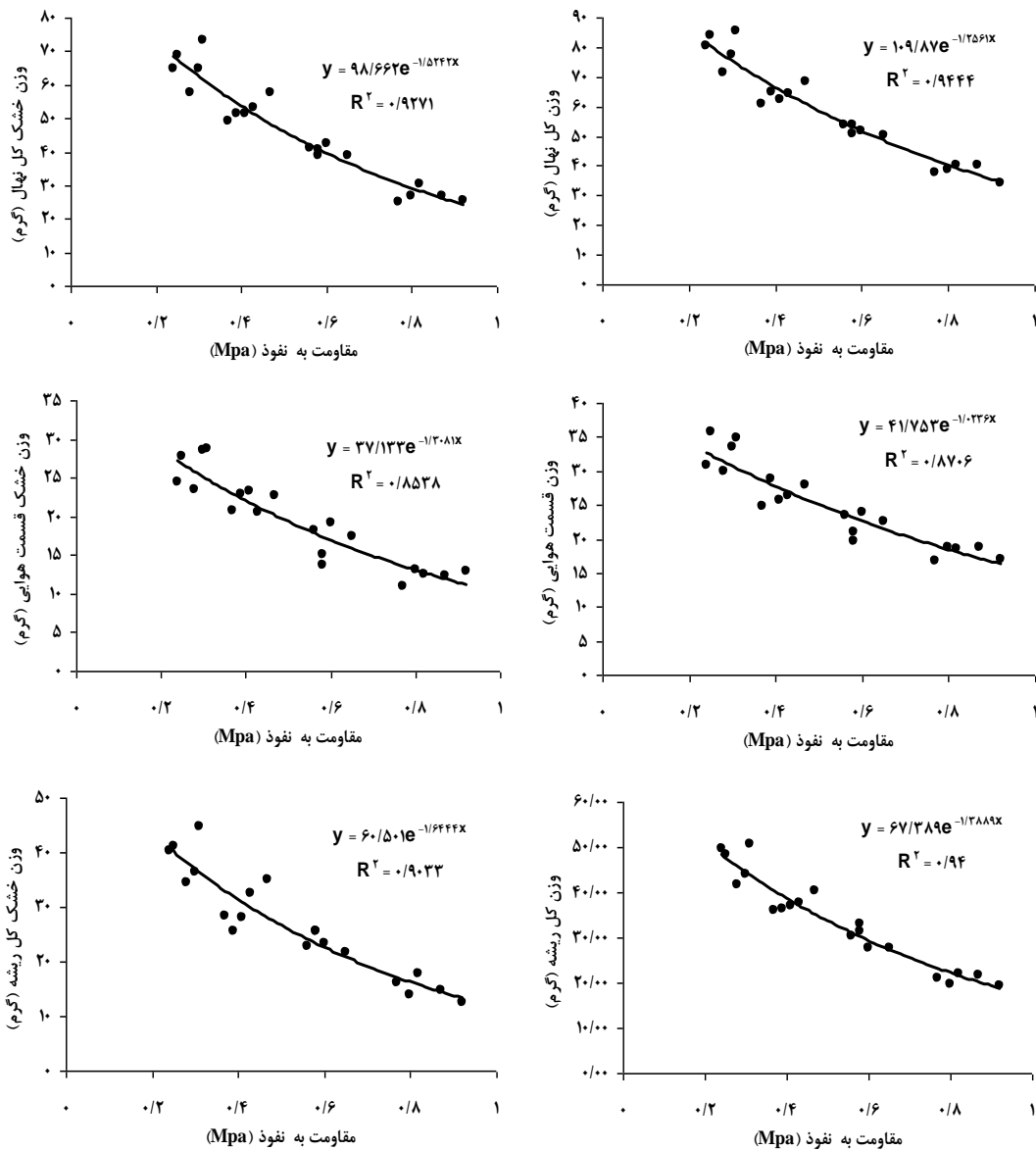
۶۳ درصد کاهش در متوسط زی توده خشک ریشه (از

۳۹/۳ گرم به ۱۴/۶ گرم) را نشان داد.

نتایج نشان داد که رابطه افزایش مقاومت به نفوذ خاک و پارامترهای زی توده (به‌عنوان مثال، تر و خشک: زی توده کل، زی توده اندام هوایی، زی توده کل ریشه) نزدیک به یک رابطه خطی است و بیان می‌کند که با افزایش شدت کوبیدگی، از میزان پارامترهای زی توده کاسته می‌شود (شکل ۵). نتایج آزمون چنددامنه‌ای دانکن نشان داد که بین میانگین کل زی توده (تر و خشک)، متوسط زی توده اندام هوایی (تر و خشک) و متوسط زی توده کل ریشه (تازه و خشک) از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد (جدول ۲).

رشد نهال (زی توده)

نتایج نشان داد که همه پارامترهای زی توده نهال بلندمازو با افزایش کوبیدگی خاک از نظر آماری به‌طور معنی‌داری (جدول ۳، $P \leq 0,001$) کاهش یافت. مقایسه مقادیر پارامترهای زی توده در تیمار شاهد (بدون کوبیدگی) نسبت به تیمار کوبیدگی شدید خاک، ۵۲ درصد کاهش در میانگین کل زی توده تر (از ۷۹/۸ گرم به ۳۸/۳ گرم)، ۵۹ درصد کاهش در متوسط زی توده خشک کل (از ۶۵/۹ گرم تا ۲۷ گرم)، ۴۶ درصد کاهش در میانگین زی توده اندام هوایی (از ۳۳ گرم به ۱۸ گرم)، ۵۳ درصد کاهش در متوسط زی توده خشک اندام هوایی (از ۲۶/۶ گرم به ۱۲/۴ گرم)، ۵۶ درصد کاهش در متوسط زی توده ریشه (از ۴۶/۸ گرم به ۲۰/۳ گرم) و



شکل ۵. ارتباط بین مقاومت به نفوذ و متغیرهای زی توده در گونه بلندمازو. در هر نمودار ضریب همبستگی و رابطه رگرسیونی آن نیز آورده شده است.

زی توده خشک ریشه های اصلی و جانبی شایان توجه بود و نسبت به تیمار شاهد، بین ۶۰ تا ۷۰ درصد کاهش یافت؛ بنابراین نتایج این استدلال را تأیید می کند که کوبیدگی خاک یک عامل مهم استرس است که می تواند از طریق کاهش تخصیص زی توده ریشه به طور معکوس بر توسعه اولیه نهال تأثیر زیادی داشته باشد [۱، ۷، ۹]. ریشه های اصلی و جانبی کوتاه تر با

نتایج نشان داد که با افزایش مقاومت به نفوذ خاک در مقایسه با تیمار شاهد، نرخ رشد نسبی براساس زی توده خشک و نرخ رشد نسبی براساس ارتفاع ساقه به صورت رابطه درجه دوم کاهش می یابد که منطبق بر یافته های محققان دیگر [۷، ۱۴] است. نتایج نشان داد که با افزایش مقاومت به نفوذ خاک، تغییرات مورفولوژیکی ریشه نهال، شامل طول ریشه جانبی و

می‌شود، می‌تواند کمبود بیش از حد آب خاک را کاهش دهد [۶، ۱۲]، به‌طوری که مقادیر زیاد رطوبت خاک، به‌طور معمول به میزان کمتری بر متغیرهای رشد نهال و زی‌توده تأثیرگذار است [۵]. علاوه بر این، کوبیدگی متوسط در خاک با بافت درشت‌دانه، می‌تواند سبب بهبود جذب مواد مغذی و آب شود [۴، ۷]. بنابراین در خاک درشت‌بافت‌تر (به‌عنوان مثال، مخلوطی از شن و ماسه و تورب) مربوط به تحقیق [۷]، با شدت متوسط کوبیدگی خاک ممکن است تماس ریشه با خاک تا حد زیادی تسهیل شود [۷، ۱۴]. درحالی که در مطالعه حاضر، کوبیدگی خاک با بافت لومی تا لومی-رسی، که کوبیدگی پذیرتر از خاک‌های درشت‌دانه ترند [۱۸] ممکن است به کمبود فضای آب و هوای خاک و کمبود بیشتر اکسیژن در خاک بینجامد که در نتیجه، سبب ایجاد استرس بیشتری بر کاهش رشد ریشه می‌شود [۱، ۳، ۸]. علاوه بر این، در خاک دارای بافت ریزدانه مانند رس و لای، کوبیدگی حتی در سطوح کم نیز ممکن است اثرهای منفی بر رشد گیاهان داشته باشد. علاوه بر این، اثرهای کوبیدگی بر رشد در مراحل سنی مختلف نهال‌ها متفاوت است. در مراحل اولیه رشد (نونهالی و نهالی) به‌واسطه افزایش ظرفیت نگهداری رطوبتی خاک تا حدودی مقدار رشد افزایش می‌یابد، زیرا در این مرحله بیشترین نیاز گیاهان را آب تشکیل می‌دهد. در گونه‌های درشت‌بذری مثل بلندمازو که میوه می‌تواند تا حدود یک سال نیاز غذایی نونهال و نهال را تأمین کند، کوبیدگی به‌واسطه افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، سبب افزایش رشد خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش کوبیدگی خاک، متغیرهای مورفولوژی و رشد نهال بلندمازو را در این مطالعه گلخانه‌ای به شدت تحت تأثیر قرار داده است

زی‌توده کمتر در خاک با کوبیدگی شدید در این مطالعه مطابق با یافته‌های قبلی است که بیان می‌دارد افزایش کوبیدگی خاک سبب کاهش رشد ریشه می‌شود [۲، ۴، ۱۴]. کاهش نفوذ ریشه، ممکن است سبب ایجاد محدودیت در دسترسی به مواد مغذی، آب و جذب آنها شود [۹]، که به افزایش کسری آب برگ، کاهش سرعت فتوسنتز، کاهش اندازه و رشد ساقه و همه نهال‌ها و حتی محدودیت بقای نهال در شرایط خشکسالی منجر می‌شود [۴، ۷، ۱۴].

نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه متغیرهای مورفولوژی و رشد نهال پاسخ سازگار و تا حد زیادی قابل پیش‌بینی به شدت‌های مختلف کوبیدگی خاک داشت، اثرهای معکوس کوبیدگی خاک (اثر مثبت بر افزایش متغیرهای رشد) به‌طور عمومی مشاهده نشد. برخی از تحقیقات نشان داده است که کوبیدگی خاک، در محدوده مقاومت به نفوذ بیش از مقدار اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر (مقادیر بیش از ۱ مگاپاسکال)، برای برخی گونه‌های درختی دارای اثر مثبت بر افزایش زی‌توده کل نهال بوده است [۷، ۱۴]. درحالی که زی‌توده در نهایت با افزایش مقاومت خاک کاهش یافت، ۹ گونه از ۱۷ گونه (۵۳ درصد) برگ‌ریز و همیشه‌سبز چوبی افزایش چشمگیری در مجموع زی‌توده با افزایش مقاومت به نفوذ خاک تا سطح متوسط (۰/۵ مگاپاسکال) را نشان دادند [۷]. تفاوت نتیجه ذکر شده با مطالعه حاضر ممکن است به دلیل تفاوت در بافت خاک و اثر آن بر استرس آب (کمبود آب) باشد. ظرفیت آب خاک در زمان کوبیدگی عاملی مهم و تعیین کننده در اثر اندازه کوبیدگی خاک بر مورفولوژی و رشد نهال است. از آنجا که رطوبت خاک سبب روان‌سازی ذرات خاک در محل نفوذ ریشه

و تأییدکننده فرضیه ماست که افزایش مقاومت به نفوذ خاک، سبب کاهش همه اندازه‌های نهال در قسمت بالای سطح زمین و زیر زمین (مورفولوژی) و زی‌توده کل نهال (رشد) و همه اجزای آن (یعنی زمینی: طول ساقه، قطر، طول برگ، زی‌توده اندام هوایی، برگ، زیر زمین: طول ریشه اصلی، قطر ریشه، طول ریشه جانبی و زی‌توده ریشه) شده است. متغیرهای مربوط به اندازه و زی‌توده نشان می‌دهد که نهال رشدیافته در تیمار شاهد (خاک بدون کوبیدگی) به‌طور معمول دارای حداقل دوبرابر اندازه و وزن نهال رشدیافته در تیمار خاک با کوبیدگی شدید است. این مورد برای همه نهال‌ها و برای بیشتر متغیرهای هوایی و زیرزمینی نهال صادق است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی اثر کوبیدگی خاک بر متغیرهای مورفولوژی نهال و رشد آن تحت شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده پرداخته است. مقاومت به نفوذ خاک که به‌عنوان یک متغیر برای کوبیدگی خاک در این تحقیق استفاده شده است، به تفاوت در بافت خاک و ظرفیت رطوبتی خاک بسیار حساس است که سبب می‌شود نتیجه‌گیری در زمینه افزایش کوبیدگی خاک به‌دلیل

شرایط مختلف خاک به چالش کشیده شود. درحالی که پیش‌بینی دقیق مقدار ترافیک عملیات بهره‌برداری و ورود ماشین‌آلات به عرصه جنگل برای تولید سطوح یکسان از مقاومت به نفوذ خاک برای نهال در حال رشد در خاک‌های با بافت‌های مختلف و ظرفیت آب ناممکن است، تغییرات مورفولوژی نهال و رشد در اثر افزایش استحکام خاک به‌راحتی تعمیم‌پذیر است. نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که در خاک‌های با بافت لوم تا بافت رس - لومی با شرایط بهینه آب و خاک و مقاومت به نفوذ تا ۱/۰ مگاپاسکال، افزایش کوبیدگی خاک نخست سبب تغییرات مورفولوژیکی بخش‌های اندام هوایی و زیرزمینی نهال‌های بلندمازو، و دوم، سبب کاهش متغیرهای رشد (زی‌توده) کل نهال و همه اجزای گیاه (به‌عنوان مثال اندام هوایی، ساقه، برگ، ریشه) می‌شود.

سپاسگزاری

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

References

- [1]. Kolowski, T.T. (1999). Soil Compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 4: 596–619.
- [2]. Conlin, T.S.S., and Van den Driessche, R., (1996). Short-term effects of soil compaction on growth of *Pinus contorta* seedlings. *Candaian Journal Forest Research*, 26: 727–739.
- [3]. Gómez, A., Powers, R.F., Singer, M.J., and Horwath, W.R. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following letter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 1334–1343.
- [4]. Bassett, I.E., Simcock, R.C., Mitchell, N.D. (2005). Consequences of soil compaction for seedling establishment: implications for natural regeneration and restoration. *Australian Ecology*, 30: 827–833.
- [5]. 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.
- [6]. Greacen, E.L., and Sands, R. (1980). A review of compaction of forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, 18: 163–189.
- [7]. Alameda, D., and Villar, R. (2009). Moderate soil compaction: implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil & Tillage Research*, 103: 325–331.
- [8]. Verdu, M., and Garcia-Fayos, P. (1996). Nucleation processes in a Mediterranean bird dispersed plant. *Functional Ecology*, 10: 275–280.
- [9]. Bejarano, L., Murillo, A.M., Villar, R., Quero, J.L., and Zamora, R. (2005). Crecimiento de plántulas de *Quercus pyrenaica* bajo distintos niveles de adición y compactación del suelo. *Resumen de Actas del 48 Congreso Forestal*. Zaragoza. 16pp.
- [10]. Lloret, F., Casanovas, C., and Peñuelas, J. (1999). Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root, shoot ratio, seed size and water and nitrogen use. *Functional Ecology*, 13: 210–216.
- [11]. Van Andel, J., and Biere, A. (1989). Ecological significance of variability in growth rate and plant productivity. In: Lambers, H., Cambridge, M.L., Konings, H., Pons, T.L. (Eds.), *Causes and Consequences of Variation in Growth Rate and Productivity of Higher Plants*. SPB Academic Publishers B.V., The Hague, pp. 257–267.
- [12]. Grime, J.P. (1977). Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *American Naturalist*, 982: 1169–1194.
- [13]. Poorter, H., and Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27: 595–607.
- [14]. 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.
- [15]. 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.

- [16]. Wasterlund, I. (1988). Damages and growth effects after selective mechanical clearing. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 3: 259–272.
- [17]. Corns, G.W. (1988). Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. *Canadian Journal of Forest Research*, 18: 75–84.
- [18]. Misra, R.K. and Gibbons, A.K. (1996). Growth and morphology of eucalypt seedling roots in relation to soil strength arising from compaction. *Plant and Soil*, 182: 1–11.
- [19]. Jamshidi, R. (2004). Effects of ground-based skidding on soil physical properties in skid trails and stand growth. Department of forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 75pp.
- [20]. Hunt, R. (1990). *Basic Growth Analysis*. Unwin Hyman Ltd., London, p. 112.