جنگل و فرآورده‌های چوب، مجلهٔ منابع طبیعی ایران
دورهٔ ۷۰، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۶
ص ۲۰۹-۲۲۰

تأثیر فشردگی خاک بر متغیرهای اندازه، زی‌توده و معماری نهال کاج سیاه در شرایط گلخانه‌ای

مقداد جورغلامی[1*]، آزاده خرمی‌زاده[2]

۱. دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۳

چکیده

افزایش مقاومت به نفوذ خاک با تحت تأثیر قرار دادن الگوهای انـدام هـوایی و زیرزمینـی، سـبب ایجـاد اثرهـای منفـی بـر متغیرهای رشد نهال‌های گونه‌های چوبی می‌شود. در این تحقیق، تأثیرات کوبیدگی خاک در خاکی با بافت لومی تـا رسـی-لومی با شرایط بهینه از نظر آب (آبیاری روزانه) در مقیاس پیوستهٔ مقاومت به نفوذ بر متغیرهای ریخت‌شناسی نهال (انـدازه)، رشد (زی‌توده)، تخصیص زی‌توده و معماری رشد نهال‌های گونهٔ کاج سیاه در چهار تیمار کوبیدگی خاک در شرایط گلخانه بررسی شد. با افزایش مقاومت به نفوذ خاک، متغیرهای رشد شامل اندازهٔ نهال (طول و قطر ساقه، طول بـرگ، طـول و قطـر ریشهٔ اصلی و طول ریشهٔ جانبی) و زی‌توده (اندام هوایی و ریشه) از نظر آماری به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. پارامترهـای رشد با افزایش کوبیدگی خاک به‌صورت رابطه‌ای غیرخطی تغییر یافتند. با افزایش مقاومت به نفوذ خاک، مقادیر مربـوط بـه اندام‌های زیرزمینی شامل زی‌توده (ریشهٔ اصلی و جانبی) به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. نتایج نشان داد کـه افـزایش تـراکم خاک سبب الگوهای متفاوت تخصیص رشد در اندام هوایی و زیرزمینی (نرخ زی‌تودهٔ ساقه، نرخ زی‌تودهٔ برگ، نرخ زی‌تودهٔ ریشه، نسبت زی‌تودهٔ ریشه به اندام هوایی، طول ساقهٔ خاص، طول ریشهٔ خاص و نسبت زی‌تودهٔ خشـک ریشـهٔ جـانبی بـه اصلی) و تغییرات معماری در نهال شد. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رشد ریشه و ارتفاع نهال کـاج سـیاه بـا هـر گونه افزایش مقاومت خاک محدود می‌شود و افزایش فشردگی خاک سبب تغییرات معنـی‌دار الگوهـای تخصـیص رشـد در اندام هوایی و زیر زمینی می‌شود.

واژگان کلیدی: تخصیص زی‌توده، ریخت‌شناسی نهال، معماری نهال، مقاومت به نفوذ خاک، نرخ رشد نسبی.

مقدمه

نگرانـی‌هـا در زمینـهٔ کوبیـدگی خـاک، جابـه‌جـایی، به‌هم‌خوردگی ظاهری و حاصلخیزی بلندمدت رویشـگاه در سـال‌هـای اخیـر گسـترش یافتـه اسـت. ورود ماشـین‌آلات مکانیزهٔ بهره‌برداری به توده‌های جنگلی، سبب کوبیده شـدن خاک‌ها می‌شود، بـه‌نـوعی کـه ممکـن اسـت مـانع رویـش درختان شود [۱]، هرچند کاهش رویش بسته به گونـه‌هـای مختلف درختی، نـوع خـاک، بافـت خـاک، عمـق خـاک و رطوبت خاک متفـاوت اسـت. محققـان، افـزایش مقاومـت خاک را شاخصی برای به‌هم‌خوردگی خسـارت‌آور در نظـر می‌گیرند. مقـدار مقاومـت حـدود ۳۰۰۰ کیلوپاسـکال یـا ۳ مگاپاسکال به‌عنوان آستانهٔ زیستی بالقوه ذکر شده اسـت کـه در این حد، رویش درخت تا حد زیادی کاهش می‌یابد [۲]. درجه و مقدار به‌هم‌خـوردگی خـاک‌هـای جنگلـی بـه‌طـور مستقیم با رویش آیندهٔ درختان [۳] مرتبط است. ریشه بایـد برای غلبه بر مقاومت خاک، قادر بـه نفـوذ از طریـق خـاک

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۲
Email: mjgholami@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

باشد. علاوه‌بر این، آنها به منافذ نیاز دارند، زیرا در خاک‌هایی با فشردگی زیاد، به‌دلیل کاهش تخلخل و محدود شدن اکسیژن، توانایی نفوذ به خاک کم شده و رشد ریشه مختل می‌شود [۴]. به‌دلیل کاهش فضاهای خالی خاک، کاهش اکسیژن و مقاومت زیاد خاک، جذب مواد مغذی و آب کاهش می‌یابد [۵]. اگر جرم مخصوص ظاهری در خاک رسی، لوم سیلتی و شنی به‌ترتیب بیشتر از ۱/۴۷، ۱/۷۵ و ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد، محدودکنندهٔ رشد است [۶]. رشد ریشه در خاکی با مقاومت به نفوذ ۲ مگاپاسکال کاهش می یابد و هنگامی‌که مقدار آن به ۳ مگاپاسکال می‌رسد، رشد متوقف می‌شود [۷]. رشد ریشهٔ نهال هنگامی‌که غلظت گاز اکسیژن زیر محدودهٔ ۶ تا ۱۰ درصد باشد، کاهش می یابد، بنابراین باید تخلخل به‌منظور حفظ انتشار هوای خوب، فعالیت‌های میکروبی و توسعهٔ ریشه، دست کم ۱۰ درصد باشد [۸]. شایان ذکر است که اثر تراکم خاک بر رشد گونه‌ها نیز متفاوت است [۹]. با این‌حال اثر تراکم بر رشد و بقا دارای ابهام است و به نوع خاک، رژیم آب و گونه بستگی دارد [۱۰].

محدودیت رشد ریشه به‌دلیل استحکام زیاد در خاک‌های کوبیده‌شده نیز ممکن است سبب کمبود آب گیاه شود. به‌طور کلی، فرض بر این است که فشردگی خاک، با توجه به افزایش مقاومت بستر نفوذ، بر رشد ریشه اثر منفی دارد [۹]. نتایج تحقیقی نشان داد که نفوذ ریشهٔ پسته با فشردگی خاک رابطهٔ منفی دارد [۱۱]. به‌طور مشابه، محققان در تحقیق دیگری دریافتند که در گونهٔ بلوط برگ‌ریز[1]، فشردگی خاک سبب کاهش طول ریشه می‌شود [۱۲].

فشردگی خاک علاوه‌بر تأثیر بر رشد ریشه، رشد گیاه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی، مشخص شده است که رشد گیاه رابطهٔ کاهشی با افزایش کوبیدگی خاک دارد. نتایج تحقیقی نشان داد که در گونهٔ *Cordyline australis*، رشد ساقه و ریشه به‌طور منفی تحت تأثیر تراکم خاک قرار می‌گیرد [۱۳]. نرخ رشد نسبی، که به‌عنوان افزایش زی‌توده در هر واحد از زی‌توده و زمان تعریف می‌شود نیز ممکن است تحت تأثیر فشردگی خاک قرار داشته باشد. نرخ رشد نسبی زیاد ممکن است مناسب باشد، زیرا اجازه می‌دهد زی‌تودهٔ بیشتری در زمان کمتری تولید شود [۱۴] که موجب می‌شود گیاه منابع بیشتری را (نور، آب و مواد مغذی) به‌دست آورد و ظرفیت رقابتی بیشتری داشته باشد [۱۵]. نتایج نشان داد که زی‌تودهٔ کل گونهٔ بلوط برگ‌ریز به‌طور مثبت از هر دو عامل نور و فشردگی خاک تأثیر می‌پذیرد [۱۶]. نتایج تحقیقی در مورد اثر کوبیدگی بر رشد ۱۷ گونهٔ همیشه‌سبز و خزان‌کنندهٔ اکوسیستم‌های مدیترانه‌ای در شرایط گلخانه‌ای، نشان داد که ۵۳ درصد گونه‌ها، با افزایش کوبیدگی خاک، زی‌تودهٔ کل بیشتری تولید می‌کنند که دلیل آن، تماس بیشتر بین ریشه – خاک است [۱۷]. فشردگی خاک به‌طور منفی نسبت ریشه‌های نازک، طول ریشه و نسبت آوندهای چوبی ریشهٔ نهال *Fraxinus angustifolia* را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، تراکم خاک اثر مهمی بر آناتومی و مورفولوژی ریشه در مرحلهٔ نونهالی دارد که پیامدهای آن در فیزیولوژی و رشد گیاه تأثیرگذار است [۱۸].

سوزنی‌برگان در میان اجتماع گیاهی جایگاه ویژه‌ای دارند. این گیاهان از نظر ارزش اقتصادی و جنبهٔ زیبایی اهمیت بسزایی دارند. کاج سیاه از گونه‌های سوزنی‌برگ کاشته‌شده در ایران است که می‌تواند به‌خوبی در اراضی درشت‌بافت و سنگلاخ مستقر شود و در برابر آلودگی هوا، گرما، سرما و خاک‌های قلیایی مقاوم است و شرایط ساحل دریا را به‌خوبی تحمل می‌کند. تا کنون در ایران، تحقیقی دربارهٔ اثر فشردگی خاک بر سرعت رشد نسبی گونه‌های درختی و اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن صورت نگرفته است. در این تحقیق تطبیقی، نهال‌های گونهٔ کاج سیاه برای آزمایش تأثیر نوع گونه در پاسخ به تراکم خاک، رشد داده شدند.

1. Quercus pyrenaica

Archive of SID

www.SID.ir

مواد و روش‌ها

خاک طبیعی به‌کاررفته در این آزمایش از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری بخش نمخانهٔ جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود در نوشهر به گلخانه منتقل شد تا سعی شود تا حد امکان خصوصیات خاک مورد بررسی با خصوصیات خاک منطقه یکسان باشد. نهال‌ها در گلخانه در خاک طبیعی منتقل‌شده از جنگل با بافت لومی تا لومی رسی و رژیم رطوبتی ثابت رشد داده شدند تا از تأثیرات بافت متفاوت خاک یا رطوبت متفاوت خاک بر کوبیدگی خاک، اجتناب شود [۱۶، ۱۷]. 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 [۱۸]. در این تحقیق چهار تیمار کوبیدگی خاک اعمال شد تا گستره‌ای پیوسته از کوبیدگی [۱۶] با استفاده از افزایش جرم مخصوص ظاهری ایجاد شود. یکی از تیمارها شاهد بود که فاقد کوبیدگی است؛ بدین ترتیب سطح اول کوبیدگی (بدون کوبیدگی) با پر کردن گلدان با خاک کوبیده‌نشده و به‌صورت دستی اعمال شد [۱۸]؛ سطح دوم تا چهارم کوبیدگی به‌ترتیب با ۳، ۵ و ۷ ضربهٔ چکش اعمال شد. تعداد کل گلدان‌ها ۲۰ عدد بود که در چهار سطح کوبیدگی خاک با پنج تکرار مطالعه شد.

در این تحقیق گونهٔ سوزنی‌برگ کاج سیاه[1] انتخاب شد. در ۲۵ آذر ۱۳۹۱ بذرها کاشته شدند و دو هفته پس از آن (۹ دی)، اولین بذرها شروع به جوانه زدن کردند. در ۲۹ بهمن، نهال‌ها به گلدان‌های بزرگ‌تر منتقل شده و تیمارهای کوبیدگی روی آنها اجرا شد. شرایط گلخانه از نظر نور، آبیاری، رطوبت و دما برای همهٔ نهال‌ها یکسان بود. برای کاشت مرحلهٔ دوم از نهال‌های به‌طور تقریبی یکسان و هم‌اندازه استفاده شد تا از بروز خطا جلوگیری شود. تیمارهای کوبیدگی عبارت‌اند از: تیمار اول سه ضربه به هر لایهٔ خاک؛ تیمار دوم پنج ضربه به هر لایهٔ خاک؛ و تیمار سوم هفت ضربه به هر لایهٔ خاک. دورهٔ رویش در این تحقیق ۱۷۶ روز در نظر گرفته شد؛ از اواخر بهمن تا اواخر مرداد سال بعد). در پایان دورهٔ رشد، نهال‌ها برداشت شده و برای هر نهال، 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 بوته، با استخراج دقیق گیاه از گلدان و شستن ریشه در یک ظرف آب انجام گرفت. ریشه‌ها به‌آرامی خشک شده و حداکثر طول ریشه و وزن تر بوته اندازه‌گیری و سپس برگ، ساقه و ریشه، وزن شدند. برگ‌های تازه در کیسه‌های پلاستیکی با کاغذ مرطوب ذخیره شده و در جعبهٔ خنکی قرار داده شده و پس از این اندازه‌گیری‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها و ریشه‌ها در ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت دست‌کم دو روز خشک شدند و زی‌تودهٔ خشک به‌دست آمد.

نرخ رشد نسبی براساس زی‌توده با استفاده از روش زیر محاسبه شد [۱۷، ۱۹]:

$$(M_2-M_1) / (T_2-T_1)$$

که در آن: M_2 و M_1 به‌ترتیب وزن خشک گیاه اولیه و نهایی و T_2-T_1 همان دورهٔ رشد است.

مادهٔ خشک نهایی برای هر بوته در برداشت بعد از دورهٔ رشد، وزن خشک اولیه برای هر بوته از ضرب وزن تر اولیه در درصد مادهٔ خشک و وزن تر اولیه برای هر بوته، از توزین هر نهال در زمان کاشت به‌دست آمد. محتوای مادهٔ خشک (وزن خشک / وزن تر) از گیاهان (۱۰-۱۵ نهال هر گونه) در ابتدای آزمایش و همچنین متغیرهای مربوط به مورفولوژی و رشد پس از پایان دورهٔ رویش اندازه‌گیری و محاسبه شد. این مطالعه در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ درجه کوبیدگی خاک در ۵ تکرار

1. Pinus nigra

Archive of SID

www.SID.ir

انجام گرفت. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، ابتدا با آزمون کولموگروف- اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی و از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل شد. به‌منظور بررسی اثر کوبیدگی خاک بر متغیرهای رشد نهال از تجزیهٔ واریانس یکطرفه استفاده شد. درصورتی‌که اثر هر عامل در تجزیه‌وتحلیل واریانس یکطرفه معنی‌دار باشد، از آزمون مقایسه‌ای چندگانهٔ دانکن برای گروه‌بندی استفاده می‌شود. تجزیهٔ آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 17.0 و رسم نمودارها با نرم‌افزار اکسل انجام گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ متوسط جرم مخصوص ظاهری و مقاومت به نفوذ خاک گلدان‌ها در تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. میانگین (± انحراف از معیار) شاخص‌های کوبیدگی خاک در تیمارهای مورد بررسی

تیمار	میانگین مقاومت به نفوذ (Mpa)	میانگین جرم مخصوص ظاهری ($g.cm^{-3}$)
شاهد	۰/۵۸ ± ۰/۰۳	۱/۱۲ ± ۰/۰۸
۱	۰/۷۱ ± ۰/۰۴	۱/۲۵ ± ۰/۰۷
۲	۰/۸۹ ± ۰/۰۳	۱/۳۸ ± ۰/۰۴
۳	۱/۱۳ ± ۰/۰۶	۱/۴۷ ± ۰/۰۵

نرخ رشد نسبی براساس زی‌توده و ارتفاع ساقه

با افزایش مقاومت به نفوذ خاک در مقایسه با تیمار شاهد، نرخ رشد نسبی براساس زی‌تودهٔ خشک به‌صورت تابع درجه دوم کاهنده، کاهش می‌یابد. نرخ رشد نسبی در یک دورهٔ ۱۷۶ روزه از ۰/۰۳ گرم در روز در تیمار شاهد به ۰/۰۱ در کوبیدگی شدید خاک کاهش می‌یابد. با افزایش مقاومت به نفوذ خاک در مقایسه با تیمار شاهد، نرخ رشد نسبی براساس ارتفاع ساقه به‌صورت رابطهٔ درجه دوم کاهش می‌یابد، به این صورت که در کوبیدگی کم و متوسط کاهش شدید داشته و در کوبیدگی زیاد به‌طور ثابت تغییر می‌یابد. نرخ رشد نسبی در یک دورهٔ ۱۷۶ روزه از ۰/۳ میلی‌متر در روز در تیمار شاهد به ۰/۰۵ در کوبیدگی شدید خاک کاهش می‌یابد.

ریخت‌شناسی نهال (اندازه)

ارتباط بین افزایش مقاومت به نفوذ خاک و متغیرهای مورفولوژی نهال (اندازه) نشان داد که چهار متغیر طول ساقه، طول برگ‌ها، طول ریشهٔ جانبی و قطر ریشهٔ اصلی روند مشابهی دارند. آزمون دانکن نشان داد که بین تیمار شاهد و سطح اول کوبیدگی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۲). همچنین بین تیمار سطح‌های دوم و سوم کوبیدگی در این متغیرها، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. آزمون دانکن نشان داد که در متغیر طول ریشهٔ اصلی، بین تیمار سطح دوم و سوم کوبیدگی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و در مورد قطر ساقه، بین تمامی تیمارهای کوبیدگی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود دارد. تجزیهٔ واریانس یکطرفهٔ متغیرهای مورفولوژی نهال (اندازه) و مقاومت به نفوذ خاک نشان داد که افزایش مقاومت به نفوذ خاک، اثر معنی‌داری بر افزایش متغیرهای اندازهٔ نهال کاج سیاه دارد.

نمودار ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و دو متغیر طول ساقه و طول ریشهٔ اصلی نشان داد که هر دو متغیر به‌صورت تابع نمایی کاهنده هستند (شکل ۱). با افزایش مقاومت به نفوذ، طول برگ‌ها در نهال‌های کاج سیاه به‌صورت تابع لگاریتمی کاهش‌یابنده است. ارتباط بین افزایش مقاومت به نفوذ و دو متغیر قطر ساقه و قطر ریشهٔ

Archive of SID

www.SID.ir

اصلی به‌صورت تابع درجه دوم کاهنده و ارتباط بین کوبیدگی خاک و متغیر طول ریشهٔ جانبی، به‌صورت تابع درجه دوم است، ولی دارای دو روند است؛ با افزایش کوبیدگی از سطح تیمار شاهد تا تیمار اول، طول ریشهٔ جانبی روند کاهشی دارد و با افزایش کوبیدگی از سطح دوم به سوم، طول ریشهٔ جانبی افزایش می‌یابد.

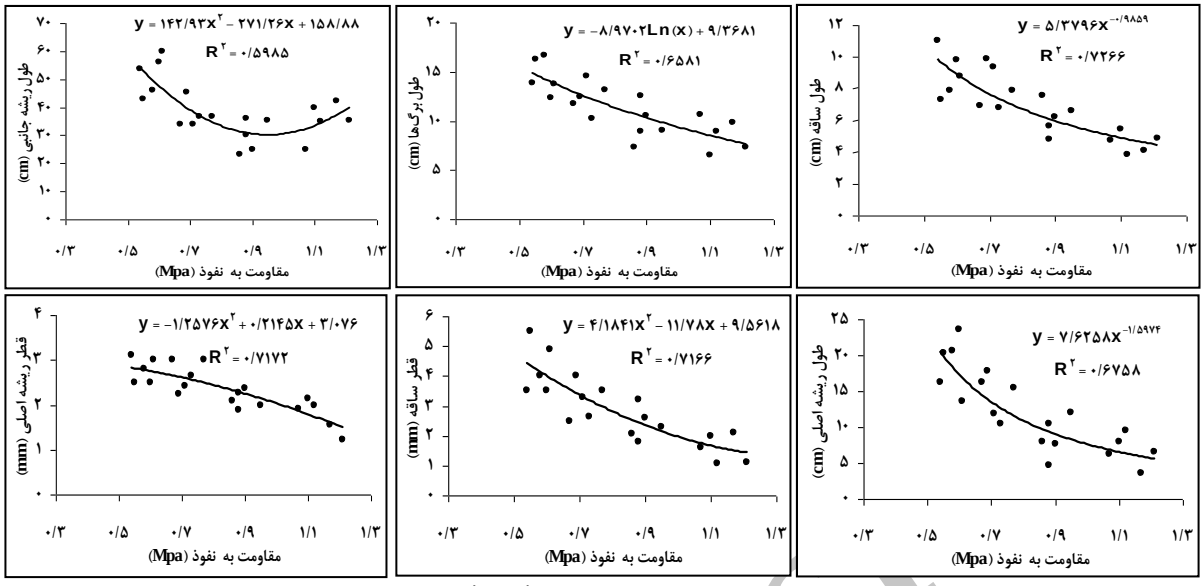
جدول ۲. نتایج تجزیهٔ واریانس یکطرفهٔ اثر افزایش مقاومت به نفوذ خاک بر متغیرهای رشد و مقایسهٔ میانگین متغیرهای رشد با افزایش مقاومت به نفوذ خاک با آزمون دانکن نهال‌های گونهٔ کاج سیاه **

پارامتر	شدت کوبیدگی				تجزیهٔ واریانس یکطرفه				
	میانگین سطح اول (شاهد)	میانگین سطح دوم	میانگین سطح سوم	میانگین سطح چهارم	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	F	*P*
طول ساقه (cm)	۸/۹۶ a	۸/۱۶ a	۶/۱۷ b	۴/۶۰ b	۵۸/۱۶	۳	۱۹/۳۹	۱۳/۷۹	۰/۰۰۰**
طول برگ‌ها (cm)	۱۴/۶ a	۱۲/۴۳ a	۹/۶۶ b	۸/۶۶ b	۱۰۹/۰۵	۳	۳۶/۳۵	۱۱/۲۹	۰/۰۰۰**
طول ریشهٔ جانبی (cm)	۵۱/۷۸ a	۳۷/۳۸ b	۲۹/۹۴ b	۳۴/۴۶ b	۱۳۰۰/۲۵	۳	۴۳۳/۴۲	۱۱/۶۴	۰/۰۰۰**
طول ریشهٔ اصلی (cm)	۱۸/۸۶ a	۱۴/۳۴ b	۸/۵۶ c	۶/۸۲ c	۴۵۵/۵۹	۳	۱۵۱/۸۶	۱۵/۹۲	۰/۰۰۰**
قطر ساقه (mm)	۴/۲۸ a	۳/۱۸ b	۲/۳۹ bc	۱/۵۸ c	۱۹/۹۳	۳	۶/۶۴	۱۵/۵۸	۰/۰۰۰**
قطر ریشهٔ اصلی (mm)	۲/۷۸ a	۲/۶۶ a	۲/۱۳ b	۱/۷۶ b	۳/۳۹	۳	۱/۱۳	۱۲/۲۶	۰/۰۰۰**
وزن ریشهٔ اصلی (g)	۲/۵۳ a	۱/۸۹ b	۱/۴۶ bc	۱/۲۱ c	۵/۰۴	۳	۱/۶۸	۱۴/۶۳	۰/۰۰۰**
وزن خشک ریشهٔ اصلی (g)	۰/۹۵ a	۰/۷۶ b	۰/۶۲ b	۰/۴۱ c	۰/۷۸	۳	۰/۲۶	۱۳/۸۵	۰/۰۰۰**
وزن ریشهٔ جانبی (g)	۳/۰۸ a	۲/۶۵ b	۲/۲۰ c	۲/۵۴ bc	۱/۹۶	۳	۰/۶۵	۷/۹۹	۰/۰۰۲**
وزن خشک ریشهٔ جانبی (g)	۱/۷۲ a	۱/۳۶ b	۱/۰۸ b	۱/۲۱ b	۱/۱۴	۳	۰/۳۸	۸/۲۲	۰/۰۰۲**
وزن ساقه (g)	۳/۵۷ a	۳/۰۰ ab	۲/۲۵ bc	۱/۷۴ c	۹/۸۳	۳	۳/۲۸	۸/۶۲	۰/۰۰۱**
وزن خشک ساقه (g)	۱/۰۹ a	۱/۰۴ a	۰/۸۳ b	۰/۷۰ b	۰/۵	۳	۰/۱۷	۹/۶۴	۰/۰۰۱**
وزن برگ‌ها (g)	۳/۷۵ a	۳/۳۰ ab	۲/۸۲ bc	۲/۲۵ c	۶/۲۱	۳	۲/۰۷	۱۰/۰۲	۰/۰۰۱**
وزن خشک برگ‌ها (g)	۲/۱۵ a	۱/۷۰ b	۱/۲۵ c	۰/۸۶ c	۴/۶۵	۳	۱/۵۵	۱۴/۸۷	۰/۰۰۰**
وزن قسمت هوایی (g)	۷/۳۳ a	۶/۳۰ a	۵/۰۷ b	۳/۹۹ c	۳۱/۵۶	۳	۱۰/۵۲	۱۷/۰۳	۰/۰۰۰**
وزن خشک قسمت هوایی (g)	۳/۲۳ a	۲/۷۴ b	۲/۰۸ c	۱/۵۶ d	۸/۱۲	۳	۲/۷۱	۲۲/۹۵	۰/۰۰۰**
وزن کل نهال (g)	۱۲/۹۴ a	۱۰/۸۳ b	۸/۷۴ c	۷/۷۴ c	۸۰/۱۶	۳	۲۶/۷۲	۲۵/۰۹	۰/۰۰۰**
وزن کل خشک نهال (g)	۵/۹۰ a	۴/۸۶ b	۳/۷۸ c	۳/۱۸ d	۲۱/۷۴	۳	۷/۲۵	۴۱/۷۷	۰/۰۰۰**
نسبت طول ساقه به وزن ساقه	۸/۲۴ a	۷/۹۸ a	۷/۵۲ a	۶/۹۱ a	۵/۱۵	۳	۱/۷۲	۰/۶۷	۰/۵۸۶ns
نسبت طول ریشه به وزن ریشه	۳۰/۴۶ a	۲۸/۲۵ a	۲۷/۷۱ a	۲۹/۵۲ a	۲۳/۱۸	۳	۷/۷۳	۰/۳۲	۰/۸۱۳ns
نرخ زی‌تودهٔ ریشه (RMR)	۰/۴۵ a	۰/۴۴ a	۰/۴۵ a	۰/۵۱ a	۰/۰۲	۳	۰/۰۱	۱/۹۳	۰/۱۶۵ns
نرخ زی‌تودهٔ ساقه (SMR)	۰/۱۸ a	۰/۲۱ a	۰/۲۲ a	۰/۲۲ a	۰/۰۱	۳	۰	۱/۳۸	۰/۲۸۴ns
نرخ زی‌تودهٔ برگ (LMR)	۰/۳۶ a	۰/۳۵ ab	۰/۳۳ ab	۰/۲۷ b	۰/۰۳	۳	۰/۰۱	۲/۵۴	۰/۰۹۳ns
وزن کل ریشه (g)	۵/۶۱ a	۴/۵۴ b	۳/۶۶ c	۳/۷۵ c	۱۲/۳	۳	۴/۱	۱۶/۶۶	۰/۰۰۰**
نسبت وزن ریشه به اندام هوایی	۰/۸۳ ab	۰/۷۸ b	۰/۸۲ ab	۱/۱۳ a	۰/۳۹	۳	۱/۱۳	۲/۴۷	۰/۱۰۰ns
نسبت ریشه جانبی به وزن خشک ریشه	۱/۸۶ b	۱/۸۶ b	۱/۷۷ b	۳/۰۷ a	۵/۷۸	۳	۱/۹۳	۶/۶۱	۰/۰۰۴**
نسبت طول ریشهٔ جانبی به اصلی	۲/۸۹ b	۲/۶۹ b	۳/۸۰ ab	۵/۹۳ a	۳۳/۰۸	۳	۱۱/۰۳	۳/۰۶	۰/۰۵۹ns
وزن خشک کل ریشه (g)	۲/۶۷ a	۲/۱۲ b	۱/۷۰ c	۱/۶۲ c	۳/۴۷	۳	۱/۱۶	۱۹/۱۶	۰/۰۰۰**

** حروف لاتین نامتشابه، بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و متغیرهای ریخت‌شناسی نهال (اندازه) در گونهٔ کاج سیاه. در هر نمودار ضریب همبستگی و رابطهٔ رگرسیونی آن نیز آورده شده است.

رشد نهال (زی‌توده)

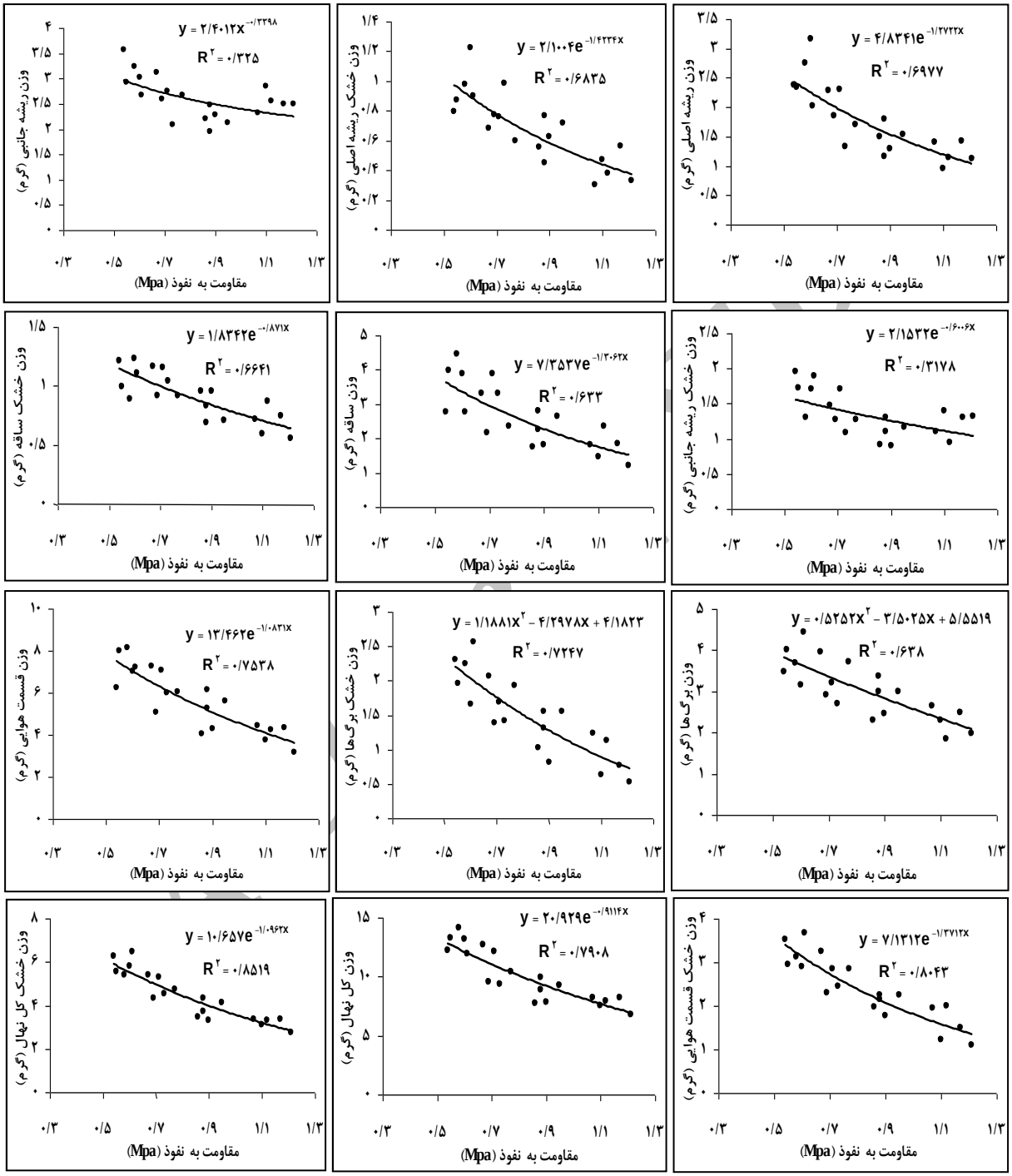
نتایج نشان داد رابطهٔ بین افزایش مقاومت به نفوذ خاک و دو متغیر وزن تر ریشهٔ اصلی و وزن خشک ریشهٔ اصلی، به‌ترتیب به‌صورت تابع توانی و نمایی کاهنده است، هرچند این روند کاهشی کند است (شکل ۲). نتایج نشان داد که زی‌تودهٔ تر و خشک ساقهٔ نهال کاج سیاه با افزایش مقدار کوبیدگی خاک به‌صورت تابع نمایی کاهنده و معنی‌دار از نظر آماری کاهش می‌یابد. رابطهٔ بین افزایش مقاومت خاک به نفوذ و زی‌تودهٔ تر و خشک برگ، به‌صورت تابع درجه دوم کاهنده و رابطهٔ بین افزایش کوبیدگی خاک و زی‌تودهٔ تر و خشک قسمت هوایی و کل نهال، به‌صورت تابع نمایی کاهنده است. نتایج آزمون چنددامنه‌ای دانکن نشان داد که بین میانگین وزن تر ریشهٔ اصلی، وزن تر ریشهٔ جانبی، وزن تر ساقه، وزن تر برگ، وزن خشک قسمت هوایی و وزن خشک کل نهال در تمامی تیمارها (تیمار شاهد و سه سطح کوبیدگی) از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

نتایج نشان داد که افزایش فشردگی خاک سبب ایجاد تغییرات شدید در متغیرهای ریخت‌شناسی و رشد نهال کاج سیاه شده است و تأییدکنندهٔ فرضیهٔ تحقیق است که افزایش مقاومت به نفوذ خاک، سبب کاهش تمامی اندازه‌های نهال در قسمت بالای سطح زمین و زیر زمین (ریخت‌شناسی) و زی‌تودهٔ کل نهال (رشد) و همهٔ اجزای آن (زمینی: طول ساقه، قطر، طول برگ، زی‌تودهٔ اندام هوایی، برگ، زیر زمین: طول ریشهٔ اصلی، قطر ریشه، زی‌تودهٔ ریشه) شده است که منطبق بر نتایج تحقیق محققان دیگر است [۵، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸]. هرچند نتایج نشان داده است که در بین متغیرهای ریخت‌شناسی، فقط متغیر طول ریشهٔ جانبی دارای دو روند است؛ با افزایش کوبیدگی از سطح تیمار شاهد تا تیمار اول، طول ریشهٔ جانبی دارای روند کاهشی است و با افزایش کوبیدگی از سطح دوم به سوم، طول ریشهٔ جانبی افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر نهال گونهٔ کاج سیاه، با افزایش کوبیدگی خاک، نوعی تعادل عملکردی را نشان می‌دهد، به این صورت که با افزایش سطوح کوبیدگی خاک و کاهش متغیر طول ریشهٔ اصلی، طول ریشه‌های جانبی افزایش می‌یابد تا به‌نوعی پاسخی مناسب به تنش فشردگی خاک نشان دهد [۱۹]. متغیرهای مربوط به ریخت‌شناسی

Archive of SID

www.SID.ir

(اندازه) نشان می‌دهد که نهال رشدیافته در تیمار خـاک بـا کوبیدگی شدید، به‌طـور معمـول دارای کـاهش ۳۴ تـا ۶۴ درصدی، نسبت به نهال رشدیافته در تیمار شـاهد (خـاک بدون کوبیدگی) است.



شکل ۲. ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و متغیرهای زی‌توده در گونهٔ کاج سیاه. در هر نمودار ضریب همبستگی و رابطهٔ رگرسیونی آن نیز آورده شده است

www.SID.ir

نتایج نشان داد تغییرات مورفولوژیکی سیستم ریشهٔ نهال، برای مثال، طول ریشهٔ جانبی و زی‌تودهٔ خشک ریشه‌های اصلی و جانبی به‌صورتی شایان توجه و با کاهش بین ۳۰ تا ۶۰ درصد (۵۶/۸ درصد کاهش در متوسط زی‌تودهٔ خشک ریشهٔ اصلی (از ۰/۹۵ گرم به ۰/۴۱ گرم)، ۲۹/۷ درصد کاهش در متوسط زی‌تودهٔ خشک ریشهٔ جانبی (از ۱/۷۲ گرم به ۱/۲۱ گرم) است. بنابراین نتایج ما، این استدلال را که فشردگی خاک، عامل مهم استرسی است که می‌تواند از طریق کاهش تخصیص زی‌تودهٔ ریشه، به‌طور معکوس بر توسعهٔ اولیهٔ نهال اثر چشمگیری داشته باشد، تأیید می‌کند [۱۷، ۱۹]. ریشه‌های اصلی و جانبی کوتاه تر با زی‌تودهٔ کمتر، در خاکی با کوبیدگی شدید در این تحقیق مطابق با یافته‌های قبلی است که بیان می‌دارد افزایش تراکم خاک سبب کاهش رشد ریشه می‌شود [۲، ۴، ۱۶، ۱۷]. کاهش نفوذ ریشه، خود ممکن است موجب دسترسی محدود به مواد مغذی و آب و جذب آنها [۱۱]، و در نتیجه افزایش کسری آب برگ، کاهش سرعت فتوسنتز، کاهش اندازه و رشد ساقه و تمام نهال‌ها و حتی محدودیت بقای نهال در شرایط خشکسالی شود [۵، ۱۷]. علاوه‌بر این، در خاک با بافت درشت‌تر (برای مثال، مخلوطی از شن، ماسه و تورب) با شدت متوسط فشردگی خاک، ممکن است تماس ریشه با خاک به‌مقدار زیادی تسهیل شود [۱۲، ۱۶]، درحالی‌که در تحقیق حاضر، تراکم خاک با بافت ریزدانه‌تر (بافت لومی و رسی–لومی)، که به‌راحتی تراکم‌پذیرتر از خاک درشت‌دانه‌ترند [۲، ۵، ۹]، ممکن است سبب کمبود فضای آب و هوای خاک و کمبود بیشتر اکسیژن در خاک و استرس بیشتری روی رشد ریشهٔ گیاه شود [۱۲، ۱۷].

معماری نهال (نسبت‌های تخصیص)

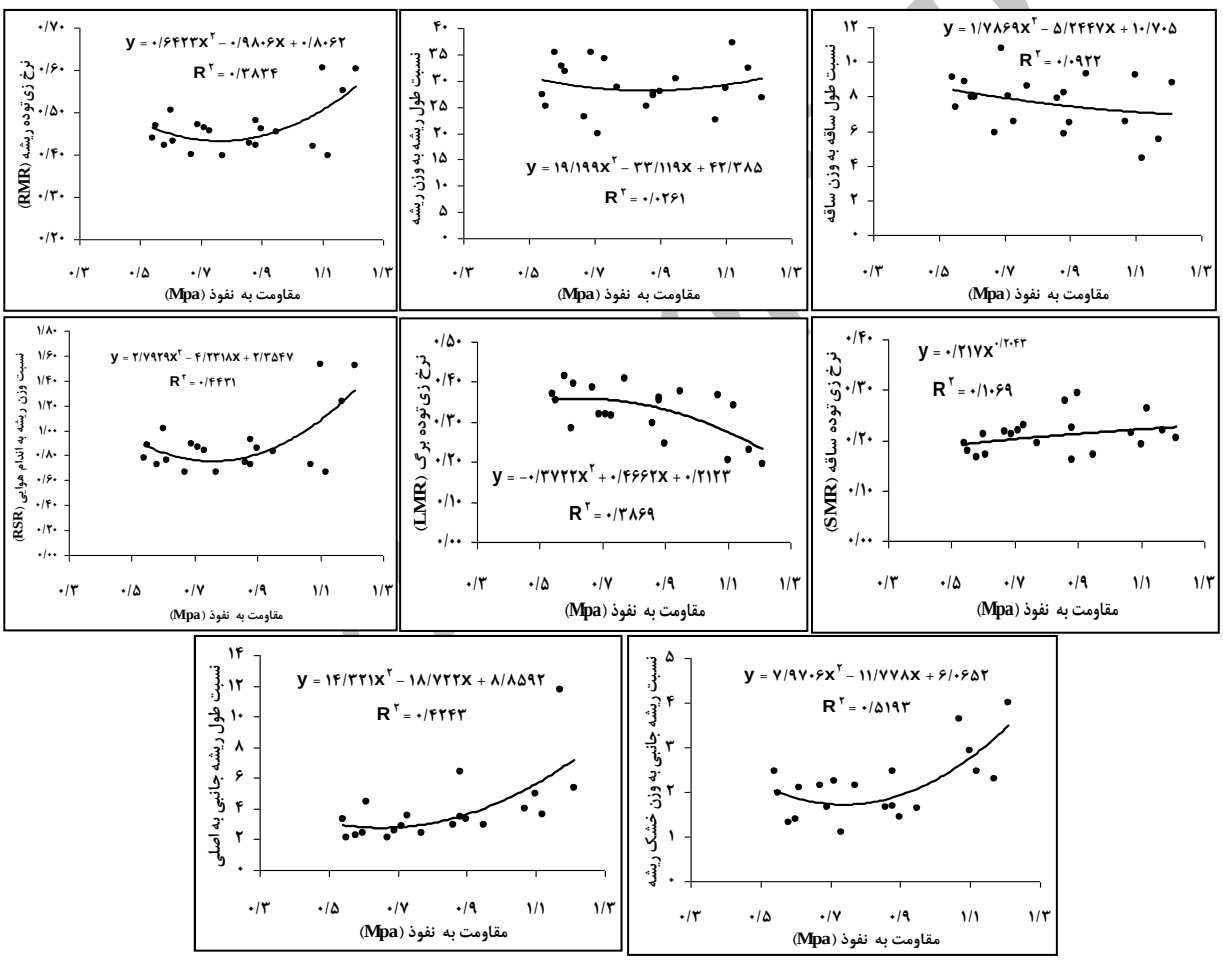
نتایج نشان داد که ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و متغیرهای نسبت طول ساقه به وزن ساقه، نسبت طول ریشه به وزن ریشه و نرخ زی‌تودهٔ ساقه از نظر آماری معنی‌دار نیست. با افزایش مقاومت به نفوذ خاک، نرخ زی‌تودهٔ ریشه ابتدا کاهش یافته و با افزایش کوبیدگی خاک، دارای روند افزایشی است؛ این رابطه از نظر آماری معنی‌دار است. هرچند، نرخ زی‌تودهٔ برگ با افزایش مقاومت به نفوذ خاک، ابتدا روند کاهشی دارد و با افزایش کوبیدگی از مقدار آن، با شدت بیشتری کاسته می‌شود که به‌صورت تابع درجه دوم بوده و از نظر آماری معنی‌دار است. با افزایش مقاومت به نفوذ خاک، سه متغیر نسبت وزن ریشه به اندام هوایی، نسبت ریشهٔ جانبی به وزن خشک ریشه و نسبت طول ریشهٔ جانبی به اصلی، روند مشابهی دارد؛ ابتدا با افزایش کوبیدگی کاهش یافتند و سپس روند افزایشی را نشان دادند که رابطهٔ آن به‌صورت تابع درجه دوم بوده و از نظر آماری نیز معنی‌دار است.

نتایج نشان داد که نرخ زی‌تودهٔ برگ یا نسبت زی‌تودهٔ برگ به زی‌تودهٔ کل خشک، با افزایش کوبیدگی خاک ابتدا کاهش ناچیزی یافته و با افزایش کوبیدگی خاک، این نسبت افزایش می‌یابد (شکل ۳). نرخ زی‌تودهٔ برگ در محدودهٔ ۳۶ تا ۲۷ درصد است و آزمون دانکن نشان داد که بین تیمارهای مختلف کوبیدگی، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد. نمودار پراکنش ابرنقاط ارتباط بین افزایش مقاومت به نفوذ خاک و نرخ زی‌تودهٔ ریشه نشان داد که به‌دلیل تماس بیشتر بین ریشه – خاک، با افزایش کوبیدگی خاک این نسبت افزایش می‌یابد (شکل ۳). نرخ زی‌تودهٔ ریشه در محدودهٔ ۴۴ تا ۵۱ درصد قرار دارد و آزمون دانکن نشان داد که بین تیمارهای مختلف کوبیدگی، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. نمودار پراکنش ابرنقاط ارتباط بین افزایش مقاومت به نفوذ خاک و نرخ زی‌تودهٔ ساقه نشان داد که با افزایش کوبیدگی خاک این نسبت افزایش می‌یابد (شکل ۳). نرخ زی‌تودهٔ ساقه در محدودهٔ ۱۸ تا ۲۲ درصد قرار دارد و آزمون دانکن نشان داد که بین تیمارهای مختلف کوبیدگی، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

Archive of SID

www.SID.ir

بررسی تخصیص زی‌توده و ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و نسبت زی‌تودهٔ ریشه به اندام هوایی در گونهٔ کاج سیاه نشان داد که با افزایش کوبیدگی این نسبت ابتدا چندان تغییر نمی‌کند و در گروه کوبیدگی متوسط و بالای خاک، به‌تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۳). نسبت زی‌تودهٔ ریشه به اندام هوایی در محدوده‌ای بین ۰/۷۸ در تیمار شاهد خاک تا ۱/۱۳ در خاک با درجهٔ کوبیدگی شدید قرار دارد و آزمون دانکن نشان داد که بین تیمارهای مختلف کوبیدگی، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد. نمودار ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و نسبت ریشهٔ جانبی به زی‌تودهٔ خشک ریشه (شکل ۳) نشان می‌دهد که با افزایش کوبیدگی خاک از تیمار شاهد به کوبیدگی کم، نسبت ریشهٔ جانبی به زی‌تودهٔ خشک ریشه ابتدا کاهش یافته و با افزایش کوبیدگی خاک در دو گروه متوسط و زیاد این نسبت افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سطح تماس ریشه- خاک است.



شکل ۳. ارتباط بین مقاومت به نفوذ خاک و متغیرهای تخصیص زی‌توده در گونهٔ کاج سیاه. در هر نمودار ضریب همبستگی و رابطهٔ رگرسیونی آن نیز آورده شده است.

نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش تراکم خاک موجب الگوهای متفاوت تخصیص رشد در اندام هوایی و زیرزمینی شده و به تغییرات معماری در نهال کاج سیاه منجر شده است. با توجه به اینکه عامل محدودکنندهٔ رشد نهال‌های کاج سیاه در زیر زمین (برای مثال آب و مواد مغذی) ناشی از فشردگی خاک است، تخصیص زی‌توده در ریشه، تعادلی را میان برگ، ساقه و ریشه برقرار خواهد کرد و این اندام‌ها را قادر می‌سازد که از طریق تطبیق فعالیت‌های

www.SID.ir

فیزیولوژیکی خود در سطح کل گیاه به‌صورت بهینه عمل کنند [۵، ۱۹]. در نتیجه، گیاهان به‌طور معمول پدیدهٔ خشکی را با کاهش زی‌تودهٔ ساقه و افزایش زی‌تودهٔ ریشه پاسخ می‌دهند [۷، ۱۹] که موجب افزایش کارایی در جذب آب و مواد غذایی می‌شود [۱۲]. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد که با افزایش کوبیدگی خاک، تخصیص زی‌توده (نسبت زی‌تودهٔ ریشه به اندام هوایی) در گونهٔ کاج سیاه، ابتدا چندان تغییر نمی‌کند و در گروه کوبیدگی متوسط و بالای خاک، به‌تدریج افزایش می‌یابد. آزمون دانکن نشان داد که بین تیمارهای مختلف کوبیدگی، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود دارد. تحقیق حاضر نشان داد که پاسخ گیاه در تخصیص زی‌توده مثبت بوده است. براساس نتایج تحقیقات قبلی گیاهان تحت تنش‌های محیط زیستی یا فیزیکی (برای مثال حذف برگ یا ریشه)، به‌سرعت قادر به بازگرداندن الگوهای تخصیص برای کنترل سطح هستند [۵، ۱۰، ۱۲، ۱۹].

نتیجه‌گیری

مقاومت به نفوذ خاک که به‌منزلهٔ متغیری برای فشردگی خاک در این تحقیق استفاده شده، به تفاوت در بافت خاک و ظرفیت نگهداری آب در خاک بسیار حساس است. با توجه به اینکه تحقیق حاضر در شرایط گلخانه‌ای و با ثابت نگه‌داشتن سایر شرایط از جمله رطوبت و نور انجام گرفته است، در اکوسیستم‌های جنگلی، پیش‌بینی دقیق حجم تردد ماشین‌های بهره‌برداری و ورود ماشین‌آلات به عرصهٔ جنگل برای تولید سطوح یکسان از مقاومت به نفوذ خاک برای نهال در حال رشد در خاک‌های با بافت‌های مختلف و ظرفیت آب بسیار دشوار است. به‌عبارت دیگر، برای دستیابی به نتایج گسترده، باید تعداد تیمارها را از نظر بافت خاک، نوع گیاه، اشکال فشردگی و میزان فشردگی و ... افزایش داد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در خاک‌های با بافت لوم به بافت خاک رسی–لومی با شرایط بهینه از نظر آب و خاک، افزایش فشردگی خاک سبب تغییرات مورفولوژیکی بخش‌های اندام هوایی و زیرزمینی نهال‌های کاج سیاه، کاهش متغیرهای رشد (زی‌توده) کل نهال و همهٔ اجزای گیاه (برای مثال اندام هوایی، ساقه، برگ و ریشه) و افزایش نسبت تخصیص زی‌توده (نسبت زی‌تودهٔ ریشه به اندام هوایی) می‌شود.

سپاسگزاری

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

References

[1]. Landsberg, J.D., Miller, R.E., Anderson, H.W., and Tepp, J.S. (2003). Bulk density and soil resistance to penetration as affected by commercial thinning in northeastern Washington. Res. Pap. PNW-RP-551. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland, OR. 35p.

[2]. Powers, R.F., Tiarks, A.E., and Boyle, J.R. (1998). Assessing soil quality: practicable standards for sustainable forest productivity in the United States. Soil Science Society of America. The contribution of soil science to the development of an implementation of criteria and indicators of sustainable forest management. SSSA special publication no. 53. p. 53-80.

[3]. Parker, R.T., Maguire, D.A., Marshall, D.D., and Cochran, P. (2007). Ponderosa pine growth response to soil strength in the volcanic ash soils of central Oregon. Western Journal of Applied Forestry, 22(2): 134-141.

[4]. Greacen, E.L., and Sands, R. (1980). Compaction of forest soils, A Review. Australian Journal of Soil Research, 18(2): 163-189.

[5]. Kolowski, T.T. (1999). Soil Compaction and Growth of Woody Plants. Scandinavian Journal of Forest Research, 14(6): 596-619.

Archive of SID

www.SID.ir

[6]. Arshad M.A., Lowery, B., and Grossman, B. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.) Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America Journal, 49: 123-143.

[7]. Whalley, W.R., Dumitru, E., and Dexter, A.R. (1995). Biological effects of soil compaction. Soil and Tillage Research, 35: 53-68.

[8]. De Bruycker, P. (1984). Invloed van de betreding op bodem en doorworteling in het Zoniënbos. In: Langohr, R., Joris, S., (Eds.) Journée à thème de la société belge de Pédologie. Brussels, Belgium.

[9]. Godefroid, S., and Koedam, N. (2004). Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. Biological Conservation, 119: 207-219.

[10]. Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120: 201-214.

[11]. Verdu, M., and Garcıa-Fayos, P. (1996). Nucleation processes in a Mediterranean bird-dispersed plant. Functional Ecolology, 10(2): 275-280.

[12]. Bejarano, L., Murillo, A.M., Villar, R., Quero, J.L., and Zamora, R. (2005). Crecimiento de pla´ ntulas de Quercus pyrenaica bajo distintos niveles de adiacio´n y compactacio ´n del suelo. Resumen de Actas del 48 Congreso Forestal. Zaragoza. 16pp.

[13]. Pérez-Ramos, I.M., Gómez-Aparicio, L., Villar, R., García, L.V., and Marañón, T. (2010). Seedling growth and morphology of three oak species along field resource gradients and seed-mass variation: a seedling-age-dependent response. Journal of Vegetation Science, 21(3): 419-437.

[14]. 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 Publishins B.V., The Hague.

[15]. 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.

[16]. 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.

[17]. 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.

[18]. Alameda, D., and Villar, R. (2012). Linking root traits to plant physiology and growth in Fraxinus angustifolia Vahl. seedlings under soil compaction conditions. Environmentsl and Experimental Botany, 79: 49-57.

[19]. Poorter, H., and Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO2, nutrients and water: a quantitative review. Australian Journal of Plant Physiology, 27: 595-607.

Archive of SID

www.SID.ir

Effects of soil compaction on morphology, biomass and architecture variables on black pine (*Pinus nigra*) in greenhouse situations

M. Jourgholami*; Assoc. Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

A. Khoramizadeh; M.Sc. Student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

(Received: 12 June 2015, Accepted: 02 February 2016)

Archive of SID

ABSTRACT

Increasing soil strength would adversely affect the seedling morphology (size) and growth (biomass) by changing the above- and below-ground patterns. In this research, the effects of soil compaction were explored in a loam to clay-loam textured soil with optimal conditions of water on a continuous scale on growth responses of the *Pinus nigra* in four intensity treatments of soil compaction (the lowest intensity of compaction, low, moderate, and high intensities of compaction). Results showed that the above- and below-ground metrics of seedling size (i.e., stem length and diameter, leaf length, main root length and diameter, and lateral root length) and biomass (i.e., total, shoot, and total root) were negatively affected by soil compaction. Seedling sizes and growth parameters responded non-linearly by increasing soil strength. Increasing soil strength changed the above- and below-ground biomass allocation patterns (i.e., root mass ratio, root: shoot ratio, specific root length) resulting in unchanged seedling architecture. It is concluded that growth of roots and heights of black pine seedlings are restricted with any increase in soil strength. The increasing soil compaction causes significant differential growth allocation patterns to above- and below-ground portions resulting in architectural changes to the seedlings.

Keywords: Penetration resistance, Relative growth rate, Seedling morphology, Biomass allocation, Seedling architecture.

* Corresponding Author, Email: mjgholami@ut.ac.ir, Tel: +982632249312

www.SID.ir