



## تأثیر سن نهال کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) و تنش‌های رطوبتی بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه

محمد عسگری<sup>۱</sup>، محسن جوانمیری پور<sup>۲</sup>، احسان عبدی<sup>۳\*</sup>، وحید اعتماد<sup>۴</sup>، خالد احمدالی<sup>۵</sup>، سلمان زارع<sup>۵</sup> و اکرم افشار صدر<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی فقیه دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته دکتری جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۵</sup> استادیار، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۶</sup> کارشناس ارشد جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۴)

### چکیده

**مقدمه:** از ویژگی‌های مکانیکی ریشه می‌توان به‌عنوان عامل مهمی در انتخاب گونه‌های درختی در جنگلکاری مناطق خشک با هدف تثبیت خاک استفاده کرد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌های گونه کاج تهران در سنین مختلف رویشی (نهال‌های یک، سه و پنج‌ساله) و تحت تنش‌های مختلف آبی (سبک، متوسط و شدید) در استان تهران است.

**مواد و روش‌ها:** نهال‌ها پس از برآورد نیاز آبی در سنین مختلف به‌مدت یک سال، تحت تیمار سطوح تنش آبی مختلف قرار گرفتند و سپس ویژگی‌های مکانیکی ریشه بررسی شد. به‌منظور ارزیابی اثر تنش‌های آبی بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌های نهال کاج تهران، از بین هر تیمار سن و تنش (در مجموع نه تیمار) که هر یک ده تکرار داشتند، پنج اصله نهال به روش کاملاً تصادفی انتخاب و کدگذاری شد. در ابتدا برخی خصوصیات مربوط به ریشه مانند قطر ریشه‌ها، طول کل ریشه‌ها، طول ریشه‌های نازک و طول بلندترین ریشه اندازه‌گیری شدند. سپس نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه‌ها با استفاده از دستگاه اینسترون استاندارد اندازه‌گیری و ثبت شدند.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی ریشه براساس رابطه توانی مثبت و مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه براساس رابطه توانی منفی تغییر می‌یابد. همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که در هر سن مشخص، هرچه سطح تنش آبی بیشتر باشد، مجموع طول ریشه‌ها و تراکم طولی سیستم ریشه افزایش می‌یابد. استفاده از آنالیز کوواریانس نشان داد که نتایج مقایسه میانگین میان یک‌سالگی و تنش خشکی سبک، سه‌سالگی و تنش متوسط و پنج‌سالگی و تنش شدید به احتمال ۹۵ درصد معنی‌دار است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ویژگی‌های مکانیکی ریشه را می‌توان به‌عنوان عامل مهمی در انتخاب نهال کاج در جنگلکاری مناطق خشک برای اهداف زیست‌مهندسی خاک به‌کار گرفت؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود این ویژگی‌ها در انتخاب گونه‌های جنگلکاری با هدف تثبیت خاک در نظر گرفته شوند.

**واژه‌های کلیدی:** تنش آبی، ریشه، سن، کاج تهران، ویژگی‌های مکانیکی.

این بوم‌سازگان‌هاست (Gobinath et al., 2021). از این‌رو پژوهشگران به دنبال معرفی روش‌هایی برای بهره‌گیری از ویژگی‌های زیست‌مهندسی گیاهان از قبیل مسلح‌سازی شیب و تثبیت دامنه هستند. در سال‌های اخیر بیشتر توجه آنها به استفاده از پوشش گیاهی برای تثبیت، کنترل فرسایش، کنترل لغزش‌های سطحی و ناپایداری دامنه معطوف شده است که علم زیست‌مهندسی خاک خوانده می‌شود (Abdi & Majnounian, 2018). سیستم ریشه تأثیر مهمی در کنترل فرسایش دارد (Moresi et al., 2019) و ریشه‌ها از طریق تحمل و انتقال تنش برشی ایجادشده در خاک به مقاومت کششی موجب افزایش مقاومت برشی می‌شوند (Melese et al., 2021). بدین ترتیب تثبیت خاک توسط ریشه تابعی از تراکم و ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌هاست (Zhang et al., 2021). نیروی کششی ریشه بیشینه نیروی لازم برای گسیخته شدن ریشه‌هاست. نسبت بیشینه نیروی لازم برای گسیختن ریشه به سطح مقطع ریشه، مقاومت کششی در نظر گرفته می‌شود (Abdi et al., 2014). مدول یانگ ریشه نیز بیانگر مقاومت به تغییر شکل کشسانی آن در راستای تنش است (Mao et al., 2012). رشد گیاه به‌طور مستقیم تحت تأثیر رطوبت خاک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک در برابر نفوذ ریشه قرار دارد. دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت دامنه‌ای از رطوبت خاک است که در آن رشد گیاه در ارتباط با مکش ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با کمترین محدودیت روبه‌رو است (Melese et al., 2021).

نتایج تحقیقی در جنگل‌های استرالیا درباره بررسی ریشه‌های اکالیپتوس نشان داد که با افزایش عمق، تعداد ریشه‌های موبین افزایش می‌یابد که این موضوع، تأثیر بسزایی در جذب آب در طول فصل‌های خشک سال دارد (Carbon et al., 1980). نتایج پژوهشی با عنوان واکنش ریشه اکالیپتوس به تنش خشکی نیز نشان داد که نفوذ عمقی ریشه اکالیپتوس (Eucalyptus camaldulensis Dehnh.) به‌طور کامل

حدود ۸۵ درصد از اراضی کشور به‌علت واقع شدن کشور در منطقه خشک و نیمه‌خشک تحت اقلیم‌های خشک (۳۰ درصد)، نیمه‌خشک (۲۰ درصد) و فراخشک (۳۵ درصد) است (Amiri & Eslamian, 2010). در این مناطق گیاهان با کم‌آبی مواجه‌اند، زیرا متوسط بارش سالانه در چنین مناطقی حداکثر ۴۰۰ میلی‌متر است. بنابراین گیاهان برای دسترسی به آب و امکان ادامه حیات از راهکارهای ویژه‌ای استفاده می‌کنند (Jazirehi, 2014; Esmaili et al., 2022). برای مثال راهکارهایی مانند افزایش ذخیره آب در بافت‌های گیاهی (Alizadeh, 2014)، افزایش لایه‌ها و کرک‌های اپیدرمی (Soltani & Faraji, 2014)، کاهش تعرق (Alizadeh, 2014)، کاهش سطح برگ (Jia & Wang, 2021)، کاهش تعداد برگ (Asgari et al., 2022)، کاهش فتوسنتز (Jazirehi, 2014)، تغییر موقعیت قرارگیری برگ‌ها روی شاخه‌ها (Asgari et al., 2022)، افزایش پراکنش افقی و عمودی ریشه‌های گیاهان (Zahedi Amiri & Zargham, 2015)، افزایش نسبت زی‌توده زیرزمینی به زی‌توده هوایی (Zahedi Amiri & Zargham, 2015) و دیگر موارد از مهم‌ترین سازوکارهای مقابله با خشکی (تنش کم‌آبی) در گیاهان آن مناطق است. برای مثال ریشه‌های گونه زرد تاغ (Haloxylon persicum Bunge)، گاهی تا عمق ۳۰ متری پراکنش عمودی پیدا می‌کنند (Asgari et al., 2022). در چنین شرایطی بخش‌هایی از گیاه که بالای سطح خاک قرار می‌گیرند (زی‌توده هوایی) تا سال‌ها کوچک می‌مانند و رشد نمی‌کنند، زیرا گیاه بیشتر انرژی خود را صرف ریشه‌دوانی عمقی و تقویت ویژگی‌های مکانیکی می‌کند (Bybordi, 2011; Bandurska, 2022).

به‌طور کلی ریشه‌دوانی عمقی و تقویت ویژگی‌های مکانیکی به‌دلیل آشفستگی‌هایی که در بوم‌سازگان‌های مناطق خشک رخ می‌دهد، در مطالعات فرسایش حائز اهمیت است (Kordrostami et al., 2020). کنترل فرسایش و تثبیت زیستی خاک از مهم‌ترین اقدامات در

شوند که البته تا کنون در جنگلکاری‌های مناطق مختلف ایران به‌عنوان عاملی تأثیرگذار در نظر گرفته نشده است. هدف پژوهش حاضر ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌های گونه کاج تهران در سنین مختلف رویشی (نهال‌های یک، سه و پنج‌ساله) تحت تنش‌های مختلف آبی (سبک، متوسط و شدید) است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه پژوهش:** این پژوهش در شهر رباط کریم از شهرستان‌های استان تهران، با وسعت ۲۷۵ کیلومتر مربع انجام گرفت. متوسط طول جغرافیایی منطقه ۵۱ درجه و ۰۴ دقیقه، متوسط عرض جغرافیایی منطقه ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه و ارتفاع متوسط از سطح دریا ۱۰۵۰ است. رباط کریم از شمال به شهرستان‌های شهریار و کرج، از جنوب به شهرستان‌های ری و اسلامشهر، از شرق به شهرستان بهارستان و از غرب به شهرستان ساوه محدود است (Asgari et al., 2022). بر اساس اقلیم‌نمای دوماترین گسترش‌یافته، این منطقه دارای تیپ اقلیم خشک با میانگین بارش سالانه ۱۴۷/۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۷/۷ درجه سانتی‌گراد است. (Asgari et al., 2022).

### شیوه اجرای پژوهش

به‌منظور اجرای پژوهش، از نهال‌های گونه کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw) در سنین یک، سه و پنج سال استفاده شد. این تحقیق به‌صورت طرح فاکتوریل با دو عامل سن گونه و تنش خشکی با طرح پایه کاملاً تصادفی در ده تکرار انجام گرفت. عامل‌های در نظر گرفته‌شده شامل عامل سن گونه‌های گیاهی در سه سطح (گونه‌های یک‌ساله، سه‌ساله و پنج‌ساله) و عامل تنش خشکی در سه سطح تنش ملایم ( $MAD=0.30$ )، تنش متوسط ( $MAD=0.50$ ) و تنش زیاد ( $MAD=0.70$ ) است. با توجه به حداکثر عمق ریشه نهال‌های مختلف یک، سه و پنج‌ساله، کاشت نهال‌ها در گلدان‌هایی به قطر و ارتفاع متناسب با سن نهال‌ها انجام گرفت. با توجه به خصوصیات گونه کاج

به مقدار رطوبت موجود در خاک وابسته است (Rad et al., 2010). یافته‌های پژوهشی با نام پاسخ‌های مورفوفیزیولوژی نهال‌های افاقیا به تنش خشکی نشان داد که بزرگ‌ترین اندازه طول ریشه متعلق به نهال‌های آبیاری‌شده با دور آبیاری دوازده‌روزه (نسبت به دیگر دوره‌های آبیاری در سطوح چهار، هشت و شانزده‌روزه) است (Norouzi Haroni & Tabari Koochksaraee, 2015). در بررسی اثر تنش خشکی بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی نهال‌های بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) نشان داده شد که تنش خشکی بر اندازه طول ریشه و نسبت طول ریشه به ساقه تأثیر معناداری ندارد (Mirzaei & Karamshahi 2015).

گونه کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) بومی منطقه الدار گرجستان است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای جنگلکاری، احداث کمربند سبز، کاشت ردیفی در پارک‌ها و کاشت در گذرگاه‌ها و میان جدول‌ها و حاشیه خیابان‌ها کاربرد دارد (Mozaffarian, 2016, Asgari et al., 2022). این گونه به شرایط نامساعد محیطی مانند خشکی یا تنش کم‌آبیاری نیز مقاوم است (Sabeti, 2016) و دارای ریشه‌های سطحی است که در برابر توفان‌های شدید در بوم‌سازگان‌های جنگلی بسیار آسیب‌پذیر است (Marvi Mohadjer, 2019). نتایج پژوهش Asgari et al. (2022) نشان داد که کاج تهران به‌عنوان گونه‌ای همیشه‌سبز بردباری بیشتری نسبت به گونه افرای سیاه (*Acer negundo* L.) در برابر تنش خشکی و همچنین نیاز آبی کمتری به‌عنوان گونه‌ای سازگار در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. به‌طور کلی از ویژگی‌های مکانیکی ریشه می‌توان به‌عنوان عامل مهمی برای انتخاب نهال گونه‌های درختی برای اهداف زیست‌مهندسی خاک استفاده کرد (Esmaili et al., 2017, Abdi & Majnounian, 2018; Keybondori et al., 2022). این ویژگی‌ها می‌توانند به‌عنوان عامل مهمی در انتخاب نهال برای جنگلکاری‌ها از جمله کاج تهران، به‌منظور اهداف زیست‌مهندسی خاک استفاده

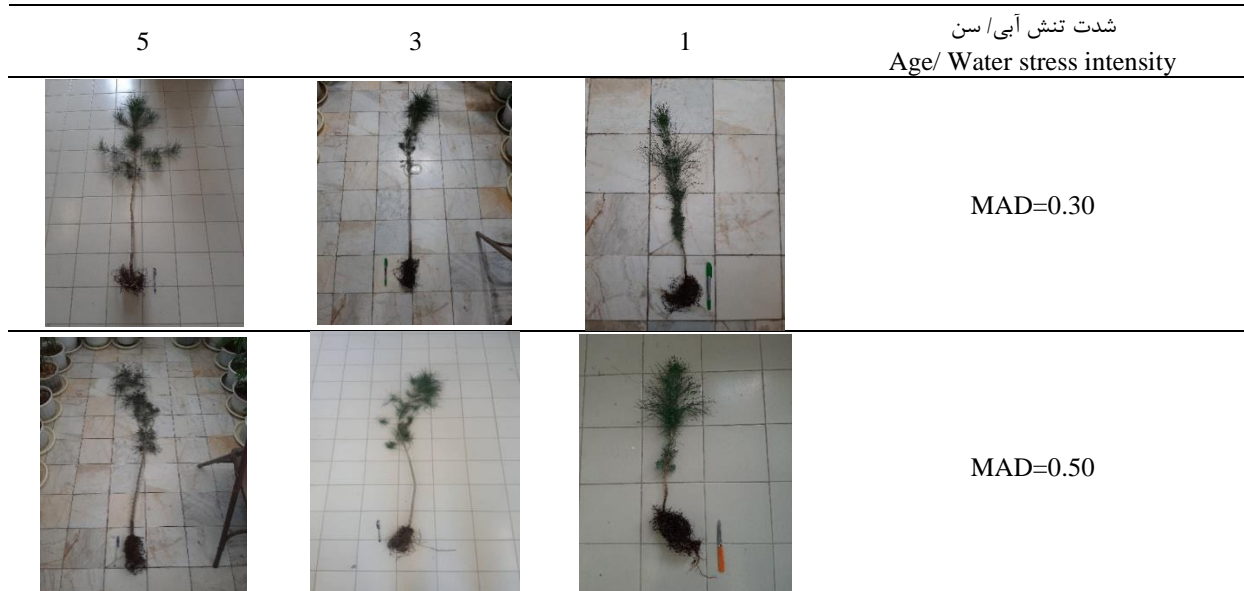
به مدت دوازده ماه آغاز شد. پس از آبیاری نهال‌های کاشته شده، حدود ۲۴ تا ۷۲ ساعت بعد، رطوبت به حد ظرفیت زراعی رسید و پایش رطوبت با گذشت زمان از نقطه ظرفیت زراعی به صورت روزانه در ساعت معین (بین ۷ تا ۸ صبح) و در همه گلدان‌ها انجام گرفت. پایش رطوبت خاک در همه گلدان‌ها در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج TDR مدل HH2 (برای تعیین زمان رسیدن به رطوبتی که باید آبیاری صورت گیرد) انجام گرفت. پس از اندازه‌گیری نقاط رطوبتی ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی (PWP) و لحاظ سطوح تنش خشکی مدنظر یعنی درصدهای ذکر شده تخلیه مجاز رطوبتی (MAD)، برنامه‌ریزی آبیاری برای هر یک از تیمارها تهیه شد و آبیاری و جبران کمبود رطوبت براساس آن انجام گرفت.

همان‌طور که ذکر شد در اسفند ۱۴۰۰، به منظور ارزیابی تنش‌های آبی بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها، از هر تیمار (در مجموع نه تیمار)، پنج اصله نهال به روش کاملاً تصادفی انتخاب و کدگذاری شد (شکل ۱).

تهران، بافت خاک لومی ماسه‌دار به‌عنوان بستر کاشت برای گونه تحت بررسی در نظر گرفته شد. با توجه به مطالب ذکر شده، نود تکرار شامل سی نهال یک‌ساله، سی نهال سه‌ساله و سی نهال پنج‌ساله انتخاب شدند. نهال‌ها از نهالستان بزرگ کرج تهیه شد.

پیش از کاشت نهال‌ها، همه ویژگی‌های اولیه پایه‌ها مانند قطر یقه (میلی‌متر با کولیس)، ارتفاع ساقه (سانتی‌متر با متر نواری)، طول ریشه (طول بلندترین ریشه به سانتی‌متر)، حجم ریشه (سانتی‌متر مربع) و نسبت اندام هوایی به ریشه اندازه‌گیری شد. برای آشنایی با وضعیت صفر نهال‌های مورد آزمایش افزون بر اندازه‌گیری‌ها، ده نهال به‌طور جداگانه با مشخصات اندازه‌های نهال‌های مورد آزمایش انتخاب و در کنار اندازه‌گیری ویژگی‌های ریختی از محل یقه، وزن تر و خشک ریشه و قسمت هوایی آنها توزین و به‌عنوان میانگین وضعیت صفر یادداشت شد.

نهال‌ها در آذرماه ۱۳۹۹ در گلدان‌ها کاشته شدند. پس از کاشت نهال‌ها، فرایند پایش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه نهال‌ها، از فروردین تا اسفند ۱۴۰۰





شکل ۱- تیمارهای استفاده‌شده برحسب سن و مقدار سطح تنش  
Figure 1. The studied treatments according to age and stress level

شمرده شدند که تعداد نمونه‌های موفق در سطح همه تیمارها ۳۸ تا ۹۷ بودند.

مدول یانگ ریشه (E<sub>r</sub>) از منحنی تنش- کرنش نمونه ریشه‌ها آزمایش شده برای گونه‌ها به دست آمد (Loades et al., 2015). مدول یانگ (برحسب مگاپاسکال) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$E_r = \frac{FL_o}{\pi \left( \frac{d^2}{4} \right) \Delta L} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه F بیشینه نیروی اعمال شده (نیوتن)، L<sub>o</sub> طول اولیه نمونه ریشه (میلی‌متر)، d قطر ریشه (میلی‌متر) و ΔL تغییر در طول ریشه (میلی‌متر) در طول آزمایش کشش است.

مشخصه‌های قطر بن (میلی‌متر) با کولیس، ارتفاع (سانتی‌متر) با متر نواری، تعداد چندشاخگی از ساقه و حداکثر عمق نفوذ ریشه در خاک (سانتی‌متر) با خط‌کش، قبل از بررسی ریشه، در آزمایشگاه زیست‌مهندسی در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های وزن تر ساقه و ریشه (گرم) نیز با استفاده از ترازوی دیجیتال برحسب گرم اندازه‌گیری شدند. سپس طول کل ریشه‌ها، طول کل ریشه‌های نازک (قطر آنها کمتر از ۲ میلی‌متر است) و طول کل ریشه‌های غیرنازک (قطر آنها بیش از ۲ میلی‌متر است) برحسب متر با استفاده از متر نواری (با دقت میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. تراکم طول ریشه با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$RLD = \frac{TRL}{SVU} \quad \text{رابطه ۲}$$

به‌طور کلی از هر تیمار، نهال در یک سن و مقدار سطح تنش معین، به تعداد پنج اصله انتخاب شد. نمونه‌های ریشه نهال‌ها براساس روش خارج کردن کل سیستم ریشه‌ای با خارج کردن خاک از گلدان جمع‌آوری شدند. بین زمان جمع‌آوری ریشه‌ها و آزمایش مکانیکی کمتر از ۱۰ ساعت اختلاف زمانی وجود داشت. تیمار به‌کاررفته برای نگهداری و آماده‌سازی نمونه‌های ریشه، شامل شست‌وشو، قرار دادن در کیسه‌های پلاستیکی حاوی مقدار اندکی محلول آب و الکل ۱۵ درصد و نگهداری در داخل یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود (Abdi, 2018). سپس نمونه ریشه‌های سالم به طول حدود ۱۵۰ میلی‌متر (Boldrin et al., 2017) به‌صورت تصادفی انتخاب و با استفاده از یک سیم‌چین تیز جدا شدند و میانگین قطر ریشه در سه قسمت مختلف (ابتدایی، میانی و انتهایی) با دستگاه کولیس دیجیتال به دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های مکانیکی بعد از قرار دادن نمونه ریشه‌ها بین دو فک دستگاه سنام استاندارد ساخت ایران (STM5) با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۰۱± نیوتن و جابه‌جایی در واحد طول ۰/۰۰۰۱± میلی‌متر انجام گرفت. سرعت آزمایش مقاومت کششی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد (Abdi et al., 2009). نیروی کششی (برحسب نیوتن) و مقاومت کششی (برحسب مگاپاسکال) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری و ثبت شدند. نمونه ریشه‌هایی که گسیختگی آنها از میان فک‌ها رخ داده بود، برای محاسبه استفاده شدند. بدین ترتیب تعداد نمونه‌های طول ریشه از نزدیک وسط گسیخته‌شده بین دو فک دستگاه

میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نهال‌ها در سنین مختلف رویشی و تحت تنش‌های مختلف آبی به شرح جدول ۲ است. به طور کلی در نهال‌های یک‌ساله کاج تهران، حداکثر عمق نفوذ ریشه مربوط به سطح تنش زیاد (MAD 0.7) و برابر با ۲۱/۵ سانتی‌متر است. اندازه طول کل ریشه‌ها نیز در سطح تنش زیاد نسبت به تنش‌های ملایم و متوسط، در بیشینه مقدار و برابر با ۱۷ متر است. تراکم طول ریشه نیز در تنش زیاد نسبت به تنش ملایم و متوسط در مقدار بیشینه برابر با ۳۴۳۹/۸ متر در متر مکعب است. در مورد نهال‌های سه‌ساله، طول تمام ریشه نهال‌هایی که در سطح تنش زیاد قرار دارد در بیشینه مقدار و برابر با ۱۳/۹ متر است. در نهال‌های پنج‌ساله نیز، کمترین عمق نفوذ ریشه مربوط به نهال‌هایی با سطح تنش زیاد و برابر با ۱۷/۸ متر است. بیشترین تراکم طول ریشه نیز مربوط به نهال‌هایی با سطح تنش زیاد و برابر با ۴۳۱/۹ متر در متر مکعب است.

نتایج آزمایش نیروی کشش ریشه نشان می‌دهد که در سنین یک، سه و پنج و در سطوح مختلف تنش آبی در نهال‌ها، با افزایش قطر ریشه، نیروی کششی ریشه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش مکانیکی ریشه‌های نهال‌ها در سنین و سطوح مختلف تنش آبی نشان می‌دهد که در هر سه سن و در هر سطح مقدار تنش آبی، با افزایش قطر ریشه، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه کاهش می‌یابد (شکل ۲). نتایج مقایسه میانگین با استفاده از آزمون تحلیل کوواریانس با احتمال ۹۵ درصد ( $P = 0/05$ ) نشان داد که میانگین نیروی کششی ریشه، میانگین مقاومت کششی ریشه و مدول یانگ در نهال‌های یک‌ساله، سه‌ساله و پنج‌ساله معنی‌دار است (شکل ۳).

RDL تراکم طول ریشه (متر بر متر مکعب)، TRL طول کل ریشه‌ها (متر) و SVU برابر با حجم واحد خاک (متر مکعب) است.

سپس نمونه‌های ساقه و ریشه ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. وزن خشک ساقه و ریشه (گرم) نیز دوباره با ترازو توزین شد. بعد از توزین وزن تر و خشک ساقه و نیز ریشه، نسبت‌های وزن تر ریشه به وزن تر ساقه و وزن خشک ریشه به وزن خشک ساقه نیز محاسبه شد. در گام آخر نیز طول ویژه ریشه (SRL) براساس رابطه ۳ محاسبه شد.

$$SRL = \frac{TRL}{FRDM} \quad \text{رابطه ۳}$$

SRL بیانگر طول ویژه ریشه (متر/گرم)، TRL طول کل ریشه‌ها (متر) و FRDM برابر با وزن خشک ریشه‌های نازک (کمتر از ۲ میلی‌متر) (گرم) است.

### روش تحلیل

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) استفاده شد. برای نرمال‌سازی داده‌های نیروی کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه‌ها از تبدیل توانی استفاده شد. همچنین برای بررسی وجود یا نبود اختلاف معنی‌دار مقاومت کششی و نیروی کششی و مدول یانگ ریشه برای تیمارهای مختلف نیز آنالیز کوواریانس (با در نظر گرفتن قطر ریشه‌ها به عنوان عامل کوواریت) استفاده شد. برای تعیین معنی‌دار بودن اختلاف بین میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده شد. همه آنالیزها در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت.

### نتایج

میانگین اطلاعات برداشتی از وضعیت صفر (هنگام کاشت، آذر ۱۳۹۹) نهال‌ها به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱- میانگین وضعیت صفر نهال‌های کاج تهران (± انحراف معیار)

Table 1. The average of zero condition of the tested seedlings of Eldar pine (± standard deviation)

سن	قطر یقه (میلی‌متر)	ارتفاع ساقه (سانتی‌متر)	طول ریشه (سانتی‌متر)	وزن تر ساقه (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ساقه (گرم)	وزن خشک ریشه (گرم)	نسبت وزن خشک ریشه به خشک ساقه	نسبت وزن تر ریشه به تر ساقه
----	--------------------	-------------------------	----------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	-------------------------------	-----------------------------

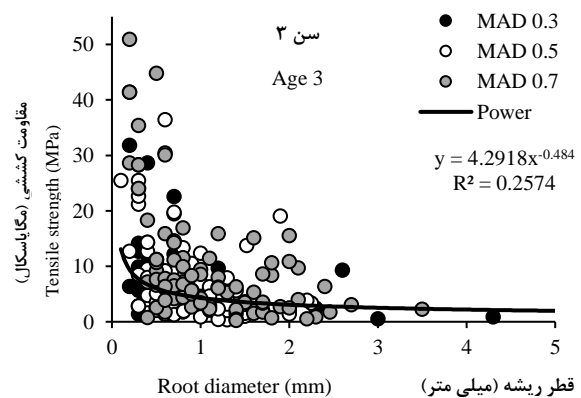
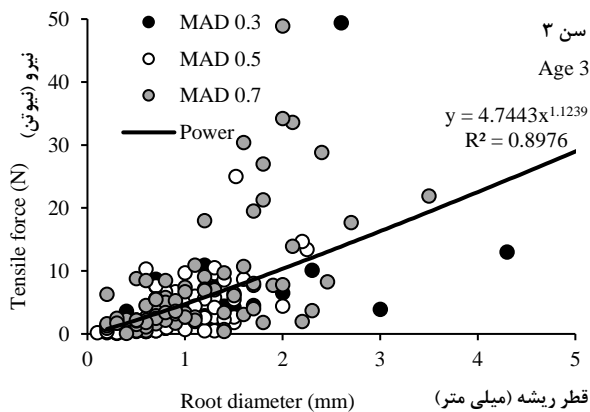
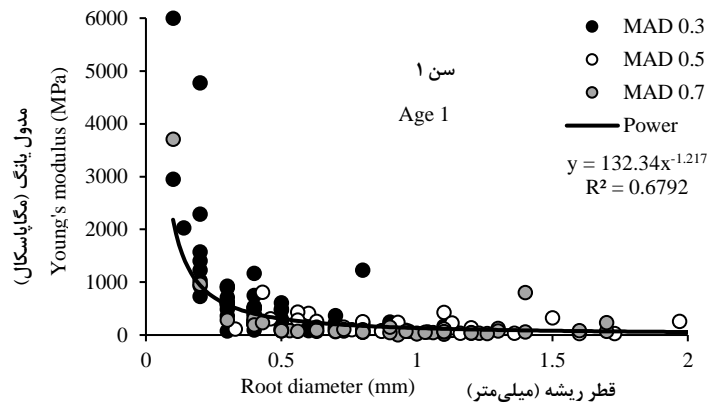
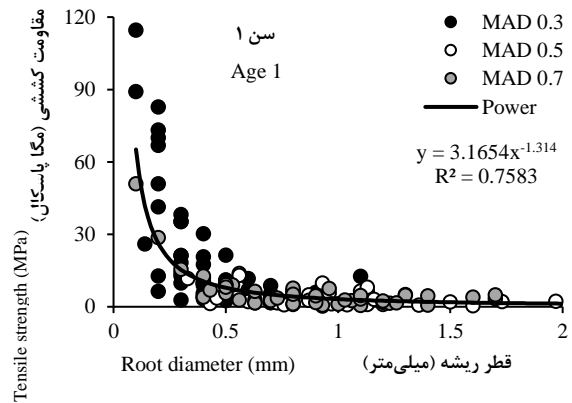
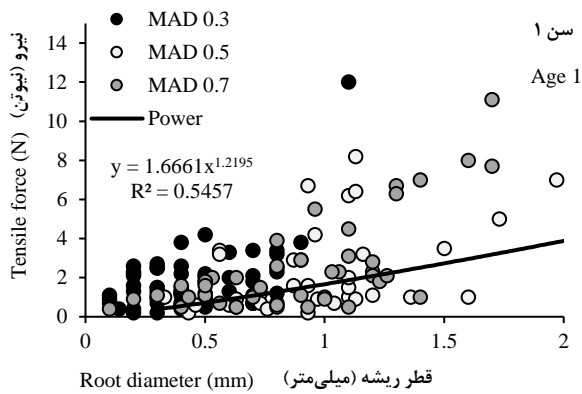
The ratio of root dry weight to stem dry weight	The ratio of root fresh weight to stem fresh weight	Root Dry Weight (gr)	Stem Dry Weight (gr)	Root Fresh Weight (gr)	Stem Fresh Weight (gr)	Root Length (cm)	Stem Height (cm)	Collar Diameter (mm)	Age
0.7 (0.01)	0.62 (0.01)	2.1 (0.5)	3 (0.7)	12.4 (2.6)	20 (2.2)	16 (3.8)	21.5 (3)	1.35 (0.4)	1
0.74 (0.02)	0.67 (0.02)	16 (0.8)	21.6 (5.4)	66 (7)	98 (24)	30.5 (1.7)	99 (9.2)	7.2 (1.1)	3
0.2 (0.05)	0.2 (0.05)	51 (7.8)	265 (3.5)	100 (21)	486 (56)	27.6 (3)	212 (15)	22 (2.2)	5

جدول ۲- میانگین مشخصه‌های اندازه‌گیری شده نهال‌های کاج تهران در سنین مختلف رویشی و تحت تنش‌های آبی

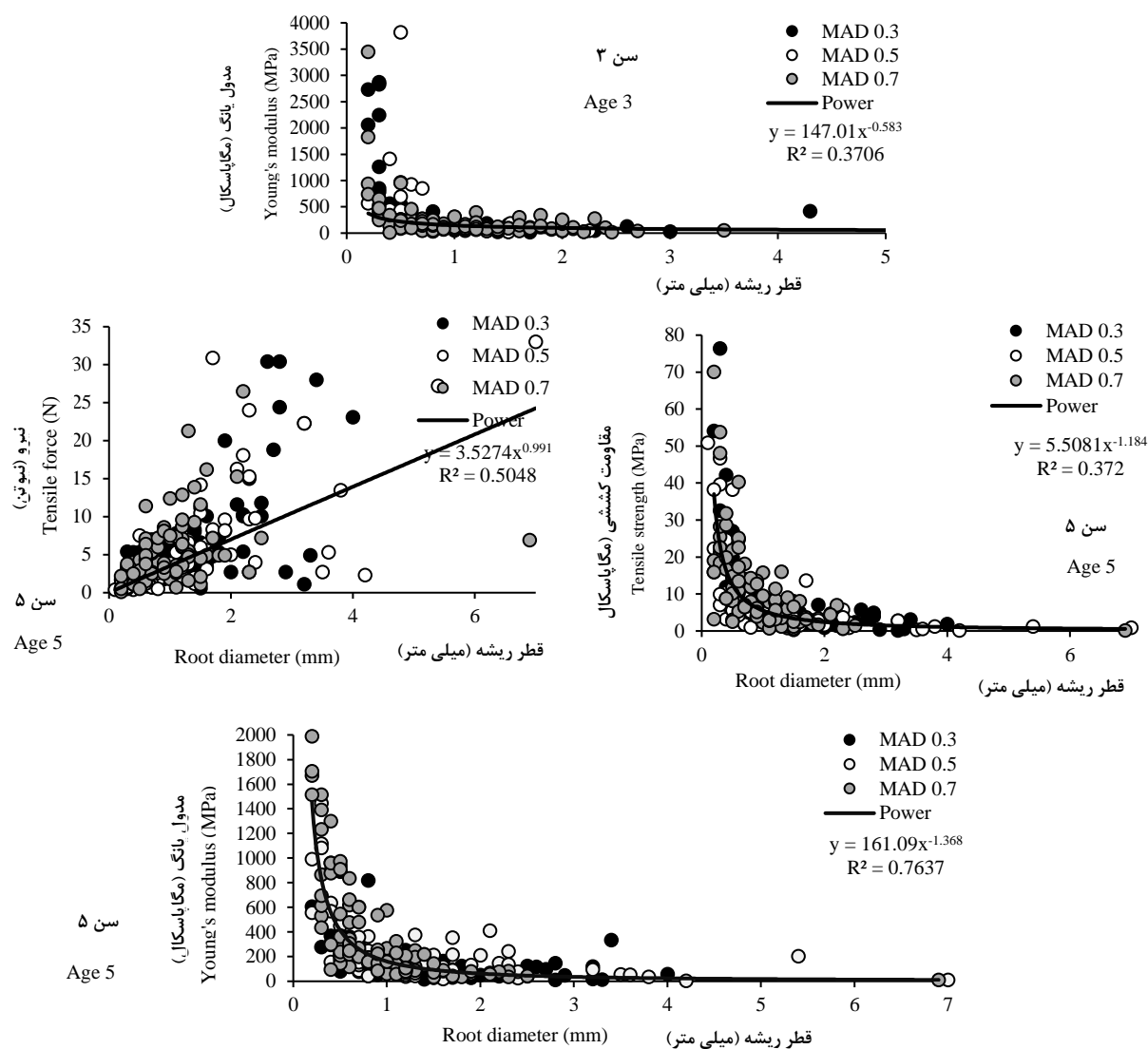
Table 2. The average measured parameters of Eldar pine seedlings under different ages and water stress levels

مشخصه‌های اندازه‌گیری شده									Measured parameters
5	3			1					
0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	سن - سطح تنش Stress level- Age
17.5	18.5	17	11.9	13.9	14.4	6	5.9	6.25	قطر بن (میلی‌متر) Collar diameter (mm)
163.8	161.3	157	136	151.3	135.3	51.8	46.7	44.75	ارتفاع (سانتی‌متر) Height (cm)
2.5	1.8	3.75	0.75	1.5	2.5	1	1.25	0.75	متوسط چندشاخگی Number of twigs average
20	20.8	17.8	22.3	23.3	22	17	18.5	21.5	حداکثر عمق نفوذ ریشه (سانتی‌متر) Maximum depth of root penetration (cm)
298	290.5	322.6	122.4	131.6	132.5	23.8	24.4	26.9	وزن تر ساقه (گرم) Stem fresh weight (gr)
117.3	136.6	138.7	53.7	66.3	74.6	10.9	13.4	12	وزن خشک ساقه (گرم) Stem dry weight (gr)
91.6	88	95.9	47.6	63.9	65.8	22.6	16.1	16	وزن تر ریشه (گرم) Root fresh weight (gr)
63	47	46.9	23.8	30.5	31.1	5.5	6.7	8.1	وزن خشک ریشه (گرم) Root dry weight (gr)
11.8	11	16.7	6.5	11.2	13.9	11.3	13.2	17	طول تمام ریشه (متر) Total root length (m)
3.3	4.1	7.14	2.53	5	7.2	7.3	10.7	14.9	طول تمام ریشه‌های نازک (کمتر از ۲ میلی‌متر) (متر) Length of all fine roots (less than 2 mm)
8.6	6.9	9.52	3.9	6.3	6.7	4	2.65	2.2	طول تمام ریشه‌های بیش از ۲ میلی‌متر (متر) Length of all roots more than two mm (meter)
195.4	249.7	431.9	253.9	497.5	725.5	1681.7	2474.5	3439.8	تراکم طول ریشه (متر بر متر مکعب) Root length density (m/m <sup>3</sup> )
0.2	0.28	0.36	0.32	0.66	0.48	2.3	2.1	2.13	طول ریشه مشخص (متر بر گرم) Specific root length (m/gr)
0.31	0.33	0.3	0.34	0.49	0.49	0.96	0.67	0.67	نسبت وزن تر ریشه به وزن تر ساقه The ratio of root fresh

weight to stem fresh weight								
نسبت وزن خشک ریشه به وزن								
خشک ساقه								
0.55	0.34	0.35	0.42	0.46	0.42	0.53	0.54	0.71
The ratio of root dry weight to stem dry weight								

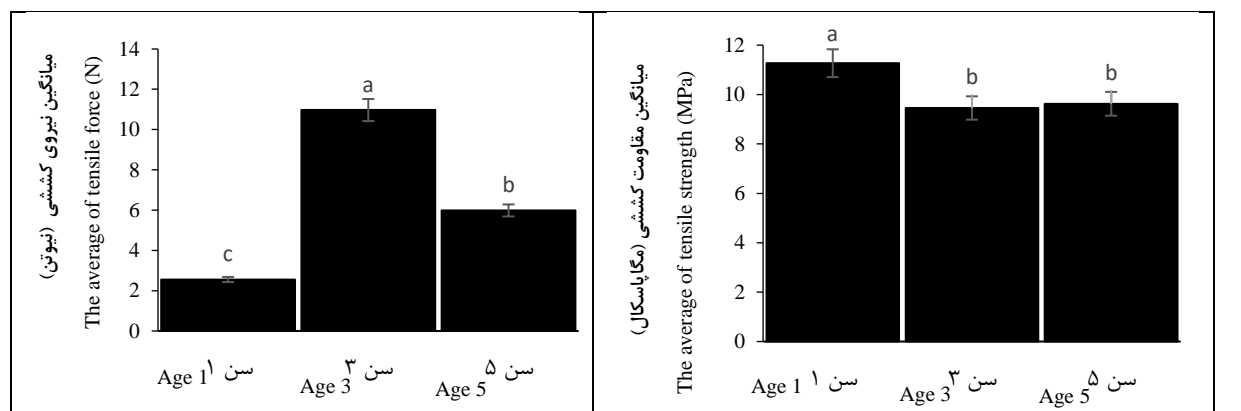


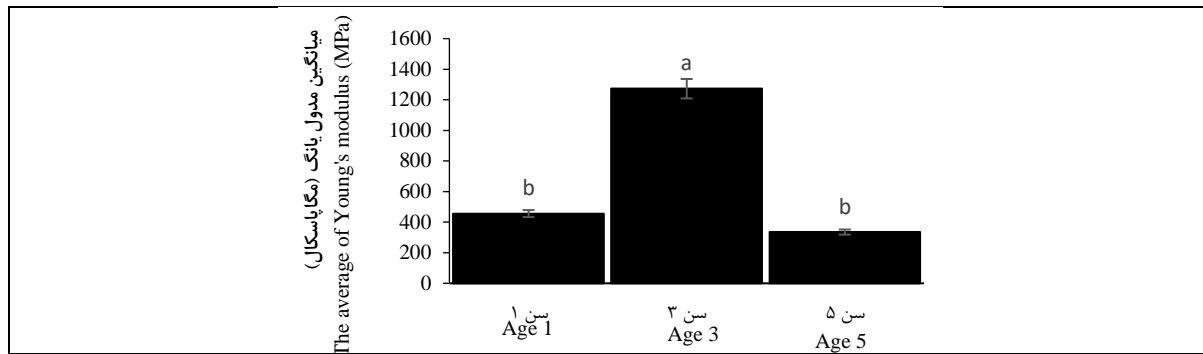
Root diameter (mm)



شکل ۲- نیرو کششی، مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه نهال‌های کاج تهران در سطوح مختلف تنش آبی

Figure 2. Tensile force, tensile strength and Young's modulus of roots of Eldar pine seedlings at different levels of water stress





شکل ۳- توزیع و تغییرات میانگین نیروی کشش ریشه، میانگین مقاومت کششی و میانگین مدول یانگ در سن‌های مختلف. حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار است

Figure 2. Distribution and changes of average root tensile force, average tensile strength and average Young's modulus at different ages. Different letters indicate significant differences

پنج‌ساله برابر با ۱۶۵۳۷/۹۸ سانتی‌متر مکعب است. به‌طوری که طول ریشه کاج تهران در نهال‌های یک‌ساله، در تنش شدید ۱۷ متر و در تنش ملایم ۱۱/۳ متر بوده است. در نهال‌های پنج‌ساله نیز طول ریشه در وضعیت تنش شدید ۱۶/۷ متر و در وضعیت تنش ملایم ۱۱/۸ متر بوده است. پژوهش‌های بسیاری بیانگر این است که تحت تأثیر تنش آبی، پراکنش و ریشه‌دوانی گونه تحت بررسی افزایش پیدا می‌کند. برای مثال می‌توان به پژوهش‌های (Jazirehi (2014) در گونه زردتاغ، (Karimian et al. (2018) در آتریپلکس، (Agh et al. (2017) در گون و (Musa et al. (2019) در گونه کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) اشاره کرد که با نتایج پژوهش حاضر همسو هستند.

به‌طور کلی قطر یقه، پراکنش مطلوب سیستم ریشه‌ای و نسبت وزن تر یا خشک ریشه به ساقه، شاخصی برای تعیین کیفیت و استقرار مطلوب نهال در جنگلکاری‌های مناطق خشک به شمار می‌آید (Jazirehi, 2014). در این پژوهش روند وزن تر ریشه و وزن تر ساقه در نهال‌های سه و پنج‌ساله به این صورت بوده است که با افزایش تنش آبی، بر وزن ریشه و وزن ساقه افزوده شده است که دلیل آن را می‌توان ترشح هورمون‌های رشد گیاهی در وضعیت تنش خشکی دانست (Soltani & Faraji, 2014). هنگامی که گیاه در معرض بی‌آبی قرار می‌گیرد، به‌منظور خارج‌سازی از حالت تنش، در ابتدا شروع به

### بحث

امروزه کاشت گونه کاج تهران در جنگلکاری‌ها و توسعه فضای سبز در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار متداول شده است (Asgari et al., 2022). کاج تهران از نظر نیاز آبی در طبقه خشکی‌گرا جای دارد (Jazirehi, 2014; Sabeti, 2016). بررسی ریشه‌های گونه‌های خشکی‌گرا همواره تحت تأثیر نوع گونه درختی، سرشت ریشه‌دوانی و سن درخت متغیر است (Zahedi Amiri & Zargham, 2015). به‌طور کلی درختان خشکی‌گرا مانند زردتاغ، سیاه‌تاغ (*Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey.) Bunge)، آتریپلکس (*Atriplex* Spp.)، گون (*Astragalus* Spp.) و گز (*Tamarix* Spp.)؛ (Marvi Mohadjer, 2019) گاه افزون‌بر عواملی مانند خصوصیات ارثی، فیزیکی و شیمیایی خاک و رقابت، تحت تأثیر کمبود رطوبت اقدام به پراکنش افقی و عمودی و در نتیجه ریشه‌دوانی‌های متفاوتی می‌کنند (Soltani & Faraji, 2014). نتایج این تحقیق نشان داد که طول ریشه‌ها در هر سن معین، به‌ازای قرار گرفتن تحت تنش شدید (MAD 0.7) نسبت به گونه‌هایی که تحت تنش ملایم یا متوسط قرار گرفته بودند، بیشتر بوده است. به‌منظور تصور بهتر، شایان ذکر است که حجم خاک موجود در گلدان‌ها به‌ازای هر مقطع سنی به‌شرح زیر است، در نهال‌های یک‌ساله برابر با ۴۳۲۷/۳۱، در نهال‌های سه‌ساله برابر با ۹۹۶۶/۳۶ و در نهال‌های

کششی ریشه در بررسی‌های مربوط به گونه‌های درختی در مناطق جنگلی معتدله مانند توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey)، انجیلی (*Parrotia persica* C.A.Mey.) و افرا پلت (*Acer velutinum* Boiss.)؛ (Abdi & Deljoue, 2018; Deljouei et al., 2020) و گونه‌های جنگلی ماندابی مانند حرا (*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.)؛ (Karimi et al., 2022) اعداد محاسبه‌شده نیروی کششی ریشه نسبت به بررسی حاضر، بسیار بزرگ‌تر است. دلیل این امر را می‌توان به نرم بودن ساختار چوبی در اندام‌های گیاهی سوزنی‌برگان مانند ریشه (Javanshir Khoei, 1984) که سبب گسیختگی زودتر در شرایط تحت تنش محیطی (توفان، برف و غیره) نسبت به پهن‌برگان می‌شود و همچنین سن نهال‌ها که حداکثر پنج‌ساله بودند مربوط دانست. به نظر می‌رسد که اثر سن گونه و تفاوت قطر ریشه‌ها دلیل احتمالی تفاوت در نیروی کششی ریشه‌هاست.

رابطه مقاومت کششی ریشه در سنین و سطوح مختلف تنش آبی با قطر ریشه از تابع توانی منفی پیروی می‌کند. این رابطه توانی منفی با نتایج (Deljouei et al., 2018; Moresi et al., 2019; Abdi & Deljouei, 2020; Afshar Sadr et al., 2020, Karimi et al., 2022) همسو است. مقاومت کششی ریشه در بررسی حاضر بیانگر این است که افزایش قطر ریشه موجب کاهش مقاومت کششی می‌شود. به عبارت دیگر، ریشه‌های نازک مقاومت کششی بیشتری دارند (Abdi & Majnounian, 2018). همچنین نتایج نشان می‌دهد که ریشه‌های نهال‌های یک‌ساله، بیشترین مقاومت کششی را دارند که منطبق بر یافته‌های پژوهش‌های قبلی مبنی بر مقاومت کششی بیشتر ریشه‌های جوان‌تر و نازک‌تر است. (Esmaili et al., 2017) بیشتر بودن درصد سلولز در ریشه‌های نازک و مقاومت بیشتر سلولز در برابر کشش نسبت به لیگنین و همی‌سلولز را برای توجیه این پدیده ذکر کرده‌اند. مقاومت کششی ریشه بسته به

افزایش زی‌توده هوایی و زیرزمینی می‌کند تا در کوتاه‌ترین زمان ممکن، عامل تنش برطرف شود (گیاه آبیاری شود) (Bandurska, 2022). استمرار تنش آبی سبب توقف رشد و سپس مرگ گیاه خواهد شد (Asgari et al., 2022). این حالت در نهال‌های یک‌ساله رخ نداد و فقط به وزن تر ساقه افزوده شد. تراکم طول ریشه نیز در هر سن معین، به‌ازای قرار گرفتن تحت تنش شدید که همراه با افزایش طول ریشه‌ها است، افزوده شده است. یعنی افزایش طول ریشه به‌ازای حجم ثابت واحد خاک رخ داده است که این امر سبب افزایش تراکم طول ریشه شده است. این نتایج با یافته‌های (Peng & Chen 2020) همسو است.

نتایج مقایسه ویژگی‌های مکانیکی ریشه در سنین و سطوح مختلف تنش آبی نشان داد که تنها میانگین نیروی کششی ریشه، میانگین مقاومت کششی ریشه و مدول یانگ در نهال‌های یک، سه و پنج‌ساله معنی‌دار است. نتایج آزمایش نیروی کششی ریشه در سنین و سطوح مختلف تنش آبی بیانگر این است که یک تابع توانی مثبت بین قطر ریشه با نیروی کششی ریشه وجود دارد. پژوهش‌های زیادی نیز مؤید این نتیجه است که تابع توانی مثبت بین قطر ریشه گونه و نیروی کششی ریشه وجود دارد (Abdi & Deljoue, 2018; Deljouei et al., 2020; Keybondori et al., 2022). بررسی نیروی کششی ریشه در تحقیق حاضر نشان داد که مقدار نیروی کششی ریشه در نهال‌های یک و سه‌ساله در مقدار تنش شدید (MAD 0.7) نسبت به تنش ملایم و متوسط بیشتر است. علت تفاوت در نیروی کششی در سنین و تنش‌های مختلف آبی پاسخ‌های متفاوت گونه‌ها به شرایط متفاوت محیطی (تنش‌های مختلف آبی) ذکر شده است (Boldrin et al., 2017). به‌طور کلی سن و تنش‌های غیرزیستی (مانند تنش آبی) هم می‌تواند بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌ها تأثیر داشته باشد (Loades et al., 2015). مقدار محاسبه‌شده نیروی

ویژگی‌های ژنتیکی گونه‌های گیاهی و مشخصه‌های رویشگاهی متغیر است. بنابراین عوامل ژنتیکی از قبیل ترکیبات ساختاری شیمیایی ریشه در کنار عوامل رویشگاهی، ممکن است بر مقاومت کششی گونه‌های گیاهی تأثیر داشته باشد. برای مثال Greenwood (2006) مقاومت کششی را برای ریشه گونه نوئل ۲۸ مگاپاسکال گزارش کرده است. Esmaili et al. (2017) نیز مقدار کمینه و بیشینه مقاومت کششی ریشه برای گونه جنگلکاری شده نوئل (*Picea abies* (L.) H. Karst.) در جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود نوشهر را ۱/۸۹ و ۴۲۴ مگاپاسکال محاسبه کردند. شایان ذکر است که سن درختان نوئل در هنگام تحقیق حدود ۳۰ سال بود. مقدار محاسبه شده مقاومت کششی ریشه در سنین و سطوح مختلف تنش آبی نسبت به گونه‌های بررسی شده در دیگر پژوهش‌ها دارای مقدار کمتری است. همان‌طور که می‌دانیم، مقاومت کششی ریشه از تقسیم نیروی کششی ریشه بر مساحت قاعده (دایره) ریشه محاسبه می‌شود. به‌طور کلی نوع گونه گیاهی بر مقاومت کششی ریشه تأثیرگذار است. رویشگاه گونه تحت بررسی و عوامل رویشگاهی نیز بر مقاومت کششی ریشه مؤثرند. بنابراین دلیل کمتر بودن مقاومت کششی ریشه کاج تهران نسبت به گونه‌های دیگر مانند گونه‌های نوئل را می‌توان در تفاوت در رویشگاه و عوامل رویشگاهی (بوم‌سازگان جنگلی معتدله در کنار مناطق خشک و نیمه‌خشک) نسبت داد.

نتایج آزمایش مکانیکی ریشه رابطه مدول یانگ ریشه با قطر ریشه را از نوع تابع توانی منفی نشان داد که این امر با نتایج پژوهش Cislighi (2021) مطابقت دارد. با توجه به اینکه مدول یانگ ریشه نسبت به نیروی کششی و مقاومت کششی ریشه برای گونه‌های نهال کمتر بررسی شده است، باید در آینده پژوهش‌های بیشتری درباره مدول یانگ ریشه در گونه‌های درختی مختلف با سنین مختلف رویشی انجام گیرد. متأسفانه به دلیل محاسبه نشدن این

شاخص در تحقیق‌های داخلی کشور، مقایسه مقادیر آن برای گونه‌های مشابه ممکن نیست؛ اما پژوهش‌های اندکی در گونه‌های دیگر انجام گرفته است که نشان می‌دهند تفاوت‌های زیادی در مدول یانگ میان گونه‌های درختی مختلف وجود دارد. Lee et al. (2021) میانگین مدول یانگ را برای نهال‌های *Macaranga tanarius*، *Mallotus paniculatus* و *Hibiscus taiwanensis* S.Y.Hu به ترتیب ۱۲۷/۱۵، ۱۱۲/۶ و ۲۵/۲۷ مگاپاسکال گزارش کردند. Keybondori et al. (2022) نیز در پژوهشی به بررسی مدول یانگ ریشه‌های نهال‌های درختی راش (*Fagus orientalis* Lipsky)، ممرز (*Carpinus betulus* L.) و افرا پلت در جنگل‌های شمال ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که کمینه و بیشینه مدول یانگ ریشه‌ها در نمونه‌های افرا پلت به ترتیب ۱۲۷/۱۱ تا ۱۰۶۷/۳۵ مگاپاسکال، در نمونه‌های راش به ترتیب ۴۸/۷۰ تا ۱۴۱۳/۷۳ مگاپاسکال و در نمونه‌های ممرز به ترتیب ۱۹۷/۵۵ تا ۱۴۷۳/۰۳ مگاپاسکال بود. به نظر می‌رسد که متغیر بودن مدول یانگ میان گونه‌های مختلف، می‌تواند با تفاوت قطر ریشه در گونه‌های بررسی شده و رویشگاه‌هایی که گونه‌های گیاهی در آنجا مستقرند ارتباط داشته باشد (Boldrin et al., 2017).

Hathaway & Penny (1975) گزارش کردند که مدول یانگ با محتوای سلولز همبستگی مثبت و با نسبت لیگنین به سلولز همبستگی منفی دارد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی مانند نیروی کششی و مقاومت کششی و مدول یانگ ریشه افزون‌بر هر مقطع سنی، در هر مقداری از تنش آبی در سن معین با یکدیگر متغیر است. با توجه به اینکه گونه کاج تهران از سازگارترین و کم‌نیازترین گونه‌های دارای کاربرد در جنگلکاری و توسعه فضای سبز در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و از سوی دیگر، از آنجا که یکی از کاربردهای ویژگی‌های مکانیکی ریشه، برآورد تثبیت مکانیکی

تنش آبی (هرچه شدت سطح تنش بیشتر شود) سبب افزایش تراکم طول ریشه در وضعیت تنش شده همسو است. (Tomášková et al. (2017) نیز در تحقیقی دیگر نشان دادند که جذب آب در جنس کاج در همه ماه‌های سال به دلیل همیشه‌سبز بودن و انجام فتوسنتز، توسط ریشه‌ها صورت می‌گیرد. حال هرچه به‌ازای هر روز، ساعت‌های آفتابی و متوسط دمای هوا بیشتر باشد (گیاه در وضعیت تنش آبی قرار گیرد)، احتیاج به آب توسط گونه‌های جنس کاج افزایش می‌یابد که این امر موجب توسعه زی‌توده زیرزمینی و به‌طور ویژه شبکه ریشه در گونه‌های جنس کاج می‌شود. این تحقیق نیز با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد که آگاهی از ویژگی‌های مکانیکی ریشه و به‌طور کلی آگاهی از نقش زیست‌مهندسی خاک در بوم‌سازگان‌ها در عمل منتهی به انتخاب گونه‌های مناسب و سازگار، مسلح‌سازی خاک، تثبیت خاک، کنترل فرسایش، پایداری بوم‌سازگان و موفقیت در اجرای طرح‌های جنگلکاری می‌شود. پیشنهاد می‌شود که ویژگی‌های مکانیکی ریشه دیگر گونه‌های متداول در جنگلکاری‌های مناطق خشک و نیز مورفولوژی سوزنی‌برگان در وضعیت تنش آبی (اندام‌های هوایی و زیرزمینی)، به‌ویژه جنس کاج، به‌عنوان گونه‌هایی که سهم کاشت فراوانی در خانواده سوزنی‌برگان در ایران دارند، در پژوهش‌های آتی لحاظ شود.

حاصل از ریشه‌هاست (Esmaili et al., 2017) از نتایج این بررسی می‌توان در مدل‌سازی تثبیت خاک و پایداری دامنه‌ها در جنگلکاری در بوم‌سازگان‌های کوهستانی و بیابانی استفاده کرد. در بوم‌سازگان‌های کوهستانی و بیابانی، با توجه به ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌های گونه‌هایی که استقرار مطلوبی دارند، می‌توان به پایداری دامنه‌ها و مسلح‌سازی خاک در آن مناطق کمک شایانی کرد. (Esmaili et al. (2017) نشان داد که در بوم‌سازگان جنگلی، ریشه‌های گونه نونل به‌عنوان گونه‌ای سوزنی‌برگ، نسبت به زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior* L.)، موجب افزایش بیشتر مسلح‌سازی خاک دامنه‌های جنگلی می‌شود که در این تحقیق، علت آن، عوامل ژنتیکی تأثیرگذار بر ویژگی‌های مکانیکی ریشه‌های سوزنی‌برگان تأثیرگذار دانسته شده است. همواره در بوم‌سازگان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، کنترل فرسایش از نوع آبی و بادی به‌همراه تثبیت خاک از اقدامات بسیار ضروری بوده (Gobinath et al., 2021) که نیازمند توجه مدیران این عرصه‌هاست. به نظر می‌رسد که جنگلکاری با کاج تهران در این عرصه‌ها که به‌طور کلی بارش سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است، همراه با قرارگیری در وضعیت تنش خشکی که با گسترش تراکم طول ریشه این گونه همراه است، می‌تواند به تثبیت خاک و کنترل فرسایش در این مناطق کمک شایانی کند. (Jacquet et al. (2014) در پژوهشی به اثرهای تنش آبی بر گونه کاج دریایی (*Pinus pinaster* Aiton) پرداختند که نتایج نشان داد به‌محض آنکه جذب آب در این گونه با اختلال مواجه شود، گیاه به افزایش زی‌توده ریشه می‌پردازد. نتایج این پژوهش با پژوهش حاضر که اثر

### References

- Abdi, E., Majnounian, B., Rahimi, H., & Zobeiri, M. (2009). Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran. *Journal of Forestry Research*, 20(2), 105-110. doi.org/10.1007/s11676-009-0019-x.
- Abdi, E., Azhdary, F., Abdulkhani, A., & Sofy Mariv, H. (2014). Tensile strength and cellulose content of Persian ironwood (*Parrotia persica*) roots as bioengineering material. *Journal of Forest Science*, 60(1), 425-430. doi: 10.17221/44/2014-JFS.
- Abdi, E., & Majnounian, B. (2018). Forest Road Maintenance. University of Tehran press (In Persian).

- Abdi, E. (2018). Root tensile force and resistance of several tree and shrub species of Hyrcanian forest, Iran. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 39(2), 255-270.
- Abdi, E., & Deljoue, A. (2018). Seasonal and spatial variability of root reinforcement in three pioneer species of the Hyrcanian forest. *Austrian Journal of Forest science*, 3, 175- 198.
- Afshar, S.A., Etemad, V., Abdi, E., Attarod, P., & Deljouei, A. (2020). Effect of slope on characteristics of Oak root system. *Journal of Forest Research and Development*, 6(2), 313-327. doi: 10.30466/JFRD.2020.120855 (In Persian).
- Agh, Kh., Esmaili, M., Hossini Moghaddam, H., & Mostafalo, H. (2017). The Assessment on Propagation Methods and Establishment of *Astragalus podolobus* Species in Arid Rangelands in North of Gonbad-e Qabus. *Journal of Desert ecosystem engineering*, 6(16), 1-10. doi: 10.22052/6.16.1 (In Persian).
- Ahmadaali, Kh., Rahimi, H., & Etemad, V. (2021). Effect of Soil Texture and Different Levels of Irrigation Amount on Water Requirement and Crop Coefficient of *Melia azedarach* L. in Karaj Area. *Iranian Journal of Soil & Water Research*, 51(12), 3195- 3205. doi:10.22059/IJSWR.2020.303336.668627. (In Persian)
- Alizadeh, A. (2014). Soil, Water, Plant Relationship. Industrial University of Sajjad Publications (In Persian).
- Amiri, M.J., & Eslamian, S.S. (2010). Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 3(4), 208-216. doi: 10.3923/jest.2010.208.216.
- Asgari, M., Javanmiri Pour, M., Etemad, V., Liaghat, A., & Zare, S. (2022). Estimation of Water Requirements of *Acer negundo* and *Pinus eldarica* Medw. in Field and Green House (Case Study: Robat Karim Town). *Iranian Journal of Soil & Water Research*, 52(10), 2581- 2594. doi:10.22059/IJSWR.2021.329702.669062 (In Persian).
- Bandurska, H. (2022). Drought Stress Responses: Coping Strategy and Resistance. *Journal of Plants*, 11, 1-17. doi: 10.3390/plants11070922.
- Boldrin, D., Leung, A.K., & Bengough, A.G. (2017). Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. *Ecological Engineering*, 109, 196-206. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.002.
- Bybordi, M. (2011). Principles of Irrigation Engineering; Vol. 1: Soil- Water Relationship. University of Tehran press (In Persian).
- Carbon, B.A., Bartle, G.A., Murray, A.M., & Macpherson, D.K. (1980). The distribution of root length, and the limits to flow of soil water to roots in a dry sclerophyll forest. *Journal of Forest Science*, 26, 656- 664.
- Cislaghi, A. (2021). Exploring the variability in elastic properties of roots in Alpine tree species. *Journal of Forest Science*, 67(7), 338-356. doi: 10.17221/4/2021-JFS.
- Deljouei, A., Abdi, E., Schwarz, M., Majnounian, B., Sohrabi, S., & Dumroese, K. (2020). Mechanical Characteristics of the Fine Roots of Two Broadleaved Tree Species from the Temperate Caspian Hyrcanian Ecoregion. *Journal of Forests*, 11(345), 2-19. doi.org/10.3390/f11030345.
- Esmaili, M., Abdi, E., Jafary, M., & Majnounian, B. (2017). Comparison of biotechnical characteristics of root in two forest plantations of *Fraxinus excelsior* and *Picea abies*. *Forest Research and Development*, 3(3), 237-247.
- Esmaili, M., Abdi, E., Mohseni Saravi, M., & Hayati, E. (2022). Soil Water Storage and Root Distribution under *Picea abies* and *Fraxinus excelsior* Plantations. *Iranian Journal of Forest*, 14(4), 355-369. doi:10.22034/IJF.2022.313303.1810 (In Persian).

- Gobinath, R., Ganapathy, G.P., & Akinwumi, I.I. (2021). Stabilization of natural slopes using natural plant root as reinforcing agent. *Journal of Proceedings*, 39, 493-499. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.227>.
- Greenwood, J.R. (2006). SLIP4EX – A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 449-465.
- Hathaway, R.L., & Penny, D. (1975). Root strength in some Populus and Salix clones. *New Zealand Journal of Botany*, 13(3), 333-344.
- Jacquet, J., Bosc, A., O'Grady, A., & Jactel, H. (2014). Combined effects of defoliation and water stress on pine growth and non-structural carbohydrates. *Tree Physiology*, 34, 367-376. [doi.org/10.1093/treephys/tpu018](https://doi.org/10.1093/treephys/tpu018).
- Javanshir Khoei, K. (1984). Needle Leaved: first volume. Research Institute of Forests and Pastures press. (In Persian)
- Jazirehi, M.H. (2014). Forest Protection. University of Tehran press (In Persian).
- Jia, Q., & Wang, Y. (2021). Relationships between Leaf Area Index and Evapotranspiration and Crop Coefficient of Hilly Apple Orchard in the Loess Plateau. *Journal of Water*, 13, 2-19. <https://doi.org/10.3390/w13141957>.
- Karimi, Z., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shirvany, A., Schwarz, M., & Hales, T. (2022). Vegetation-induced soil stabilization in coastal area: An example from a natural mangrove forest. *Journal of Catena*, 216, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106410>.
- Karimian, V., Jahantab, E., Farzin, M., & Golzar, E. (2018). A review of the cultivation history of *Atriplex lentiformis* in Iran and investigation of the reason for the lack natural regeneration, The 7th National Conference on Pasture and Pasture Management of Iran, 8 May 2018, Tehran (In Persian).
- Keybondori, S., Abdi, E., Shakeri, Z., & Etemad, V. (2022). Evaluating mechanical properties of seedling roots of some tree species. *Iranian Journal of Forest*, 14(2), 155-167. [10.22034/IJF.2022.315418.1816](https://doi.org/10.22034/IJF.2022.315418.1816) (In Persian).
- Kordrostami, F., Attarod, P., Bozorg-Haddad, O., Etemad, V., Abbaspour, K.C., & Ludwig, R. (2020). Evaluation of hydrological response of Latian Dam watershed to afforestation in semi-arid climate. *Iranian Journal of Forest*, 11(1), 89-100 (In Persian).
- Lee, J.T., Tsai, S.M., Wu, Y.J., Lin, Y.S., Chu, M.Y., & Lee, M.J. (2021). Root Characteristics and Water Erosion-Reducing Ability of Alpine Silver Grass and Yushan Cane for Alpine Grassland Soil Conservation. *Sustainability*, 13(14), 7633. <https://doi.org/10.3390/su13147633>.
- Loades, K.W., Bengough, A.G., Bransby, M.F., & Hallett, P.D. (2015). Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (*Hordeum vulgare* L.) in contrasting soil environments. *Plant and Soil*, 395(1), 253-261. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2560-z>.
- Mao, Z., Saint-Andre, L., Genet, M., Mine, F.X., Jourdan, C., Rey, H., & Stokes, A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.026>.
- Marvi Mohadjer, M.R. (2019). Silviculture. University of Tehran press. (In Persian)
- Melese, D.T. (2021). Effect of Diameter, Root Moisture Content, Gauge Length and Loading Rate on Tensile Strength of Plant Roots and Their Contribution to Slope Stability. *Lowland Technology International date*, 22(4), 164- 173. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151791>.
- Mirzaei, J., & Karamshahi, A. (2015). Effects of drought stress on physiological characteristics of *Pistacia atlantica* seedlings. *Journal of Wood & Forest Science*, 22(1), 31-43. [20.1001.1.23222077.1394.22.1.3.5](https://doi.org/10.1001.1.23222077.1394.22.1.3.5) (In Persian).

- Moresi, F.V., Maesano, M., Matteucci, G., Romagnoli, M., Sidle, R.C. & Scarascia Mugnozza, G. (2019). Root biomechanical traits in a montane Mediterranean forest watershed: variations with species diversity and soil depth. *Journal of Forests*, 10(4), 341-350. <https://doi.org/10.3390/f10040341>.
- Mozaffarian, V. (2016). Trees and shrubs of Iran. Farhang Moaser Publication. (In Persian)
- Musa, A., Zhang, Y., & Cao, J. (2019). Relationship between root distribution characteristics of Mongolian pine and the soil water content and groundwater table in Horqin Sandy Land, China. *Trees*, 33, 1203–1211. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01852-3>.
- Norouzi Haroni, N., & Tabari koochksaraee, M. (2015). Morpho-Physiological Responses of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Seedlings to Drought Stress. *Journal of Forest and Wood Product*, 68(3), 715-727. 10.22059/JFWP.2015.55600 (In Persian).
- Peng, S., & Chen, H. (2020). Global response of fine root biomass and traits to plant species mixtures in terrestrial ecosystems. *Journal of Global Ecology & Biogeography*, 4(1), 20-16. <https://doi.org/10.1111/geb.13205>.
- Rad, M.H., Assareh, M.M., & Soltani, M. (2010). Response of the root of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. to drought stress. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(2), 285- 298 (In Persian).
- Sabeti, H. (2016). Forests, Trees and Shrubes of Iran. University of Yazd press (In Persian).
- Soltani, A., & Faraji, A. (2014). Soil Water & Plant Relationship. Publications University of Mashhad. (In Persian).
- Tomášková, I., Vítámvás, J., & Bažant, V. (2017). Needle water potential of selected pine species during the off-season: A case study. *Journal of Forest Science*, 63 (1), 16-21. doi: 10.17221/69/2016-JFS.
- Zahedi Amiri, Gh., & Zargham, N. (2015). Carbon sequestration in terrestrial ecosystems. University of Tehran press (In Persian).
- Zhang, L., Yan, W.M., & Leung, F.T. (2021). Probabilistic estimation of root cohesion in regards to intra-specific variability of root system. *Catena*, 196(1), 104-128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104898>.



*Research Article*

## Evaluation of age and moisture stress on the mechanical properties of *Pinus eldarica* Medw. seedling roots for plantation

M. Asgari<sup>1</sup>, M. Javanmiri Pour<sup>2</sup>, E. Abdi<sup>3\*</sup>, V. Etamad<sup>4</sup>, K. Ahmadaali<sup>5</sup>, S. Zare<sup>5</sup>, and A. Afsharsadr<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Late Ph.D. Student of Forest Biological Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Graduated, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

<sup>3</sup> Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

<sup>4</sup> Associate Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

<sup>5</sup> Assistant Prof., Dept. of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

<sup>6</sup> Master graduate of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: 6 October 2022; Accepted: 24 March 2023)

### Abstract

**Introduction:** The mechanical characteristics of roots can serve as a significant factor for selecting trees in the plantation of arid regions for soil bioengineering. This research aims to evaluate the mechanical characteristics of Eldar pine roots at various vegetative ages (one-year-old, three-year-old, and five-year-old seedlings) and under different water stress levels (light, medium, and severe) in Robat Karim.

**Materials and Methods:** The mechanical properties of the roots were studied after estimating the water requirement of the studied seedlings at different ages for one year and based on the water stress levels. Then, five seedlings from each treatment (equal to 9 treatments) were selected and coded completely randomly to evaluate the water stress on the mechanical characteristics of the roots of Eldar pine. Initially, some root parameters such as root diameter, length of the whole root, length of thin roots, and length of the longest root were measured. Then the tensile force, tensile strength, and Young's modulus of the roots were measured and recorded using a standard Centam device.

**Results:** The results showed that with the increase in root diameter, the tensile force of the root changes based on the positive power relationship, and the tensile strength and Young's modulus of the root changes based on the negative power relationship. Furthermore, laboratory examinations showed that at any age, the length of the whole root and the root length densities are higher with the increase in water stress. The use of covariance analysis showed that the results of the average comparison between one-year-old age and mild drought stress, three-year-old age and moderate stress, and five-year-old age and severe stress are significant with a probability of 95%.

**Conclusion:** The results of this research show that the mechanical characteristics of the root can be used as an important factor for the selection of pine seedlings in the afforestation of arid areas for soil bioengineering purposes. Therefore, it is recommended that these properties be considered in soil reinforcement modeling.

**Keywords:** Root, Water Stress, Mechanical Properties, Age, Eldar Pine.