



تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۶/۱۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۱۰/۰۱

واکنش ریشه گونه‌های چوبی فراتوفیت (آب یاب) به تنش خشکی

(مطالعه موردی: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh)

محمدهادی راد^{۱*} و مهدی سلطانی گردفرامرزی^۲

چکیده

فرا توفیت‌ها گیاهانی هستند که نیاز آبی خود را به‌طور مستقیم از طریق توسعه ریشه‌های کارآمد، از منابع آبی سطحی تأمین می‌کنند و برای رشد مطلوب، ریشه باید در تماس مستقیم با آب یا خاک کاملاً مرطوب قرار گیرد. با توجه به اهمیت ریشه در فرایند جذب آب و مواد غذایی از خاک، مطالعه رفتار و سازوکارهای سازگاری آن به تنش‌های محیطی و از جمله تنش خشکی به‌ویژه در خصوص گونه‌های چوبی فراتوفیت که در جنگل‌کاری از اهمیت خاصی برخوردار هستند، بسیار ضروری است. در این تحقیق پراکنش وزنی و طولی ریشه *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh به‌عنوان یک گونه فراتوفیت مورد توجه قرار گرفت. آزمایش در شرایط لایسیمتری و تحت تأثیر رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری (آبیاری در حد ظرفیت زراعی به‌عنوان شاهد، ۳۰ و ۶۰ درصد کم‌آبیاری) صورت گرفت. نتایج بررسی‌های به‌عمل آمده نشان داد که با کاهش دسترسی گیاه به آب یا کم‌آبیاری، وزن و طول ریشه کاهش یافت. پراکنش وزنی و طولی ریشه در اعماق مختلف خاک، به‌میزان دسترسی گیاه به آب وابسته بود، به‌گونه‌ای که با افزایش سطح کم‌آبیاری، میزان پراکنش ریشه در عمق بیشتر خاک، کاهش یافت. بنابراین می‌توان اذعان کرد که برخلاف گیاهان گزروفیت و مزوفیت، نفوذ عمقی ریشه *E. camaldulensis* به‌طور کامل به‌میزان رطوبت موجود در اعماق خاک وابسته است، به‌گونه‌ای که خشکی لایه‌های زیرین خاک، موجب توقف رشد ریشه در اعماق شده و گیاه با سازگاری به‌مقدار آب موجود در لایه‌های سطحی خاک، میزان رشد رویشی خود را مدیریت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پراکنش ریشه، کم‌آبیاری، لایسیمتر

Root response of woody phreatophyte species to drought stress

(Case study: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh)

M.H. Rad^{1*} and M. Soltani Gerdeframarzi²

Abstract

Phreatophytes are the plants that supply their water requirements directly through the development of efficient roots from surface water resources and for optimum growth, the root should be in direct contact with water or a completely moist soil. Considering the importance of roots in the process of water and nutrient uptake from soil, it is necessary to study the mechanism of root adaptation to environmental stresses, including drought stress, especially in woody phreatophyte species, which are more important in forestation. In this research, the weight and length distribution of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh roots as a phreatophyte species was investigated. The experiment was carried out under lysimetric conditions at different irrigation regimes (irrigation at field capacity as control, 30% and 60% of deficit irrigation). The results of this study indicated that the weight and root length decreased with decreasing plant access to water or deficit irrigation. The weight and length distribution of roots at different depths depended on the amount of plant access to water, so that the root distribution in the deeper soil decreased by increased deficit irrigation stress. Therefore, it can be concluded that, in contrast to xerophyte and mesophyte plants, the root penetration of *E. camaldulensis* depends thoroughly on the amount of water in the deeper soil depths. In other words, the dried underlying layers of soil inhibit the root growth in the depths, and the plant manages its vegetative growth through adaptation with available water in the soil surface layers

Keywords: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, deficit irrigation, root distribution, lysimeter

*- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
پست الکترونیک: mohammadhadi@yazd.ac.ir

۲- پژوهشگر، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

1*- Assistant Prof., Research Division of Natural Resources, Yazd Agricultural and Natural Resource Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran
E-Mail: mohammadhadi@yazd.ac.ir

2- Research Expert, Research Division of Natural Resources, Yazd Agricultural and Natural Resource Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran

● مقدمه

با وجود وابستگی توسعه افقی و عمودی ریشه به شرایط محیطی، باید ویژگی‌های ژنتیکی گیاه نیز مدنظر قرار داد. در درختان بالغ، وجود ریشه عمیق به گیاه اجازه می‌دهد تا آب بیشتری را از اعماق خاک جذب کرده و با دوره‌های طولانی مدت خشکی در مقایسه با گونه‌هایی که ریشه سطحی دارند، مقابله کند (Drunasky & Struve, 2005). برخی گونه‌های جنگلی مناطق خشک و نیمه‌خشک به دنبال دسترسی به منابع آبی سهل‌الوصول بوده (گونه‌های فراتوفیت یا آب‌یاب) و با برداشت آب از سطح منابع آبی زیرزمینی یا خاک‌های کاملاً مرطوب ناشی از پدیده کاپیلاری یا ماندابی شدن، نیاز آبی خود را تأمین می‌کنند (With et al., 2000). این گیاهان با درک کامل از حضور منابع آبی سهل‌الوصول در اطراف خود، ریشه را به حدی توسعه می‌دهند تا با حداکثر توان در برداشت آب، از رشد رویشی مطلوب و بالاترین عملکرد، برخوردار شوند. برخی دیگر با تلفیق سازوکار توسعه ریشه، تطابق اسمزی و کاهش تبخیر و تعرق از طریق بهبود ساختار مرفولوژیکی اندام هوایی به دنبال برداشت آب از خاک (حتی در زیر نقطه پژمردگی) هستند (گزرروفیت‌ها و مزوفیت‌ها). در هر صورت گیاهان، برای کمبودهای کوتاه‌مدت آب (برای مثال در نیمروز) تعادلی بین جذب آب و کمبود آن از طریق انسداد روزنه‌ها برقرار می‌کنند (Banon et al., 2004; Kramer & Boyer, 1995). در این حالت جذب CO_2 محدود شده و میزان فتوسنتز خالص کاهش می‌یابد (Maricle et al., 2007). برای کمبودهای طولانی‌مدت، سازش از طریق افزایش نسبت سطح ریشه به سطح برگ به دست می‌آید (Bacelar et al., 2007). نسبت بالای ریشه به شاخه می‌تواند در سازگاری به شرایط خشک، بسیار مؤثرتر از سایر سازوکارها باشد (Li & Wang, 2003; Gazal & Kubiske, 2004; Bargali & Tewari, 2004)، به عبارتی اولین و عمومی‌ترین ویژگی رشد گیاه در مناطق خشک، فزونی نسبت ریشه به

اندام هوایی است، اگرچه نسبت مذکور به‌طور عمده تحت کنترل ژنتیکی قرار دارد (علیزاده، ۱۳۸۳). در شرایط تنش خشکی، توسعه ریشه از طریق انتقال مواد غذایی از برگ‌ها و ساقه‌ها به ریشه صورت گرفته که با محدود شدن رشد اندام هوایی نسبت اندام هوایی به ریشه کاهش می‌یابد (Dias et al., 2007). راد و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی وضعیت توسعه ریشه تاغ (*Haloxylon spp.*) در شرایط لایسیمتری، گزارش کرده‌اند که اعمال تنش شدید خشکی موجب نفوذ ۵۷ درصد از ریشه‌ها به عمق بیشتر از ۶۰ سانتی‌متری خاک شد، درحالی‌که این مقدار برای شاهد (بدون محدودیت آب) ۳۵ درصد اندازه‌گیری شد. تاغ از جمله گیاهان مزوفیت بوده که با توسعه ریشه در سطح و اعماق خاک و اشغال حجم قابل ملاحظه‌ای از آن، نسبت به برداشت آب از طریق افزایش شدید ظرفیت آب، اقدام می‌کند. Thomas و Gausing (2000) گزارش کرده‌اند که با اعمال تیمار خشکی در بلوط، نسبت شاخه به ریشه کاهش یافته و گیاه توانسته است خود را با این شرایط وفق دهد. ادامه تنش خشکی، منجر به توقف کامل رشد و مرگ گیاهان شد. از ریشه‌های عمیق به‌عنوان ابزار کارآمد در جذب آب و سازگاری گونه‌های جنگلی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به شرایط سخت محیطی حاکم، یاد شده است (Yang Wen & Sun, 2015).

گونه‌های چوبی فراتوفیت، دارای ساختار ریشه‌ای متفاوتی هستند. این گیاهان در صورتی که منابع آبی زیرزمینی در دسترس نداشته باشند، با توسعه ریشه در سطح خاک از آب‌های سطحی استفاده و رشد خود را محدود می‌کنند. با وجود منابع آبی زیرزمینی، نسبت به توسعه ریشه اقدام و ریشه‌های خود را برای برداشت آب سهل‌الوصول به منبع آبی می‌رسانند. Jackson و Schenk (2002) بیان داشته‌اند که اگرچه سهم ریشه‌های عمیق از مجموع ریشه‌های تولیدی در برخی گونه‌های جنگلی اندک است، با این وجود آنها می‌توانند عملکرد متفاوتی داشته و اکوسیستم‌های جنگلی

را تحت تأثیر قرار دهند. در این شرایط، منابع زیرزمینی آب می‌توانند به‌عنوان تأمین‌کننده بخشی از نیاز آبی این گیاهان مطرح شده و مورد توجه قرار گیرند (Eamus et al., 2015). به‌نظر می‌رسد که رابطه‌ای بسیار قوی بین گونه‌های فراتوفیت با نوسانات آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود دارد (Nichols et al., 1994; Jobbágy & Jackson, 2007). موضوعی که با عنوان اکوهیدرولوژی مطرح شده و رابطه وجود و پراکنش گونه‌های چوبی را با جریان آب در خاک و منابع آبی زیرزمینی بیان می‌کند (Batelaan et al., 2003).

گزارش‌های متعددی مبنی بر توانایی گونه‌های مختلف اکالیپتوس در برداشت آب‌های زیرسطحی از طریق توسعه ریشه وجود دارد. در بیشتر این گزارش‌ها تأکید

با وجود

وابستگی توسعه افقی و

عمودی ریشه به شرایط محیطی،

باید ویژگی‌های ژنتیکی گیاه نیز مدنظر قرار داد. در درختان بالغ، وجود ریشه عمیق به گیاه اجازه می‌دهد تا آب بیشتری را از اعماق خاک جذب کرده و با دوره‌های طولانی مدت خشکی در مقایسه با گونه‌هایی که ریشه سطحی دارند، مقابله کند.

شده است که آنها می‌توانند با توسعه ریشه در اعماق خاک و دسترسی به منابع آبی زیرزمینی، به‌عنوان زهکش‌کننده‌های زیستی و پالایش‌کننده‌های عناصر سنگین عمل کرده و نقش مؤثری در کاهش سطح ایستایی و ماندابی آب و همچنین تصفیه پساب‌های نفوذیافته به اعماق خاک، داشته باشند (Landmeyer, 2012; Jena et al., 2011; Engel et al., 2005; Cramer et al., 1999). گزارش Whitehead و Beadle (2004) کرده‌اند که درختان جوان اکالیپتوس دارای دو سیستم ریشه سطحی برای استفاده رطوبت



در افق سطحی خاک و ریشه‌های عمودی و عمیق برای جذب رطوبت از اعماق خاک هستند. Carbon و همکاران (1980) گزارش کرده‌اند که ریشه‌های *E. marginata* در جنگل‌های جنوب غرب استرالیا تا اعماق ۲۰ متری مشاهده شده‌اند. آنها اشاره کردند که با افزایش عمق، تعداد ریشه‌های موئین افزایش یافته که این خود تأثیر بسزایی در جذب آب بیشتر از منابع زیرزمینی در فصول خشک سال دارد. Stape و همکاران

آمده به وسیله آن، در تغییرات کمی و کیفی منابع زیرزمینی آب مورد توجه قرار گرفته است (Engel et al., 2005; Jobbagy & Jackson, 2004).

● اقدام‌ها و یافته‌ها

آزمایش با استفاده از لایسیمترهای وزنی زهکش‌دار با ارتفاع ۱۷۰ سانتی‌متر و قطر ۱۲۱ سانتی‌متر در ایستگاه تحقیقات بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد با طول جغرافیایی $9^{\circ} 11' 54''$ شرقی و عرض



شکل ۱- درختان اکالیپتوس استقرار یافته در لایسیمترهای سایت تحقیقاتی آزمایش‌های لایسیمتری ایستگاه تحقیقات بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد

دارای بافت متوسط سیلت- لومی بوده و از $EC\ 4/1$ میلی‌موس بر سانتی‌متر و $pH\ 7/1$ برخوردار بود (راد و همکاران، ۱۳۸۸). با کاشت یک اصله نهال گلدانی یک‌ساله داخل هر لایسیمتر، نسبت به انجام آبیاری و مراقبت‌های لازم به‌مدت یک‌سال اقدام شد. پس از استقرار نهال‌ها در داخل لایسیمترها، تیمارهای آبیاری اعمال شد. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری کامل (در حد ظرفیت زراعی) به‌عنوان شاهد، کم‌آبیاری در حد ۳۰ درصد (تنش ملایم) و کم‌آبیاری در حد ۶۰ درصد (تنش شدید) بود که در قالب طرح آزمایشی کاملاً تصادفی و در سه تکرار اعمال شد. تیمارهای آبیاری به‌مدت یک‌سال اعمال و در پایان نسبت به حذف بخش‌های هوایی و سپس برداشت ریشه برای تعیین پراکنش وزنی و طولی در اعماق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری اقدام شد. شکل ۱ و ۲ نمایی از طرح تحقیقاتی اجرا شده را در ایستگاه تحقیقات بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد نشان می‌دهد.

با برداشت خاک و ریشه در اعماق ذکرشده و الک کردن و سپس شست‌وشوی خاک، ریشه‌های ضخیم و موئین جدا شده و با قرار دادن در کوره و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت (Yin et al., 2005) وزن خشک آنها به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری طول ریشه نسبت به برداشت حجم معینی از خاک و ریشه در اعماق مختلف و از طریق دريچه‌های نصب‌شده روی بدنه لایسیمترها اقدام شد (شکل ۳). نمونه‌های خاک به آزمایشگاه انتقال و ریشه‌های موئین و ضخیم از طریق شست‌وشو از خاک جدا شدند. طول ریشه‌های جداشده از حجم مشخص خاک از طریق روش نیومن (علیزاده، ۱۳۸۳) اندازه‌گیری شد. طول ریشه‌ها در واحد حجم استوانه، محاسبه و سپس اعداد به‌دست آمده به کیلومتر برای هر درخت و در اعماق مختلف تغییر واحد داده شد. بررسی‌های به‌عمل آمده نشان داد که رژیم‌های مختلف آبیاری تأثیر معنی‌داری بر پراکنش وزنی و طولی ریشه در خاک

جغرافیایی $30^{\circ} 4' 32''$ شمالی انجام شد. میانگین بارندگی سالانه ۷۰ میلی‌متر، بیشینه سرعت وزش باد ۱۲۰ کیلومتر در ساعت، میانگین سالانه ساعات آفتابی ۳۰۵۲ ساعت، میانگین سالانه تعداد روزهای یخبندان ۷۳ روز، میانگین سالانه تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، $3207/4$ میلی‌متر، میانگین سالانه رطوبت نسبی در صبحگاه ۵۷ درصد، میانگین سالانه رطوبت نسبی در عصر ۳۸/۵ درصد، میانگین دمای سالانه ۱۸ درجه سانتی‌گراد، کمینه مطلق دمای سالانه $13/5$ - درجه سانتی‌گراد، بیشینه مطلق دمای سالانه $45/5$ درجه سانتی‌گراد و اقلیم منطقه براساس روش دومارتن اصلاح شده فراخشک سرد گزارش شده است. خاک مورد استفاده

(2010) وجود ریشه درختان دوساله *E. grandis* را در عمق ۱۰ متری برای برداشت آب بیشتر از خاک مشاهده و گزارش کرده‌اند که حضور ریشه در این عمق در حالی اتفاق افتاده است که افق‌های رویی خاک، از رطوبت کافی برخوردار بوده‌اند. به‌عنوان *E. camaldulensis* Dehnh یکی از مهم‌ترین گونه‌های اکالیپتوس، سطح قابل توجهی از جنگل‌های دست‌کاشت را به‌خود اختصاص داده است. این گونه در ایران نیز مورد توجه بوده و از آن در جنگل‌کاری، ایجاد بادشکن و فضای سبز استفاده می‌شود (راد و همکاران، ۱۳۸۸). در منابع مختلف به فراتوفیت بودن این گونه اشاره شده و نقش جنگل‌کاری‌های به‌عمل



شکل ۲- لایسیمترهای خارج شده از سایت تحقیقاتی برای انجام مطالعات ریشه (پایان آزمایش)

● بحث و نتیجه گیری

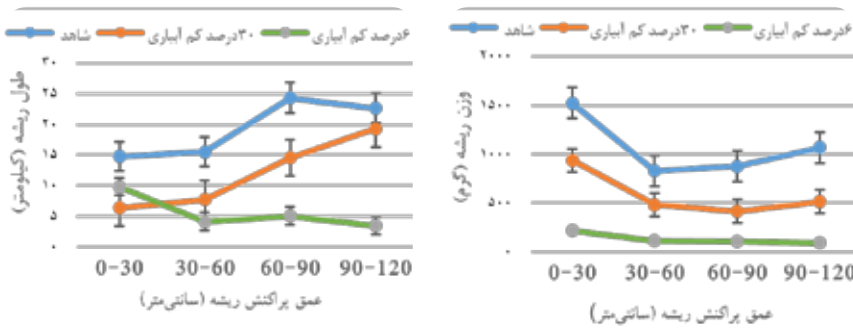
کاهش معنی دار ماده خشک ریشه و همچنین طول ریشه *E. camaldulensis* بر اثر افزایش تنش خشکی، دلالت بر تحت تأثیر قرار گرفتن ریشه به عنوان یکی از مهم ترین اجزای گیاه بر اثر این پدیده محیطی دارد. کاهش وزن خشک ریشه از ۴۲۸۸/۳ گرم در تیمار شاهد به ۵۲۵/۷ گرم در تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری حکایت از تأثیر بسیار زیاد تنش خشکی بر عملکرد ریشه این گیاه دارد. کاهش طول ریشه از ۷۷/۳۲ کیلومتر

موضوع به ویژه در خصوص تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری ملموس تر بود (شکل ۴). در مقابل، با بررسی تأثیر عمق خاک بر پراکنش طولی ریشه‌ها مشخص شد که بین اعماق مختلف، اختلاف معنی داری وجود داشت؛ به طوری که بیشترین مقدار طولی ریشه در افق زیرین (۹۰-۱۲۰ سانتی متری) متمرکز بوده و کمترین طول ریشه در افق میانی (۳۰-۶۰ سانتی متر) خاک مشاهده شد. در بین تیمارها بیشترین کاهش مربوط به تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری بود (شکل ۴).

داشت. با افزایش سطح کم آبیاری، وزن خشک ریشه و همچنین طول ریشه‌ها کاهش یافت. بیشترین مقدار وزنی و طولی ریشه مربوط به تیمار شاهد و کمترین آن مربوط به تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری بود (شکل ۴). با اندازه گیری میزان پراکنش وزنی ریشه در اعماق مختلف خاک، مشخص شد که وزن ریشه در اعماق مختلف خاک، از اختلاف معنی داری برخوردار بود. بیشترین ماده خشک در افق سطحی مشاهده شد و دیگر افق‌ها، اختلاف معنی داری نداشتند. این



شکل ۳- دریچه‌های نصب شده روی بدنه لایسیمترها برای مطالعه خاک و ریشه

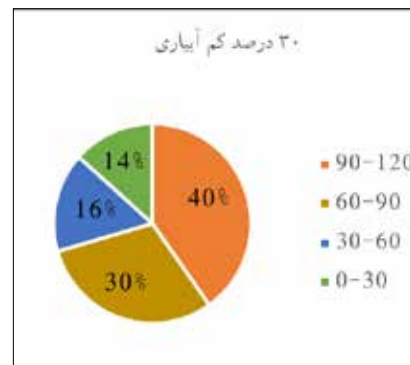
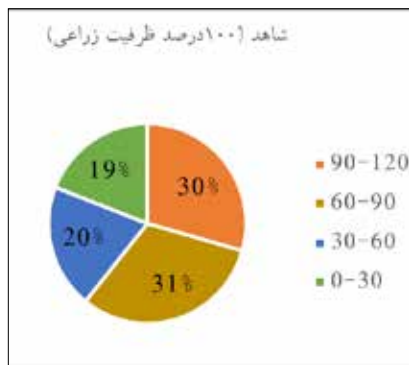
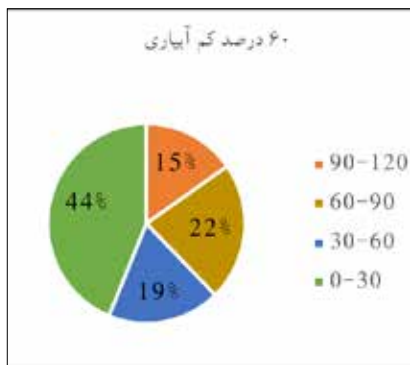


شکل ۴- روند تغییرات توسعه وزنی و طول ریشه *E. camaldulensis* در رژیم‌های مختلف آبیاری در شرایط لایسیمتری

در تیمار ظرفیت زراعی به ۲۲/۵۱ کیلومتر در تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری نیز این موضوع را به خوبی به اثبات رساند (شکل ۴). از نکات برجسته در این خصوص، عمق توسعه ریشه است. از نظر وزنی، بالاترین وزن خشک ریشه مربوط به عمق ۳۰-۰ سانتی متری خاک بود و سایر اعماق، اختلاف معنی داری را از خود نشان ندادند؛ در حالی که از نظر طولی بالاترین طول ریشه مربوط به ۹۰-۱۲۰ سانتی متری بود. نتیجه اینکه نفوذ عمقی ریشه برای دریافت آب بیشتر از خاک (آب‌های زهکش شده به اعماق خاک) در تیمار شاهد و ۳۰ درصد کم آبیاری با توسعه ریشه‌های فرعی و موین، از سازوکارهای جذب بیشتر آب از خاک، توسط گونه مورد نظر است، هر چند علیزاده (۱۳۸۳) به این نکته اشاره دارد که نباید تصور کرد ریشه بعضی گیاهان به دنبال آب به اعماق فرو می‌رود، بلکه رشد ریشه تابع موجودیت آب بوده و عمیق شدن ریشه‌ها در بعضی گیاهان یک خصوصیت ژنتیکی است. به عبارتی در برخی از گیاهان که آنها را گیاهان فراتوفیت (آب‌یاب) می‌نامند، موجودیت منابع غنی آب در اعماق خاک (نه خیلی عمیق) را عامل اصلی توسعه ریشه در آنها دانسته‌اند. این گیاهان می‌توانند قبل از مواجهه با تنش خشکی و بسیار هوشمندانه منابع آب را که در اطرافشان وجود دارد، شناسایی کرده و به آنها دسترسی یابند. White و همکاران (2000) بعضی از گونه‌های گیاهی را مصرف‌کننده‌های قوی آب دانسته و اشاره دارند که آنها می‌توانند از طریق ریشه‌های عمیق و با گذر از خاک‌های مرطوب، به منابع آب سهل‌الوصول دسترسی یابند؛ موضوعی که توسط Stape و همکاران (2010) نیز گزارش شده است. آنها اشاره دارند که ریشه‌های *E. grandis* را بعد از گذشت دو سال از کاشت (با وجود آب کافی در خاک) در عمق ۱۰ متری از سطح خاک مشاهده کردند؛ موضوعی که عامل موفقیّت این گیاه را در برداشت آب از منابع زیرسطحی دانسته و رشد بسیار سریع و تولید زیست‌توده زیاد را در سال سوم به بعد، مربوط به این امر دانسته‌اند. همان‌گونه که شکل ۵



شکل ۵- نفوذ عمقی ریشه *E. camaldulensis* در تیمار آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و خروج آن از زهکش لایسیمتر، برای برداشت آب بیشتر از مخزن جمع‌آوری زه‌آب



شکل ۶- درصد پراکنش طولی ریشه *E. camaldulensis* در تیمارهای مختلف آبیاری در شرایط لایسیمتر

کم آبیاری به ترتیب ۳۳۰ و ۲۲۰ سانتی متر اندازه گیری شد. محدود بودن آب در اعماق لایسیمتر به دلیل اعمال تنش شدید خشکی، عامل اصلی توقف رشد ریشه در تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری بود. در صورت محدود بودن آب در اعماق خاک و مواجهه ریشه با تنش خشکی، توسعه ریشه ها محدود به سطح خاک شده و گیاه سازوکار کاهش رشد اندام هوایی و بقا در شرایط خشک را بروز می دهد (شکل ۷). در تنش های ملایم، گیاه می تواند با سازوکار توسعه ریشه، آب را از سطح و عمق بیشتری از خاک برداشت کند. در شرایطی که رطوبت کافی در افق های رویی خاک وجود داشته باشد و همچنین منابع آبی زیرزمینی نیز در دسترس باشد، گیاه با توسعه ریشه به اعماق خاک و برداشت آب بیشتر، از رشد مطلوب برخوردار شده و عملکرد قابل انتظار را به عنوان گونه ای تندرست به همراه خواهد داشت. Laclau و همکاران (2013) با بررسی ساختار ریشه *E. grandis* و هیبریدهای مربوطه این موضوع را مورد تأکید قرار داده و بیان داشته اند که این گیاهان دارای سیستم ریشه ای دوگانه با تراکم بالای ریشه های کم عمق در سطح خاک و ریشه های عمیق که عمق توسعه آنها به بیش از ۱۸ متر نیز می رسد، آب را از سطح و اعماق خاک برداشت می کنند. این در شرایطی است که منابع آبی مطمئن در اعماق خاک، در دسترس گیاه باشد.

کمیت و کیفیت ریشه *E. camaldulensis* در شرایط برخورداری از آب کافی (تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)

اعماق مختلف خاک نشان داد که هیچ یک از تیمارهای رطوبتی از قاعده مذکور پیروی نکرده اند. با وجود رطوبت کافی در تیمار ظرفیت زراعی (در تمامی اعماق خاک)، بخش قابل توجهی از ریشه ها که بیشتر ریشه های موین بودند در عمق ۹۰-۱۲۰ سانتی متری متمرکز شدند (شکل ۶). Jackson و Schenk (2002) به این موضوع اشاره کرده و بیان داشته اند که با وجود پایین بودن نسبت زیست توده ریشه در اعماق خاک، ریشه های عمیق، تأثیر زیادی بر عملکرد اکولوژیکی اکوسیستم های جنگلی و برداشت آب از منابع زیرزمینی دارند. گرچه تغییرات وزنی و طولی ریشه

نفوذ عمقی ریشه برای دریافت آب بیشتر از خاک (آب های زهکش شده به اعماق خاک) در تیمار شاهد و ۳۰ درصد کم آبیاری با توسعه ریشه های فرعی و موین، از سازوکارهای جذب بیشتر آب از خاک، توسط گونه مورد نظر است.

در تیمار ۳۰ و ۶۰ درصد کم آبیاری در اعماق مختلف خاک قابل توجه بود، اما ثابت بودن نسبی آن در تیمار ۶۰ درصد کم آبیاری نشان از توقف رشد ریشه بر اثر تنش بیش از حد، به ویژه در اعماق خاک داشت. طول بلندترین ریشه در تیمار شاهد، ۳۸۰ سانتی متر، تیمار ۳۰ و ۶۰ درصد

نشان می دهد، این موضوع در خصوص *E. camaldulensis* نیز مشاهده شد. با وجود رطوبت کافی در خاک (در حد ظرفیت زراعی)، ریشه ها از زهکش لایسیمتر خارج شده و از منبع آبی که به صورت مصنوعی و از طریق جمع آوری زه آب ایجاد شده بود، استفاده کردند.

erninger و Susiluoto (2007) نیز گزارش کرده اند که در مناطق خشک و نیمه خشک، در صورت وجود منابع آبی قابل دسترس، ریشه های درختان اکالیپتوس برای مقابله با فصول خشک، با نفوذ به اعماق خاک از آب های ذخیره شده استفاده می کنند. باید اشاره داشت که گونه های مختلف اکالیپتوس از سازوکارهای متنوعی در برداشت آب از خاک برخوردار هستند. برخی از آنها می توانند سازوکارهای گونه های گزروفیت و مزوفیت را در مقابله با تنش خشکی به کار گیرند که از جمله آنها می توان به *E. microtheca* و *E. sarjantii* اشاره کرد (راد و همکاران، ۱۳۹۲). با وجود این موضوع، در این تحقیق تنش خشکی شدید نتوانست تأثیری بر نفوذ عمقی ریشه *E. camaldulensis* داشته باشد. برای بیشتر گیاهان در حالت معمول و بدون محدودیت برای توسعه ریشه، حدود ۴۰ درصد ریشه های گیاه در لایه یک چهارم سطحی، ۳۰ درصد در لایه یک چهارم دومی، ۲۰ درصد در لایه یک چهارم سومی و ۱۰ درصد در لایه یک چهارمی آخر گسترش می یابد (علیزاده، ۱۳۸۳). نتایج بررسی وضعیت توسعه ریشه *E. camaldulensis* از نظر طولی و وزنی در



شکل ۷- تفاوت رشد اندام هوایی و ریشه *E. camaldulensis* در رژیم‌های مختلف آبیاری (از چپ به راست، شاهد، ۳۰ درصد کم آبیاری و ۶۰ درصد کم آبیاری)

را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. در پایان می‌توان بیان داشت که گونه‌های چوبی فراتوفیت و از جمله *E. camaldulensis* توانایی بسیار بالایی در برداشت آب از منابع آبی زیرسطحی و سهل‌الوصول از طریق توسعه عمودی ریشه و پس از دسترسی به آب، توسعه شبکه‌ای از ریشه‌های موئین که از سطح جذب بالایی برخوردار هستند، دارند. موضوعی که توسط محققان مختلفی گزارش شده و این گونه از اکالیپتوس را به‌عنوان گونه‌ای فراتوفیت و شاخص زهکش زیستی معرفی کرده و مورد تأکید قرار داده‌اند (Landmeyer, 2012; Jena et al., 2011; Cramer et al., 1999).

منابع

راد، م.ه.، عصاره، م.ح.، سلطانی، م. و تجملیان، م.، ۱۳۹۲. تعیین نیاز آبی، ضریب گیاهی و کارایی مصرف آب در دو گونه اکالیپتوس (*E. microtheca* و *E. sargentii*) در شرایط لایسیمتری، پژوهش آب ایران، ۱۲(۷): ۷۸-۷۱.
راد، م.ه.، عصاره، م.ح.، مشکوه، م.ح.، دشتکیان، ک. و سلطانی، م.، ۱۳۸۸. نیاز آبی و تابع تولید اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*) در شرایط اقلیمی خشک. مجله جنگل ایران، ۱۲(۱): ۷۱-۶۱.

راد، م.ه.، میرحسینی، س.ر.، مشکوه، م.ح. و سلطانی، م.، ۱۳۸۶. بررسی تأثیر رطوبت خاک بر چگونگی توسعه ریشه گیاه تاغ (*Haloxylon* spp). فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۱(۱): ۱۲۳-۱۱۲.
علیزاده، الف.، ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد، ۴۷۰ صفحه.

Bacelar, E.A., Moutinho, J.M., Goncalves, B.c., Ferreira, H.F. and Correia, C.M. 2007. Changes in growth, gas exchange, xylem hydraulic properties and water use efficiency of tree olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 60: 183-192.
Banon, S., Fernandez, J.A., Franco, J.A., Torrecillas, A., Alarcon, J.J. and Sanchez-Blanco, M.J., 2004. Effects of water stress and night temperature preconditioning on water relation and morphological and anatomical changes of *Lotus creticus* plants. *Scientia Horticultural*, 101: 331-342.
Bargali, K. and Tewari. A., 2004. Growth and water relation parameters in drought-stressed *Coriaria nepalensis* seedling. *Journal of Arid Environment*, 58: 505-512.
Batelaan, O., De Smedt, F. and Triest, L., 2003. Regional groundwater discharge: phreatophyte mapping, groundwater modelling and impact analysis of land-use change. *Journal of Hydrology*, 275(1-2): 86-108.
Carbon, B.A., Bartle, G.A., Murray, A.M.

and Macpherson, D.k., 1980. The distribution of root length, and the limits to flow of soil water to roots in a dry sclerophyll forest. *Forest Science*, 26: 656-664.
Cramer, V.A., Thorburn, P.J. and Fraser, G.W., 1999. Transpiration and groundwater uptake from farm forest plots of *Casuarina glauca* and *Eucalyptus camaldulensis* in saline areas of southeast Queensland, Australia. *Agricultural water management*, 39: 187-204.
Dias, P.C., Araujo, W.I., Moraes, G. a. b. k., Barros, R.S. and Damatta, F.M., 2007. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. *Journal of Plant Physiology*, 164: 1639-1647.
Drunasky, N. and Struve, D.K., 2005. *Quercus macrocarpa* and *Q. prinus* physiological and morphological responses to drought stress and their potential for urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4: 13-22.
Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J. and Huete, A., 2015. Ground water dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19: 4229-4256.
Engel, V., Jobbagy, E.G., Stieglitz, M., Williams, M. and Jackson, R.B., 2005. Hydrological consequences of *Eucalyptus* afforestation in the Argentine Pampas. *Water Resources Research*, 41: 1-14.



شکل ۸- کمیت و کیفیت ریشه *E. camaldulensis* در شرایط آبیاری در حد ظرفیت زراعی. شبکه گسترده از ریشه‌های موین به‌ویژه در بخش انتهایی، برای برداشت آب بیشتر (تصویر سمت چپ) مورد توجه است.

and Management, 259: 1684–1694.
 Susiluoto, S. and Berninger, F., 2007. Interactions between Morphological and Physiological Drought Responses in *Eucalyptus microtheca*. *Silva Fennica*, 41: 221-233.
 Thomas, F.M. and Gausling, T., 2000. Morphological and physiological responses of oak seedlings (*Quercus petraea* and *Q. robur*) to moderate drought. *Annals of Forest Science*, 57: 325-333.
 White, D.A., Turner, N.C. and Galbraith, J.H., 2000. Leaf water relations and stomatal behavior of four allopatric *Eucalyptus* species planted in Mediterranean southwestern Australia. *Tree Physiol*, 20: 1157–1165.
 Whitehead, d. and Beadle, C.L., 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, 193: 113-140.
 Yang, B., Wen, X. and Sun, X., 2015. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201: 218–228.
 Yin, C., Wang, X., Duan, B., Luo, J. and Li, C., 2005. Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric *Populus* species as affected by water stress. *Forest Ecology and Management*, 193: 113-140.

Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater , Springer, Dordrecht, pp. 209-232. <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1957-6-9>.
 Li, C. and Wang, K., 2003. Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell populations. *Forest Ecology and Management*, 179: 377-385.
 Maricle, B.R., Cobos, D.R. and Campbell, C.S., 2007. Biophysical and morphological leaf adaptations to drought and salinity in salt marsh grasses. *Environmental and Experimental Botany*, 60: 458–467.
 Nichols, W.D., 1994. Groundwater discharge by phreatophyte shrubs in the Great Basin as related to depth to groundwater. *Water Resource Research*, 30: 3265–3274.
 Schenk, H.J. and Jackson, R.B., 2002. Rooting depths, lateral root spreads and belowground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90: 480–494.
 Stape, J.L., Binkley, D., Ryan, M.G., Fonseca, S., Loos, R.A., Takahashi, E.N., Silva, C.R., Silva, S.R., Hakamada, R.E., Ferreira, J.M. de A., Lima, A.M.N., Gava, J.L., Leite, F.P., Andrade, H.B., Alves, J.M., Silva, G.G.C. and Azevedo, M.R., 2010. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology*

Gazal, R.M. and Kubiske, M.E., 2004. Influence of initial root length on physiological responses of cherry bark oak and shumard oak seedling to field drought conditions. *Forest Ecology and Management*, 189: 295-305.
 Jena, S.K., Sahoo, N., Roy Chowdhury, S., Mohanty, R.K., Kundu, D.K., Behera, M.S., Patil, D.U. and Kumar, A., 2011. Reclamation of coastal waterlogged wasteland through bio drainage. *Journal Indian Society Coastal Agriculture Research*, 29: 57-62.
 Jobbagy, E.G. and Jackson, R.B., 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, 10: 1299-1312.
 Jobbagy, E.G. and Jackson, R.B., 2007. Groundwater and soil chemical changes under phreatophytic tree plantations. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 112:1-15.
 Kramer, P.J. and Boyer, J.S., 1995. Water relation of plants and soil. Academic Press, San Diego, 495 p.
 Laclau, J.-P., da Silva, E.A., Lambais, G.R., Bernoux, M., le Maire, G., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., de Moraes Goncalves, J.L., Jourdan, C. and Nouvellon, Y., 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Frontiers in Plant Science*, 4: 1-12.
 Landmeyer, J.E., 2012. Monitoring Plant and Groundwater Interactions. In