

نیاز آبی و تابع تولید اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh) در شرایط اقلیمی خشک

محمدهادی راد^{۱*}، محمدحسن عصاره^۲، محمدعلی مشکوه^۳، کاظم دشتکیان^۱ و مهدی سلطانی^۵

^۱مربی پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی یزد
^۲دانشیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور
^۳استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی یزد
^۴کارشناس مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی یزد
تاریخ دریافت: ۸۸/۴/۱۱، تاریخ تصویب: ۸۸/۱۰/۲۸

چکیده

اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh) در ایران سطحی وسیع و در شرایط اقلیمی مختلف کاشت شده است. باوجود کشت گسترده آن در کشور، تحقیقات مدونی درباره نیاز آبی آن صورت نگرفته است. هدف از اجرای این تحقیق، تعیین مقدار تبخیر- تعرق (Et) سالانه، تابع تولید (PF) و کارایی مصرف آب (WUE) در گونه ذکرشده، تحت شرایط لایسیمتری و رژیم‌های مختلف آبیاری بوده است. آزمایش در ایستگاه تحقیقات بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد با درختان سه ساله‌ای که در لایسیمترهای زهکش‌دار با قطر ۱۲۰ سانتی‌متر و عمق ۱۶۰ سانتی‌متر کشت شده بودند، آغاز شد. تیمارهای اعمال‌شده در سه تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل ۱۰۰ درصد (آبیاری به اندازه کافی)، ۷۰ درصد (تنش متوسط) و ۴۰ درصد (تنش شدید) ظرفیت زراعی بودند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقدار تبخیر- تعرق گیاه به طور کامل به موجودی آب در خاک وابسته است، به‌گونه‌ای که در صورت وجود رطوبت کافی در خاک (در حد ظرفیت زراعی)، می‌تواند ضریب گیاهی خود را تا ۱/۷ افزایش می‌دهد. مجموع ماده خشک (ساقه، برگ و ریشه) نیز با افزایش مقدار رطوبت خاک یا دسترسی گیاه به آب بیشتر افزایش یافت. با افزایش مقدار رطوبت خاک، مقدار تبخیر- تعرق افزایش یافت و موجب بهبود تابع تولید گیاه شد. تنش خشکی موجب بهبود کارایی مصرف آب (گرم ماده خشک بر کیلوگرم آب تعرق‌یافته) شد، به‌گونه‌ای که تیمارهای ۷۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی با تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) نشان دادند، هرچند افزایش تنش خشکی از ۷۰ درصد به ۴۰ درصد ظرفیت زراعی بر کارایی مصرف آب تأثیر معنی‌داری نداشت. بیشترین کارایی مصرف آب مربوط به تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی با مقدار ۲/۵ گرم ماده خشک بر کیلوگرم آب مصرف‌شده در تعرق بود.

واژه‌های کلیدی: اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh)، تبخیر- تعرق، تابع تولید، کارایی مصرف آب، تنش خشکی.

مقدمه و هدف

گونه‌های مختلف اکالیپتوس در بیش از ۸۵ کشور جهان، در مساحتی حدود ۶۵ میلیون هکتار، به‌طور گسترده و با اهداف مختلف کشت می‌شود. قسمت اعظم جنگلکاری‌های صنعتی موجود در جهان، با ۱۰ گونه از میان تعداد زیاد گونه‌های آزمایش‌شده، انجام می‌گیرد که *E. camaldulensis* یکی از مهم‌ترین آنهاست (عصاره و سردابی، ۱۳۸۶). کاشت اکالیپتوس در ایران همزمان با ورود انگلیسی‌ها به خوزستان صورت گرفت، اما به‌طور رسمی از سال ۱۳۱۰، کشت آن در منطقه شمال آغاز شد (سردابی، ۱۳۷۷) و اکنون سطح وسیعی از اراضی شمال، مرکز و جنوب کشور را به خود اختصاص داده است. در فارس از حدود ۸۵ سال قبل پایه‌هایی از *E. camaldulensis* در جهرم و داراب کاشته شده است (مرتضوی جهرمی، ۱۳۷۳). در میان گونه‌های کاشته‌شده، گونه *E. camaldulensis* به‌دلیل مقاومت بیشتر در برابر شرایط نامساعد محیطی و رشد سریع بیشتر مورد توجه است و سطح بیشتری را به خود اختصاص داده است.

باوجود قدمت زیاد کاشت این گونه در ایران، تحقیقات چندانی درباره نیاز آبی و رفتارهای اکولوژیکی آن در شرایط اقلیمی کشور و در مواجهه با تنش‌های محیطی به‌ویژه خشکی صورت نگرفته است. صادقی (۱۳۷۹) با اجرای تحقیقاتی، دوره آبیاری مناسب برای اکالیپتوس را برای بوشهر تعیین کرده است. صالحه شوشتری (۱۳۷۶) مؤثرترین دوره آبیاری تکمیلی برای استقرار اولیه چهار گونه و پروانس اکالیپتوس را در شرایط تپه‌های شنی و شنزارهای خوزستان مشخص کرده است. ادراکی و کوثر (۱۳۷۱) نیاز آبی *E. camaldulensis* را در عرصه‌های آبخوان گریبایگان فسا تعیین کرده‌اند.

منابع اطلاعاتی متعددی درباره نیاز آبی و رفتارهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه در مواجهه با تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی وجود دارد. محققان مختلف بر حسب شرایط اکولوژیکی کشور خود تحقیقاتی را انجام داده و اطلاعاتی را در این زمینه منتشر کرده‌اند (Callister et al., 2008; Lemcoff et al., 2002; Al-jamal et al., 2002; Gindaba et al., 2004; Merchant et al., 2006; Merchant et al., 2007; Farrell et al.,

1998; Arndt et al., 2008; Dieters, 2007; Whitehead & Beadle, 2004; Butcher et al., 2009; Jie et al., 2004). نیاز آبی، یا به‌عبارتی، تبخیر- تعرق و چگونگی واکنش گیاه به تنش خشکی، مهم‌ترین عامل محدودکننده در توسعه پوشش گیاهی است که باید به‌طور ویژه به آن پرداخته شود. در این مقاله، ضمن توجه به نیاز آبی *E. camaldulensis*، ضریب گیاهی (Kc)، تابع تولید و کارایی مصرف آب (WUE¹) نیز برای این گیاه در شرایط اقلیمی خشک معرفی شده است.

منظور از تبخیر- تعرق، برآورد مقدار آبی است که باید به هر پوشش گیاهی داده شود تا در طول دوره رویش صرف تبخیر و تعرق کند و بدون آنکه با تنش آبی مواجهه شود، رشد خود را تکمیل و حداکثر مقدار محصول را تولید کند (علیزاده، ۱۳۸۳؛ Kirkam, 2005; Al-Jamal et al., 2002). در این زمینه اطلاع از مقدار آب مورد استفاده توسط گیاه یا نیاز روزانه گیاه برای تبخیر- تعرق اهمیت دارد و می‌توان بر اساس آن برنامه‌ریزی آبیاری را تدوین کرد، زیرا مقدار تبخیر و تعرق، با عملکرد گیاه رابطه خطی دارد. رابطه بین عملکرد و مقدار تبخیر- تعرق می‌تواند تابع تولید تبخیر- تعرق (Etp²) را برای گیاه تعریف کند (Al-Jamal et al., 2002).

استفاده مناسب از آب موضوع مبهمی است، چرا که معانی و موارد بسیاری دارد. با وجود این، می‌توان آن را به مجموع ماده خشکی که توسط هر واحد آب مورد استفاده به‌وجود می‌آید، تعریف کرد (Howell, 2001). رطوبت خاک، غلظت نمک‌ها، مواد غذایی و تنش‌های ناشی از حمله آفات و بیماری‌ها بر مقدار تبخیر- تعرق تأثیر می‌گذارد و موجب کاهش عملکرد محصول می‌شود. در نتیجه تابع تولید نمی‌تواند برای هر گونه گیاهی تعریف قاطعی داشته باشد. تابع تولید بر اساس اقلیم منطقه، ارقام مختلف یک گونه و حتی از سالی به سال دیگر، ممکن است متفاوت باشد (Hang & Miller, 1982).

1- Water Use Efficiency
2- Et Production Function

مواد و روش‌ها

مکان، شرایط اقلیمی و وضعیت خاک، از سایت تحقیقاتی آزمایش‌های لایسیمتری ایستگاه تحقیقاتی بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد که شامل بر ۱۰ عدد لایسیمتر وزنی زهکش‌دار با ارتفاع ۱۶۰ سانتی‌متر و قطر ۱۲۱ سانتی‌متر است، استفاده شد. جنس لایسیمترها از آهن گالوانیزه است و بدنه آنها به منظور کاهش تبادلات حرارتی با فابریکلاس و پشم شیشه پوشانده شده است. کف لایسیمترها، شیب دو سانتی‌متری دارد و آب اضافی به لوله‌ای که برای خروج آب در نظر گرفته شده است، منتهی می‌شود. به منظور بهبود وضعیت زهکش لایسیمترها از ماسه درشت به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و ماسه ریز به ارتفاع ۵ سانتی‌متر در کف آنها استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقدار تبخیر از سطح خاک، لایسیمتری که در آن گیاهی کشت نشد و رطوبت آن همواره در حد ظرفیت زراعی حفظ شد، در نظر گرفته شد. در کنار لایسیمترها تشتک تبخیر کلاس A برای

اندازه‌گیری تبخیر نصب شد. شرایط اکولوژیکی حاکم بر سایت تحقیقاتی ذکر شده عبارت است از: میانگین بارندگی سالانه ۷۰ میلی‌متر، حداکثر 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 ۳۲۰۷/۴ میلی‌متر، میانگین سالانه رطوبت نسبی در صبحگاه ۵۷ درصد، میانگین سالانه رطوبت نسبی در عصر ۳۸/۵ درصد، میانگین دمای سالانه ۱۸ درجه سانتی‌گراد، حداقل مطلق دمای سالانه ۱۳/۵- درجه سانتی‌گراد، حداکثر مطلق دمای سالانه ۴۵/۵ درجه سانتی‌گراد، اقلیم منطقه نیز براساس روش دومارتن اصلاح‌شده فراخشک سرد گزارش شده است. برای پر کردن لایسیمترها از خاک مناسب با بافت شنی-لوم استفاده شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده به شرح جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در لایسیمترها

وزن مخصوص ظاهری	بافت خاک	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	مواد خنثی‌شونده (درصد)	واکنش گل اشباع (pH)	هدایت الکتریکی در پایان طرح ($EC \times 10^3$)	هدایت الکتریکی بعد از آبشویی ($EC \times 10^3$)	هدایت الکتریکی قبل از آبشویی ($EC \times 10^3$)
۱/۵۸	S.L	۱۸	۱۲/۳	۶۹/۷	۲۴/۸۷	۷/۱	۱/۰۷	۴/۸	۳۳/۴۳

تکرار یک اصله نهال و در مجموع برای هر تیمار سه اصله) اعمال شد. در این شرایط سن نهال‌ها حدود دو سال بود. با اعمال تیمارهای رطوبتی به مدت یک‌سال، اندازه‌گیری‌ها بر روی درختان سه‌ساله انجام شد. اندازه‌گیری رطوبت خاک به وسیله TDR مدل TRAM انجام گرفت. رطوبت خاک در پنج عمق ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد و میانگین آنها مبنای آبیاری قرار گرفت. قبل از به‌کارگیری TDR، دقت آن از راه توزین لایسیمترها و اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک بررسی شد. آبیاری بر حسب نیاز و در زمان مقرر انجام گرفت. برای تجزیه آماری داده‌ها و همچنین مقایسه میانگین داده‌ها و بررسی

- مواد آزمایشی، تیمارها و طرح آماری
 با آماده شدن لایسیمترها و فراهم شدن شرایط برای کاشت نهال در آنها، یک اصله نهال یکساله که از نهالستان مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع تهیه شده بود کاشته شد. نهال‌ها در شروع فصل پاییز سال ۱۳۸۵ کاشته و به مدت یکسال به فاصله ۱۵ روز یکبار با مقدار ۵۰ لیتر آب، آبیاری شدند. از نهال‌های کاشته‌شده در برابر باد و سرمای احتمالی مراقبت به عمل آمد. در ابتدای پاییز سال ۱۳۸۶، تیمارهای رطوبتی شامل ۱۰۰ درصد (بدون تنش یا شاهد)، ۷۰ درصد (تنش ملایم) و ۴۰ درصد (تنش شدید) ظرفیت زراعی در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار (در هر

یکبار عملیات کفبر کردن و استفاده مجدد از جست‌ها تکرار شد). چنین حالتی در طراحی مدل آبیاری درختان *E. camaldulensis* با استفاده از فاضلاب شهری نیز گزارش شده است (At Jamal et al., 2002). اجزای بریده‌شده نگهداری شد و در انتهای آزمایش، در اندازه‌گیری‌های مربوطه به کار رفت.

برای محاسبه مقدار تعرق گیاه از میانگین ضرایب ارایه‌شده در منابع و رابطه $T_{(crop)} = E_{t(crop)} \times 0.09$ استفاده شد. در این رابطه $T_{(crop)}$ معادل تعرق گیاه و $E_{t(crop)}$ معادل تبخیر و تعرق گیاه است. به عبارتی حدود ۹ درصد از تبخیر - تعرق، تنها تبخیر از سطح خاک است. این مقدار را در منابع، حدود ۱۵ - ۱۰ درصد گزارش کرده‌اند (علیزاده، ۱۳۸۳). در اینجا ذکر یک نکته ضروری است که برای محاسبه مقدار تبخیر - تعرق در واحد سطح (هکتار) و همچنین محاسبه تابع تولید، تعداد درختان کشت‌شده در یک هکتار برای *E. camaldulensis* برابر ۱۱۱۱ اصله، یعنی با فاصله 3×3 متر در نظر گرفته شده است.

ب) محاسبه نیاز آبی: در محاسبه نیاز آبی برای آبیاری باید به درصد پوشش زمین توسط گیاه توجه کرد. در زمان محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مورد نظر و مقایسه آن با گیاه مرجع یا تشتک تبخیر، مبنای محاسبه بر اساس پوشش کامل زمین توسط گیاه است. اگر بخواهیم تبخیر - تعرق پتانسیل را در شرایطی که زمین پوشش کامل نداشته باشد، به دست آوریم، باید ضریب درصد پوشش گیاهی را نیز در محاسبات مربوطه که معمولاً بر مبنای فرمول زیر استوار است، در نظر بگیریم (علیزاده، ۱۳۸۳):

$$E_{t(\text{partial cover})} = 0.33(1 + C)(E_{\text{pan}})(K_c(\text{crop}))$$

در فرمول بالا C مقدار پوشش زمین توسط گیاه بوده و مقدار آن از صفر تا یک متغیر است. E_{pan} مقدار تبخیر از تشتک تبخیر و $K_c(\text{crop})$ برابر با ضریب گیاهی در شرایط آزمایش است. نظر به اینکه به‌طور معمول در مراحل مختلف رشد اکالیپتوس، به آبشویی برای خارج کردن نمک‌های اضافی از منطقه ریشه نیاز نیست، ضریب مربوط به آبشویی در محاسبه نیاز آبی لحاظ نشده است.

همبستگی صفات مورد اندازه‌گیری از نرم‌افزار آماری SAS استفاده و برای بررسی رابطه صفات با یکدیگر و رسم نمودارها از محیط نرم‌افزاری EXCEL استفاده شد.

- فاکتورهای مورد ارزیابی

الف) تبخیر - تعرق از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Et = I + P - LO - L$$

که در آن Et تبخیر - تعرق (سانتی‌متر)، I مقدار آبیاری (سانتی‌متر)، P مقدار بارندگی (سانتی‌متر)، LO جریان آب زیر سطحی خارج‌شده از لایسیمترها (سانتی‌متر) و L مقدار آبی است که برای آبشویی به خاک وارد می‌شود تا شوری خاک افزایش نیابد (سانتی‌متر). برای آبشویی خاک، پس از سه بار آبیاری مقدار ۳۰ درصد آب اضافه به خاک وارد شد و سپس مقدار خروجی اندازه‌گیری و در محاسبات مقدار آب مصرف‌شده در تبخیر و تعرق لحاظ شد.

برای محاسبه ضریب گیاهی از اطلاعات موجود درباره مقدار تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A مربوط به سایت تحقیقاتی مربوطه و همچنین ایستگاه‌های هواشناسی یزد و میبد که هر دو به فاصله تقریبی بیست کیلومتر از محل تحقیق قرار دارند، استفاده شد. برای محاسبه ضریب گیاهی لازم بود که مقدار تبخیر - تعرق در هر یک از تیمارها بر مقدار تبخیر - تعرق گیاه مرجع (E_{t_0}) در شرایط آزمایش تقسیم شود. با توجه به عدم دسترسی به تبخیر - تعرق از گیاه مرجع از ضریب تشت که معادل 0.66 در نظر گرفته شد استفاده شد (علیزاده، ۱۳۸۳). به عبارتی مقدار تبخیر - تعرق گیاه مرجع معادل 0.66 تبخیر از تشتک در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه ضریب گیاهی مقدار ثابتی نیست و مقدار آن در طول دوره رشد گیاه متغیر است، برای دوره‌های مختلف رشد گیاه و برای تیمارهای مختلف محاسبه شد. در این بخش باید به این نکته اشاره شود که در دی ماه ۱۳۸۶ با بروز پدیده یخبندان (کاهش دما تا $10/5$ - درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ روز)، بخش هوایی تمامی درختان دچار آسیب شد که به ناچار در اواسط اسفندماه درختان کفبر شدند و در ادامه از جست‌های حاصل که تنک شد و تنها یک شاخه از آنها باقی ماند، استفاده شد (این موضوع ممکن است در عمل نیز برای بهره‌برداری از چوب درختان اتفاق بیفتد و هر چند سال

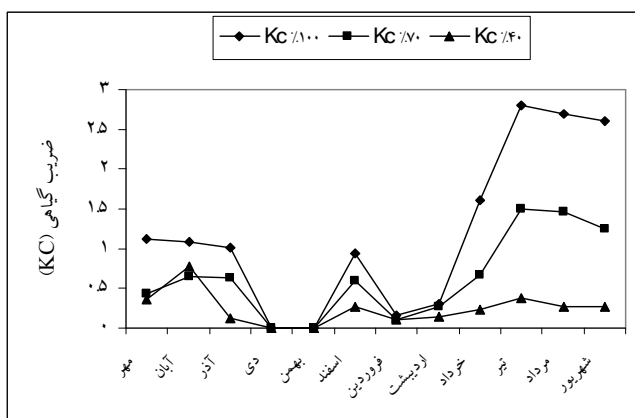
خشک تولید شده و W جرم آب مصرف‌شده توسط گیاه است.

نتایج

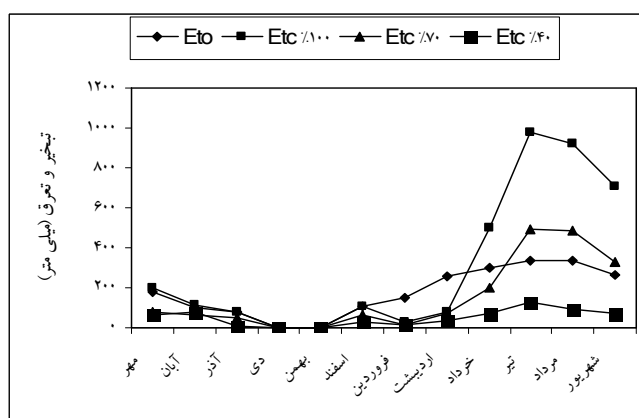
الف) تبخیر- تعرق گیاه (E_t) و محاسبه ضریب گیاهی (K_c): با توجه به مقدار آب مصرف‌شده در هر یک از تیمارهای رطوبتی که به ترتیب برای تیمارهای ۱۰۰ درصد، ۷۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی ۴۳۴۵، ۲۱۳۳/۵ و ۶۹۰/۶ لیتر اندازه‌گیری شد، به خوبی می‌توان بر تفاوت آنها در مقدار تبخیر- تعرق اشاره کرد. مراحل مختلف رشد گیاه که اغلب تحت تأثیر شرایط اقلیمی است در مقدار تبخیر- تعرق نقش دارد و به این دلیل، می‌توان مراحل مختلف رشد را بر اساس مقدار تبخیر- تعرق تفکیک کرد. این موضوع در شکل‌های ۱ و ۲ به خوبی نشان داده شده است. شکل ۳ مقدار تبخیر- تعرق را در طول دوره آزمایش در تیمارهای مختلف و در مقایسه با گیاه مرجع (E_{t_0})، نشان می‌دهد. در شرایط آزمایش، نزدیک‌ترین مقدار تبخیر- تعرق به تبخیر- تعرق گیاه مرجع زمانی اتفاق افتاده است که گیاه تحت تأثیر تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی قرار گرفته است، هرچند مقدار کمی تبخیر- تعرق آن از گیاه مرجع کمتر بوده است.

ج) تابع تولید: در محاسبه توابع تولید، رابطه مقدار تولید با تبخیر- تعرق مد نظر قرار می‌گیرد که معمولاً این توابع خطی هستند، اما اگر مقدار آب داده‌شده (مقدار آبیاری) ملاک قرار گیرد، تابع تولید غیر خطی خواهد بود (علیزاده، ۱۳۸۳). با کنترل معادلات Polynomial مشخص شد که ضریب تشخیص آنها برای صفت مورد نظر افزایش می‌یابد، با وجود این دلیل یادشده از تابع خطی استفاده شد. نکته‌ای که در منحنی‌ها و توابع تولید باید به آن توجه کرد، محدودیت‌های این معادله‌هاست که صحت آنها فقط در یک دامنه خاص است و نمی‌توان منحنی را امتداد داد و به ازای مقادیری که آزمایش نشده‌اند هم تولید را پیش‌بینی کرد (علیزاده، ۱۳۸۳).

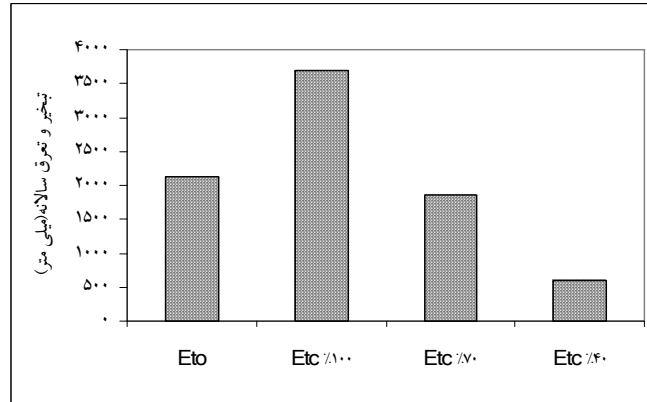
د) کارایی مصرف آب: در پایان آزمایش، بخش‌های هوایی و ریشه گیاه برداشته شد و با قرار دادن آنها در کوره و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، وزن خشک آنها محاسبه شد (Yin et al, 2005). با محاسبه مقدار تعرق و بیوماس تولیدی (کل و چوب) کارایی مصرف آب بر مبنای گرم ماده خشک تولیدی به ازای هر لیتر آب مصرف‌شده با استفاده از فرمول $WUE = D/W$ محاسبه شد. در این فرمول WUE کارایی مصرف آب، D جرم ماده



شکل ۲- ضریب گیاهی (K_c) مراحل مختلف رشد *E.camaldulensis* در تیمارهای مختلف رطوبتی



شکل ۳- مقدار تبخیر- تعرق تیمارهای مختلف در مقایسه با گیاه مرجع. E_{t_0} تبخیر- تعرق گیاه مرجع و E_{t_c} تبخیر- تعرق *E.camaldulensis* در تیمارهای مختلف رطوبتی



شکل ۳- مقدار تبخیر- تعرق سالانه *E.camaldulensis* در تیمارهای رطوبتی مختلف در مقایسه با گیاه مرجع (Eto)

ب) محاسبه نیاز آبی: در جدول ۲، درصد پوشش و مقدار آب آبیاری در هریک از تیمارهای رطوبتی، داده شده است.

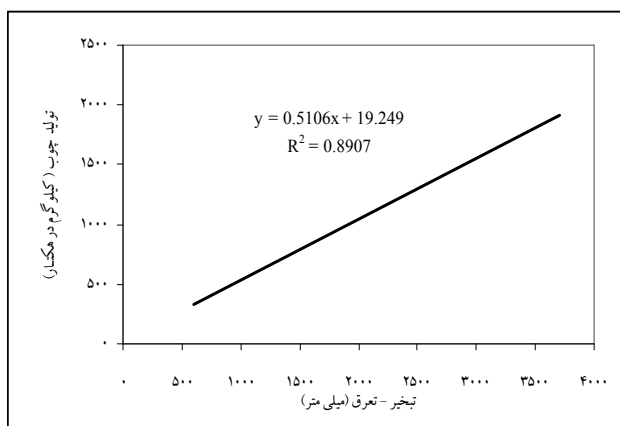
جدول ۲- مقدار آب آبیاری و درصد پوشش در هر یک از تیمارهای آزمایشی

تیمار	درصد پوشش سطح زمین توسط گیاه در زمان آزمایش	مقدار آب آبیاری در دوره آزمایش (میلی متر)	درصد پوشش زمین توسط گیاه	مقدار آب آبیاری در زمان پوشش کامل سطح زمین (میلی متر)
۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی	۵۰/۳	۲۷۷۸/۴	۱۰۰	۳۷۰۵
۷۰ درصد ظرفیت زراعی	۳۳/۲	۱۲۲۶/۵	۱۰۰	۱۸۵۶/۵
۴۰ درصد ظرفیت زراعی	۱۶/۵	۳۴۵/۲	۱۰۰	۶۰۲

ج) کارایی مصرف آب (WUE): در محاسبه کارایی مصرف آب به طور معمول مقدار تعرق گیاه به ازای ماده خشک تولیدی مورد توجه است. همان گونه که اشاره شد، حدود ۹ درصد از تبخیر- تعرق مربوط به تبخیر از سطح خاک و بقیه سهم تعرق از گیاه است. در جدول ۳ مقدار تبخیر- تعرق و تعرق، در هر یک از تیمارها نشان داده شده است.

جدول ۳- مقدار تبخیر- تعرق، تعرق و کارایی مصرف آب در هریک از تیمارهای رطوبتی

تیمار رطوبتی	۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی	۷۰ درصد ظرفیت زراعی	۴۰ درصد ظرفیت زراعی
تبخیر- تعرق (کیلوگرم)	۴۳۴۵	۲۱۳۳/۵	۶۹۰/۶
تعرق (کیلوگرم)	۳۹۵۴	۱۹۴۲	۶۲۹
بیوماس کل (گرم ماده خشک)	۷۸۸۴/۳	۴۷۴۶/۶	۱۵۷۴
کارایی مصرف آب (کل)	۱/۹۹ ^b	۲/۴۴ ^a	۲/۵۰ ^a
چوب (گرم ماده خشک)	۱۶۸۰	۹۷۰	۲۳۵
کارایی مصرف آب (چوب)	۰/۴۲ ^b	۰/۵۰ ^a	۰/۳۷ ^b



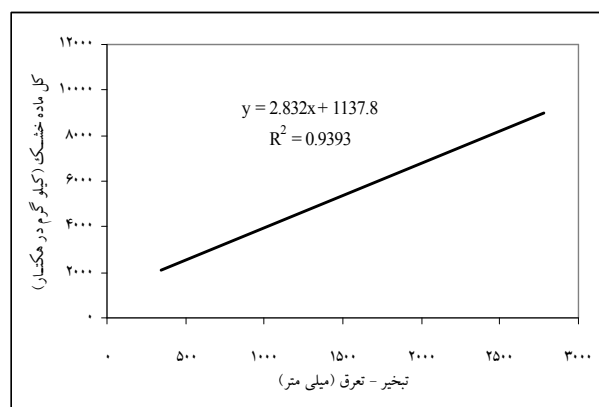
شکل ۵- رابطه مقدار چوب تولیدشده به ازای مقدار تبخیر- تعرق در *E. camaldulensis* (تابع تولید چوب)

بحث

نتایج بررسی‌ها نشان داد که مقدار تبخیر و تعرق گیاه به‌طور کامل به مقدار رطوبت خاک بستگی دارد، به‌گونه‌ای که با اعمال ۳۰ درصد تنش خشکی (تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) مقدار تبخیر- تعرق از ۳۷۰۵ میلی‌متر به ۱۸۵۶/۵ میلی‌متر و با اعمال ۶۰ درصد تنش خشکی (تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به ۶۰۲ میلی‌متر کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که *E. camaldulensis* توانایی سیار زیادی در مصرف آب از خاک از راه بهبود سطح تعرق کننده داشته و به همین دلیل در شرایط رطوبت کافی در خاک، مقدار مصرف آب به‌وسیله آن از گیاه مرجع نیز بیشتر است (ضریب گیاهی ۱/۷۵ برای تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی). این موضوع توسط At Jamal et al. (2002) نیز با استفاده از آب فاضلاب برای آبیاری درختان *E. camaldulensis* در منطقه Ojinaga در مکزیک گزارش شده است. آنها مقدار حداکثری تبخیر و تعرق را برای گونه مذکور و در شرایط اقلیمی منطقه یادشده که نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۲۸۸ میلی‌متر است، در سال اول ۱۱۲، در سال دوم ۹۰۵ و در سال سوم، ۲۳۸۵ میلی‌متر گزارش کردند. این مقدار برای درختان مورد آزمایش در سال سوم، برای تیمارهای ۱۰۰ درصد، ۷۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، به‌ترتیب ۲۷۷۸/۴، ۱۲۲۶/۵ و ۳۴۵/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که با تعمیم آن به پوشش کامل، به‌ترتیب برای هریک از تیمارهای ذکرشده، روزانه ۱/۱، ۵/۱ و ۱/۶

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بین تیمارهای مختلف آبیاری در سطح آماری ۵ درصد اختلاف معنی‌داری در کارایی مصرف آب وجود دارد. به‌عبارتی اگرچه اختلاف معنی‌داری بین دو تیمار ۴۰ درصد و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی وجود نداشت، با وجود این بین این دو تیمار و تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. مقایسه میانگین تیمارهای مختلف این موضوع را خوبی روشن کرد. جدول ۳ مقدار ماده خشک تولیدی به ازای هر کیلوگرم آب مصرف‌شده را نشان می‌دهد. در این جدول کارایی مصرف آب در رابطه با چوب تولیدی نیز نشان داده شده است. اطلاعات ارائه‌شده، بر افزایش کارایی مصرف آب در تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی دلالت دارد که تاثیر تنش خشکی را در بهبود کارایی مصرف آب نشان می‌دهد. افزایش تنش خشکی از راه کاهش مقدار آب موجود در خاک در حد ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، موجب کاهش کارایی مصرف آب شده است.

د) توابع تولید محصول نسبت به آب: با توجه به اینکه مقدار ماده خشک تولید شده در شرایط بدون تنش (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و تحت سطوح مختلف تنش (۷۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) اندازه‌گیری شد، برقراری ارتباط بین مقدار آب مصرف‌شده (تبخیر- تعرق) و ماده خشک تولیدشده در شرایط آزمایش و در محدوده تیمارهای ذکرشده میسر گردید. شکل‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب رابطه مقدار کل ماده خشک تولیدی و مقدار چوب تولیدی را با مقدار تبخیر- تعرق که در این مقاله با عنوان تابع تولید از آن یاد شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۴- رابطه مقدار کل ماده خشک تولیدی به ازای مقدار تبخیر- تعرق در *E. camaldulensis* (تابع تولید کل)

داشته باشد، ۳۰ درصد است. کاهش بیشتر تنش خشکی، ضمن کاهش شدید رشد و عملکرد، موجب کاهش کارایی مصرف آب در تولید چوب می‌شود. تنش بیش از حد خشکی از راه انسداد روزنه‌ها و کاهش جذب CO₂ می‌تواند موجب کاهش کارایی مصرف آب شود. کاهش کارایی مصرف آب در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی نیز نشانه کاهش نسبت CO₂ جذب‌شده به مقدار تعرق است (Gindaba et al. (2005) کاهش کارایی مصرف آب را در اثر افزایش تنش خشکی در شرایط گلخانه برای گیاهانی چون *Cordia Africana*, *E. camaldulensis*, *E. globulus*, *Millettia ferruginea* و *Croton macrostachyusa* گزارش کرده‌اند. آنها کارایی مصرف آب را در *E. camaldulensis* برای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، به ترتیب ۱/۸، ۴، ۴/۵ و ۴/۹ گرم ماده خشک برای هر کیلوگرم آب گزارش کردند که با نتایج ارائه‌شده در گزارش Davidson (1989) که مقدار آب مورد نیاز برای تولید یک کیلوگرم ماده خشک را در اکالیپتوس ۷۸۵ لیتر (۱/۲۷ گرم به‌ازای هر لیتر آب) بیان داشت، مغایرت دارد. Li (1999) کارایی مصرف آب را در سه توده از اکالیپتوس که تحت تأثیر سه سطح از تنش خشکی قرار گرفته بودند بررسی کرد و دریافت که بین مقدار رشد و کارایی مصرف آب رابطه قوی وجود دارد. به اعتقاد وی رشد اکالیپتوس به‌عنوان گونه‌ای با چرخه فتوسنتزی C₃ در گرو مقدار تعرق است. Kramer & Boyer (1995) معتقدند برای بسیاری از گیاهان که بازده تولید زیاد دارند (به‌طور معمول گیاهان C₄)، افزایش تنش خشکی از راه انسداد روزنه‌ها و کاهش تعرق موجب بهبود کارایی مصرف آب می‌شود.

منابع

ادراکی، مسعود و آهنگ کوثر، ۱۳۷۱. تعیین آب مصرفی اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*) در یک شبکه پخش سیلاب در منطقه گربایگان فسا در مجموعه مقالات سمینار بررسی مناطق بیابانی و کویری ایران، جلد اول، یزد، مرکز تحقیقات مناطق کویری و بیابانی ایران، ۱۸۹-۲۱۰.

میلی‌متر محاسبه شد. Rosier & Roberts (1993) نیاز آبی *E. camaldulensis* را برای تعرق در منطقه Karnataka در هند، روزانه ۱/۵ تا ۳/۵ میلی‌متر گزارش کرده‌اند. ادراکی و کوثر (۱۳۷۱) نیاز آبی *E. camaldulensis* را در منطقه گربایگان فسا و در شرایط پخش سیلاب، ۵/۶ میلی‌متر در روز یا ۲۰۴۴۰ متر مکعب در سال گزارش کرده‌اند که به‌طور تقریبی معادل مقدار به‌دست آمده در تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی است. با بررسی رابطه میان مقدار تبخیر و تعرق و ماده خشک تولیدی (تابع تولید) روشن شد که با افزایش دسترسی گیاه به آب، مقدار ماده خشک در همه قسمت‌های گیاه افزایش یافت ($R^2 = 0.94$)، اگر به ضرایب همبستگی تابع تولید دقت شود، تفاوتی میان آنها مشاهده می‌شود که بر تأثیر بیشتر آب مصرف‌شده در تولید اجزای دیگر از جمله برگ و ریشه نسبت به چوب دلالت دارد. با افزایش مقدار مصرف آب، کارایی مصرف آب تا حدودی کاهش یافت که این کاهش بر باز بودن روزنه‌ها و اتلاف بیشتر آب از راه تعرق دلالت دارد. با افزایش تنش خشکی از ۷۰ درصد به ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، کارایی مصرف آب دوباره کاهش یافت که این موضوع نشان‌دهنده حساسیت گیاه به تنش بیش از حد است. افزایش تعداد برگ و در نهایت افزایش سطح تعرق‌کننده در اثر افزایش رطوبت خاک، نشان می‌دهد که این گیاه توانایی اتلاف آب از راه بهبود سطح تعرق‌کننده را نیز دارد. افزایش مقدار تبخیر و تعرق در اثر افزایش سطح برگ و در نهایت افزایش شاخص سطح برگ (LAI) از راه کارهای مؤثر گیاه برای استفاده بیشتر از آب خاک است. با اعمال ۳۰ درصد تنش خشکی ضریب گیاهی (Kc) به شدت کاهش یافت و به ۰/۸۷ رسید. در چنین شرایطی اگرچه کاهش عملکردی معادل ۳۹ درصد در اثر اعمال ۳۰ درصد تنش و ۸۰ درصد در اثر اعمال ۶۰ درصد تنش مشاهده شد، ولی به دلیل بهبود کارایی مصرف آب در تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (۲/۴۴ گرم ماده خشک به ازای هر لیتر آب مصرف‌شده) می‌توان این موضوع را مطرح کرد که در شرایط کمبود آب برای آبیاری یا دسترسی محدود گیاه به آب، حداکثر توان تنش خشکی که عملکردی معادل ۶۱ درصد از شرایط بدون تنش را به‌دنبال

- drought tolerant eucalyptus for salinity abatement and commercially forestry, *Ecological Engineering*, 31: 175-182.
- Davidson, G., 1989. The *Eucalyptus dilemma* arguments for and against eucalyptus planting in Ethiopia. The Forestry Research Seminar, Addisababa.
- Farrell, R.C.C., D.T. Bell., K. Akilan & J.K. Marshall, 1998. Morphological and physiological comparisons of clonal lines of *Eucalyptus camaldulensis* responses to drought and waterlogging, *Australian Journal of Physiology*, 23(4): 497-507.
- Gindaba, J., A. Rozanov & L. Negash, 2004. Response of seedlings of two Eucalyptus and three deciduous tree species from Ethiopia to severe water stress, *Forest Ecology and Management*, 201: 119-129.
- Gindaba, J., Rozanov, A. & L. Negash. 2005. Photosynthetic gas exchange, growth and biomass allocation of two *Eucalyptus* and tree indigenous tree species of Ethiopia under moisture deficit. *Forest Ecology and Management*, 205 (1-3): 127-138.
- Howell, T.A., 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture, *Agronomy Journal*, 93: 381-289.
- Jie, G., C. Kunfang & W. Huanxiao, 2004. Water relation and stomatal conductance in nine species during a dry period growing in a hot and dry vally, *Acta Phytoecologica sinica*, 28 (2): 186-190.
- Kirkham, M.B., 2005. Soil and plant water relation. Principles of Elsevier, Academic Press, USA, 500pp.
- Kramer, P.J. & J.S. Boyer, 1995. Water relation of plants and soil. San Diego: Academic Press.
- Lemcoff, J., A. Guarna Schelli., A. Garau & P. Prystupa, 2002. Elastic and osmotic adjustment in rooted cutting of several clones of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. From south-eastern Australia after adrought, *Flora*, 197 (2): 134-142.
- Li, C., 1999. Carbon isotope composition, water-use efficiency and biomass productivity of *Eucalyptus microtheca* populations under different water supplies, *Plant Soil*, 214: 165-171.
- Merchant, a., M. Callister., S. Arndt., M. Tausz & M. Adams, 2007. Contrasting physiological responses of six *Eucalyptus* species to water deficit. *Annals of Botany*, 100 (7): 1507-1515.
- Merchunt, A., M. Tausz., S. Arndt & M. Adams, 2006. Cyclitols and carbohydrates in leaves and roots of 13 *Eucalyptus* species suggest contrasting physiological responses to water deficit, *Plant, Cell and Environment*, 2(11): 2017-2029.
- سردابی، حسین، ۱۳۷۷. بررسی سازگاری گونه‌های مختلف اکالیپتوس و کاج در مناطق ساحلی و کم ارتفاع شرق استان مازندران، نشریه شماره ۱۹۳، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ص ۱۳۳.
- صادقی، سیدموسی، ۱۳۷۹. تعیین دوره آبیاری مناسب کنار، اکاسیا و اکالیپتوس در استان بوشهر، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی خاتمه‌یافته مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ص ۲۷.
- صالحه شوشتری، محمدحسن، ۱۳۷۶. تعیین مؤثرترین دور آبیاری تکمیلی برای استقرار اولیه چهار گونه و پرونانس اکالیپتوس، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی خاتمه‌یافته مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ص ۵۸.
- عصاره، محمدحسن و حسین سردابی، ۱۳۸۶. اکالیپتوس، جلد اول، شناخت، معرفی و ازدیاد با استفاده از فناوری‌های نوین، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، تهران، ص ۶۷۲.
- علیزاده، امین، ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه، چاپ چهارم، دانشگاه امام رضا، مشهد، ص ۴۷۰.
- مرتضوی جهرمی، سیدمرتضی، ۱۳۷۳. معرفی گونه‌های سازگار اکالیپتوس در مناطق غربی استان فارس، نشریه شماره ۹۹، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ص ۷۱.
- At Jamal, M.S., T.W. Sammis, J.G. Mexal, G.A. Picchioni & W.H. Zachritz, 2002. A growth-irrigation scheduling model for waste water use in forest production, *Agricultural Water Management*, 56: 27-79.
- Arndt, S.K., S.J. Livesley., A Merchant., T.M. Bleby & P. Grierson, 2008. Quercitol and osmotic adaptation of field – grown Eucalyptus under seasonal drought stress, *Plant, Cell and Environment*, 31, 915-924.
- Butcher, P.A., M.W. Mc-donald & J.C. Bell, 2009. Congruence between environmental parameters, morphological and genetic structure in australian most widely distributed eucalypt, *Eucalyptus camaldulensis*, *Tree Genetics & Genomes*, 5(1): 189-195.
- Callister, A.N., S.K. Arndt., P.K. Ades., A. Merchant., D. Rowell & M.A. Adam, 2008. Leaf osmotic potential of Eucalyptus hybrids responds differently to freezing and drought, with little clonal variation, *TreePhysiology*, 28: 1297-1304.
- Dale, G. & M. Dieters, 2007. Economic returns from environmental problems: Breeding salt and

Miller, D.E. & A.N. Hang, 1982. Deficit, high-frequency sprinkler irrigation of wheat, *Soil Science Society of America Journal*. 46: 386-389.

Roberts, J.M. & P.T.W. Rosier, 1993. Physiological studies in young *Eucalyptus* stand in southern India and derived estimates of forest transpiration, *Journal of Water Manage*, 24: 103-118.

Whitehead, D. & C.L. Beadle, 2004. Physiological regulation of productivity and water use *Eucalyptus*: a review, *Forest Ecology and Management*, 193: 113-140.

Yin, C., X. Wang, B. Duan, J. Luo & C. Li, 2005. Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric *Populus* species as affected by water stress, *Environmental and Experimental Botany*, 53: 315-322.

Water requirement and production function of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh) in arid environment

M. H. Rad^{*1}, M. H. Assare², M. A. Meshkat³, K. Dashtegian¹ and M. Soltani⁴

¹Member of Scientific Board, Research Center of Agriculture and Natural Resources of Yazd, I. R. Iran

²Member of Scientific Board, Research Institute of Forests and Rangelands, I. R. Iran

³Assistant Prof., Research Center of Agriculture and Natural Resources of Yazd, I. R. Iran

⁴Expert of Research Center of Agriculture and Natural Resources of Yazd, I. R. Iran

(Received: 2 July 2009, Accepted: 18 January 2010)

Abstract

In Iran Eucalyptus (*E. camaldulensis* Dehnh) has been planted across a wide range of environmental conditions. Despite of expansion of *E. camaldulensis* planting in wide range of Iran, no study has been done about its water requirement. The objective of this study were to determine the evapotranspiration (Et), production function (PF) and water use efficiency (WUE) of 3-year old plants under lysimetry conditions and different regimes of irrigation. The trials were carried out in Yazd Shahidsadog control desert research station under drainage lysimeters with 121 cm diameter and 160 cm depth. The treatments were 100% (well watered), 70% (medium stress) and 40% (high stress) field capacity (FC), With three replicate under complete randomize design. The results showed that evapotranspiration dependend on soil water content and sufficient soil moisture (of the field capacity) can increase crop coefficient (Kc) up to 1.7. Total dry mass (stems, leaves and roots) also increases with increasing soil moisture. The higher the soil moisture, the higher the evapotranspiration rate and plant production function can be improved. Water use efficiency (dry mass/t) improved with increasing drought stress, so that treatments of 70% and 40% of field capacity showed significant difference with 100% of field capacity ($P < 0.05$). However, the increase of drought stress from 70% to 40% of field capacity, showed no significant effect on Water use efficiency. The highest water use efficiency belonged to 40% field capacity treatment with 2.5 g dry weight in kg water consumed in transpiration.

Key words: Eucalyptus (*E. camaldulensis* Dehnh), Evapotranspiration, Production function, Water use efficiency, Drought stress.