نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۳، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۸، ص. ۶۷۰-۶۵۹

Journal of Water and Soil
Vol. 33, No. 5, Nov.-Dec. 2019, p. 659-670

تأثیر کم‌آبیاری تنظیم شده و آبیاری ناقص ریشه بر ویژگی‌های کمی رزماری

رسول اسدی[۱]- فرزاد حسن‌پور[۲*]- میترا مهربانی[۳]- امین باقی‌زاده[۴]- فاطمه کاراندیش[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۳

چکیده

به‌منظور مقایسه دو روش کم‌آبیاری بر خصوصیات رشد گیاه دارویی رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.)، آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۵، در ایستگاه تولید نهال شهرداری کرمان در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش، تیمارها شامل آبیاری کامل (۱۰۰ درصد تأمین رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری تنظیم شده و آبیاری ناقص ریشه هر کدام در دو سطح ۷۵ و ۵۵ درصد آبیاری کامل بودند. نتایج نشان داد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی گیاه (۳۸۷۴/۶ کیلوگرم در هکتار) و شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد، در تیمار آبیاری کامل بدست آمد که از لحاظ آماری با سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص تفاوت معنی‌داری نداشت. این در حالی است که بیشترین بهره‌وری آب (۲/۰۶ کیلوگرم بر متر مکعب)، وزن تر ریشه (۳/۸ گرم)، طول ریشه (۱۶/۴ سانتی‌متر) و حجم ریشه (۲/۴ سانتی‌متر مکعب)، به سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه اختصاص یافت که این امر به‌دلیل افزایش ریشه‌های ثانویه در این تیمار نسبت به سایر تیمارها بود. لازم به ذکر است که عملکرد بدست آمده از سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ۳۶۶۹/۳ کیلوگرم در هکتار بود. بنابراین اعمال روش آبیاری ناقص ریشه و تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌تواند با توسعه مناسب شاخص سطح برگ و ریشه گیاه، امکان استفاده بهتر از انرژی خورشید و رطوبت موجود در خاک را به‌رغم اعمال تنش رطوبتی فرآهم آورد و راهکار مناسبی برای مقابله با بحران آب، برای حرکت به سمت کشاورزی پایدار محسوب شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، بهره‌وری آب، تنش خشکی، شاخص سطح برگ، گیاه دارویی، رزماری

مقدمه

با آن‌که آب از فراوان‌ترین ترکیبات روی زمین است اما در بخش وسیعی از جهان، کمبود منابع آب به‌عنوان مهم‌ترین و محدودکننده‌ترین عامل تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مطرح است (۳۲). در واقع خشکی، محدود کننده‌ترین عامل تولید موفقیت‌آمیز محصولات کشاورزی در سراسر جهان به‌حساب می‌آید و این عامل، زمانی ایجاد می‌شود که ترکیبی از عوامل فیزیکی و محیطی سبب تنش در گیاه شوند و در نتیجه عملکرد یا بازدهی گیاه را کاهش دهند (۲۰). در چنین شرایطی مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی، می‌تواند راه‌کاری مناسب جهت کنترل بحران کم‌آبی باشد (۲۰). لذا کم‌آبیاری می‌تواند یکی از راه‌کارهای استفاده بهینه از آب و افزایش کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی باشد (۱) که از جمله تکنیک‌های توسعه یافته در شرایط کمبود آب می‌توان به آبیاری ناقص ریشه اشاره نمود (۲۷).

تئوری خاص حاکم بر روش آبیاری ناقص ریشه آن را از روش کم‌آبیاری معمولی که اغلب موجب کاهش محصول، عدم رشد مناسب گیاه، شستشوی کامل املاح مانند نمک در منطقه توسعه ریشه و ... می‌شود (۷ و ۸) متمایز ساخته است. در این روش در هر نوبت آبیاری، تنها بخشی از ریشه، آبیاری و بخش دیگر آن خشک می‌ماند که سمت خشک ریشه با ارسال سیگنال‌هایی به روزنه‌های برگ، میزان بازشدگی روزنه را تحت تأثیر قرار داده که خود باعث کاهش میزان تلفات آب می‌شود (۳). از جمله نتایج اعمال آبیاری ناقص ریشه می‌توان به افزایش غلظت شیره آوندی، کاهش هدایت روزنه‌ای، افزایش کارایی مصرف آب و عدم کاهش معنی‌دار کمیت محصولاتی همچون انبه، انگور، ذرت و ... اشاره نمود (۲۵، ۲۲ و ۱۳). همچنین مطالعات صورت گرفته نشان داد که در این روش آبیاری، کیفیت محصول با افزایش در میزان قند آن، بهبود قابل ملاحظه‌ای یافت (۱۳، ۱۸، ۷ و ۲۵).

نتایج مقایسه تأثیر آبیاری کامل و آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بر کارایی مصرف آب درختان پرتغال نشان داد که عملکرد در روش آبیاری ناقص ریشه در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، به‌ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد افزایش یافت. لذا با توجه به اثرات مثبت روش آبیاری ناقص ریشه، محققین گزارش نمودند که در شرایط

۱، ۲ و ۵- به‌ترتیب دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی و دانشیاران گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
(*- نویسنده مسئول: Email: Hassanpourir@uoz.ac.ir)
۳- استاد، گروه فارماکوگنوزی، مرکز تحقیقات داروهای گیاهان دارویی و سنتی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
۴- دانشیارگروه بیوتکنولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
DOI: 10.22067/jsw.v0i0.70053

محدودیت منابع آب، روش آبیاری ناقص ریشه بخوبی می‌تواند ضمن افزایش عملکرد محصول، افزایش ذخیره آب را نیز به همراه داشته باشد (۲). همچنین در بررسی تأثیر آبیاری ناقص ریشه بر عملکرد گوجه‌فرنگی، شش تیمار آبیاری ثابت، متناوب شیارها (یک طرفه گیاه) و تمام شیارها (دو طرف گیاه) در دو سطح ۱۰۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب در آبیاری متناوب در حالی ۴۰ درصد نسبت به آبیاری تمام شیارها افزایش یافت، که علاوه بر اینکه هیچ کاهش محصولی ایجاد نشد، بیش از ۳۸ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی شد. همچنین، محصول تولید شده در آبیاری متناوب نسبت به آبیاری تمام و آبیاری ثابت شیارها از کیفیت بالاتری برخوردار بود (۲۴). نتایج بررسی تأثیر آبیاری ناقص ریشه بر گیاه گوجه‌فرنگی نشان از افزایش چشمگیری بهره‌وری آب در مقایسه با کم‌آبیاری تنظیم شده بود (۲۴). در مطالعه‌ای دیگر روش آبیاری ناقص ریشه با تغییر پتانسیل اسمزی، میزان آماس سلول‌های برگ را در حد بالاتر از معمول حفظ کرد و میزان مقاومت گیاه در شرایط کم‌آبیاری را افزایش داد (۳۴).

مطالعات صورت گرفته نشان داد که روند توزیع زمانی و مکانی رطوبت در خاک در نتیجه اعمال آبیاری ناقص ریشه، مهم‌ترین عامل ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی در گیاه می‌باشد (۲۷). تغییر سیستم توسعه ریشه در نتیجه تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک، میزان جذب آب و عناصر غذایی از خاک و در نتیجه روند توسعه فیزیولوژیکی اندام هوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). همچنین نتایج مطالعات انجام شده حاکی از آن است که توزیع خاص رطوبت در خاک در روش آبیاری ناقص ریشه موجب افزایش تولید ریشه‌های ثانویه و همچنین گسترش بیشتر ریشه‌های اولیه درخت سیب (۵)، افزایش رشد ریشه بوته‌های انگور (۴) و افزایش جرم ریشه درخت پرتقال (۲) می‌شود. در نتیجه با تولید بیشتر هورمون آبسسیک اسید، موجب افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه‌های گوجه‌فرنگی (۱۵) و در نتیجه افزایش جذب عناصر غذایی از خاک و افزایش عملکرد گیاه خواهد شد (۳۳).

از طرف دیگر جهت مقابله با آسیب‌پذیری درآمدهای نفتی کشور ایران از مسائل سیاسی و اقتصادی منطقه بایستی به توسعه تولیداتی توجه نمود که ضمن بهبود وضع اقتصادی داخلی، سبب افزایش صادرات غیر نفتی شود. در این میان گیاهان دارویی علاوه بر نقش مهمی که در سلامت جامعه و اشتغال‌زایی دارند، می‌توانند تأثیر به‌سزایی در امر اقتصاد غیر نفتی داشته باشند (۹). این در حالی است که گرایش عمومی جوامع به استفاده از داروها و درمان‌های گیاهی و به طور کلی فرآورده‌های طبیعی، رو به افزایش بوده و مهم‌ترین علل آن، اثبات اثرات مخرب داروهای شیمیایی است (۱۹).

اکلیل کوهی با نام عمومی رزماری (*Rosmarinus officinalis*) از قدیمی‌ترین گیاهان شناخته شده دارویی و از خانواده نعناعیان است که از قرن‌ها پیش، برای تقویت حافظه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گیاه مقوی معده و محرک هضم می‌باشد و تحقیقات متعددی خواص کاهش استرس، تسکین سردرد، تسکین آسم و درمان برونشیت آن را تائید کرده‌اند. همچنین عصاره این گیاه، با محافظت از مواد تشکیل دهنده سلول‌های پوست از آسیب‌های پوستی مانند چین و چروک پیش‌گیری می‌کند به‌طوری‌که ماساژ دادن منظم پوست با روغن مستخرج از این گیاه، خشکی پوست را نیز از بین می‌برد (۲۱ و ۳۱).

بررسی مطالعات صورت گرفته در راستای مدیریت مصرف آب نشان داد که استفاده از استراتژی‌های نوین آبیاری نظیر آبیاری ناقص ریشه معطوف به کاربرد این روش در کشت محصولات باغی و زراعی بوده و تاکنون در راستای افزایش بهره‌وری آب و عملکرد گیاهان دارویی، از این روش کارآمد استفاده نشده است. لذا بررسی اثرات آبیاری ناقص ریشه بر ویژگی‌های کمی گیاه دارویی رزماری که از با ارزش‌ترین گیاهان دارویی محسوب می‌شود، به عنوان هدف این مطالعه مد نظر است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور مقایسه دو روش کم‌آبیاری بر ویژگی‌های کمی گیاه دارویی رزماری، آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۵، در زمینی به مساحت ۳۶۰ متر مربع در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار، به اجرا در آمد. مزرعه مورد مطالعه در شهر کرمان در محدوده طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۲ دقیقه، عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه و ارتفاع ۱۷۹۹ متر از سطح دریا واقع شده که میانگین بارندگی، دما و تبخیر سی ساله آن به‌ترتیب ۱۲۹ میلی‌متر، ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد و ۲۴۴۸ میلی‌متر است (۲۹). در این آزمایش پنج سطح، آبیاری کامل (۱۰۰ درصد تأمین رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی (FI))، کم‌آبیاری تنظیم شده در دو سطح ۷۵ درصد (RDI_{75}) و ۵۵ درصد (RDI_{55}) آبیاری کامل و آبیاری ناقص ریشه در دو سطح ۷۵ درصد (PRD_{75}) و ۵۵ درصد (PRD_{55}) آبیاری کامل، مورد ارزیابی قرار گرفت. تیمارها در کرت‌هایی به عرض سه و طول پنج متر (شامل ۴ ردیف کشت به‌فاصلهٔ ۰/۷۵ متر و فاصله بوته ۰/۵ متر از یکدیگر) اجرا شد.

قبل از عملیات کشت نمونه‌برداری از آب و خاک مورد استفاده انجام شد و تجزیه ویژگی‌های آن‌ها در جداول ۱ و ۲ آمده است. لذا با توجه به نتایج تجزیه خاک و آب و توصیه آزمایشگاه خاک و آب، قبل از عملیات کشت ۷۰، ۵۰ و ۴۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب کود نیتروژن از منبع اوره، سوپر فسفات تریپل و سوفات پتاسیم به خاک مزرعه تزریق شد. همچنین در این تحقیق پس از دریافت نهال یک ساله رزماری از خزانه ایستگاه تحقیقاتی نهال و بذر شهرداری شهر کرمان، عملیات کشت در اواخر فروردین ماه انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات خاک مزرعه

Table 1- The soil characteristics of farm

عمق خاک Depth (cm)	بافت خاک Soil texture	درصد رطوبت Moisture		وزن مخصوص ظاهری Bulk density ($gr.cm^{-3}$)	اسیدیته pH	شوری EC (dS/m)	نیتروژن N (٪)	فسفر P (mg/kg)	پتاسیم K (mg/kg)
		Fc	PWP						
0 - 10	Clay	21.65	8.63	1.39	7.91	0.4	0.14	1.3	126.7
10 - 20	Silty Clay	22.39	8.71	1.42	7.94	0.4	0.12	1.2	118.9
20 - 30	Silty Clay	23.42	9.43	1.41	7.92	0.4	0.12	0.9	104.2
30 - 50	Silty Clay	23.75	9.74	1.41	7.96	0.3	0.11	0.9	91.9
50 - 70	Silty Clay	23.54	9.49	1.42	7.96	0.3	0.09	0.6	75.2
70 - 90	Silty Clay	22.96	9.11	1.44	7.97	0.3	0.06	0.6	66.7

جدول ۲- نتایج کیفیت آب

Table 2- The results of water quality

اسیدیته pH	شوری EC (dS/m)	آنیون‌ها و کاتیون‌های محلول Dissolved cations and anions (meq/lit)					
		HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{-2}	Mg^{+2}	Ca^{+2}	Na^+
7.1	0.7	4.6	9	–	7	4.2	2.5

در این مطالعه جهت آبیاری بوته‌ها از سیستم آبیاری قطره‌ای با قطره‌چکان از نوع نتافیم با دبی ۲ لیتر بر ساعت استفاده شد. برای هر ردیف کشت، دو لوله آبرسان با فاصله حدوداً ۱۵ سانتی‌متری نسبت به ردیف کشت تعبیه شد که در تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری تنظیم شده، در هر نوبت آبیاری، هر دو سمت گیاه، آبیاری شد. اما در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه، در هر نوبت آبیاری، به‌صورت تناوب، فقط یک طرف ردیف کشت، آبیاری شد. در تیمارهای روش آبیاری ناقص ریشه، به‌منظور اطمینان از خشک بودن نیمی از ریشه به‌هنگام آبیاری نیمه دیگر، در هر سه نوبت آبیاری نسبت به تعویض جهت آبیاری از یک سمت ریشه به سمت دیگر اقدام شد.

با توجه به اینکه دور آبیاری برای تمامی تیمارها ثابت و هر چهار روز یک مرتبه بود، لذا به‌منظور تعیین عمق آب آبیاری، قبل از هر نوبت آبیاری، با نمونه‌برداری از اعماق ۰ تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۵۰، ۵۰ تا ۷۰ و ۷۰ تا ۹۰ سانتی‌متری خاک، رطوبت موجود در تیمار شاهد (آبیاری کامل) اندازه‌گیری و میزان عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه زیر بدست آمد (۶). لازم به ذکر است که فاصله لوله‌آبرسان تا محل نمونه‌برداری در حدود ۱۰ سانتی‌متر بود.

$$D_I = \sum_{j=1}^{6}\left(\left(\theta_{FCj} - \theta_{BIj}\right) \times D_j\right) \quad (۱)$$

که در آن: D_I: عمق آب آبیاری (میلی‌متر)، Θ_{FCi}: درصد رطوبت وزنی در نقطه رطوبتی ظرفیت زراعی در لایه iام، Θ_{BIj}: درصد رطوبت وزنی قبل از آبیاری در لایه iام و D_j: ضخامت هر لایه است. حجم آب آبیاری در هر نوبت آبیاری در تیمار آبیاری کامل در کل فصل رشد و در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه و کم‌آبیاری تنظیم شده نیز تا ۴۰ روز بعد از عملیات کاشت (پس از استقرار گیاه)، با ضرب نمودن عمق آب آبیاری (رابطه ۱) در مساحت هر کرت، بدست آمد (۶). همچنین، پس از استقرار گیاه و از زمان شروع اعمال تیمارها تا انتهای فصل کشت، تیمارهای RDI_{75} و PRD_{75}، ۷۵ درصد و تیمارهای RDI_{55} و PRD_{55}، ۵۵ درصد از حجم آب آبیاری محاسبه شده در تیمار آبیاری کامل را در طول دوره اعمال تیمار دریافت کردند.

در این بررسی، برای مقایسه تیمارها، شاخص‌های رشد گیاه از جمله ارتفاع بوته، تعداد شاخه زایا، وزن خشک اندام رویشی، شاخص سطح برگ، وزن تر، حجم و طول ریشه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس با توجه به اینکه بیشترین اسانس گیاه دارویی رزماری در زمان ۵۰ درصد گل‌دهی می‌باشد (۱۱)، لذا برای اندازه‌گیری شاخص‌های مذکور در اواسط مرحله گل‌دهی (۱۹۰ روز بعد از کشت)، با حذف ردیف‌های کناری در هر تکرار و نیم متر از ابتدا و انتهای هر ردیف، به‌منزله اثر حاشیه، از دو ردیف وسط، هر تکرار از هر تیمار، ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و نمونه‌برداری انجام شد. بوته‌های برداشت شده به مدت سه هفته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، خشک شدند و سپس وزن خشک شده اندام رویشی اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که در زمان گل‌دهی گیاه، جهت اندازه‌گیری خصوصیات ریشه از جمله وزن، طول و حجم ریشه مربوط به هر کدام از تیمارها، پس از جدا نمودن قسمت هوایی گیاه از روی سطح خاک، ریشه بوته مدنظر را به‌طور کامل از خاک خارج نموده و پس از شستشوی کامل، ارتفاع ریشه‌ای که دارای بیشترین طول بود با متر اندازه‌گیری شد همچنین وزن ریشه را با ترازوی با دقت ۰/۱ گرم توزین گردید. همچنین حجم ریشه توسط استوانه مدرج بر حسب سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد.

جهت بررسی روند تغییرات شاخص سطح برگ در طول فصل رشد، از زمان اعمال تیمار هر سی روز یک مرتبه، از هر تکرار از هر تیمار سه بوته به‌صورت تصادفی انتخاب شد. سپس با اندازه‌گیری مساحت برگ‌های هر بوته با استفاده از دستگاه مساحت سنج و میانگین‌گیری از آن‌ها، با در دست داشت سطح زمین اختصاص یافته به هر بوته (۷۵×۵۰ سانتی‌متر)، شاخص سطح برگ از رابطه زیر محاسبه شد (۳۱):

$$LAI=A_i/A_T \quad (۲)$$

که در آن: LAI: شاخص سطح برگ، A_i: مجموع مساحت برگ‌های هر بوته (سانتی‌متر مربع) و A_T: سطح زمین اختصاص یافته به هر بوته (سانتی‌متر مربع) است. همچنین، برای تعیین بهره‌وری آب از رابطه (۳) استفاده شد. در نهایت داده‌های بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن (در سطح یک و پنج درصد) انجام شد.

$$WP^{1}=Y_T/V_T \quad (۳)$$

که در آن: WP: بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y_T: وزن خشک اندم رویشی (کیلوگرم) و V_T: مجموع تبخیر تعرق واقعی گیاه (متر مکعب) است.

نتایج و بحث

تحلیل میزان آب مصرفی

با توجه به جدول جدول ۳، اعمال سطوح RDI_{75} و PRD_{75} منتج به ۲۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب در طول دوره اعمال تیمار نسبت به تیمار کامل آبیاری شد. این در حالی است که آبیاری بر اساس سطوح یاد شده صرفه‌جویی ۱۷/۱ درصدی را در کل دوره رشد نسبت به تیمار کامل آبیاری در پی داشت. همچنین صرفه‌جویی در سطوح RDI_{55} و PRD_{55} نسبت به تیمار آبیاری کامل در طول دوره اعمال تیمار، ۴۵ درصد و در کل دوره رشد گیاه ۳۲/۶ درصد بود. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که اگرچه میزان آب داده شده در تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم شده و آبیاری ناقص ریشه در سطوح مشابه، یکسان است، اما مقادیر متفاوت در جذب رطوبت خاک به‌وسیله ریشه در این دو روش، می‌تواند زمینه لازم برای ایجاد اختلاف بین مقادیر عملکرد و اجزای رشد گیاه در این تیمارها را فراهم آورد (۳۳ و ۳۲). لازم به‌ذکر است در مطالعه‌ای میزان آب مصرفی رزماری در جنوب شرقی اسپانیا، در در سطوح مختلف آبیاری اعمال شده در سیستم آبیاری قطره‌ای را بین ۵۰ تا ۱۶۷ میلی‌متر در کل فصل رشد برآورد شد (۱۶).

تحلیل وزن خشک اندام هوایی

شکل ۱ نشان دهنده مقایسه میانگین صفت وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری است. با توجه به این شکل می‌توان مطرح نمود که به رغم صرفه‌جویی ۲۵ درصدی در مصرف آب سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{75}) نسبت به آبیاری کامل (FI) در دوره اعمال تیمار، اختلاف معنی‌داری بین وزن خشک اندام هوایی این دو تیمار مشاهده نشد. این در حالی بود که مقدار وزن خشک بدست آمده در تیمار آبیاری کامل با سایر تیمارها معنی‌دار است. به‌طوری که اختلاف عملکرد در سطوح ۷۵ و ۵۵ درصد اعمال شده در کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI_{75} و RDI_{55}) با آبیاری کامل به‌ترتیب ۱۶/۴ و ۳۹/۹ درصد بود. پژوهش‌های صورت گرفته نیز نشان از کاهش میزان وزن خشک اندام هوایی در نتیجه اعمال تنش رطوبتی می‌دهند (۱۶ و ۲۳).

از سوی دیگر، شیوه آبیاری در کاهش و افزایش عملکرد محصول دخیل است لذا به‌ازای عمق آب آبیاری ثابت (جدول ۳)، همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، میزان وزن خشک در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه بالاتر از عملکرد بدست آمده در تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم شده در سطوح آبیاری مشابه، بود. به‌طوری‌که میزان وزن خشک در سطوح ۷۵ و ۵۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص (PRD_{75} و PRD_{55}) نسبت به سطوح مشابه در کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI_{75} و RDI_{55}) به‌ترتیب ۱۱/۷ و ۱۵/۱ درصد بیشتر بود. پژوهشگران گزارش نمودند که بالاتر بودن شاخص سطح برگ در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه و رابطه مستقیم بین میزان فتوسنتز و شاخص سطح برگ می‌تواند دلیل بالاتر بودن عملکرد در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه نسبت به کم‌آبیاری تنظیم شده در سطوح مشابه باشد (۱۳، ۱۸ و ۲۵) که با نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر هم‌سو است.

تحلیل تعداد شاخه زایا و ارتفاع بوته

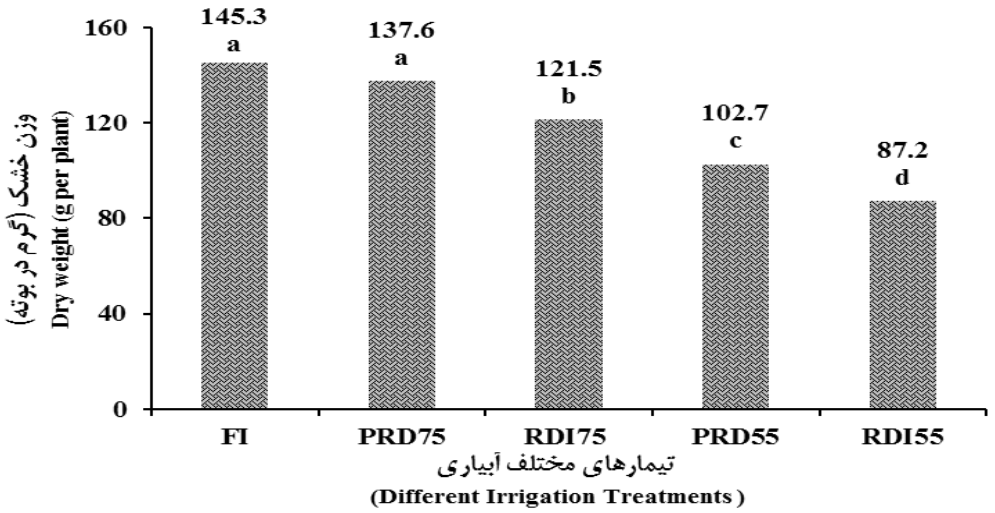
شکل ۲ نشان دهنده مقایسه میانگین تعداد شاخه زایا و ارتفاع بوته تحت تأثیر سطوح آبیاری که با آزمون دانکن به‌دست آمده است، می‌باشد. با توجه به این شکل می‌توان مطرح نمود که اثر سطوح مختلف آبیاری بر دو صفت تعداد شاخه زایا و ارتفاع بوته که از موثرترین شاخص‌های تعیین‌کننده عملکرد (وزن خشک اندام هوایی) رزماری بوده (۱۱)، معنی‌دار بود. به‌طوری که تأمین کامل نیاز آبی گیاه باعث ایجاد بیشترین تعداد شاخه زایا (۱۲۸/۷) و ارتفاع بوته (۶۸/۴ سانتی‌متر) در انتهای فصل رشد شد. اعمال سطح ۷۵ درصد جبران کمبود رطوبت خاک در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{75})، باعث ایجاد اختلاف ۱۰/۵ و ۱۳/۶ درصدی به‌ترتیب در صفات تعداد شاخه زایا و ارتفاع بوته نسبت به تیمار آبیاری کامل (FI) شد. این در حالی بود که سطح ۷۵ درصد جبران کمبود رطوبت خاک اعمال شده در کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI_{75}) در صفات تعداد شاخه زایا و ارتفاع بوته به‌ترتیب اختلاف ۲۳/۵ و ۳۲/۳ درصدی نسبت به تیمار آبیاری کامل (FI) داشت.

1- Water productivity

جدول ۳- عمق آب مصرفی در آبیاری کامل (FI)، کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI) و آبیاری ناقص ریشه (PRD)

Table 3- The depth of irrigation water in full irrigation (FI), regulated deficit irrigation (RDI) and partial root zone drying irrigation (PRD)

تیمار Treatment		حجم آب مصرفی در کل فصل رشد Seasonal Water Consumption (m^3.h)	درصد کاهش مصرف آب در مقایسه با آبیاری کامل Water consumption reduction compared with FI (%)	حجم آب مصرفی در زمان اعمال تیمار Water consumption in period of conducting treatment (m^3.h)	درصد کاهش مصرف آب در مقایسه با آبیاری کامل Water consumption reduction compared with FI (%)
FI		2150	-	1500	-
RDI	75	1782	17.1	1125	25
	55	1449	32.6	825	45
PRD	75	1782	17.1	1125	25
	55	1449	32.6	825	45



شکل ۱- مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

Figure 1- Mean comparison of different irrigation treatments on dry weight

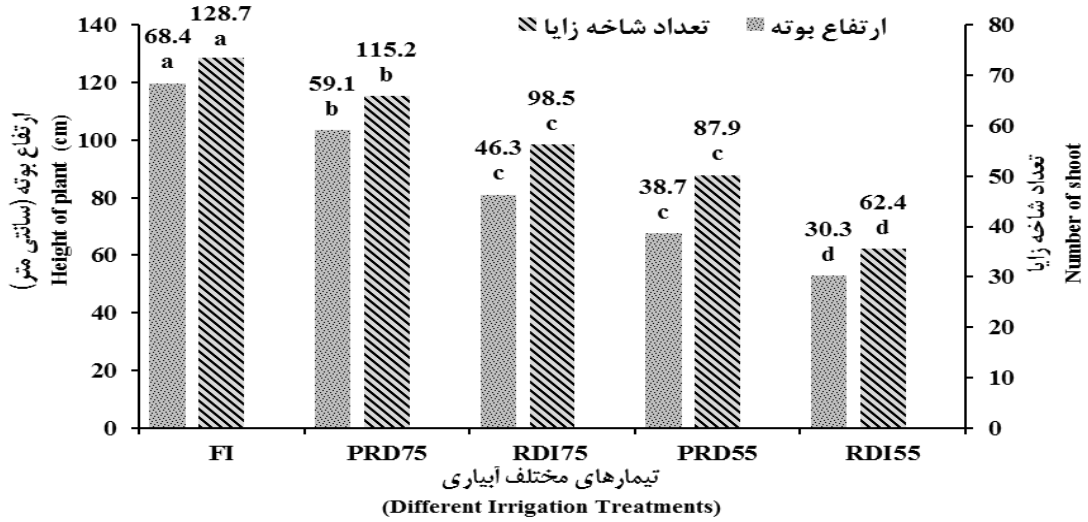
حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد است.

Same letters are indicating not significant difference between treatments at probability 1 percent.

سطح ۵۵ درصد جبران کمبود رطوبت خاک اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{55}) با وجود ۲۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب و به‌رغم کاهش ۱۰/۷ و ۱۶/۴ درصدی به‌ترتیب در صفات تعداد شاخه زایا و ارتفاع بوته نسبت به سطح ۷۵ درصد اعمال شده در کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI_{75})، در هر دو صفت از لحاظ آماری در جایگاه یکسانی با سطح یاد شده قرار گرفت که نشان از برتری مطلق اعمال آبیاری ناقص ریشه نسبت به کم‌آبیاری تنظیم است. مطالعات صورت گرفته نشان داد که شرایط محیطی از جمله تنش خشکی، به میزان زیادی ارتفاع بوته و تعداد شاخه زایا رزماری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۶ و ۲۳). به‌طوری‌که طی بروز تنش خشکی، کاهش پتانسیل آب بافت‌های مریستی موجب نقصان پتانسیل فشاری به حدی کمتر از میزان لازم برای بزرگ شدن سلول‌ها می‌شود (۱۵ و ۳۵). این در حالی است که هر گونه کمبود رطوبت خاک موجب تقلیل بیشتر آماس سلولی، کاهش تقسیم و کاهش توسعه سلولی به خصوص در ساقه و برگ می‌شود (۲۸). لذا اولین اثر محسوس کم‌آبی روی گیاه را می‌توان از روی کاهش ارتفاع بوته، کوچک بودن برگ‌ها و کاهش تعداد شاخه زایا تشخیص داد (۱۰، ۱۶ و ۲۳). اما در شرایط اعمال آبیاری ناقص ریشه، با افزایش حجم ریشه، تماس ریشه با خاک افزایش یافته، لذا توانایی ریشه در جذب مواد غذایی از خاک نسبت به کم‌آبیاری تنظیم شده افزایش می‌یابد که در نهایت باعث عملکرد بهتر تیمار آبیاری ناقص ریشه می‌شود (۱۳، ۱۸ و ۳۰).

تحلیل تعداد شاخص سطح برگ

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، در دو مرحله اول به‌رغم وجود روند صعودی در شاخص سطح برگ، از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود نداشت، این در حالی است که در چهار مرحله بعد بین تیمارها از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار بود. پژوهش‌های صورت گرفته نشان داد که رشد برگ جزء اولین فرآیندهایی است که به کمبود آب واکنش نشان می‌دهد و تنش رطوبتی در طول دوره رشد گیاه، منجر به کوچک شدن برگ‌ها و ریزش آن‌ها می‌شود (۱۷).



شکل ۲- مقایسه میانگین صفات ارتفاع بوته و تعداد شاخه زایا تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

Figure 2- Mean comparison of different irrigation treatments on height of plant and number of shoot

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد است.

Same letters are indicating not significant difference between treatments at probability 1 percent.

جدول ٤- مقایسه میانگین شاخص سطح برگ تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

Table 4- Mean comparison of different irrigation treatments on leaf area index

تیمار Treatment	مرحله اول First stage	مرحله دوم Second stage	مرحله سوم Third stage	مرحله چهارم Fourth stage	مرحله پنجم Fifth stage	مرحله ششم Sixth stage
FI	0.74 a	1.09 a	1.42 a	1.87 a	1.81 a	1.61 a
PRD_{75}	0.75 a	1.05 a	1.31 a	1.72 a	1.69 a	1.58 a
RDI_{75}	0.76 a	1.01 a	1.21 b	1.45 b	1.36 b	1.19 b
PRD_{55}	0.74 a	0.95 a	1.17 b	1.41 b	1.35 b	1.23 b
RDI_{55}	0.75 a	0.91 a	1.11 c	1.28 c	1.17 c	1.03 c

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است.

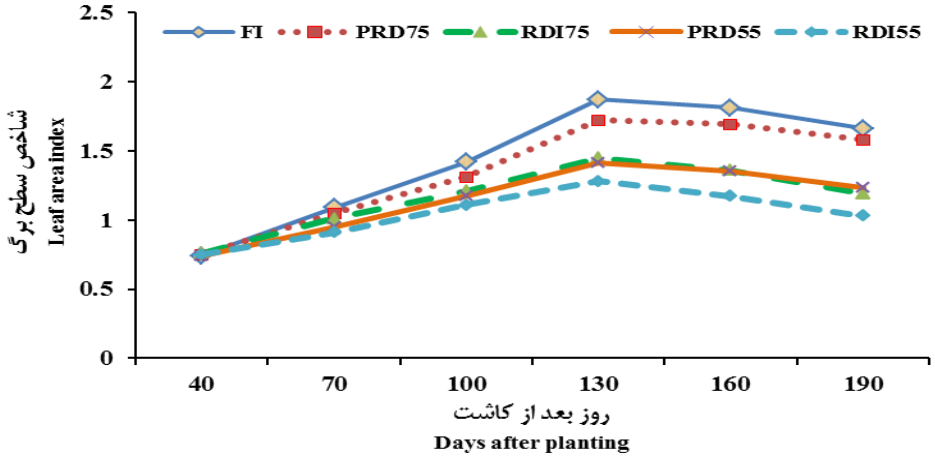
Same letters at each column are indicating not significant difference between treatments at probability 5 percent.

با نزدیک شدن به مراحل پایانی رشد گیاه، تفاوت بین شاخص سطح برگ تیمارهای آبیاری کامل و سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{75}) کم‌تر شد که با نتایج بدست آمده از سایر مطالعات هم‌سو است (۱۳ و ۳۰).

شکل ۳ نشان داد که سیر نزولی شاخص سطح برگ در تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم شده زودتر از تیمارهای آبیاری ناقص ریشه و آبیاری کامل شروع شد. همچنین، مقادیر شاخص سطح برگ در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه نسبت به سطوح مشابه در کم‌آبیاری تنظیم شده، بالاتر بود. پژوهشگران نشان دادند که پیری زود رس برگ‌ها به‌دلیل کمبودهای ناشی از کم‌آبیاری، باعث تسریع در ایجاد سیر نزولی شاخص سطح برگ تیمارهای تحت کم‌آبیاری تنظیم شده می‌شود (۲۴ و ۲۲). این شکل نشان داد که روند تغییرات شاخص سطح برگ در سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{75}) با تیمار آبیاری کامل (FI) مشابه بود و با اختلافی کمی از آن نسبت به سایر تیمارها تغییر کرد. نتایج بدست آمده از سایر پژوهش‌ها نشان داد که کاهش میزان بازشدگی روزنه‌ها و جلوگیری از هدر رفت آب جذب شده، می‌تواند زمینه لازم را برای شادابی و فتوسنتز و در نتیجه عدم تغییر معنی‌دار سطح برگ در تیمار آبیاری ناقص ریشه نسبت به آبیاری کامل را فراهم آورد (۲ و ۸). کاهش سطح برگ در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه نسبت به آبیاری کامل، یک عکس‌العمل فیزیولوژیکی مهم در شرایط تنش رطوبتی در بخش خشک ریشه است که به دلیل تولید اسید آبسزیک اسید در ریشه و انتقال آن به اندام هوایی به‌وجود آمده است. در مقابله با اثرات منفی کاهش سطح برگ، گیاه روزنه‌های خود را به‌طور نسبی بسته و زمینه لازم برای حفظ فتوسنتز و در نتیجه کاهش معنی‌دار عملکرد را فرآهم می‌آورد (۳).

تحلیل پارامترهای ریشه

در این بررسی، پارامترهای ریشه گیاه در یک مرحله (انتهای فصل رشد) اندازه‌گیری شد.



شکل ۳- روند تغییرات شاخص سطح برگ تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

Figure 3- The trend of changes in leaf area index under different irrigation treatments

لذا با توجه به جدول ۵ که نشان‌دهنده مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده ریشه گیاه است، می‌توان مطرح نمود که درحالی بیشترین وزن تر، طول و حجم ریشه در شرایط اعمال ۷۵ درصد جبران کمبود رطوبت خاک در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{75}) بدست آمد که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با مقادیر بدست آمده از آبیاری کامل (FI) نداشت.

مطالعات صورت گرفته علت این نتیجه را شیوه خاص آبیاری ناقص ریشه دانستند که باعث افزایش ریشه‌های ثانویه می‌شود (۲۵، ۱۴ و ۱۲). این در حالی است که اعمال تنش آبی در تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم شده در حد معنی‌داری باعث کاهش وزن تر، طول و حجم ریشه نسبت به تیمار آبیاری کامل (FI) شد. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که کاهش رشد ریشه در شرایط کم‌آبیاری تنظیم شده ممکن است به‌علت از دست رفتن اتساع سلولی و کاهش فعالیت میتوزی یا مهار طویل شدن سلول‌ها باشد (۲۶). اگرچه اعمال تنش به شیوه کم‌آبیاری تنظیم شده منتج به کاهش معنی‌دار ویژگی‌های ریشه شد، اما نتایج نشان‌دهنده بیشتر بودن مقادیر اندازه‌گیری‌شده ریشه در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه نسبت به مقادیر بدست آمده در تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم شده با سطوح مشابه تنش بود. تأثیر متفاوت اعمال تنش به روش آبیاری ناقص ریشه بر ویژگی‌های رشد ریشه در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (۲۴، ۷، ۱ و ۴). گزارشات بدست آمده نشان داد که آن‌چه باعث تفاوت در رشد ریشه بین روش آبیاری ناقص ریشه و کم‌آبیاری تنظیم شده، می‌شود متناوب خشک و تر شدن ریشه در آبیاری ناقص ریشه است. آبیاری مجدد بخشی از ریشه که مدتی خشک باقی مانده است، زمینه لازم برای ایجاد برخی تغییرات فیزیولوژیکی در گیاه را فراهم می‌آورد به‌طوری‌که با ایجاد تغییراتی در سامانه توزیع ریشه، میزان و شدت جذب آب از خاک را بهبود می‌بخشد. اما شیوه اعمال تنش در کم‌آبیاری تنظیم شده باعث تغییرات آناتومیکی مضری در سامانه ریشه مانند از بین رفتن اپیدرم، کورتکس و شادابی ریشه می‌شود که در نهایت کاهش جذب آب و مواد مغذی را به دنبال دارد (۲۵).

تحلیل بهره‌وری آب

شکل ۴ نشان دهنده مقایسه میانگین بهره‌وری آب تحت تأثیر تیمارهای آبیاری است. با توجه به این شکل می‌توان مطرح نمود که بیشترین و کم‌ترین میزان این صفت به‌ترتیب متعلق به سطوح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه (PRD_{75}) و ۵۵ درصد اعمال شده در کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI_{55}) است.

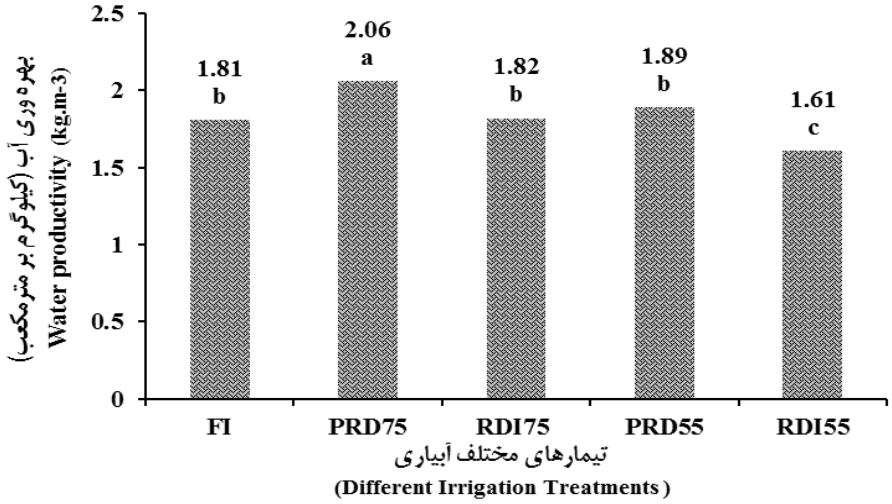
جدول ۵- مقایسه میانگین پارامترهای ریشه گیاه تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

Table 5- Mean comparison of different irrigation treatments on root parameters

تیمار Treatment	حجم ریشه Root volume (cm3)	عمق ریشه Root depth (cm)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)
FI	2.2 a	16.3 a	3.6 a
PRD_{75}	2.4 a	16.4 a	3.8 a
RDI_{75}	1.9 b	13.1 b	2.6 b
PRD_{55}	1.6 b	13.6 b	1.7 c
RDI_{55}	1.2 c	10.2 c	1.1 d

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد است.

Same letters at each column are indicating not significant difference between treatments at probability 1 percent.



شکل ٤- مقایسه میانگین بهره‌وری تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

Figure 4- Mean comparison of different irrigation treatments on water productivity

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد است.

Same letters are indicating not significant difference between treatments at probability 1 percent.

همچنین بهره‌وری آب در سطوح ۵۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه و کم‌آبیاری تنظیم شده (PRD_{55} و RDI_{55}) و آبیاری کامل (FI) از لحاظ آماری در جایگاه b قرار گرفته‌اند. نتیجه این امر در بسیاری از مطالعات، کاهش حجم آب مصرفی در تیمار آبیاری ناقص ریشه نسبت به آبیاری کامل و عدم کاهش معنی‌دار محصول گزارش شده است (۵ و ۸). همچنین، در روش آبیاری ناقص ریشه، درک کم‌آبی توسط سمت خشک ریشه، سبب تولید اسید آبسزیک در گیاه و بسته شده روزنه‌ها و کاهش تنفس گیاه شود. از سوی دیگر جذب آب توسط سمت مرطوب ریشه سبب حفظ آب گیاه در سطح مطلوب و ادامه رشد آن می‌شود که این امر بهبود بهره‌وری آب در تیمارهای تحت اعمال آبیاری ناقص ریشه را در پی دارد (۱۸، ۷ و ۱).

نتیجه‌گیری

مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی گیاه و شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد زمانی حاصل می‌شود که گیاه آب مورد نیاز خود را به‌طور کامل دریافت کند. این در حالی است که اعمال سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه باعث افزایش تمامی شاخص‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سطح مشابه اعمال شده در کم‌آبیاری تنظیم شده، شد. در این تیمار ضمن صرفه‌جویی ۲۵ درصدی در مصرف آب نسبت به تیمار آبیاری کامل، با توسعه مناسب شاخص سطح برگ و ریشه گیاه، امکان استفاده بهتر از انرژی خورشید و رطوبت موجود در خاک را به‌رغم اعمال تنش رطوبتی فرآهم آورد. با این وجود، مقایسه میانگین شاخص سطح برگ و وزن خشک اندام هوایی به‌عنوان مهم‌ترین مولفه‌های فیزیولوژیکی گیاه در تیمار ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه، نشان از عدم تفاوت معنی‌دار با تیمار آبیاری کامل داشت. از سوی دیگر، بهره‌وری آب، وزن تر ریشه، طول ریشه و حجم ریشه این تیمار دارای افزایش به‌ترتیب ۱۲/۱، ۵/۳، ۰/۶ و ۸/۳ درصدی نسبت به تیمار آبیاری کامل بود. لذا با در نظر گرفتن مسائل مربوط به کمبود آب، می‌توان سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه گیاه دارویی رزماری را به‌عنوان تیمار برتر و راهکار مناسب برای مقابله با بحران آب، برای حرکت به سمت یک سامانه کشاورزی پایدار توصیه نمود.

منابع

1- Ahmadi S.H., Andersen M.N., Plauborg F., Poulsen R.T., Jensen C.R., Sepaskhah A.R., and Hansen S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. Agricultural Water Management 97: 1486-1494.

2- Consoli S., Stango F., Vanella D., Boaga J., Cassiani G., and Roccuzzo G. 2017. Partial root-zone drying irrigation in orange orchards: Effects on water use and crop production characteristics. European Journal of Agronomy 82: 190-202.

3- Davies W.J., Bacon M.A., Thompson D.S., Sobeih W., and Rodriguez L.G. 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: Exploitation of the plant's chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. Journal of Experimental Botany 51:1617-1626.

4- Dry P.R., and Loveys B.R. 1998. Factors influencing grapevine vigor and the potential for control with partial root zone drying. Australian Journal of Grape and Wine Research 4: 140-148.
5- Du S., Kang S., Li F., and Du T. 2017. Water use efficiency is improved by alternate partial root-zone irrigation of apple in arid northwest China. Agricultural Water Management 179: 184-192.
6- Gheysari M., Mirlatif S.M., Homaee M., Asadi M.E., and Hoogenboom G. 2009. Nitrate Leaching in a Silage Maize Field under Different Irrigation and Nitrogen Fertilizer Rates. Agricultural Water Management 96(6): 946-954.
7- Ghrab M., Gargouri K., Bentaher H., Chartzoulakisc K., Ayadia M., Mimound M.B., Masmoudid M.M., Mechliad N.B., and Psarrasc G. 2013. Water relations and yield of olive tree (cv. Chemlali) in response to partial root-zone drying (PRD) irrigation technique and salinity under arid climate. Agricultural Water Management 123: 1– 11.
8- Karandish F. 2016. Improved soil-plant water dynamics and economic water use efficiency in a maize field under locally water stress. Agronomy and Soil Science 62(9): 1311-1323.
9- Khazaei H.R., Nadjafi F., and Bannayan M. 2008. Effect of irrigation frequency and planting density on herbage biomass and oil production of thyme (*Thymus vulgaris*) and hyssop (*Hyssopus officinalis*). Industrial Crops and Products 27: 315-321.
10- Khosh-Khui M., Ashiri F., and Sahakhiz M.J. 2012. Effects of irrigation regimes on antioxidant activity and total phenolic content of thyme (*Thymus vulgaris* L.). Medicinal & Aromatic Plants 1: 1-7.
11- Leithy S., El-Meseir T., and Abdallah E. 2006. Effect of bio fertilizer, cell stabilizer and irrigation regime on Rosemary herbage oil yield and quality. Applied Sciences Research 2(10): 773-779.
12- Liang J., Zhang J., and Wong M.H. 1996. Effects of air-filled soil porosity and aeration on the initiation and growth of secondary roots of maize (*Zea mays*). Plant and Soil Journal 186: 245-254.
13- Limaa R.S.N., Assis Figueiredoa F.A.M.M., Martinsa A.O., Deusa B.C.S., Ferraza T.M., Assis Gomesa M.M., Sousab E.F., Glennc D.M., and Campostrini E. 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity and water-use efficiency of papaya. Scientia Horticulturae 183: 13–22.
14- Loveys B.R., Dry P.R., Stoll M., and McCarthy M.G. 2000. Using plant physiology to improve. The water use efficiency of horticultural crops. Acta Hort 537: 187–199.
15- Marjanović M., Jovanović Z., Stikić R., and Radović B. 2015. The effect of partial root-zone drying on tomato fruit growth. Procedia Environmental Sciences 29: 87-98.
16- Nicolas E., Ferrandez T., Rubio S., Alarcon J., and Sanchez J. 2008. Annual water status, development, and flowering patterns for *Rosmarinus officinalis* plants under different irrigation conditions. Hortscience 43: 1580-1585.
17- Pagter M., Bragato C., and Brix H. 2005. Tolerance and physiological responses of (*Phragmites australis*) to water deficit. Aquatic Botany Journal 81: 285-299.
18- Parvizi H., Sepaskhah A.R., and Ahmadi S.H. 2014. Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit yields and water productivity of a pomegranate (*Punica granatum* (L.) cv. Rabab) orchard. Agricultural Water Management 146: 45–56.
19- Pintore G., Usai M., Bradesi P., Juliano C., Boatto G., Tomi F., Chessa M., Cerri R., and Casanova J. 2002. Chemical composition and antimicrobial activity of *Rosmarinus officinalis* L. oils from Sardinia and Corsica. Flavor and Fragrance Journal 7: 15–19.
20- Qadir M. 2003. Agricultural water management in water starved countries: Challenges and opportunities. Agricultural Water Management 62: 165-185.
21- Rajoob A., Massadeh A., and Omari M.N. 2008. Evaluation of Pb, Cu, Zn, Cd, Ni and Fe levels in *Rosmarinus officinalis* (Rosemary) medicinal plant and soils in selected zones in Jordan. Environment Monitor Assessment 140: 61-68.
22- Romero P., Gil-Munoza R., Fernández-Fernández I., Del Amorb F., Martínez-Cutillasa A., and García-García J. 2015. Improvement of yield and grape and wine composition in field-grown monastrell grapevines by partial root zone irrigation, in comparison with regulated deficit irrigation. Agricultural Water Management 149: 55–73.
23- Sardans J., Roda F., and Penuelas J. 2005. Effects of water and a nutrient pulse supply on *Rosmarinus officinalis* growth, nutrient content and flowering in the field. Environmental and Experimental Botany 53: 1-11.
24- Sarker K.K., Akanda M.A., Biswas S.H., Roy D.K., Khatun A., and Goftar M.A. 2016. Field performance of alternate wetting and drying furrow irrigation on tomato crop growth, yield, water use efficiency, quality and profitability. Journal of Integrative Agriculture 15(10): 2380–2392.
25- Sepaskhah A.R., and Ahmadi S.H. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production 4(4): 241-258.
26- Shah F.R., Ahmad N., Masood K.R., and Zahid D.M. 2008. The influence of cadmium and chromium on the biomass production of shisham (*Dalbergia sissoo* roxb.) seedlings. Pakistan Journal of Botany 40(4): 1341-1348.
27- Shahnazari A., Liu F., Andersen M.N., Jacobsen S.E., and Jensen C.R. 2007. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. Field Crops Research, 100: 117-124.
28- Sreevalli Y., Baskaran K., Chandrashekara R., and Kuikkarni R. 2001. Preliminary observations on the effect of irrigation frequency and genotypes on yield and alkaloid concentration in periwinkle. Journal of Medicinal and Aromatic Plant Science 22: 356-358.

29- Statistical Yearbook Meteorological Organization of Kerman Province, 2016.
30- Sun Y., Holm P.E., and Liu F. 2014. Alternate partial root-zone drying irrigation improves fruit quality in tomatoes. Horticultural Science 41(4): 185–191.
31- Terpinc P., Bezjak M., and Abramovic H. 2009. A kinetic model for evaluation of the antioxidant activity of several rosemary extracts. Food Chemistry 115(2): 740-744.
32- Topak R., Acar B., Uyanoz R., and Ceyhan E. 2016. Performance of partial root-zone drip irrigation for sugar beet production in a semi-arid area. Agricultural Water Management 176: 180-190.
33- Wang Z., Liu F., Kang S.H., and Jensen C.R. 2012. Alternate partial root zone drying irrigation improves nitrogen nutrition in maize (*Zea mays*) leaves. Environmental Experimental Botany 75: 36-40.
34- Xu H., Qin F., Wang F., Xu Q., Wang R., Shah S., Zhao A., and Li F. 2009. Applications of xero psychophysiology in plant production-Partial root drying improves tomato crops, Journal of Food, Agriculture and Environment 7: 981- 988.
35- Yazar A., Gökçel F., and Sezen M. 2009. Corn yield response to partial root zone drying and deficit irrigation strategies applied with drip system. Plant Soil Environment 55: 494-503.

Journal of Water and Soil
Vol. 33, No. 5, Nov.-Dec. 2019, p. 659-670

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۳، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۸، ص. ۶۷۰-۶۵۹

Effect of Regulated Deficit and Partial Root Zone Drying Irrigation on Quantitative Traits of *Rosmarinus officinalis* L.

R. Asadi[1]- F. Hassan Pour[2*]- M. Mehrabani[3]- A. Baghizadeh[4]- F. Karandish[5]

Received: 17-10-2017
Accepted: 14-07-2018

Introduction: In arid and semi-arid areas, water can be a limiting factor for plant growth and agricultural yields. Considering limited water resources in arid and semi-arid climate of Iran, deficit irrigation is one of the strategies for efficient use of water and increasing water use efficiency in agricultural lands. Deficit irrigation (DI) is a suitable solution to gain acceptable and economic performance by using minimum amount of water. The Partial Root- zone Drying (PRD) irrigation is a new improvement in deficit irrigation in which the half of the root zone is irrigated alternatively in scheduled irrigation events. The plants with PRD irrigation method can, therefore, have different root system in comparison with other irrigation methods. At this method the plant's condition would be OK by withdrawing water from wet side, and the roots at the dry side can release abscisic acid hormone which decrease the stomatal conductance and consequently the water use efficiency would increase. Also, by using proper irrigation management in farm, we are able to utilize water, soil and fertilizer to produce high yield and quality products. Drip irrigation is considered one of the most efficient irrigation methods. One of the major advantages is its ability to apply water to the soil as often as desired and in smaller quantity than the other irrigation methods. Drip irrigation has been practiced for many years for its effectiveness in reducing soil surface evaporation and it has been widely used in horticultural crops in both greenhouse and open field.

Materials and Methods: In order to compare two deficit irrigation methods on plant growth characteristics of Rosmarinus officinalis L., a field experiment was carried out during 2016 growing season at an experimental farm in Kerman Municipality seedling production station. The experimental treatments were arranged as randomized complete block design with three replications. The irrigation regimes consisted of full irrigation (FI-100), regulated deficit (RDI_{75} and RDI_{55}) and partial root zone drying irrigation (PRD_{75} and PRD_{55}). In this study, drip lines were placed on the soil surface at a distance of 15 cm from the plant and plant rows were placed between drip lines. The irrigation interval was 4 days for all treatments. In the full irrigation and regulated deficit irrigation treatments, the plants were irrigated from two sides for every irrigation. In the PRD, one of two neighboring drip line was alternatively used for irrigation. The irrigation interval was 4 days for all treatments. Dry weight, leaf area index (LAI), number of shoots, plant height, water productivity, root fresh weight, root depth and root volume were measured. Since the highest essential oil of rosemary is at 50 percent of flowering time, the above-mentioned indices were measured at the middle of flowering (190 days after planting) by removing the side rows in each replicate and half a meter from the beginning and end of each row. As a marginal effect, 10 plants were randomly selected and sampled from two middle rows, each replicate of each treatment. The harvested bushes were dried at 25 °C for three weeks and then the dried weight of the vegetative organs was measured. Moreover, the number of 10 plants selected from each treatment was accurately counted to determine the number of shoots. Data were analyzed statistically using SAS Statistical software. Treatment means were compared using LSD test.

1, 2 and 5- Ph.D. Student and Associate Professors, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, Zabol University, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Hassanpourir @uoz.ac.ir)
3- Professor, Department of Pharmacognozy, Herbal and Traditional Medicines Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
4- Associate Professor, Department of Biotechnology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Results and Discussion: The results showed that highest herbage dry weight (145.3 g) and leaf area index in different stages of growth were under full irrigation treatment in which no significant difference between this treatment and 75 percent water replacement in partial root zone drying was observed. The highest number of shoots (128.7) and plant height (68.4 cm) were also obtained by full irrigation treatment and there was significant difference between this treatment and other treatments. However, the highest water productivity (2.06 kg/m^3), root fresh weight (3.8 g), root depth (16.4 cm) and root volume (2.4 cm^3) were found in 75 percent water replacement in partial root zone drying.

Conclusion: According to the results, 75 percent water replacement in partial root zone drying irrigation treatments, in addition to saving water consumption, provides better use of soil moisture and sunlight. Thus, this treatment can be considered as a suitable approach to cope with the water crisis and achieve a sustainable agriculture.

Keywords: Drip irrigation, Drought stress, Leaf area index, Medicinal plant, *Rosmarinus officinalis*, Water productivity