



## تغییرات ضریب خاموشی و کارایی مصرف نور در واکنش به اعمال رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد گوجه‌فرنگی

اسماعیل فرخی<sup>۱</sup>، مهدی نصیری محلاتی<sup>۲\*</sup>، علیرضا کوچکی<sup>۲</sup>، سید علیرضا بهشتی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فرودسی مشهد

۲. استاد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فرودسی مشهد

۳. دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۸

### چکیده

توانایی گیاهان برای تبدیل انرژی خورشیدی به زیست‌توده عاملی مهم در تعیین عملکرد گیاه در واکنش به تنش‌های محیطی می‌باشد. با توجه به نیاز بالای گوجه‌فرنگی به آب، مدیریت آبیاری به‌منظور رسیدن به عملکردی مطلوب ضروری است. در همین راستا و به‌منظور برآورد ضریب خاموشی و کارایی مصرف نور گوجه‌فرنگی در واکنش به رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فرودسی مشهد در دو سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ اجرا شد. عامل کرت اصلی شامل اعمال کم‌آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی و عامل کرت فرعی شامل اعمال کم‌آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی بود. به‌طور کلی عملکرد گوجه‌فرنگی با افزایش میزان آب آبیاری افزایش یافت، با این حال به شدت تحت تأثیر زمان اعمال آبیاری قرار گرفت. به گونه‌ای که حتی زمانی که شاخص سطح برگ گیاه در وضعیت مناسبی قرار داشت با اعمال کم‌آبیاری در مرحله گلدهی به علت خشک‌شدن و ریزش گل‌ها، عملکرد کاهش یافت. توسعه سطح برگ در طول زمان به ساختار کانوپی در واکنش به میزان آب وابسته بود. شاخص سطح برگ بیشتر، منجر به افزایش تشعشع جذب شده توسط گیاه شد. از این‌رو بالاترین ضریب خاموشی نور در تیمار اعمال آبیاری کامل در هر دو مرحله رشد با مقدار ۰/۶۹۲ به ثبت رسید. مقادیر ضریب خاموشی نور در واکنش به رژیم‌های مختلف آبیاری در طول فصل رشد بسیار متغیر بود. با توجه به میزان نور جذب شده توسط کانوپی، حداکثر کارایی مصرف نور با  $0.90 \text{ gDM MJ}^{-1}$  در تیمار آبیاری کامل به دست آمد. در نتیجه تیمار آبیاری کامل به دلیل بهترین کارایی استفاده از نور بیشترین عملکرد تر میوه را با ۹۹/۸۱ و ۱۰۱/۰۱ تن در هکتار به ترتیب در سال‌های اول و دوم به ثبت رساند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، تشعشع جذب شده، ضریب خاموشی نور، کراپ‌وات، کم‌آبیاری

### مقدمه

جدید وابسته است (Gifford et al., 1984). میزان تشعشع جذب شده به شاخص سطح برگ (LAI)<sup>۱</sup> و آرایش فضایی کانوپی بستگی دارد (Adeboye et al., 2016). در صورت عدم تنش‌های محیطی ناشی از میزان آب، دمای هوا، تغذیه ناکافی و آفات و بیماری‌ها، مقدار زیست‌توده تولیدشده در

کمی‌سازی و اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های کانوپی گیاه (به‌ویژه نفوذ نور) در پاسخ به روش‌های مدیریتی و شرایط محیطی یکی از پیش‌نیازهای اساسی در استفاده از مدل‌های رشد گیاهی می‌باشد. در شرایط مزرعه، رشد و نمو گیاهان به ظرفیت کانوپی در جذب تشعشع و تبدیل آن به زیست‌توده

<sup>۱</sup> Leaf area Index (LAI)

طول فصل رشد گیاه با مقدار تشعشع خورشیدی یا تشعشع فعال فتوسنتزی<sup>۲</sup> جذب شده بوسیله سطح سبز برگ گیاه در طول دوره رشد آن وابسته است (Monteith et al., 1977). شیب رابطه خطی بین کل زیست‌توده تولیدی و کل تشعشع فعال فتوسنتزی یا تشعشع خورشیدی جذب شده به عنوان کارایی مصرف نور<sup>۳</sup> (RUE) تعریف می‌شود (Monteith et al., 1977; Ceotto and Castelli, 2002). بسیاری از مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی رشد گیاهان استفاده می‌شوند بر پایه رابطه‌ای خطی استوارند؛ زیرا عملکرد دانه را می‌توان به عنوان تابعی از کسر تشعشع فعال فتوسنتزی<sup>۴</sup>، شاخص برداشت<sup>۵</sup> (HI) و کارایی مصرف نور توصیف کرد (Monteith et al., 1977; Turner et al., 2001; Saha et al., 2012). کارایی مصرف نور گوجه‌فرنگی در مزرعه حدود ۲/۱ گرم وزن تر تولیدشده به مگاژول تشعشع فعال فتوسنتزی جذب شده تخمین زده شده است (Heuvelink, 2018). کسر تشعشع جذب شده بوسیله گیاهان در طول دوره رشد که به شدت به سطح سبز برگ و ضریب خاموشی نور بستگی دارد، بسیار متغیر است (Adeboye et al., 2016). شیب تغییرات عمودی نور در کانوپی گیاه به عنوان ضریب خاموشی نور<sup>۶</sup> ( $k$ ) شناخته شده است. در مدل‌های ساده و مهمی همچون لینتول<sup>۷</sup> (Van Ittersum et al., 2003) که براساس مفهوم کارایی مصرف نور استوار هستند، ضریب خاموشی نور به طور گسترده‌ای به منظور محاسبه جذب نور بوسیله کانوپی گیاه و پیش‌بینی عملکرد زیست‌توده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرایط بدون تنش آب، توزیع عمودی نور در کانوپی با توجه به قانون لامبرت-بیر<sup>۸</sup> ( $e^{-k \cdot LAI - 1}$ ) با فرض نمایی بودن کاهش<sup>۹</sup> نور در طول کانوپی تفسیر می‌شود که در منابع مختلف به اندازه کافی به آن پرداخته شده است (Hirose and Werger, 1987; Monsi and Saeki, 2005)؛ اما در شرایط تنش آبی، توزیع نور در طول عمق کانوپی بسیار پیچیده‌تر است، چون تنش آب نه تنها بر ظاهر و اندازه برگ‌ها که بر جنبه‌های مورفولوژیک موقعیت برگ، زاویه برگ و زاویه آزمایش برگ نیز مؤثر خواهد بود (Archontoulis et al., 2015).

به دلیل خشکسالی‌های متوالی چند سال اخیر و کمبود آب کشاورزی در ایران (Pourmohamad et al., 2019)، به نظر می‌رسد کشاورزان به منظور کاهش آب مصرفی باید مدیریتی صحیح و منطقی را در پیش بگیرند. اتخاذ رهیافت‌های صرفه‌جویی در مصرف آب مانند کم آبیاری یا حتی بدون آبیاری (کشت دیم) و استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی و یا ارقام محلی می‌توانند ابزارهایی مؤثر جهت

طول فصل رشد گیاه با مقدار تشعشع خورشیدی یا تشعشع فعال فتوسنتزی<sup>۲</sup> جذب شده بوسیله سطح سبز برگ گیاه در طول دوره رشد آن وابسته است (Monteith et al., 1977). شیب رابطه خطی بین کل زیست‌توده تولیدی و کل تشعشع فعال فتوسنتزی یا تشعشع خورشیدی جذب شده به عنوان کارایی مصرف نور<sup>۳</sup> (RUE) تعریف می‌شود (Monteith et al., 1977; Ceotto and Castelli, 2002). بسیاری از مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی رشد گیاهان استفاده می‌شوند بر پایه رابطه‌ای خطی استوارند؛ زیرا عملکرد دانه را می‌توان به عنوان تابعی از کسر تشعشع فعال فتوسنتزی<sup>۴</sup>، شاخص برداشت<sup>۵</sup> (HI) و کارایی مصرف نور توصیف کرد (Monteith et al., 1977; Turner et al., 2001; Saha et al., 2012). کارایی مصرف نور گوجه‌فرنگی در مزرعه حدود ۲/۱ گرم وزن تر تولیدشده به مگاژول تشعشع فعال فتوسنتزی جذب شده تخمین زده شده است (Heuvelink, 2018). کسر تشعشع جذب شده بوسیله گیاهان در طول دوره رشد که به شدت به سطح سبز برگ و ضریب خاموشی نور بستگی دارد، بسیار متغیر است (Adeboye et al., 2016). شیب تغییرات عمودی نور در کانوپی گیاه به عنوان ضریب خاموشی نور<sup>۶</sup> ( $k$ ) شناخته شده است. در مدل‌های ساده و مهمی همچون لینتول<sup>۷</sup> (Van Ittersum et al., 2003) که براساس مفهوم کارایی مصرف نور استوار هستند، ضریب خاموشی نور به طور گسترده‌ای به منظور محاسبه جذب نور بوسیله کانوپی گیاه و پیش‌بینی عملکرد زیست‌توده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرایط بدون تنش آب، توزیع عمودی نور در کانوپی با توجه به قانون لامبرت-بیر<sup>۸</sup> ( $e^{-k \cdot LAI - 1}$ ) با فرض نمایی بودن کاهش<sup>۹</sup> نور در طول کانوپی تفسیر می‌شود که در منابع مختلف به اندازه کافی به آن پرداخته شده است (Hirose and Werger, 1987; Monsi and Saeki, 2005)؛ اما در شرایط تنش آبی، توزیع نور در طول عمق کانوپی بسیار پیچیده‌تر است، چون تنش آب نه تنها بر ظاهر و اندازه برگ‌ها که بر جنبه‌های مورفولوژیک موقعیت برگ، زاویه برگ و زاویه آزمایش برگ نیز مؤثر خواهد بود (Archontoulis et al., 2015).

<sup>۶</sup> Light extinction coefficient ( $k$ )

<sup>۷</sup> LINTUL

<sup>۸</sup> Lambert-Beer's law

<sup>۹</sup> Exponential decline

<sup>۲</sup> Photosynthetically active radiation (PAR)

<sup>۳</sup> Radiation use efficiency (RUE)

<sup>۴</sup> Fraction of the incident photosynthetically active radiation (fIPAR)

<sup>۵</sup> Harvest index (HI)

2010) و اطلاعات کمی در مورد اثرات کم آبیاری بر رشد گوجه فرنگی در مزرعه در دسترس است (Çetin and Uygan, 2008; Favati et al., 2009; Patane and Cosentino, 2010).

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) گیاهی با اهمیت اقتصادی بالا در جهان می‌باشد. در سال ۲۰۱۷، کل تولید جهانی گوجه‌فرنگی حدود ۱۸۲ میلیون تن بوده است، این در حالی است که ایران با تولیدی حدود ۶ میلیون تن در رده ششم بعد از چین، هند، ترکیه، ایالات متحده و مصر قرار گرفته است (FAO STAT, 2018). میزان تولید گوجه‌فرنگی در میان گیاهان متنوع کشت شده در ایران جایگاه ششم را به خود اختصاص داده است (۶/۵۱ درصد از تولید کل محصولات زراعی) (Agricultural statistics of Iran, 2018). میانگین عملکرد گوجه‌فرنگی در ایران حدود ۳۴/۵ تن در هکتار می‌باشد که این رقم در استان خراسان رضوی به حدود ۴۰ تن در هکتار می‌رسد (Agricultural statistics of Iran, 2018).

با توجه به ارزش اقتصادی مناسب گوجه‌فرنگی در ایران و تمایل کشاورزان به کشت این محصول، گسترش کشت آن در سال‌های اخیر افزایش یافته است. از طرفی ایران در چند سال اخیر با کمبود شدید آب مواجه شده است و این در حالی است که کشت گوجه‌فرنگی به مقدار نسبتاً زیاد آب نیاز دارد؛ بنابراین یافتن راهی به منظور کاهش مصرف آب در حالی که عملکرد مطلوبی حاصل شود ضروری به نظر می‌رسد. این مطالعه با هدف کمی‌سازی و ارزیابی جذب و کارایی مصرف نور، ضریب خاموشی نور، شاخص سطح برگ و عملکرد گوجه‌فرنگی در پاسخ به اعمال کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشدی (رویشی و زایشی) به منظور حصول بهترین عملکرد با مناسب‌ترین میزان آب مصرفی و شناخت مراحل حساس به تنش آبی در گوجه‌فرنگی اجرا شد.

## مواد و روش‌ها

### ویژگی‌های محل اجرای آزمایش

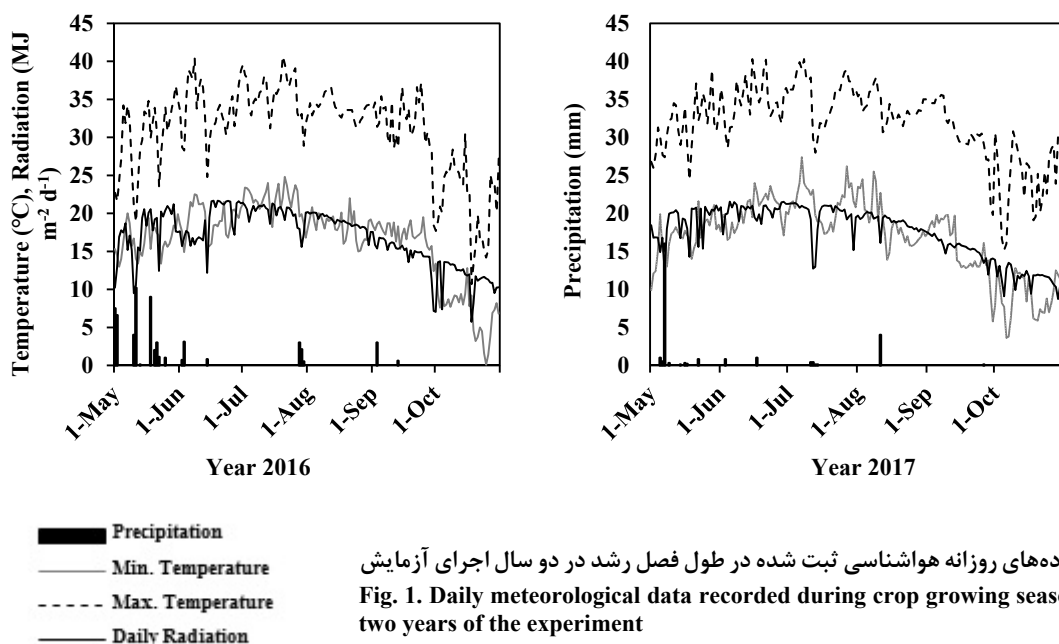
پژوهشی مزرعه‌ای در دو سال متوالی (۹۶-۱۳۹۵) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا واقع در استان خراسان رضوی اجرا شد. مشهد دارای اقلیم نیمه خشک با میانگین بارندگی سالانه ۲۱۸/۹ میلی‌متر

ذخیره آب، بدون کاهش قابل توجه در عملکرد باشند (Guida et al., 2017). چون گوجه‌فرنگی نیاز آبی بالایی دارد (Ngouajio et al., 2007; Patane and Cosentino, 2011b) و به دلیل اینکه آب یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر رشد و تولید می‌باشد، برنامه‌ریزی آبیاری برای افزایش عملکرد کمی و کیفی گوجه‌فرنگی بسیار مهم است (Wang et al., 2011). برنامه‌ریزی آبیاری که زمان و میزان آب را تعیین می‌کند، بوسیله عوامل متعددی کنترل می‌شود، اما در این میان خرداقلیم مهم‌ترین نقش را بازی می‌کند (Imtiyaz et al., 2000). به نظر می‌رسد بهینه‌ترین روش برای بهبود کارایی مصرف آب، شناسایی مرحله بحرانی آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری براساس وضعیت آب گیاه باشد (Ngouajio et al., 2007)؛ بنابراین شناخت بهتر رابطه بین کمبود آب خاک، ظهور مراحل نموی و عملکرد میوه به تولیدکنندگان کمک می‌کند که بتوانند به شیوه‌ای مؤثرتر آب‌آبیاری را مدیریت کنند (Renquist and Reid, 2001).

در کم‌آبیاری، گیاه در تمام طول فصل رشد یا در مرحله‌ی خاصی از رشد در معرض سطح مشخصی از تنش آب قرار می‌گیرد (English and Raja, 1996). با این حال تمامی مراحل نمو در گوجه‌فرنگی حساسیت یکسانی به کمبود رطوبت خاک ندارند، به گونه‌ای که حتی کم‌آبیاری در مراحل غیر بحرانی ممکن است سود بیشتری داشته باشد. بطور کلی حساس‌ترین مراحل نمو گیاهان در واکنش به کم‌آبیاری گل‌دهی و تشکیل میوه می‌باشند (Harmanto et al., 2005). برای مثال، مرحله حساس آب برای پیاز (*Allium cepa*) در طول مرحله تجمع محصول اقتصادی، برای کلم (*Brassica oleracea*) در طول مرحله رسیدگی، در فلفل (*Capsicum annum*) مرحله آغازین گلدهی، برای هندوانه (*Citrullus vulgaris*) اواخر مرحله رویشی، مرحله گلدهی و مرحله تشکیل عملکرد و برای گوجه‌فرنگی در مرحله گلدهی اتفاق می‌افتد (Doorenbos and Kassam, 1979). میزان تنش آب و زمان اعمال آبیاری تأثیر معنی‌داری بر عملکرد و کیفیت گوجه‌فرنگی دارد (Wang et al., 2011). به طور کلی، بیشتر مطالعات در مورد آبیاری گوجه‌فرنگی به مطالعه پاسخ‌های عملکردی و کیفی آن به تنش آب در شرایط گلخانه اختصاص پیدا کرده است (Yuan et al., 2001; Harmanto et al., 2005; Mahajan and Singh, 2006; Topcu et al., 2007; Ismail et al., 2008; Li et al.,

حداکثر دما در طول فصل رشد در سال ۹۵، ۱۸/۵ و ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد و در سال ۹۶، ۱۸/۴ و ۳۳/۲ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). آب آبیاری مورد نیاز از چاهی به عمق بیش از ۱۰۰ متر استخراج می‌شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

می‌باشد، این در حالی است که در طول اجرای این آزمایش بارندگی بسیار ناچیز بود و تنها در اوایل فصل رشد میزان اندکی بارندگی اتفاق افتاد. بارندگی تجمعی در طول فصل رشد در سال اول آزمایش ۲۹/۹ و در سال دوم ۸/۳ میلی‌متر بود (شکل ۱). در طول فصل رشد، میانگین تشعشع خورشیدی ۱۸/۱۰ و ۱۸/۴۸ مگاژول بر مترمربع بر روز به ترتیب در سال ۱۳۹۵ و ۹۶ بود. میانگین حداقل و



شکل ۱. داده‌های روزانه هواشناسی ثبت شده در طول فصل رشد در دو سال اجرای آزمایش  
Fig. 1. Daily meteorological data recorded during crop growing season in the two years of the experiment

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil

عمق Depth	بافت Texture	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن کل Total N	هدایت الکتریکی EC	کربن آلی OC	ماده آلی OM	اسیدیته pH
cm		-----mg/kg-----		%	dS/m	-----%-----		
0-30	Silty clay loam	289	13.5	0.076	6.75	0.65	1.12	8.15

ایجاد شد. فاصله بین نشاءها در هر ردیف دوتایی ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از نشت آب بین کرت‌های تیمارهای مختلف، فاصله بین کرت‌های اصلی ۳ متر، کرت‌های فرعی ۱/۵ متر و تکرارها ۲/۵ متر در نظر گرفته شد. آبیاری به صورت قطره‌ای و با استفاده از نوار تیپ انجام شد و لوله‌کشی‌های لازم در فاصله‌های مشخص بر اساس فاصله ردیف کاشت، انجام شد.

آزمایش به نحوی اجرا شد که اثر کم‌آبیاری و سطوح مختلف آن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مورد بررسی قرار

### طرح آماری و شرایط انجام آزمایش

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با اعمال رژیم‌های مختلف آبیاری در مرحله رویشی و زایشی به عنوان فاکتورهای کرت‌های اصلی و فرعی در سه تکرار اجرا شد. به طور کلی نشاءهای گوجه فرنگی در ۲۷ کرت ۴/۵ در ۳ متری (۱۳/۵ مترمربع) با تراکم ۰/۲۶ گیاه در مترمربع کاشته شدند. نشاءها با الگوی زیگزاگی در ردیف‌هایی دوتایی با فاصله ۱/۵ متر بین ردیف‌های دوتایی کاشته شدند؛ بنابراین ۴ ردیف دوتایی ۳ متری در هر کرت

گردد، به این منظور فاکتورهای اصلی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی (۷۱۰۰)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (۷۷۵)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (۷۵۰) و فاکتورهای فرعی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی (R۱۰۰)، ۲- آبیاری به

میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (R۷۵)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (R۵۰) بود؛ بنابراین این طرح شامل ۹ تیمار می‌باشد. تیمارهای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. از کاشت تا تشکیل ۱۰ درصد گل‌ها در هر کرت به عنوان مرحله رویشی و از ۱۰ درصد گل‌دهی تا پایان دوره رشد به عنوان مرحله زایشی در نظر گرفته شد.

## جدول ۲. توصیف تیمارهای آزمایش

Table 2. Description of experimental treatments

رژیم‌های آبیاری irrigation regimes	توصیف تیمار Description
100V-100R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در تمامی مراحل رشد (آبیاری کامل) Irrigation applied 100% water requirement at the all growth stages (full irrigation)
100V-75R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
100V-50R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
75V-100R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
75V-75R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
75V-50R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
50V-100R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
50V-75R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
50V-50R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage

## روش اجرای آزمایش

تاریخ ۱۳۹۵/۲/۱۵ و ۱۳۹۶/۲/۱۵ با تراکم ۰/۲۶ گیاه در مترمربع کاشته شدند. قبل از کاشت به منظور جلوگیری از ایجاد بیماری‌های قارچی، ریشه‌های نشاءهای گوجه‌فرنگی در محلول قارچ‌کش قرار داده شدند. قبل از انتقال نشاء، کود گاوی به صورت یکسان در سطح مزرعه به میزان ۲۰ تن در هکتار پاشیده شد. سپس با استفاده از دستگاه روتیواتور، کود با خاک به خوبی مخلوط شد. خصوصیات گود گاوی استفاده شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

نشاءهای گوجه‌فرنگی (رقم کارون یا در واقع همان رقم استرلینگ وارداتی که باتوجه به استقبال زارعین هر سال توسط شرکت فلات در ایران بذرگیری و توزیع می‌شود) با اندازه‌های یکسان (۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) در مرحله ۴ تا ۵ برگی از مزرعه نمونه آستان قدس رضوی تهیه و به مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شدند و در

جدول ۳. خصوصیات کود گاوی استفاده شده در آزمایش

Table 3. Characteristics of manure used in the experiment

پتاس	فسفر	نیتروژن	هدایت الکتریکی	کربن آلی	ماده آلی	اسیدیته
K	P	N	EC	OC	OM	pH
-----mg/kg-----		%	ds/m	%	%	
8215	7893	2.31	6.81	27.43	47.29	7.38

از کنتور حجمی استفاده شد. به منظور جلوگیری از اختلاط حجم تیمارهای آبی برای آب ورودی تمام کرت‌ها شیر آب در نظر گرفته شد و در زمان آبیاری هر کرت شیرهای آب سایر کرت‌ها بسته بود.

قبل از انتقال نشاء، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم و ۸۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل به صورت کاملاً یکسان در هر کرت اعمال شد. یک ماه بعد از کاشت ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در ۵ قسط به فاصله دو هفته‌ای در طول دوره رشد اعمال شد. کنترل علف‌های هرز در چند نوبت به صورت دستی انجام شد. در طول دوره رشد برای مبارزه با آفات و بیماری‌های ایجاد شده از سموم شیمیایی مربوطه استفاده شد.

جدول ۴. مقادیر آب اعمال شده در رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 4. Amount of water applied in different irrigation regimes

تیمار	مرحله		کل فصل
(رژیم‌های آبیاری)	رویشی	مرحله زایشی	رشد
Treatment (irrigation regimes)	Vegetative stage	Reproductive stage	Total growing season
	-----mm-----		
100V-100R	253.4	951.1	1204.5
100V-75R	253.4	713.3	966.7
100V-50R	253.4	475.6	729.0
75V-100R	190.1	951.1	1141.2
75V-75R	190.1	713.3	903.4
75V-50R	190.1	475.6	665.6
50V-100R	126.7	951.1	1077.8
50V-75R	126.7	713.3	840.0
50V-50R	126.7	475.6	602.3

#### اندازه‌گیری‌ها و محاسبات

در هر دو فصل رشد، پارامترهای رشدی و فیزیولوژیک گیاه با اندازه‌گیری دو بوته در هر کرت با فاصله دو هفته‌ای ارزیابی شدند. نمونه‌برداری از ۴۵ روز بعد از انتقال نشاء (DAT) تا

به منظور آبیاری گیاهان از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد. نوار تیپ‌های ۲۵ سانتی در مرکز هر ردیف دوتایی قرار داده شد. یک روز قبل از انتقال نشاء، کرت‌ها به صورت یکسان آبیاری شدند. بلافاصله بعد از انتقال، به منظور اطمینان از استقرار همه نشاءها آبیاری سبکی انجام شد. یک هفته بعد از انتقال هنگامی که بوته‌های گوجه‌فرنگی به خوبی مستقر شده بودند، تیمارهای آبیاری اعمال شد. تیمارهای آبیاری شامل سه سطح آب بر اساس نیاز آبی گیاه بودند. نیاز آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از نرم‌افزار کراپوات ۸ محاسبه شد. نرم‌افزار کراپوات ابزار حمایتی تصمیم‌گیری است که بوسیله فائو توسعه یافته است. این نرم‌افزار به طور گسترده‌ای برای تعیین نیاز آبی گوجه‌فرنگی جهت آبیاری در اقلیم‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (Lahoz et al., 2016; Chowdhury et al., 2016; Surendran et al., 2015; Kawy et al., 2013; Harmanto et al., 2005). اطلاعات مورد نیاز مدل کراپوات شامل داده‌های گیاهی، اقلیمی و خاک می‌باشد. داده‌های هواشناسی (میانگین دمای ماهانه، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارش) که اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز تخمین آب مورد نیاز گیاه در مدل کراپوات می‌باشد از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد. پارامترهای گیاهی از داده‌های پیش‌فرض در کراپوات برای گوجه‌فرنگی استفاده شد. برنامه آبیاری شامل عمق و دور آبیاری با استفاده از تخمین آب مورد نیاز گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های خاک محل آزمایش بدست آمد. براساس داده‌های ۱۰ ساله هواشناسی (۲۰۱۵-۲۰۰۶)، مقدار خالص آب مورد نیاز گوجه‌فرنگی در شرایط آب و هوایی مشهد و مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۱۰۷ میلی‌متر و کل آبیاری ناخالص، ۱۲۰۴ میلی‌متر محاسبه شد. آبیاری به روش قطره‌ای و سه بار در هفته در زمان یکسان برای همه تیمارها بر اساس کل آبیاری ناخالص و برنامه آبیاری بدست آمده از کراپوات اعمال شد. عمق آب اعمال شده در رژیم‌های مختلف آبیاری و در مراحل مختلف رشدی در جدول ۴ نشان داده شده است. برای اعمال حجم مذکور در هر نوبت آبیاری

رشد نسبی در طی فصل رشد و  $t$  زمان بر حسب روز پس از کاشت می‌باشد.

همچنین مقادیر روزانه شاخص سطح برگ با برازش تابع لجستیک پیک (معادله ۳) به مقدار شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده در طی زمان تعیین گردید.

$$LAI = a + b \times 4 \times (\exp(-x-b)/c) / (1 + \exp(-(x-b)/c))^2 \quad [3]$$

که در این معادله  $a$ : عرض از مبدأ (مقدار LAI در زمان صفر)،  $b$ : زمان رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ،  $c$ : زمان رسیدن به مرحله خطی رشد سطح برگ و  $x$ : زمان می‌باشد. سپس با استفاده از ضریب خاموشی ( $k$ ) و تغییرات شاخص سطح برگ در طول فصل رشد و با استفاده از معادله ۴، کسر تشعشع جذب شده ( $F_{abs}$ ) برای هر روز از طول فصل رشد محاسبه شد.

$$F_{absi} = 1 - \exp(-k_i \times LAI_i) \quad [4]$$

میزان تشعشع روزانه خورشیدی ( $I_{tot}$ ) ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) برای عرض جغرافیایی مشهد به روش ارائه شده توسط خودریان و فان‌لار (Nassiri Mahallati, 2000) محاسبه گردید. سپس این مقادیر براساس ساعت آفتابی استخراج شده از داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد، اصلاح و در نهایت میزان کل تشعشع جذب شده روزانه توسط کانوپی ( $I_{abs}$ ) محاسبه شد (معادله ۵).

$$I_{abs} = I_{tot} \times F_{abs} \quad [5]$$

در پایان، کارایی مصرف نور گوجه‌فرنگی ( $g \cdot MJ^{-1}$ ) از طریق محاسبه شیب خط رگرسیون بین تشعشع تجمعی جذب شده توسط کانوپی ( $MJ \cdot m^{-2}$ ) و کل وزن خشک گیاه ( $g \cdot m^{-2}$ ) برآورد شد.

### تجزیه و تحلیل‌های آماری

به منظور تجزیه واریانس (ANOVA) و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش و رسم نمودارها و شکل‌ها از نرم‌افزارهای Minitab 17 و Microsoft Excel 2010 استفاده شد. برای برازش معادلات غیرخطی رشد و بدست آوردن ضرایب آنها از نرم‌افزار Slidewrite v7.01 استفاده شد. در نهایت مقایسه

۱۴۵ روز بعد از انتقال<sup>۱</sup> نشاء ادامه یافت. پس از نمونه‌برداری تخریبی و جدا کردن کامل بوته از سطح خاک، برگ، ساقه و میوه از یکدیگر جدا شدند. بلافاصله بعد از جداسازی، سطح برگ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ ( $\Delta T$ ) (DeltaT Ltd., UK) اندازه‌گیری شد. همزمان با این اندازه‌گیری‌ها، میزان تشعشع رسیده به بالای کانوپی و تشعشع عبور کرده از کانوپی و رسیده به سطح زمین در پایین کانوپی از طریق قرار دادن حسگر دستگاه سپتومتر خطی (AccuPAR-LP80, Decagon Devices, USA) روی سطح زمین در دو طرف ردیف‌ها و در چهار جهت مختلف در فاصله ساعات ۱۲ تا ۱۴ برای تمام کرت‌های آزمایشی اندازه‌گیری و ثبت شد. برگ‌ها و سایر اندام‌های هوایی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت درون آون قرار گرفتند و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. میوه‌های گوجه‌فرنگی به صورت دستی و هنگامی که به طور کامل رسیدند برداشت شدند. برداشت در هر دو فصل رشد در ۵ نوبت انجام گرفت. هر کرت به دو بخش مساوی تقسیم شده بودند، یک بخش برای نمونه‌برداری‌های تخریبی در طول فصل رشد و بخش دیگر برای اندازه‌گیری عملکرد.

براساس مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ و میزان تشعشع اندازه‌گیری شده در بالا و پایین کانوپی در هر کرت و با استفاده از معادله مانسی و ساکی (معادله ۱) مقدار ضریب خاموشی نور ( $k$ ) برای گیاهان تحت تأثیر هر یک از رژیم‌های آبیاری محاسبه شد (Nassiri Mahallati, 2000).

$$I / I_0 = \exp(-k \times LAI) \quad [1]$$

که در آن  $I$ : میزان تشعشع رسیده به پایین کانوپی،  $I_0$ : میزان تشعشع رسیده به بالای کانوپی،  $k$ : ضریب خاموشی نور و  $LAI$ : شاخص سطح برگ گیاه است.

به منظور پیش‌بینی مقادیر روزانه تجمع ماده خشک، به داده‌های حاصل از اندازه‌گیری وزن خشک در طول زمان، از بین معادلات غیر خطی آزمون شده، مدل لجستیک (معادله ۲) زیر به دلیل برخورداری از بهترین ضریب تبیین ( $R^2$ )، برازش داده شد (Farrokhi et al., 2018).

$$TDM = \frac{a}{(1 + b \times \exp(-c \times t))} \quad [2]$$

که در این معادله،  $TDM$  ماده خشک تجمعی ( $g \cdot m^{-2}$ )،  $a$ : حداکثر ماده خشک،  $b$ : ضریب ثابت معادله،  $c$ : میانگین سرعت

<sup>1</sup> Day After Transplanting (DAT)

دلیل رشد فیزیولوژیکی گیاه و پیری برگ در پیش گرفت. این روند کاهشی در تیمارهای V-100R۷۵ و V-100R۵۰ وجود نداشت و این تیمارها تا انتهای فصل رشد روند افزایشی خود را حفظ کردند. در تمامی مراحل رشد، شاخص سطح برگ گیاهانی که در هر دو مرحله رشدی ۱۰۰ درصد نیاز آبی را دریافت کرده بودند با اختلاف معنی‌داری بالاتر از تیمارهای دیگر قرار گرفت و حداکثر شاخص سطح برگ ۵/۲۸ و ۵/۳۵ به ترتیب در سال اول و دوم در این تیمار به ثبت رسید (جدول ۵). تنش شدید آب باعث کاهش شدید شاخص سطح برگ گیاهان گوجه‌فرنگی شد، به طوری که گیاهان فقط توانستند برگ‌های تولید شده در ابتدای فصل رشد را حفظ کنند.

میانگین‌ها به کمک آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

## نتایج و بحث

### شاخص سطح برگ

آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که تیمارهای مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد گوجه‌فرنگی اثر معنی‌داری بر حداکثر شاخص سطح برگ داشتند (جدول ۵). روند افزایشی سطح برگ تا رسیدن به حداکثر خود در اواخر مرداد (حدود ۱۰۰ روز پس از انتقال نشاء) در طول فصل رشد ادامه داشت (شکل ۲). پس از آن شاخص سطح برگ به آرامی روند کاهشی را به

جدول ۵. ماده خشک تجمعی و شاخص سطح برگ گوجه‌فرنگی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری در طول دو فصل رشد (۱۳۹۶-۱۳۹۵).

Table 5. Cumulative dry weight and Leaf area index in tomato affected by different irrigations regimes during two growing seasons (2016 and 2017)

تیمار آبیاری در مرحله رویشی Irrigation regimes at Vegetative	تیمار آبیاری در مرحله زایشی Irrigation regimes at Reproductive	ماده خشک تجمعی Cumulative dry weight (g m <sup>-2</sup> )		حداکثر شاخص سطح برگ Maximum LAI	
		2016	2017	2016	2017
		100V	100R	1546.69 <sup>a</sup>	1546.53 <sup>a</sup>
	75R	954.91 <sup>bc</sup>	912.49 <sup>cd</sup>	2.27 <sup>c</sup>	2.35 <sup>c</sup>
	50R	634.75 <sup>e</sup>	590.38 <sup>fg</sup>	1.91 <sup>cd</sup>	2.06 <sup>c</sup>
75V	100R	1079.04 <sup>b</sup>	1083.44 <sup>b</sup>	4.06 <sup>b</sup>	3.88 <sup>b</sup>
	75R	800.17 <sup>cd</sup>	792.73 <sup>de</sup>	2.17 <sup>c</sup>	2.17 <sup>c</sup>
	50R	562.65 <sup>e</sup>	521.92 <sup>gh</sup>	1.39 <sup>de</sup>	1.33 <sup>d</sup>
50V	100R	996.97 <sup>b</sup>	1006.94 <sup>bc</sup>	3.50 <sup>b</sup>	3.58 <sup>b</sup>
	75R	721.11 <sup>de</sup>	718.95 <sup>ef</sup>	1.98 <sup>c</sup>	1.85 <sup>cd</sup>
	50R	374.36 <sup>f</sup>	369.09 <sup>h</sup>	1.08 <sup>e</sup>	1.43 <sup>d</sup>
ANOVA					
V		**	**	**	**
R		**	**	**	**
V*R		*	**	*	*
LSD of V*R		74.56	70.95	0.266	0.276

ns, \* و \*\* به ترتیب بی‌معنی، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد. در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌دار ندارند. داده‌ها میانگین داده‌های مشاهده شده در دو سال هستند چون تفاوت معنی‌داری بین داده‌ها در دو سال آزمایش وجود نداشت. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، ۱۰۰= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۷۵= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۵۰= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی

ns, \* and \*\*: are non- significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

In each column means different letters indicate statistically significant differences (P<0.05). Data are averages observed for the two experiment year because there was no significant difference between two experiment years.

V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

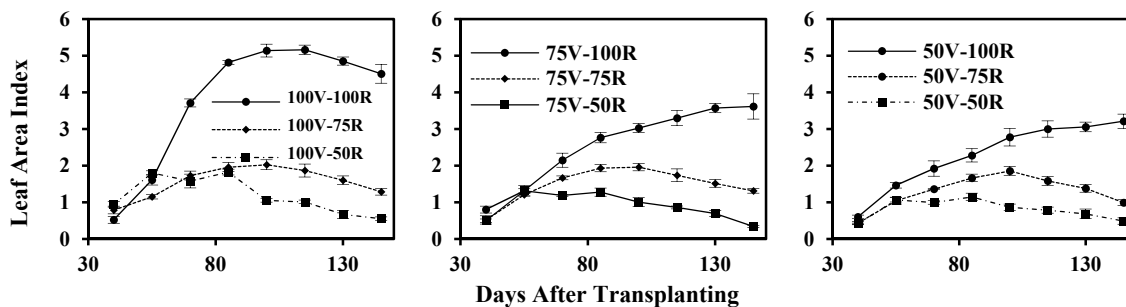
تیمارهای تحت تنش در مرحله رویشی پس از دریافت آب بیشتر در مرحله زایشی شاخص سطح برگ خود را سریعاً افزایش دادند. در مقابل شاخص سطح برگ در تیمارهای بدون تنش در مرحله رویشی با قرار گرفتن در معرض تنش یا ثابت

شاخص سطح برگ عامل اصلی فیزیولوژیک در تعیین عملکرد گیاه می‌باشد. توسعه شاخص سطح برگ در طول زمان به تغییرات کانوپی گوجه‌فرنگی در واکنش به میزان آب قابل دسترس بستگی داشت. در این مطالعه مشاهده شد که



ریشه‌های خود برای مقابله با تنش آبی، بعد از دریافت بیشتر آب در مرحله زایشی، رشد خود را سریعاً و با قدرت بیشتر نسبت به گیاهان دیگر ادامه دادند. این نتایج با یافته‌های آلو و همکاران (Alou et al.; 2018) که بر واکنش رشدی، فیزیولوژیک و عملکردی برنج به تنش آبی در مراحل مختلف رشد مطالعه کرده بودند، کاملاً هم‌خوانی دارد. در هر دو سال آزمایش بیشترین شاخص سطح برگ پس از تیمار آبیاری کامل به ترتیب به تیمار V-100R $\delta$  و V-100RY $\delta$  اختصاص داشت، بنابراین این نتیجه نشان می‌دهد که توانایی گیاه برای توسعه سطح برگ خود، با دریافت آب پس از یک دوره کم‌آبی افزایش می‌یابد.

ماند و یا کاهش پیدا کرد (شکل ۲). این گونه تطبیق کانوبی گیاه با شرایط خشکی که باعث بهبودی مجدد گیاه از تنش آبی می‌شود و عملکردی قابل قبول حاصل می‌شود، نوعی انعطاف‌پذیری رشدی است (Adeboye et al., 2016). این ویژگی برای سویا (Manavalan et al., 2009) و نخود (Canci and Toker, 2009) نیز گزارش شده است. این واکنش شاخص سطح برگ گوجه‌فرنگی به میزان آب آبیاری اعمال شده در زمان‌های مختلف ممکن است به افزایش قدرت ریشه در تیمارهای مختلف بستگی داشته باشد. ظاهراً گوجه‌فرنگی در شرایط کم آبی با ایجاد ریشه‌هایی عمیق‌تر، خود را با شرایط موجود تطبیق می‌دهد (Barrios-Masias and Jackson, 2016). گیاهانی که در مرحله رویشی در معرض تنش قرار گرفته بودند به دلیل افزایش قدرت



شکل ۲. تغییرات زمانی شاخص سطح برگ گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در طول دو فصل رشد (میانگین سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶). خطوط عمودی نشان دهنده خطای استاندارد میانگین می‌باشد. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، ۱۰۰= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۷۵= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۵۰= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی.

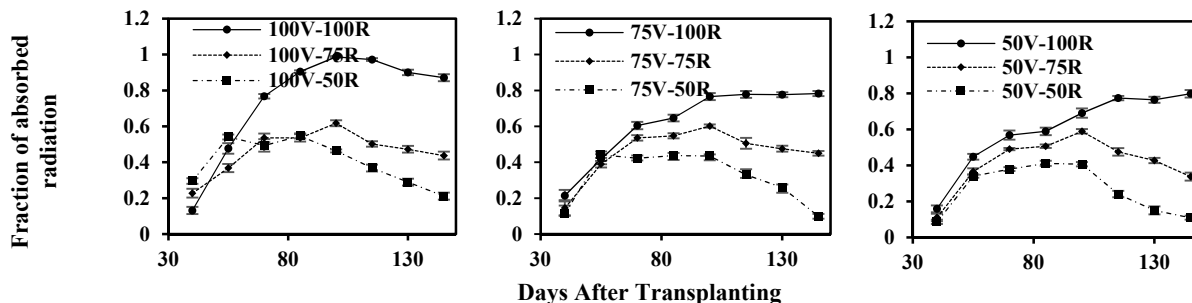
Fig. 2. Time trend of tomato LAI as affected by different irrigation regimes during two growing seasons (Average of 2016 and 2017). Vertical bars indicate standard error of the mean (SEM). V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

روند کاهشی در انتهای فصل رشد دیده نشد و تا انتهای فصل رشد روندی افزایشی داشتند (شکل ۳). این به دلیل افزایش سطح برگ این تیمارها در اواخر دوره رشد بود که با تأمین میزان بالاتری آب پس از یک دوره تنش حاصل شده بود. تغییرات کسر تشعشع جذب‌شده در طول زمان روندی مشابه با تغییرات زمانی در شاخص سطح برگ داشت. در واقع حداکثر میزان تشعشع جذب شده با بالاترین مقدار شاخص سطح برگ که در تیمار آبیاری کامل حاصل شده بود، مطابقت داشت. این نتیجه با یافته‌های پاتانه و همکاران (Patanè et al., 2011a) مطابقت داشت. در تمامی تاریخ‌های نمونه‌برداری به جز در نمونه‌برداری‌های ۵۵ و ۷۰ روز پس از

### کسر تشعشع جذب شده (fIPAR) و ضریب خاموشی نور (k)

روند تغییرات کسر تشعشع فعال فتوسنتزی جذب‌شده (fIPAR) توسط کانوبی گوجه‌فرنگی در رژیم‌های مختلف آبیاری در شکل ۳ نشان داده شده است. کسر تشعشع جذب‌شده چند روز بعد از انتقال نشاء در اردیبهشت ماه، شروع به افزایش کرد. همه تیمارها در اواخر مرداد (حدود ۱۰۰ روز پس از انتقال نشاء) به حداکثر مقدار خود در جذب تشعشع رسیدند و پس از آن بتدریج با گذشت زمان در طول فصل رشد تا آخرین نمونه‌برداری روند کاهشی را طی کردند؛ این در حالی است در تیمارهای V-100RY $\delta$  و V-100R $\delta$

انتقال نشاء در سال اول، کسر تشعشع جذب‌شده به صورت معنی‌داری تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری قرار گرفت. در مقابل در سال دوم تفاوت معنی‌دار فقط در تاریخ‌های ۴۰،



شکل ۳. تغییرات کسر تشعشع جذب‌شده توسط گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در طول دو فصل رشد (میانگین سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶). خطوط عمودی نشان دهنده خطای استاندارد میانگین می‌باشد. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، ۱۰۰= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۷۵= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۵۰= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی

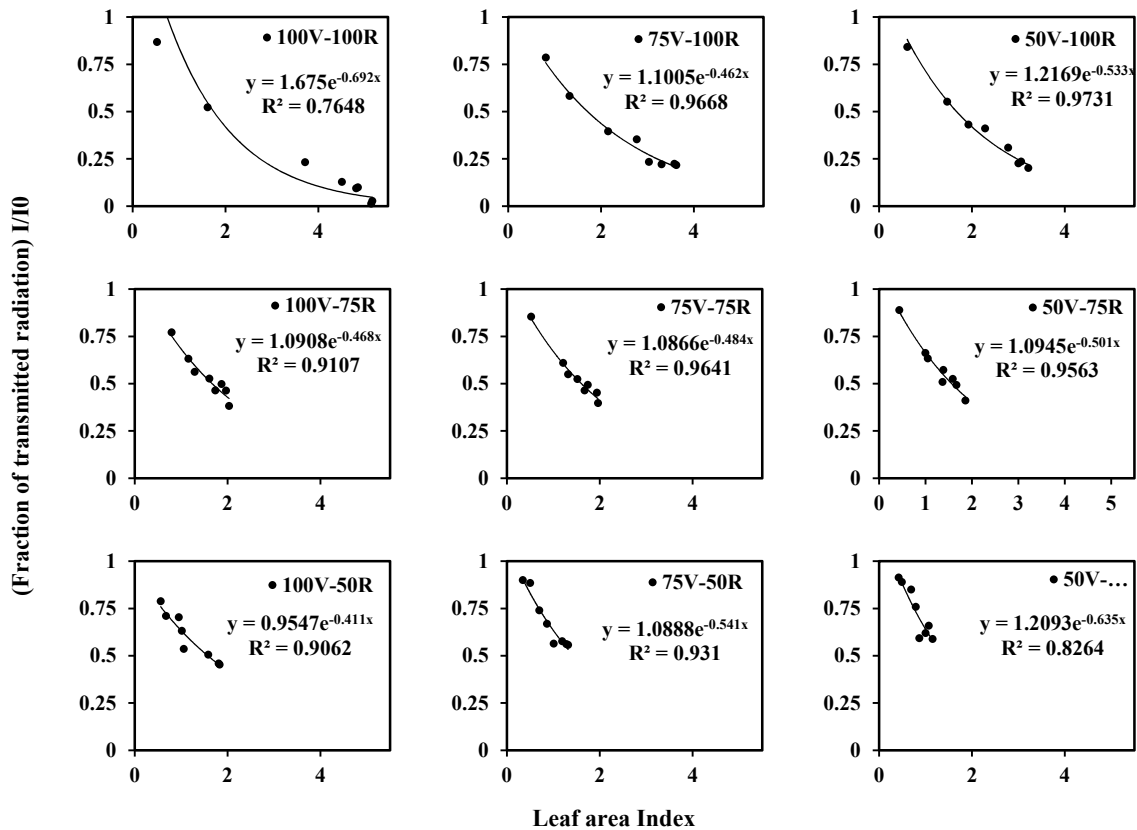
Fig. 3. Changes in fraction of absorbed radiation by tomato as affected by different irrigations regimes during two growing seasons (Average of 2016 and 2017). Vertical bars indicate standard error of the mean (SEM). V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

آمده برای این تیمار غیر منطقی به نظر برسد. با این حال در شرایط کمبود آب، فاصله بین میانگره‌ها کوتاه‌تر شده و این امر موجب کم شدن فاصله بین لایه‌های کانوپی و قرار گرفتن برگ‌ها به صورت مجتمع خواهد شد و در نتیجه مقدار  $k$  افزایش خواهد یافت (Lantinga et al., 1999; Kim et al., 2011; Sarlikioti et al., 2011; Litvin et al., 2019; Durigon et al., 2016). از طرفی شاید این قضیه لزوم محاسبه  $k$  در تمامی طول فصل رشد را به خصوص برای استفاده در مدل‌های رشد گیاهی امری ضروری قلمداد کند و استفاده از این روش برای محاسبه  $k$  روشی مناسب برای ارزیابی مقدار  $k$  در شرایط محدودیت‌های محیطی مثل تنش آبی نباشد و لزوم محاسبه دقیق  $k$  در طول فصل رشد را دو چندان می‌کند. مقدار  $k$  به ساختار کانوپی، گونه و الگوی کشت گیاه بستگی دارد و محدوده‌ای از ۰/۳ تا ۱/۵ بسته به گونه گیاهی را شامل می‌شود (Saeki, 1960; Jones, 1992; Zarea et al., 2005).  $k$  بزرگ‌تر از ۱ از آرایش غیر افقی برگ‌ها یا برگ‌های انبوه و  $k$  بزرگ‌تر از ۱ از برگ‌های افقی یا برگ‌هایی با توزیع منظم در فضا حاصل می‌شود (Jones, 1992). تأثیر تنش آب در مراحل مختلف رشد بر مقدار  $k$  به اثبات رسیده است (Jeuffroy and Ney, 1997). در این حال آدبویه و همکاران (Adeboye et al., 2016)

شیب منحنی نور عبور کرده از کانوپی در برابر شاخص سطح برگ که در شکل ۴ نشان داده شده است بیانگر ضریب خاموشی نور است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود کسر نور عبور کرده از کانوپی در تمامی تیمارهای آبیاری، با افزایش شاخص سطح برگ به طور نمایی کاهش یافت. بیشترین میزان ضریب خاموشی نور در تیمار آبیاری کامل با مقدار ۰/۶۹ و کم‌ترین آن در تیمار ۱۰۰-50R با مقدار ۰/۴۱ بدست آمد. مقدار  $k$  در هر دو فصل آزمایش تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری قرار گرفت. تبرزاد و همکاران (Tabarzad et al., 2016) نیز گزارش کردند که مقادیر روزانه و ساعتی  $k$  در جو تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و تاریخ کاشت قرار گرفت؛ اما این به این معنی نبود که با کاهش مقدار آب  $k$  نیز کاهش پیدا کند، چون علاوه بر مقدار آب، زمان اعمال کم آبی نیز بسیار تأثیرگذار بود. نتیجه قابل تأمل در مقادیر  $k$  بدست آمده از این مطالعه، مقدار  $k$  در تیمار ۱۰۰-50R بود.  $k$  در تیمار ۵۰-50R مقدار ۰/۶۳ را به خود اختصاص داد که با وجود داشتن کمترین میزان شاخص سطح برگ در بین همه تیمارها و دریافت کمترین میزان آب، پس از مقدار  $k$  بدست آمده برای تیمار آبیاری کامل در رده دوم قرار گرفت (شکل ۴). باتوجه به مقایسه شاخص سطح برگ تیمار ۵۰-50R با بقیه تیمارها، شاید عدد  $k$  بدست

می‌باشد (Monsi and Saeki, 2005). با توجه به نتایج به‌دست آمده، اعمال کم‌آبی بر میزان شاخص سطح برگ تأثیرگذار بود که این امر میزان تشعشع جذب شده توسط برگ‌ها را تحت تأثیر قرار داد (شکل ۲ و ۳) و در نتیجه می‌تواند نتایج متفاوتی را برای کارایی مصرف نور (RUE) به همراه داشته باشد. از اینرو زمانی که گیاهان تحت تنش رطوبتی قرار دارند، محاسبه  $k$  به صورت جداگانه برای هر شرایط محیطی و نه در نظر گرفتن یک عدد ثابت (Zhang et al., 2014)، به منظور محاسبه RUE امری ضروری به‌نظر می‌رسد (De Pascale et al., 2015).

تأثیر معنی‌داری در مقادیر  $k$  در واکنش به تیمارهای مختلف خشکی در مراحل مختلف رشد در سویا مشاهده نکردند و آنها علت آن را تحمل رقم کشت شده به خشکی عنوان کردند. در این مطالعه، کسر تشعشع جذب شده (fIPAR) در تیمارهای مختلف به دلیل تغییر در مقدار شاخص سطح برگ متغیر بود. تغییر زمانی fIPAR از روندی شبیه به آنچه که در LAI رخ داد پیروی کرد (شکل ۲ و ۳). تولید زیست‌توده تحت تأثیر تشعشع خورشیدی و جذب آن توسط سطح برگ می‌باشد (Ronga et al., 2017). اندازه‌گیری LAI پیش‌نیازی برای بررسی ضریب خاموشی نور ( $k$ ) که به چگونگی توزیع زاویه برگ در کانوپی گیاه وابسته است،



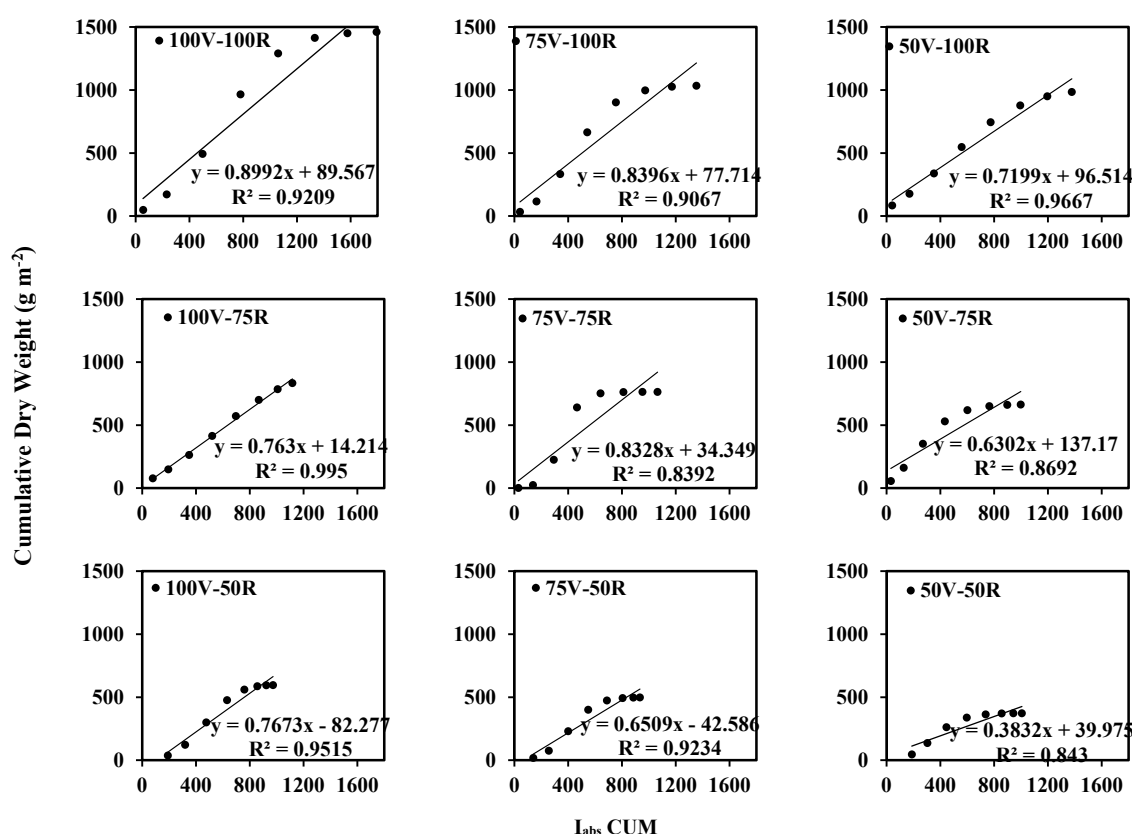
شکل ۴. روند تغییرات نسبت نور عبور کرده از کانوپی در برابر شاخص سطح برگ گوجه‌فرنگی در واکنش به رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد. (در معادلات منحنی، توان نشان‌دهنده ضریب خاموشی نور است). داده‌ها، میانگین داده‌های مشاهده شده در دو سال هستند چون تفاوت معنی‌داری بین داده‌ها در دو سال آزمایش وجود نداشت. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، اعمال ۱۰۰= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۷۵= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، ۵۰= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی

Fig. 4. Exponential decrease of the fraction of transmitted radiation against tomato leaf area index in different irrigation regimes at different growth stages during two growing seasons (2016 and 2017). (In curve equations, the exponent demonstrate light extinction coefficient). Data are averages observed for the two experiment year because there was no significant difference between two experiment year. V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

## کارایی مصرف نور

کارایی مصرف نور در اغلب مطالعات با یک مقدار  $k$  ثابت در طول فصل رشد حتی هنگامی که گیاهان در معرض تنش هستند، محاسبه می‌شود (De Pascale et al., 2015; Yildirim and Bahar, 2017). در این مطالعه به منظور محاسبه کارایی مصرف نور از مقادیر متغیر  $k$  متأثر از رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه گوجه‌فرنگی

استفاده شد. شیب خط رگرسیونی برازش یافته به تغییرات ماده خشک تجمعی طی فصل رشد در برابر تشعشع تجمعی جذب شده نشان داده شده در شکل ۵، بیانگر کارایی مصرف نور (RUE) توسط گوجه‌فرنگی می‌باشد. همبستگی قوی و مثبتی بین ماده خشک تجمعی و تشعشع تجمعی جذب شده روزانه در هر دو فصل زراعی آزمایش در همه تیمارهای آبیاری در مراحل مختلف رشد گوجه‌فرنگی مشاهده شد (شکل ۵).



شکل ۵. میزان ماده خشک تجمعی در گوجه‌فرنگی به عنوان تابعی از تشعشع تجمعی در واکنش به رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد. (شیب خط رگرسیونی، نشان‌دهنده کارایی مصرف نور است). داده‌ها، میانگین داده‌های مشاهده شده در دو سال هستند چون تفاوت معنی‌داری بین داده‌ها در دو سال آزمایش وجود نداشت. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، 100= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، 75= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، 50= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی

Fig. 5. Tomato dry matter accumulation as a function of accumulated radiation affected by different irrigation regimes at different growth stages during two growing seasons (2016 and 2017). (The slope of regression lines indicates radiation use efficiency). Data are averages observed for the two experiment year because there was no significant difference between two experiment years. V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

همکاران (De Pascal et al., 2015) با مطالعه بر روی واکنش گوجه‌فرنگی به تنش شوری در شرایط مزرعه، مقادیر کارایی مصرف نور را در محدوده‌ای بین ۰/۶۶ تا ۱/۰۳ و ۰/۴۴ تا ۰/۹۱ گرم ماده خشک بر مگازول تشعشع جذب شده به

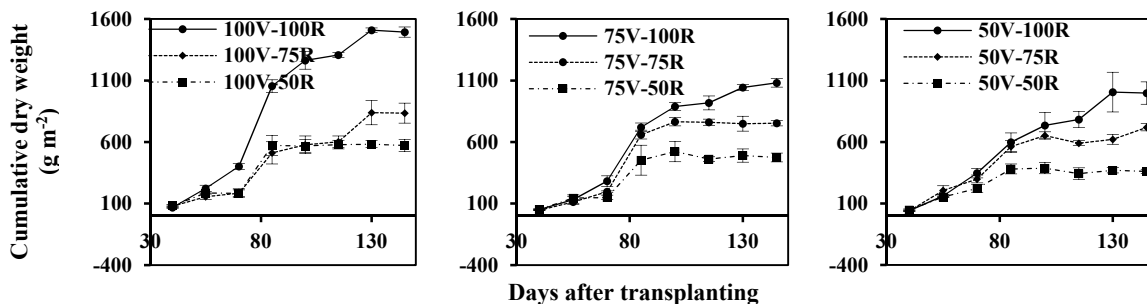
کارایی مصرف نور بدست آمده در تیمارهای مختلف در محدوده‌ای بین ۰/۹۰ تا ۰/۳۸ گرم ماده خشک بر مگازول تشعشع جذب شده (gDM MJ<sup>-1</sup>) به ترتیب برای تیمارهای V-50R۵۰ و V-100R۱۰۰ به ثبت رسید. د پاسکال و

در مراحل مختلف رشد، اعمال آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در هر دو مرحله رشدی می‌تواند پیشنهاد قابل قبولی باشد. اعمال آبیاری در طول مرحله رویشی می‌تواند افزایش در سطح برگ، نور جذب شده و فتوسنتز را تسریع ببخشد (Comas et al., 2019) و به دنبال آن بهبود کارایی مصرف نور را به همراه داشته باشد. با این حال تنش در طول مرحله رویشی ممکن است شرطی جهت تحمل بیشتر گیاهان به تنش آبی در مرحله زایشی باشد (Harb et al., 2010).

#### ماده خشک تجمعی و عملکرد

تجمع کل ماده خشک (DM) و تخصیص (تسهیم) آن به هر یک از اندام (برگ، ساقه و میوه) در طول هر دو فصل رشد مورد بررسی قرار گرفت. رژیم‌های مختلف آبیاری تأثیر معنی‌داری بر تجمع ماده خشک در هر دوسال آزمایش داشتند (جدول ۵). در هر دو سال آزمایش، الگوی مشابه در همه رژیم‌های آبیاری مشاهده شد. تفاوت تجمع زیست‌توده در طول مراحل پایانی رشد در هر دو فصل آزمایش آشکارتر بود (شکل ۶).

ترتیب برای سال‌های اول و دوم گزارش کردند. همچنین بیلدریم و بهار (Yıldırım and Bahar, 2017) با بررسی کارایی مصرف نور گوجه‌فرنگی در تراکم‌های مختلف در شرایط مزرعه، محدوده‌ای بین ۰/۱۹ تا ۰/۴۲ گرم ماده خشک تجمعی بر مگاژول تشعشع جذب شده را گزارش کردند. آنها همچنین بیان داشتند که کارایی مصرف نور به طور معنی‌داری به میزان مصرف آب گیاه وابسته بود. آرکونتولیس و همکاران (Archontoulis et al., 2011) گزارش کردند که مقادیر k در شرایط محدودیت آب همیشه از مقادیر آن در شرایط بدون محدودیت آب کم‌تر بود. با بررسی سه تیمار 75V-75R، V-100R و V-50R مشاهده می‌شود که بیشترین کارایی مصرف نور مربوط به تیماری است که در هر دو مرحله رشدی، تنش رطوبتی متوسط دریافت کرده است (V-75R)، این در حالی است که تنها با اختلاف ۷/۴٪ کم‌تر از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی در هر دو مرحله رشدی (V-100R) است و همین‌طور با اختلاف بسیار ناچیز (۸٪) کم‌تر از تیماری است که نسبت به خود در مرحله زایشی ۱۰۰ نیاز آبی (V-100R) را دریافت کرده است؛ بنابراین به نظر می‌رسد به منظور رسیدن به یک RUE مناسب همزمان با کاهش میزان آب مصرفی با مدیریت آبیاری



شکل ۶. تغییرات تجمع ماده خشک گوجه‌فرنگی (برگ، ساقه و میوه) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در طول دو فصل رشد (میانگین سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶). خطوط عمودی نشان دهنده خطای استاندارد میانگین می‌باشد. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، 100= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، 75= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، 50= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی

Fig. 6. Time trend of tomato total dry weight (leaf, stem and fruit) during two growing seasons as affected by different irrigation regimes. Vertical bars indicate standard error of the mean (SEM). V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

به تیمار V-100R تنها ۸/۳٪ و ۷/۶٪ به ترتیب در سال‌های اول و دوم بزرگ‌تر بود. با اعمال تنش رطوبتی متوسط در مرحله زایشی (V-75R، 75V-75R and 50V-100) ماده خشک تجمعی در تیمار V-75R 19/33٪ و ۱۵/۱٪ و ۳۲/۴٪ و ۲۶/۹۱٪ به ترتیب نسبت به V-75R و 75V-75R

زیست‌توده خشک تجمعی در تیمار V-100R همیشه نسبت به تیمارهای دیگر بالاتر بود و اختلاف بین آن‌ها در طول فصل رشد به تدریج بیشتر شد. کمبود آب، تجمع ماده خشک را کاهش داد. تجمع ماده خشک در تیمار V-100R علی‌رغم دریافت آب بیشتر در مرحله رویشی نسبت

رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد گوجه‌فرنگی، به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد، به عبارت دیگر روند تغییرات شاخص سطح برگ (شکل ۲) و به دنبال آن کسر نور جذب شده (شکل ۳)، کاملاً منطبق با روند تغییرات ماده خشک تجمعی (شکل ۴) در فصل رشد گوجه‌فرنگی بود. افزایش عملکرد و ماده خشک تجمعی اغلب بوسیله افزایش در کارایی مصرف نور تخمین زده می‌شود (Higashide, 2018).

میانگین مقادیر عملکرد تر و خشک میوه گوجه‌فرنگی در شکل ۷ نشان داده شده است. زمان اعمال تنش آبی بر عملکرد خشک و تر میوه در هر دو سال آزمایش اثر معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) داشت (جدول ۶).

و V-75R۵۰ به ترتیب در سال اول و دوم بزرگتر بود. کل زیست‌توده تولیدشده از پارمترهای مهم در رسیدن به رشد مطلوب می‌باشد، البته توزیع مواد فتوسنتزی در میان اندام‌های گیاه ویژگی‌ای مهم برای رسیدن به عملکرد قابل قبول می‌باشد (Ronga et al., 2017). با این حال هیگاشید (Higashide, 2018) بیان داشت که بالاترین عملکرد ارقام جدید گوجه‌فرنگی در کشور هلند به علت افزایش تولید کل ماده خشک گیاهان حاصل می‌شود و نه با افزایش تخصیص ماده خشک به میوه. به طور کلی، شاخص سطح برگ با مقدار ماده خشک اندام هوایی، همبستگی مثبت و با مقدار نور عبور کرده از کانوپی، همبستگی منفی دارد (Nassir Mahallati, 2000). در این مطالعه نیز، مقایسه روند تغییرات شاخص سطح برگ و تغییرات ماده خشک تجمعی در نتیجه اعمال

جدول ۶. نتایج آنالیز واریانس عملکرد تر و خشک گوجه‌فرنگی و نسبت بین وزن میوه خشک و کل وزن خشک بوته (شاخص برداشت) در گوجه‌فرنگی در واکنش به تیمارهای مختلف آبی در طول فصل رشد دو سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶

Table 6. Results of variance analysis for fresh and dry yield and ratio between fruit dry weight and plant total dry weight (harvest index – HI) of tomato in response to different water treatment, during the 2016 and 2017 growing seasons.

S.O.V	منابع تغییر	df	عملکرد تر میوه		عملکرد خشک میوه		شاخص برداشت	
			Fresh yield		Dry yield		HI	
			2016	2017	2016	2017	2016	2017
تکرار	2	161272 <sup>ns</sup>	503591 <sup>ns</sup>	1628.8 <sup>ns</sup>	4164*	24.202 <sup>ns</sup>	224.05*	
Replicate								
رویشی	2	20050445**	22870736**	79765.8**	99033**	98.677*	677.54**	
Vegetative								
خطای کرت اصلی	4	347040	2647663	1827.1	10908	9.541	114.45	
Error a								
زایشی	2	34938029**	63799821**	56355.6**	148948**	285.242**	265.17*	
Reproductive								
رویشی × زایشی	4	1299065**	1307341**	6342.5**	3306*	32.283 <sup>ns</sup>	136.67 <sup>ns</sup>	
Veg × Rep								
خطای کرت فرعی	12	83118	213489	751.2	972	20.096	52.06	
Error b								
ضریب تغییرات								
CV%			4.88	8.70	7.04	8.96	12.92	16.13

ns, \* و \*\* به ترتیب بی‌معنی، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

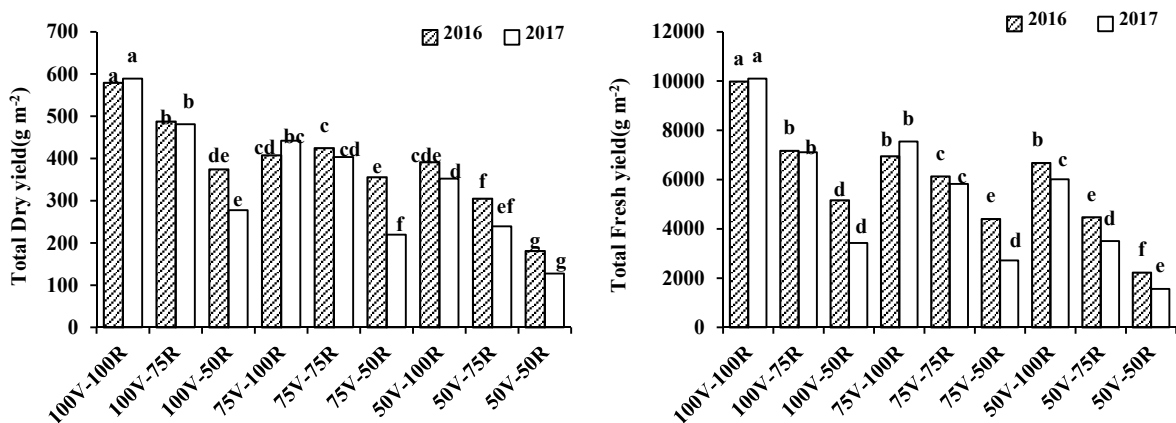
ns, \* and \*\*: are non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively

اجرا شده بر روی تولید گوجه‌فرنگی در شرایط اقلیمی متفاوت مشاهده شده است که با افزایش تنش آبی، کاهش ۲۵ تا ۵۰ درصدی در عملکرد به ثبت رسیده است. عملکرد تر میوه گوجه‌فرنگی در سال اول و دوم به ترتیب به ۹۹/۸۱ و ۱۰۱/۰۱ تن در هکتار در شرایط آبیاری کامل در هر دو مرحله رشدی (V-100R۱۰۰) رسید که به طور معنی‌داری از عملکرد تر

تأثیر مشابه در مطالعه کاسکو و همکاران (Kuscu et al., 2014) نیز مشاهده شد. به طور کلی، عملکرد گوجه‌فرنگی با افزایش مقدار آب آبیاری اعمال شده افزایش یافت، با این حال عملکرد شدیداً بوسیله زمان اعمال آبیاری تحت تأثیر قرار گرفت. گویدا و همکاران (Guida et al., 2017) گزارش کردند که در بسیاری از مطالعات مزرعه‌ای

مترمربع در شرایط آبیاری کامل و ۱۸۰/۸۶ و ۱۲۷/۴۵ گرم در مترمربع در شرایط کاهش ۵۰ درصد نیاز آبی در هر دو مرحله رشدی به ترتیب در سال‌های اول و دوم به ثبت رسید (شکل ۷).

میوه تولید شده در شرایط تنش شدید در هر دو مرحله رشد (V-50R۵۰) با ۱۱/۲ و ۱۵/۶۶ تن در هکتار بزرگتر بود (شکل ۷). واکنشی مشابه به میزان آب آبیاری اعمال شده در مراحل مختلف رشد در عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی مشاهده شد که محدوده‌ای بین ۵۷۹/۱۸ و ۵۸۹/۱۳ گرم در



شکل ۷. مقایسه میانگین عملکرد تر و خشک میوه گوجه‌فرنگی در واکنش به رژیم‌های مختلف آبیاری. حروف (a, b, c, d, e, f, g) نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار میانگین‌ها ( $P < 0.05$ ) با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار می‌باشند. V= مرحله رویشی، R= مرحله زایشی، 100= اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، 75= اعمال ۷۵ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی، 50= اعمال ۵۰ درصد نیاز آبی گوجه‌فرنگی. Fig. 7. Means comparison of fresh and dry yield of tomato in response to different irrigation regimes. Letters (a, b, c, d, e, f, g) indicate statistically significant differences between the means ( $P < 0.05$ ) using Fisher's Least Significant Difference (LSD) test. V= Vegetative stage, R= Reproductive stage, 100= apply 100% water requirement, 75= apply 75% water requirement, 50= apply 50% water requirement

آبیاری در مرحله تشکیل میوه صورت گرفته بود، این در حالی است که کم‌ترین عملکرد در تیمارهایی ثبت شد که آبیاری آنها تنها در مرحله رویشی اعمال شده بود. واکنش‌های متفاوتی در عملکرد گوجه‌فرنگی به رژیم‌های آبیاری در هر دو سال مشاهده شد. تفاوت عملکرد بین دو فصل رشد را می‌توان با تفاوت در شرایط اقلیمی توضیح داد. بارندگی در طول دوره رشد در سال اول نسبت به سال دوم به خصوص در مرحله رویشی بیشتر بود و سال دوم به طور کلی سال خشک‌تری بود، بنابراین چنین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش عملکرد در سال اول به خصوص در تیمارهایی که شامل تنش آبی در طول دوره رویشی بودند به دلیل بارندگی بیشتر بوده است. در هر دو سال آزمایش، بیشترین و کم‌ترین عملکرد تر و خشک میوه گوجه‌فرنگی به ترتیب در تیمارهای V-100 و 100R و V-50V۵۰ به ثبت رسید. با مقایسه عملکرد خشک میوه روندهای متفاوتی در دو سال آزمایش مشاهده شد. با توجه به مقدار آب آبیاری اعمال شده به خصوص در مرحله

با مقایسه عملکرد تر میوه بین تیمارهای V-100R۵۰ و V-100R۵۰ اختلافی از نظر معنی‌داری دیده نشد، این در حالی است که عملکرد تر میوه تیمار V-50R۱۰۰ به طور معنی‌داری کمتر از تیمار V-75R۱۰۰ بود. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که اثر منفی کمبود آب در مرحله زایشی نسبت به مرحله رویشی بر عملکرد تر میوه گوجه‌فرنگی آشکارتر بود. در حقیقت تنش آبی در مرحله گلدهی به طور معنی‌داری دارای اثر منفی بر عملکرد گوجه‌فرنگی بوده است. در این راستا یافته‌های این آزمایش هم‌سویی خوبی با مطالعات پیشین دارد، این مطالعات نشان داده‌اند که کمبود رطوبت خاک در طول دوره گلدهی و میوه‌دهی اثر منفی بیشتری بر عملکرد داشته است (Branthome and Plé, 1987; Zegbe et al., 2006; ) (Gatta et al., 2007; Alou et al., 2018). کاسکو و همکاران (Kuşçu et al., 2014) بیان کرده‌اند که بالاترین عملکرد گوجه‌فرنگی در تیمارهایی حاصل شد که اعمال

### نتیجه‌گیری نهایی

درک سازگاری‌های فیزیولوژیک گیاهان هنگام مواجهه با کم آبی و تنش آبی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مطالعه تأثیر میزان آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، ماده خشک تجمعی، شاخص سطح برگ، جذب تشعشع، ضریب خاموشی نور و کارایی مصرف نور در شرایط مزرعه در دو سال متوالی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج آزمایش به وضوح تأثیر منفی کم آبی بر عملکرد گوجه‌فرنگی را نشان داد، به گونه‌ای که حداکثر عملکرد تر میوه با آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در هر دو مرحله رشدی به دست آمد. با این حال نتایج آزمایش نشان داد که این اثر منفی را می‌توان با مدیریت صحیح آبیاری در مراحل مختلف رشدی به حداقل کاهش داد. این آزمایش مزیت‌های اعمال کم آبیاری در طول مرحله رویشی به شرط اینکه گیاه شانس دریافت آب کافی در طول مرحله زایشی را بدست آورد را نمایان ساخت. بعلاوه، نتایج نشان داد که تأثیر تأمین آب در مرحله حساس رشد بر بهره‌وری گوجه‌فرنگی تا حد زیادی به دلیل تأثیر مثبت فراهمی آب بر کارایی مصرف نور بوده است. برآورد کارایی مصرف نور برای تولیدکنندگان این امکان را فراهم می‌کند تا شیوه‌های تولید خود را با محدودیت آب در مناطق خشک تطبیق دهند. اطلاعات به‌دست آمده در این مطالعه به تولیدکنندگان گوجه‌فرنگی کمک می‌کند تا روش‌های مدیریت آبیاری خود را بهینه کنند، مانند آبیاری کامل در طی مراحل حساس و صرفه‌جویی در مصرف آب در مرحله رویشی. کارایی مصرف نور و به‌ویژه ضریب خاموشی نور می‌تواند ابزاری سودمند در مدل‌های شبیه‌سازی به منظور پیش‌بینی رفتار گوجه‌فرنگی در شرایط مختلف آب باشند.

زایشی، میوه‌های گیاهان تیمار شده با رژیم‌های مختلف آبیاری دارای درصد‌های رطوبتی متفاوتی بودند. میزان رطوبت میوه تیمارهایی که ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی را در مرحله زایشی دریافت کرده بودند به ترتیب تقریباً برابر با ۹۴، ۹۳ و ۹۱ درصد بود. این نتایج با یافته‌های کاسکو و همکاران (Kuşçu et al., 2014) منطبق بود به گونه‌ای که آنها گزارش کردند که اعمال آبیاری تنها در مرحله رویشی رطوبت میوه را کاهش داد. به علت متفاوت بودن درصد محتوای رطوبت میوه در تیمارها، اختلاف معنی‌داری در عملکرد خشک میوه بین برخی از تیمارها وجود نداشت، در صورتی که همان تیمارها (به عنوان مثال بین تیمار ۷۵-۷ V-100R و ۷۵-۷ V) در عملکرد تر میوه داری اختلاف معنی‌دار بودند. اثر تنش آبی در مراحل مختلف رشد بر شاخص برداشت (HI) معنی‌دار نبود (جدول ۶). به طور کلی، رشد گوجه‌فرنگی به روشنی تحت تأثیر میزان آب آبیاری در مراحل مختلف رشد در هر دو سال آزمایش قرار گرفت. همانطور که انتظار می‌رفت، میزان آب کم‌تر بر رشد گوجه‌فرنگی تأثیر منفی داشت. این نتیجه با یافته‌های محققین دیگر منطبق بود (Agbna et al., 2017; Shao et al., 2014; Patané et al., 2011a; Topcu et al., 2007). با این حال در این آزمایش تنش شدید آب در مرحله گلدهی حتی زمانی که شاخص سطح برگ در شرایط مناسبی قرار داشت، باعث خشک‌شدن و ریزش گل‌ها شد که متعاقباً باعث کاهش عملکرد در گوجه‌فرنگی شد. نتایج نشان داد به منظور افزایش تولید در گوجه‌فرنگی، زمان آبیاری از مقدار آن با اهمیت‌تر می‌باشد.

### منابع

- Adeboye, O.B., Schultz, B., Adekalu, K.O., Prasad, K., 2016. Impact of water stress on radiation interception and radiation use efficiency of Soybeans (*Glycine max* L. Merr.) in Nigeria. *Brazilian Journal of Science and Technology*. 3, 15.
- Agbna, G.H.D., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N.A., Guangcheng, S., Timm, L.C., 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*. 222, 90-101.
- Alou, I.N., Steyn, J.M., Annandale, J.G., van der Laan, M., 2018. Growth, phenological, and yield response of upland rice (*Oryza sativa* L. cv. Nerica 4®) to water stress during different growth stages. *Agricultural Water Management*. 198, 39-52.
- Archontoulis, S.V., Vos, J., Yin, X., Bastiaans, L., Danalatos, N.G., Struik, P.C. 2011. Temporal dynamics of light and nitrogen vertical distributions in canopies of sunflower,



- kenaf and cynara. *Field Crops Research*. 122, 186-198.
- Barrios-Masias, F.H., Jackson, L.E. 2016. Increasing the effective use of water in processing tomatoes through alternate furrow irrigation without a yield decrease. *Agricultural Water Management*. 177, 107-117.
- Branthome, X., Plé, Y., 1987. Irrigation for mechanized harvest of processing tomatoes. pp. 165-172. *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, Leuven, Belgium.
- Canci, H., Toker, C., 2009. Evaluation of yield Criteria for drought and heat resistance in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 195, 47-54.
- Ceotto, E., Castelli, F., 2002. Radiation-use efficiency in flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.): response to nitrogen supply, climatic variability and sink limitations. *Field Crops Research*. 74, 117-130.
- Cetin, O., Uygan, D., 2008. The effect of drip line spacing, irrigation regimes and planting geometries of tomato on yield, irrigation water use efficiency and net return. *Agricultural Water Management*. 95, 949-958.
- Chowdhury, S., Al-Zahrani, M., Abbas, A., 2016. Implications of climate change on crop water requirements in arid region: An example of Al-Jouf, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 28, 21-31.
- Comas, L.H., Trout, T.J., DeJonge, K.C., Zhang, H., Gleason, S.M., 2019. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. *Agricultural Water Management*. 212, 433-440.
- De Pascale, S., Maggio, A., Orsini, F., Stanghellini, C., Heuvelink, E., 2015. Growth response and radiation use efficiency in tomato exposed to short-term and long-term salinized soils. *Scientia Horticulturae*. 189, 139-149.
- Doorenbos, J., Kassam, A., 1979. Yield response to water. *Irrigation and drainage paper*. 33, 257.
- Durigon, A., Evers, J., Metselaar, K., de Jong van Lier, Q., 2019. Water stress permanently alters shoot architecture in common bean plants. *Agronomy*. 9(3), 160.
- English, M., Raja, S.N., 1996. Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 32, 1-14.
- FAO STAT, 2018. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. 20/01/2019.
- Farrokhi, E., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Khademi, R., 2018. The effect of manure, chemical and biological fertilizers on Aloe vera growth in Boushehr province. *Journal of Agroecology*. 10, 1-21. [In Persian with English Summary].
- Favati, F., Lovelli, S., Galgano, F., Miccolis, V., Di Tommaso, T., Candido, V., 2009. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae*. 122, 562-571.
- Gatta, G.M., Giuliani, M., Monteleone, M., Nardella, E., De Caro, A., 2007. Deficit irrigation scheduling in processing tomato. In: Bogliotti, C., Lamaddalena, N., Scardigno, A., Todorovic, M. (eds.), *Water Saving in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs*. Vol. 1. Bari: CIHEAM. pp. 277-289
- Gifford, R.M., Thorne, J.H., Hitz, W.D., Giaquinta, R.T., 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science*. 225:801.
- Guida, G., Sellami, M.H., Mistretta, C., Oliva, M., Buonomo, R., De Mascellis, R., Patanè, C., Roupheal, Y., Albrizio, R., Giorio, P., 2017. Agronomical, physiological and fruit quality responses of two Italian long-storage tomato landraces under rain-fed and full irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 180, 126-135.
- Harb, A., Krishnan, A., Ambavaram, M.M.R., Pereira, A., 2010. Molecular and physiological analysis of drought stress in arabidopsis reveals early responses leading to acclimation in plant growth. *Plant Physiology*. 154, 1254.
- Harmanto, V., Salokhe, M., Babel, M.S., Tantau, H.J., 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management*. 71, 225-242.
- Heuvelink, E., 2018. *Tomatoes*. 2nd edition. Boston, MA: CABI.
- Heuvelink, E., Bakker, M.J., Elings, A., Kaarsemaker, R.C., Marcelis, L.F.M., 2005. Effect of leaf area on tomato yield. pp. 43-50. *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, Leuven, Belgium.
- Higashide, T., 2018. Review of dry matter production and light interception by plants for

- yield improvement of greenhouse tomatoes in Japan. *Horticultural Research (Japan)*. 17, 133-146.
- Higashide, T., Heuvelink, E., 2009. Physiological and morphological changes over the past 50 years in yield components in tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 134, 460-465.
- Hirose, T., Werger, M.J.A., 1987. Maximizing daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy. *Oecologia*. 72, 520-526.
- Imtiyaz, M., Mgdla, N.P., Manase, S.K., Chendo, K., Mothobi, E.O., 2000. Yield and economic return of vegetable crops under variable irrigation. *Irrigation Science*. 19, 87-93.
- Ismail, S.M., Ozawa, K., Khondaker, N.A., 2008. Influence of single and multiple water application timings on yield and water use efficiency in tomato (var. First power). *Agricultural Water Management*. 95, 116-122.
- Jeuffroy, M.H., Ney, B., 1997. Crop physiology and productivity. *Field Crops Research*. 53, 3-16.
- Jones, H.G., 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press.
- Kawy, W.A.A., El-Magd, I.H.A., 2013. Assessing crop water requirements on the bases of land suitability of the soils South El Farafra Oasis, Western Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 6, 2313-2328.
- Kim, H.S., Palmroth, S., Thérézien, M., Stenberg, P., Oren, R., Niinemets, Ü., 2011. Analysis of the sensitivity of absorbed light and incident light profile to various canopy architecture and stand conditions. *Tree Physiology*. 31, 30-47.
- Kuscu, H., Turhan, A., Demir, A.O., 2014. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment. *Agricultural Water Management*. 133, 92-103.
- Lahoz, I., Pérez-de-Castro, A., Valcarcel, M., Macua, J.I., Beltrán, J., Roselló, S., Cebolla-Cornejo, J., 2016. Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato. *Scientia Horticulturae*. 200, 55-65.
- Lantinga, E.A., Nassiri, M., Kropff, M.J., 1999. Modelling and measuring vertical light absorption within grass-clover mixtures. *Agricultural and Forest Meteorology*. 96, 71-83.
- Litvin, A.G., Iersel, M.W.V., Malladi, A., 2016. Drought stress reduces stem elongation and alters gibberellin-related gene expression during vegetative growth of tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 141(6), 591-597.
- Mahajan, G., Singh, K.G. 2006. Response of Greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management*. 84, 202-206.
- Manavalan, L.P., Guttikonda, S.K., Phan Tran, L.S., Nguyen, H.T., 2009. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology*. 50, 1260-1276.
- Monsi, M., Saeki, T., 2005. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals of Botany*. 95, 549-567.
- Monteith, J.L., Moss, C.J., Cooke, G.W., Pirie, N.W., Bell, G.D.H., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*. 281, 277-294.
- Nassiri Mahallati, M., 2000. *Modelling of Crops Growth Processes*. Jahad Daneshgahi, Mashhad, Iran. [In Persian].
- Ngouajio, M., Wang, G., Goldy, R., 2007. Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch. *Agricultural Water Management*. 87, 285-291.
- Ngugi, K., Collins, J.O., Muchira, S., 2013. Combining, earliness, short anthesis to silking interval and yield based selection indices under intermittent water stress to select for drought tolerant maize. *Australian Journal of Crop Science*. 7, 2014-2020.
- Patane, C., Cosentino, S.L., 2010. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*. 97, 131-138.
- Patane, C., Cosentino, S.L., 2013. Yield, water use and radiation use efficiencies of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) under reduced water

- and nitrogen soil availability in a semi-arid Mediterranean area. *European Journal of Agronomy*. 46, 53-62.
- Patane, C., La Rosa, S., Tringali, S., Scandurra, S., 2011a. Radiation use and irrigation water use efficiency in processing tomato at two plant densities under deficit irrigation in a mediterranean climate. Pages 169-175. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium.
- Patane, C., Tringali, S., Sortino, O., 2011b. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*. 129, 590-596.
- Pourmohamad, Y., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., Gebremichael, M., Ziaei, A.N., Bannayan, M., 2019. Optimizing cropping area by proposing a combined water-energy productivity function for Neyshabur Basin, Iran. *Agricultural Water Management*. 217, 131-140.
- Renquist, A.R., Reid, J.B., 2001. Processing tomato fruit quality: influence of soil water deficits at flowering and ripening. *Australian Journal of Agricultural Research*. 52, 793-867.
- Ronga, D., Zaccardelli, M., Lovelli, S., Perrone, D., Francia, E., Milc, J., Ulrici, A., Pecchioni, N., 2017. Biomass production and dry matter partitioning of processing tomato under organic vs conventional cropping systems in a Mediterranean environment. *Scientia Horticulturae*. 224, 163-170.
- Saeki, T., 1960. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Shokubutsugaku Zasshi*. 73, 55-63.
- Saha, S., Sehgal, V.K., Nagarajan, S., Pal, M., 2012. Impact of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on radiation utilization and related plant biophysical properties in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*. 158-159, 63-70.
- Sarlikioti, V., de Visser, P.H.B., Buck-Sorlin, G.H., Marcelis, L.F.M., 2011. How plant architecture affects light absorption and photosynthesis in tomato: towards an ideotype for plant architecture using a functional-structural plant model. *Annals of Botany*. 108, 1065-1073.
- Shao, G.C., Wang, M.H., Liu, N., Yuan, M., Kumar, P., She, D.L., 2014. Growth and comprehensive quality index of tomato under rain shelters in response to different irrigation and drainage treatments. *The ScientificWorld Journal*. Article ID 457937.
- Surendran, U., Sushanth, C.M., Mammen, G., Joseph, E.J. 2015. Modelling the crop water requirement using FAO-CROPWAT and assessment of water resources for sustainable water resource management: A case study in Palakkad District of humid tropical Kerala, India. *Aquatic Procedia*. 4, 1211-1219.
- Tabarzd, A., Ghaemi, A.A., Zand-Parsa, S., 2016. Extinction coefficients and radiation use efficiency of barley under different irrigation regimes and sowing dates. *Agricultural Water Management*. 178, 126-136.
- Topcu, S., Kirda, C., Dasgan, Y., Kaman, H., Cetin, M., Yazici, A., Bacon, M.A. 2007. Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*. 26, 64-70.
- Turner, N.C., Wright, G.C., Siddique, K.H.M., 2001. Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy*. 71, 193-231
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*. 18, 201-234.
- Wang, F., Kang, S., Du, T., Li, F., Qiu, R., 2011. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. *Agricultural Water Management*. 98, 1228-1238.
- Wilson, D.R., Jamieson, P.D., 1985. Models of Growth and Water use of Wheat in New Zealand. In: Day, W., Atkin, R.K. (eds.) *Wheat Growth and Modelling*. Springer US, Boston, MA. pp. 211-216.
- Xianshi, G., Sinclair, T.R., Ray, J.D., 1998. Effect of drought history on recovery of transpiration, photosynthesis, and leaf area development in maize. *Soil & Crop Science Society of Florida Proceedings*. 57, 83-87.
- Yıldırım, M., Bahar, E., 2017. Water and radiation use-efficiencies of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) at three different planting densities in open field. *Mediterranean Agricultural Sciences*. 30, 39-45.

- Yuan, B.Z., Kang, Y., Nishiyama, S., 2001. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouses. *Irrigation Science*. 20, 149-154.
- Zarea, M. J., Ghalavand, A., Daneshian, J. 2005. Effect of planting patterns of sunflower on yield and extinction coefficient. *Agronomy for Sustainable Development*. 25(4), 513-518
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., Clothier, B.E. 2006. Responses of 'Petopride' processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. *Irrigation Science*. 25, 85-85.
- Zhang, L., Hu, Z., Fan, J., Zhou, D., Tang, F., 2014. A meta-analysis of the canopy light extinction coefficient in terrestrial ecosystems. *Frontiers of Earth Science*. 8, 599-609.