

## مقایسه عملکرد فتوسیستم II در چهار رقم پایه‌ای پسته اهلی با استفاده از تکنیک فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی

فاروق فهیمی خویردی و محمد حسین شمشیری\*

گروه علوم باگبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج)

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۷/۱۱)

### چکیده:

در آزمایشی با هدف مقایسه میزان مقاومت به تنش خشکی، ارزیابی کارکرد فتوسیستم II با استفاده از پارامترهای فلورسانس کلروفیل و محتوای PEG کلروفیل چهار رقم پایه‌ای پسته (*Pistacia vera* L.) در قالب طرح کاملاً تصادفی و بصورت فاکتوریل با تیمار خشکی (پلی‌اتیلن گیکول) اضافه شده به محلول کامل هوگلندر در چهار سطح (صفر، ۰-۵ و ۱-۲-۲-۵ مگاپاسکال) و چهار پایه پسته «بادام‌ریز، قزوینی، سرخ و ابارقی» در شرایط گلخانه انجام شد. بعد از گذشت سه ماه از شروع تنش خشکی، با استفاده از دستگاه فلورومتر، فلورسانس کلروفیل و متغیرهای وابسته (RC / ABS و  $F_v/F_0$ , PI,  $V_J$ , Area,  $F_v/F_m$ ,  $F_m$ ,  $F_v$ ,  $F_0$ ) محاسبه گردید. محتوای کلروفیل  $a$ ,  $b$ ، کل و وزن خشک نیز در پایان آزمایش اندازه-گیری شدند. نتایج نشان داد که پارامترهای فلورسانس کلروفیل تحت تاثیر خشکی قرار گرفتند. پارامترهای  $F_v/F_m$ ,  $F_m$ ,  $F_v$  و PI با افزایش سطوح خشکی کاهش یافتدند. پارامتر PI که بیانگر عملکرد دستگاه فتوستتری است، در یالاترین سطح خشکی حدود ۹۰ درصد کاهش یافت. همچنین این پارامتر بیشترین همبستگی ( $R^2 = 61$ ) را با وزن خشک داشت، بنابراین می‌تواند به عنوان یک پارامتر موثر در شناسایی پایه‌های حساس و مقاوم به خشکی استفاده گردد. همچنین نتایج بیانگر همبستگی مناسبی بین کاهش محتوای کلروفیل با کاهش پارامترهای فلورسانس کلروفیل و کاهش وزن خشک کل در سطوح خشکی بود. به طور کلی، رقم سرخ و بادامی ریز با ظرفیت فتوستتری بالاتر و کاهش کمتر وزن خشک کل در شرایط خشکی، نسبت به شرایط تنش مقاوم‌تر و رقم ابارقی با ظرفیت فتوستتری پایین‌تر و کاهش بیشتر وزن خشک، نسبت به شرایط تنش حساس‌تر ارزیابی گردید.

کلمات کلیدی: پسته، پلی‌اتیلن گلایکول، تنش خشکی، فلورسانس کلروفیل.

### مقدمه:

مرکز تولید این محصول در جهان، ایران و استان کرمان محسوب می‌شود به طوری‌که سهم این شهرستان از سطح زیرکشت بارور این محصول در جهان، ایران و استان کرمان به ترتیب ۲۴ و ۳۶ و ۶۰ درصد می‌باشد (میرزاپی خلیل‌آبادی و چیذری، ۱۳۸۳). یکی از مشکلات اصلی باغات پسته در منطقه رفسنجان در حال حاضر کاهش شدید منابع آبی ناشی از خشکسالی سالیان اخیر است که به شکل قابل توجهی از تولید

پسته اهلی (*Pistacia vera* L.) درختی است از خانواده پسته سانان و تنها گونه در جنس پسته است که دارای خشک میوه خندان بوده واز نظر باگبانی دارای اهمیت تجاری است (Kafkas *et al.*, 2001) شهرستان رفسنجان در جنوب شرقی ایران با ارتفاع ۱۵۱۰ متر از سطح دریا و آب و هوای گرم و خشک با سطح زیر کشتی بالغ بر ۱۱۰ هزار هکتار عمدۀ ترین

اشباع نوری بوده و مراکز واکنش کاملاً باز باشند، بخش زیادی از انرژی نورانی در فعالیت‌های فتوشیمیابی به مصرف می‌رسد و در نهایت تنها بخش کمی از آن به صورت فلورسانس بازتاب می‌یابد که به آن فلورسانس کمینه ( $F_0$ ) می‌گویند، در مقابل هنگامی که تابش نور اشباع ادامه می‌یابد تمامی ملکول‌های اولین دریافت کننده الکترون یا انرژی یعنی کوئینون آ ( $Q_A$ ) دست کم به صورت وقت به صورت احیا درآمده و به دلیل تداوم واکنش‌های فتوشیمیابی فتوسیستم II، مراکز واکنش بسته شده و فلورسانس به میزان زیادی افزایش می‌یابد که به آن فلورسانس بیشینه ( $F_m$ ) اطلاق می‌شود (Maxwell and Johanson, 2000). افزایش میزان فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی روی گیاهان زیادی از جمله توت فرنگی، کاهو و زیتون گزارش شده است (Razavi *et al.*, 2008)؛ (Petridis *et al.*, 2012)؛ (Hussain and Reigosa, 2011) تفاوت ژنتیپ‌های حساس و مقاوم از نظر  $F_v/F_m$  در تنش شدید پدیدار می‌شود و ژنتیپ‌های با نسبت بالای  $F_v/F_m$  در شرایط تنش شدید، کارآبی فتوسیستزی بالاتری دارند (Sayed, 2003). پارامترهای مربوط به فلورسانس کلروفیل از سه بخش تشکیل شده است که عبارتند از پارامترهای مربوط به جذب نور (ABS)، به دام انداختن انرژی برانگیخته (TR) و انتقال انرژی برانگیخته به زنجیره انتقال الکترون (ET) از طریق مرکز واکنش (RC). به دلیل تغییر رفتار فتوسیستم II در شرایط تنش‌های محیطی می‌توان با استفاده از آزمون O-J-I-P میکروپلزیکی این فتوسیستم را تحت شرایط تنش‌های محیطی مختلف تجزیه و تحلیل کرد (Strasser *et al.*, 2004).

مولکول‌های کلروفیل نوع a و b، در کنار کارتینوئیدها (کارتن‌ها و گزانتوفیل‌ها) مهمترین رنگیزه‌های جذب کننده نور در گیاهان عالی هستند (Scheer, 2004) و حضور آنها برای تبدیل انرژی نورانی به انرژی شیمیابی ذخیره شده در ناقل‌های الکترون ضروری است (Taiz and Zeiger, 2002). گزارش شده که تنش خشکی در گیاهان باعث پیری زودرس، شکسته شدن کلروپلاست‌ها و تجزیه کلروفیل در اثر افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز می‌گردد (Sheng *et al.*, 2008).

ضمون آنکه شدت نور در این مخصوص کاسته است. یکی از راهکارهای پیش رو در مقابل این پدیده، شناسایی و استفاده از پایه‌های مقاوم‌تر نسبت به خشکی می‌باشد.

یکی از بارزترین پاسخ‌های گیاهان به تنش‌های محیطی، کم شدن فتوسیستز ناشی از اختلال در فعالیت فتوسیستم II می‌باشد (Anderws *et al.*, 1995) تبادلات گازی تحت تاثیر تنش‌های محیطی، ادامه جذب انرژی نورانی منجر به اختلال در زنجیره انتقال الکترون و در پی آن، بسته شدن مراکز واکنش و کاهش عملکرد کوأنتومی فتوسیستم II می‌گردد (Maxwell and Johnson, 2000). در زمان بروز تنش خشکی نیز در فرآیند مشابه، روزنه‌های گیاه بسته شده و در نتیجه انتشار دی‌اکسید کربن از اتمسفر به محل انجام کربوکسیلاسیون کاهش می‌یابد که منجر به کاهش Fv/Fm می‌گردد (Montanaro *et al.*, 2007) (Cornic, 2009).

بخش عمده‌ای از انرژی نورانی خورشید که به وسیله برگ دریافت می‌شود صرف فرآیندهای بیوشیمیابی می‌گردد، اما ممکن است بخش کوچکی از نور دریافت شده به صورت گرما تلف شده یا توسط ملکول‌های کلروفیل مستقر در مراکز واکنش با طول موج بلندتری (۶۸۰-۷۴۰ نانومتر) بازتابش نماید که به این پدیده فلورسانس کلروفیل گفته می‌شود (سلطانی، ۱۳۸۳). فلورسانس کلروفیل منحصرًا در فتوسیستم II اتفاق می‌افتد (Strasser *et al.*, 2000)، از این رو تجزیه و تحلیل تغییرات آن می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی در مورد ساختار و عملکرد فتوسیستم II ارائه کند. (Oukarroum *et al.*, 2007). همچنین از فلورسانس کلروفیل برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و میزان آسیب واردہ به دستگاه فتوسیستزی در شرائط تنش‌های محیطی استفاده می‌گردد (Hakam *et al.*, 2000) Percival and Henderson, 2003).

تشخیص خشکی و شوری موجب افزایش فلورسانس متغیر ( $F_v$ )، فلورسانس حداکثر ( $F_m$ )، فلورسانس اولیه ( $F_0$ ) و کاهش حداکثر کارآبی کوأنتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m$ ) می‌گردد (Zhao *et al.*, 2007).

و بصورت فاکتوریل با دو فاکتور خشکی در چهار سطح (صفر،  $-0/5$ ،  $-1$  و  $-2$  مگاپاسکال) و رقم در چهار سطح (بادامی، قزوینی، سرخس و ابارقی) در چهار تکرار انجام شد.

**اندازه‌گیری پارامترهای فلورسانس کلروفیل: متغیرهای فلورسانس (OJIP) توسط یک دستگاه فلورومتر (Pocket PEA, Hansatech LTD, UK) اندازه‌گیری گردید. در پایان آزمایش، برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل بین ساعت ۱۱ تا ۱۳، ابتدا با اتصال گیره‌های مخصوص دستگاه روی برگ‌های کاملاً توسعه یافته هر یک از ارقام، ۳۰ دقیقه تاریکی ایجاد شد. بعد از این زمان با اتصال رابط دستگاه فلورومتر به هر یک از این گیره‌ها اندازه‌گیری‌ها صورت گرفت. تغییرات فلورسانس کلروفیل در برگ سازگار شده با تاریکی و پس از قرارگرفتن در معرض نور،تابع منحنی کائوتیکی می‌باشد (شکل ۱). زمانی که برگ‌های گیاه در تاریکی قرار می‌گیرند، تمام مراکز واکنش (RC) کاملاً باز شده و کینون‌ها در حالت اکسید شده قرار می‌گیرند. با تابش نور ضعیفی در طیف قرمز (630 nm) توسط دستگاه فلورومتر، تنها بخش کوچکی از انرژی نورانی بصورت تابشی ساطع شده و فلورسانس کمینه (F0) بدست می‌آید. با تابش پالس‌های اشباع نوری (3500 s<sup>-1</sup>) به سطح برگ، تمامی مراکز واکنش بسته شده و کینون‌ها احیاء می‌شوند، در نتیجه یک افزایش چند مرحله‌ای در میزان فلورسانس کلروفیل اتفاق می‌افتد که به بیشینه فلورسانس (Fm) ختم می‌شود (Misra *et al.*, 2012). در پژوهش حاضر بین پارامترهای فلورسانس کلروفیل نه پارامتر تحت شرایط تنش اندازه‌گیری شد (جدول ۱).**

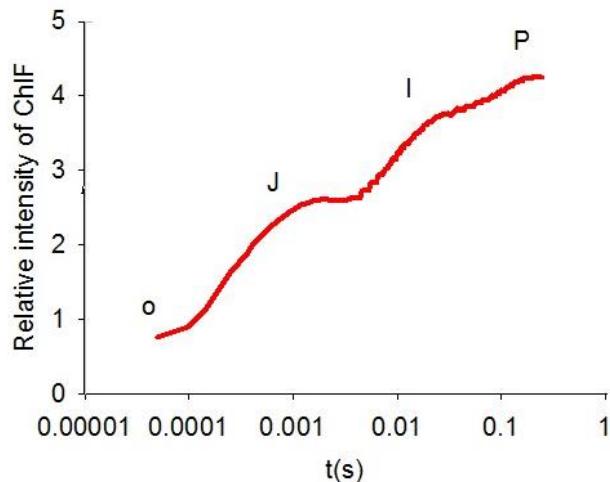
**محتوای کلروفیل برگ:** میزان کلروفیل *a*, *b* و کلروفیل کل در پایان آزمایش با استفاده از روش طیف سنجی اندازه‌گیری گردید (Lichtenthaler, 1987). بدین منظور، ابتدا  $0/25$  گرم از نمونه برگ تازه در هاون چینی سرد با  $10$  میلی‌لیتر استون  $80$  درصد ساییده شد تا به صورت محلول یکنواختی درآید، سپس نمونه‌ها به سانتریفیوژ منتقل و به مدت  $10$  دقیقه با سرعت  $3500$  دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید، پس از جداسازی فاز مایع از جامد، قسمت مایع برای قرائت میزان

کاهش میزان کلروفیل برگ در اثر تنش خشکی، باعث کاهش کارآیی فتوسنتز می‌شود و گیاهانی که در شرایط تنش میزان کلروفیل خود را در سطح بالایی حفظ می‌کنند کارآیی فتوسنتزی بالاتری دارند (Penuelas and Filella, 1998).

هدف این پژوهش، ارزیابی و مقایسه چهار رقم پایه ای پسته در شرایط تنش خشکی با مطالعه کارکرد فتوسیستم II و با استفاده از تغییرات فلورسانس کلروفیل و محتوای کلروفیل آنها بود.

## مواد و روش‌ها:

این تحقیق در سال ۱۳۹۲ در گلخانه و آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان روی چهار رقم پسته پایه‌ای اهلی به نام‌های بادامی ریز زرنده، قزوینی، سرخس و ابارقی صورت گرفت. در این پژوهش بذر رقم بادامی ریز زرنده، قزوینی و سرخس از موسسه تحقیقات پسته ایران واقع در شهرستان رفسنجان و رقم ابارقی از شهرستان ابارق واقع در جنوب استان کرمان تهیه شدند. پس از انتخاب و جداسازی بذرهای سالم و حذف پوسته استخوانی، بذرها را به مدت  $15$  دقیقه در محلول  $2/5$  در هزار قارچ کش بنومیل همراه با هیپوکلریت سدیم  $5$  درصد به منظور ضداغفونی خیسانده و سپس با آب مقطر شستشو شدند. پس از شستشو با آب مقطر بذرها در پارچه مرطوب و محل تاریک در دمای  $25$  درجه سلسیوس به مدت یک هفته نگهداری شدند تا جوانه بزنند. تعداد  $3$  عدد بذر جوانه‌دار شده از هر رقم در گلدان‌های پنج لیتری حاوی پرلاتیت کشت شدند. بعد از منتقل کردن گلدان‌ها به گلخانه با متوسط دمای  $27/6$  درجه سلسیوس، رطوبت نسبی  $30$  درصد و شدت نور میانه روز  $50\pm10$  کیلوولوكس به مدت چهل روز با محلول غذایی کامل هوگلن德 تغذیه شدند. تیمارهای خشکی با اضافه کردن پلی‌اتیلن گلایکول (PEG)  $6000$  به محلول کامل هوگلنده بر اساس فرمول Michel (Kaufmann ۱۹۷۳) تهیه گردید. چهار سطح خشکی صفر،  $-0/5$  و  $-2$  مگاپاسکال (پلی‌اتیلن گلایکول اضافه شده به محلول هوگلنده) پس از گذشت چهل روز از رشد گیاه به مدت سه ماه اعمال شد. آزمایش حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی



شکل ۱- منحنی کائوتسکی و تغییرات فلورسانس در یک برگ سبز و سالم (Misra *et al.*, 2012).  
O: فلورسانس کمینه، J: فلورسانس پس از ۲ میلی ثانیه، I: فلورسانس پس از ۲۰-۳۰ میلی ثانیه، P: فلورسانس بیشینه

جدول ۱- تعریف برخی پارامترهای فلورسانس کلروفیل اندازه گیری شده در پژوهش حاضر.

$F_0$	فلورسانس کمینه پس از گذشت ۵۰ میکرو ثانیه
$F_m$	فلورسانس بیشینه
$F_v = (F_m - F_0)$	فلورسانس متغیر
$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$	حداکثر کارآیی فتوستزی فتوسیستم II
Area	سطح بالای منحنی فلورسانس کلروفیل بین $F_0$ و $F_m$
RC/ABS	تراکم مراکز واکنش به ازاء انرژی نوری جذب شده
$F_v/F_0$	کارآیی کمپلکس تجزیه آب در سمت دهنده الکترون در فتوسیستم II
$V_J = (F_J - F_0)/(F_m - F_0)$	فلورسانس متغیر نسبی در مرحله J
$PI = \left( \frac{RC}{ABC} \right) \left[ \left( \frac{TR0}{ABC} \right) / \left( \frac{F0}{Fm} \right) \right] \left[ \left( \frac{ET0}{RT0} \right) / \left( VJ \right) \right]$	شاخص کارآیی فتوستز

وزن خشک گیاه: برای اندازه گیری وزن خشک گیاه (TDW)، نمونه های شاخشاره و ریشه به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت و سپس وزن گردیدند.  
تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه آماری آداده ها و ضرایب همبستگی با استفاده از نرم افزار SAS و مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون LSD در سطح ۱ و ۵ درصد صورت گرفت و برای محاسبه پارامترهای فلورسانس کلروفیل از نرم افزار PEA Plus استفاده گردید.

#### نتایج:

پارامترهای فلورسانس کلروفیل: نتایج حاصل از تجزیه

جذب استفاده شد. میزان جذب نور محلول با استفاده از دستگاه اسپکترو فتو متر (PG Instruments, T80 UV/VIS, UK) در طول موج های ۶۶۳/۲، ۶۴۷/۸ و ۴۷۰ نانومتر قرائت و غلظت رنگیزه ها براساس معادلات زیر محاسبه گردید (Lichtenthaler, 1987):

$$Chla (\text{mg.g}^{-1} \text{dw}) = \{12.25 (A663.2) - 2.79 (A646.8)\} \times V/1000 \times W$$

$$Chl b (\text{mg.g}^{-1} \text{dw}) = \{12.21 (A646.8) - 5.10 (A663.2)\} \times V/1000 \times W$$

$$Ch T (\text{mg.g}^{-1} \text{dw}) = Chl b + Chl a$$

A، میزان جذب نور. V، حجم نهایی محلول. W، وزن

نمونه مورد استفاده. Chl a: کلروفیل a. Chl b: کلروفیل b و

ChT: مجموع کلروفیل.

جدول ۲- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس پارامترهای فلورسانس کلروفیل در چهار رقم پسته

F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	F <sub>v</sub>	F <sub>m</sub>	F <sub>0</sub>	درجه آزادی
/۰۰۲**	۲۰۰۰۷۰۱۴/۱**	۱۳۶۹۴۹۱۲/۰۸*	۲۰۰۴۵۴۷/۲**	۳ رقم
۰/۱**	۶۳۶۷۶۲۷۳/۲**	۲۴۴۳۱۶۶۴/۳۸**	۹۵۵۵۸۳۳/۱۳**	۳ خشکی
۰/۰۰۳ns	۳۹۳۸۴۱۷ns	۴۵۴۳۰۴۷/۲۵ns	۶۴۱۸۲۹/۷۳ns	۹ خشکی × رقم
۰/۰۰۱	۲۷۸۶۷۴۵/۸	۴۲۵۷۹۵۲	۴۲۸۶۳۴/۱۵	۳۰ خطأ
۷/۷	۱۵/۵۴	۱۲/۹۴	۱۲/۵۷	- ضریب تغییرات

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

جدول ۳- اثر سطوح مختلف خشکی و رقم بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل دانهالهای پسته

F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	F <sub>v</sub>	F <sub>m</sub>	F <sub>0</sub>	تیمار
خشکی (MPa)				
۰/۷۶ <sup>a</sup>	۱۳۴۶۳/۵۴ <sup>a</sup>	۱۷۵۱۵/۸۳ <sup>a</sup>	۴۰۵۲/۲۹ <sup>d</sup>	۰.۰
۰/۶۹ <sup>b</sup>	۱۱۳۸۴/۰۸ <sup>b</sup>	۱۶۳۱۸/۶ <sup>a</sup>	۴۹۳۴/۵۲ <sup>c</sup>	-۰/۵
۰/۶۳ <sup>c</sup>	۱۰۰۶۷/۲۳ <sup>b</sup>	۱۵۶۸۶/۰۸ <sup>b</sup>	۵۶۱۸/۷۵ <sup>b</sup>	-۱.۰
۰/۵۲ <sup>d</sup>	۷۴۹۲/۳۷ <sup>c</sup>	۱۳۷۹۲/۱۲ <sup>c</sup>	۶۲۹۹/۷۵ <sup>a</sup>	-۲.۰
رقم				
۰/۶۲ <sup>b</sup>	۹۹۲۹/۷۹ <sup>b</sup>	۱۵۷۲۱/۲۲ <sup>b</sup>	۵۷۹۱/۴۳ <sup>a</sup>	ابارقی
۰/۶۴ <sup>b</sup>	۹۹۶۴/۸۳ <sup>b</sup>	۱۴۹۹۷/۷۵ <sup>c</sup>	۵۰۳۲/۹۱ <sup>b</sup>	بادامی ریز زرند
۰/۶۳ <sup>b</sup>	۹۸۷۰/۹۱ <sup>b</sup>	۱۵۱۵۰/۶۶ <sup>c</sup>	۵۲۷۹/۷۵ <sup>a</sup>	قزوینی
۰/۷۲ <sup>a</sup>	۱۲۶۴۱/۱۷۹ <sup>a</sup>	۱۷۴۴۳ <sup>a</sup>	۴۸۰۱/۲ <sup>b</sup>	سرخس

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی داری با یکدیگر نیستند.

(جدول ۲). در سطح خشکی صفر و -۰/۵- مگاپاسکال بیشترین F<sub>m</sub> مشاهده شد و بین این دو سطح از خشکی تفاوت معنی داری مشاهده نگردید. با افزایش سطح خشکی پارامتر F<sub>m</sub> کاهش یافت به طوری که در بالاترین سطح از تنش ۲-۲ مگاپاسکال پارامتر F<sub>m</sub> نسبت به تیمار شاهد ۲۱ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین مقدار پارامتر F<sub>m</sub> متعلق به رقم سرخس بود که به ترتیب ۱۳.۲، ۱۳.۱، ۱۴.۱ و ۹.۹ درصد بیشتر از ارقام قزوینی، بادامی ریز و ابارقی بود. بین رقم بادامی ریز و قزوینی اختلاف معنی داری از لحاظ این صفت مشاهده نگردید. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به پارامتر F<sub>v</sub> (جدول ۲) نشان داد که

واریانس (جدول ۲) نشان داد که تنش خشکی و رقم روی پارامتر F<sub>0</sub> اثرات معنی داری داشتند ولی این پارامتر تحت تاثیر اثرات متقابل آنها قرار نگرفت. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) نشان داد که با افزایش سطح خشکی، پارامتر F<sub>0</sub> افزایش یافت. کمترین مقدار F<sub>0</sub> متعلق به تیمار شاهد (صفر مگاپاسکال) بود و در تیمار خشکی -۲- مگاپاسکال حدود ۵۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش نشان داد. در بین ارقام مورد بررسی رقم ابارقی و قزوینی بیشترین مقدار F<sub>0</sub> را داشتند به طوری که اختلاف آن با رقم بادامی و سرخس معنی دار بود. پارامتر F<sub>m</sub> تحت تاثیر تنش خشکی و رقم قرار گرفت ولی برهمکنش خشکی و رقم تاثیری روی این پارامتر نداشت

دار شد ولی اثر متقابل خشکی و رقم تاثیر معنی‌داری روی این پارامتر نداشت. همان‌طور که جدول ۵ نشان می‌دهد مقدار پارامتر RC/ABS با افزایش سطوح خشکی کاهش یافت به‌طوری که در تیمار شاهد بیشترین مقدار پارامتر RC/ABS مشاهده شد و در سطح خشکی ۲-۲ مگاپاسکال،  $9/5$  درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. نتایج حاصل از مقایسه میانگین ارقام پسته (جدول ۵) نشان داد که رقم سرخس نسبت به سایر ارقام بیشترین پارامتر RC/ABS را کسب نمود و اختلاف آن از لحاظ آماری با سایر ارقام معنی‌دار بود. پارامتر RC/ABS در رقم قزوینی و ابارقی ۳۴ درصد نسبت به رقم سرخس و ۱۲ درصد نسبت به رقم بادامی‌ریز کاهش نشان داد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر رقم، خشکی و برهمنکش خشکی و رقم در ارتباط با پارامتر  $F_7/F_0$  در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد در سطح خشکی صفر مگاپاسکال رقم بادامی و سرخس نسبت به رقم ابارقی و قزوینی بیشترین مقدار پارامتر  $F_7/F_0$  را کسب نمودند. با افزایش سطح خشکی از مقدار این پارامتر کاسته شد و در بالاترین سطح خشکی در بین ارقام مورد بررسی، این پارامتر در رقم سرخس حدود ۴۶ درصد بیشتر از سایر ارقام بود و رقم ابارقی دارای کمترین مقدار و بین رقم‌های بادامی و قزوینی در این سطح از خشکی از لحاظ پارامتر  $F_7/F_0$  تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

نتایج نشان داد که پارامتر  $V_7$  با افزایش سطوح خشکی از یک روند کاهشی برخوردار بود، به‌طوری که در سطح خشکی ۱-۲-۲ مگاپاسکال به ترتیب با ۲۲ و ۳۵ درصد، کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). با توجه به اطلاعات بدست آمده از جدول ۵، بیشترین مقدار پارامتر PI در تیمار شاهد (پتانسیل صفر) مشاهده شد. خشکی اثر معنی‌داری روی این پارامتر گذاشت به‌طوری که در بالاترین سطح از تنفس خشکی (۲-۲ مگاپاسکال) پارامتر PI،  $75$  درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در بین ارقام مورد بررسی، رقم سرخس از بالاترین میزان پارامتر PI برخوردار بود در شرایطی که مقدار آن در رقم ابارقی

اثر تنفس خشکی و رقم روی این پارامتر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی اثرات متقابل خشکی و رقم تاثیر معنی‌داری روی این پارامتر نداشت. پارامتر  $F_7$  با افزایش سطوح PEG کاهش نشان داد به‌طوری که در سطح خشکی ۲-۲ مگاپاسکال نسبت به شاهد،  $44$  درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌پارامتر  $F_7$  در بین ارقام نشان داد این پارامتر در رقم سرخس نسبت به سایر ارقام حدود ۲۲ درصد بیشتر بود و بین رقم ابارقی، قزوینی و سرخس تفاوت معنی‌داری از لحاظ این پارامتر مشاهده نگردید (جدول ۳). طبق نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) پارامتر  $F_7/F_m$  تحت تاثیر اثرات مستقل خشکی و رقم تغییرات معنی‌داری داشت ولی اثرات متقابل خشکی و رقم روی این پارامتر تاثیر معنی‌داری نداشت. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) نشان داد که بیشترین مقدار پارامتر  $F_7/F_m$  در تیمار شاهد بود و با افزایش سطوح خشکی به ۱-۱ و ۲-۲ مگاپاسکال، مقدار آن به ترتیب ۱۷ و ۳۱ درصد کاهش یافت. در بین ارقام مورد بررسی از لحاظ پارامتر  $F_7/F_m$  تفاوت معنی‌داری بین رقم ابارقی، قزوینی و بادامی مشاهده نشد ولی در رقم سرخس با ۱۳ درصد افزایش، اختلاف معنی‌داری با سایر ارقام نشان داد (جدول ۳).

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به پارامتر سطح بالای منحنی (Area) نشان داد (جدول ۴) که اثر مستقل خشکی و رقم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی برهمنکش خشکی و رقم اثر معنی‌داری روی این پارامتر نشان داد. پارامتر سطح بالای منحنی با افزایش سطوح خشکی کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵) به‌طوری که در سطح خشکی ۱-۲-۲ مگاپاسکال، به ترتیب  $41$  و  $50$  درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. در بین ارقام مورد بررسی نیز رقم سرخس و بادامی‌ریز بیشترین پارامتر سطح بالای منحنی را کسب نمودند و تفاوت معنی‌داری بین این دو رقم از لحاظ این صفت مشاهده نشد. رقم ابارقی با کاهش  $14$  درصد در میزان سطح بالای منحنی نسبت به سایر ارقام از کمترین سطح بالای منحنی برخوردار بود (جدول ۵). نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌های مربوط به RC/ABS (جدول ۴) نشان داد که اثر مستقل تنفس خشکی و رقم در سطح احتمال یک درصد معنی‌

جدول ۴- میانگین مریعات حاصل از تجزیه واریانس پارامترهای فلورسانس کلروفیل در چهار رقم پسته

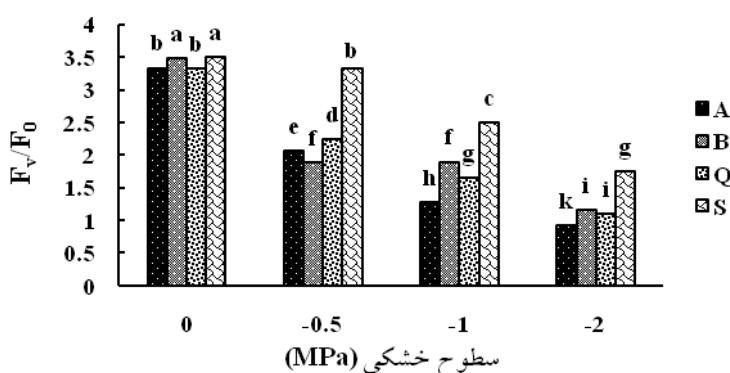
منابع تغییرات	درجه آزادی	Area	RC/ABS	Fv/F <sub>0</sub>	V <sub>J</sub>	PI
رقم	۳	۶۴۱۳۲۱۶۸۳۰/۴*	۱/۲۸**	۱/۷۲**	۰/۰۳۴**	۱۲/۴۸**
خشکی	۳	۹۰۲۱۸۶۰۴۷۴۱**	۹/۲۶**	۸/۳۹**	۰/۱۲۳**	۱۰۵/۱۱**
خشکی × رقم	۹	۳۱۴۴۷۹۵۲۳۴/۴ns	۰/۱۳ns	۰/۲۱*	۰/۰۰۵ns	۱/۷۳ns
خطا	۳۰	۳۱۱۹۷۳۸۲۸۳	۰/۰۶۲	۰/۰۷	۰/۰۰۲	۰/۹۴
ضریب تغییرات (%)	-	۱۸/۴۲	۱۶/۷۳	۱۲/۷۷	۸/۹۵	۳۳/۶۰

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد

جدول ۵- اثر سطوح مختلف خشکی و رقم بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل دانهالهای پسته

تیمار	Area	RC/ABS	V <sub>J</sub>	PI
خشکی (MPa)				
۰..	۴۲۷۰۷۰/۸۳ <sup>a</sup>	۲/۸۱ <sup>a</sup>	۰/۷۷ <sup>a</sup>	۵/۴ <sup>a</sup>
-۰.۵	۳۰۴۵۶۵/۲۷ <sup>b</sup>	۱/۴۱ <sup>b</sup>	۰/۶۵ <sup>b</sup>	۲/۴۲ <sup>b</sup>
-۱.۰	۲۵۳۸۴۹/۶۶ <sup>c</sup>	۱/۰۹ <sup>c</sup>	۰/۶۰ <sup>c</sup>	۱/۳۸ <sup>c</sup>
-۲.۰	۲۱۳۰۳۱/۲۵ <sup>d</sup>	۰/۶۳ <sup>d</sup>	۰/۵۰ <sup>d</sup>	۰/۵۵ <sup>d</sup>
رقم				
ابارقی	۲۷۵۸۰۵/۸۵ <sup>c</sup>	۱/۲۶ <sup>c</sup>	۰/۵۵ <sup>c</sup>	۲/۳ <sup>d</sup>
بادامی ریز زرند	۳۱۹۹۲۷/۹۱ <sup>a</sup>	۱/۴۳ <sup>b</sup>	۰/۶۴ <sup>b</sup>	۲/۸۶ <sup>b</sup>
قروینی	۲۸۲۱۸۸/۹۱ <sup>b</sup>	۱/۲۶ <sup>c</sup>	۰/۶۲ <sup>b</sup>	۲/۵۵ <sup>c</sup>
سرخس	۳۲۰۵۴۹/۳۳ <sup>a</sup>	۱/۹۹ <sup>a</sup>	۰/۷۱ <sup>a</sup>	۴/۵۱ <sup>a</sup>

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی دار با یکدیگر نیستند.



شکل ۲- اثر تنش خشکی بر پارامتر  $F_v/F_0$  در ارقام پسته A (ابارقی)، B (بادامی ریز زرند)، Q (قروینی)، S (سرخس). سطوح خشکی (۰، -۰.۵ و -۲- مگاپاسکال). ستون‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون LSD ندارند.

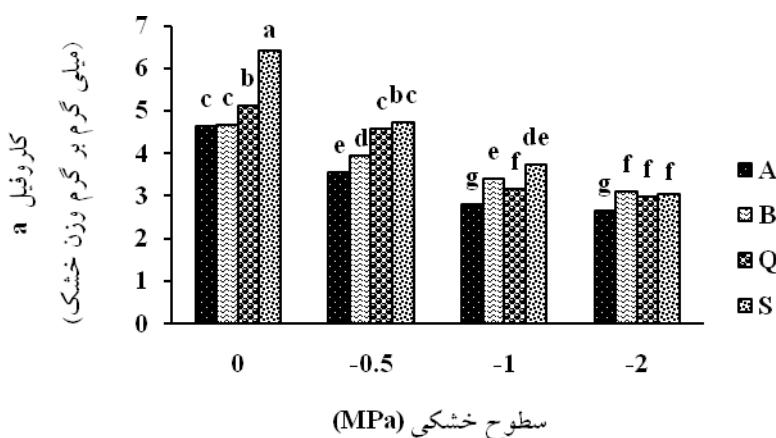
کلروفیل a (جدول ۶) نشان داد تنش خشکی و برهمکنش تیمارهای خشکی و رقم از نظر آماری در سطح یک درصد بر

به میزان ۶۴ درصد نسبت به رقم سرخس کاهش نشان داد.  
رنگیزه‌های گیاهی: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به

جدول ۶- میانگین مربیات حاصل از تجزیه واریانس مربوط به رنگیزهای گیاهی و وزن خشک در چهار رقم پسته

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	وزن خشک گیاه
رقم	۳	۳/۳۴**	۲/۹۲**	۱۱/۹۵**	۳۸/۴**
خشکی	۳	۱۶/۲۵**	۱۱/۶۶**	۵۵/۴۲**	۳۷/۶۶**
خشکی × رقم	۹	۰/۶۱**	۰/۴۶**	۱/۸۷**	۲/۴۶**
خطا	۴۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۱۰
ضریب تغییرات (%)	-	۶/۹۸	۵/۶۵	۷/۰۳	۹/۷۵

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد.



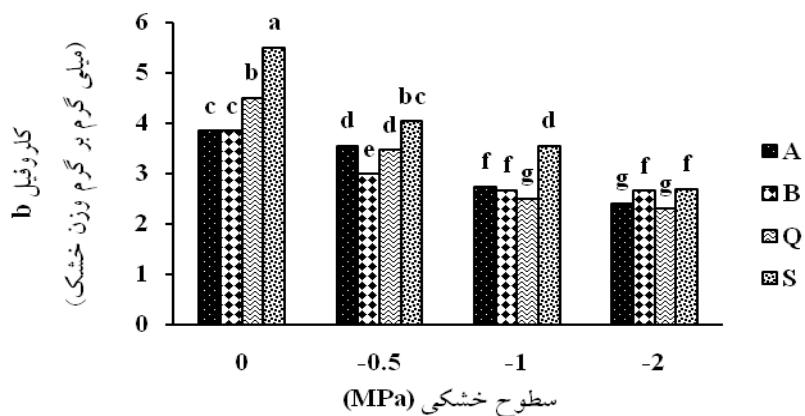
شکل ۳- تاثیر برهmekش خشکی بر غلظت کلروفیل a (ارقام پسته A (ابارقی)، B (بادامی ریز زرند)، Q (قزوینی)، S (سرخس)). سطوح خشکی (۰، -۰/۵، -۱ و -۲- مگاپاسکال). ستون های دارای حروف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد با استفاده از آزمون LSD ندارند.

خشکی ۲- مگاپاسکال رقم سرخس و بادامی ریز مقدار کلروفیل b بالاتری نسبت به سایر ارقام نشان دادند در این سطح از خشکی رقم ابارقی و قزوینی مقدار کلروفیل b کمتری حاصل کردند. در تیمار شاهد (پتانسیل صفر) رقم سرخس مقدار کلروفیل b بالاتری نشان داد و از اختلاف معنی داری نسبت به سایر ارقام مورد مطالعه برخوردار بود.

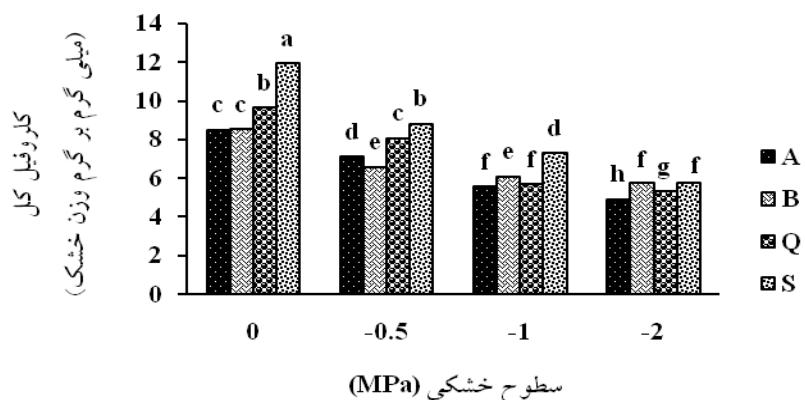
نتایج تجزیه واریانس داده های مربوط به کلروفیل کل (جدول ۶) نشان داد اثر خشکی و برهmekش تنش خشکی و رقم بر میزان کلروفیل کل در سطح یک درصد معنی دار شد. نتایج حاصل از مقایسه میانگین ها نشان داد با افزایش تنش خشکی کل کاهش یافت. بیشترین میزان کلروفیل کل در تیمار شاهد (پتانسیل اسمزی صفر) در رقم سرخس و کمترین میزان کلروفیل کل در سطح خشکی ۲- (مگاپاسکال) در رقم ابارقی مشاهده شد (شکل ۵).

غلظت کلروفیل a تاثیر داشتند. نتایج حاصل از مقایسه میانگین ها نشان داد با افزایش سطوح خشکی غلظت کلروفیل a در هر چهار رقم روند نزولی داشت. در همه ارقام، بیشترین میزان کلروفیل a در شرایط غیر تنش مشاهده شد. در این سطح رقم سرخس بیشترین میزان کلروفیل a را داشت. در سطح خشکی ۲- مگاپاسکال، رقم ابارقی میزان کلروفیل a کمتری نسبت به سایر ارقام تولید کرد. بین ارقام سرخس، قزوینی و بادامی ریز زرند از لحاظ میزان کلروفیل a تفاوت معنی داری در سطح خشکی ۲- مگاپاسکال مشاهده نشد (شکل ۳).

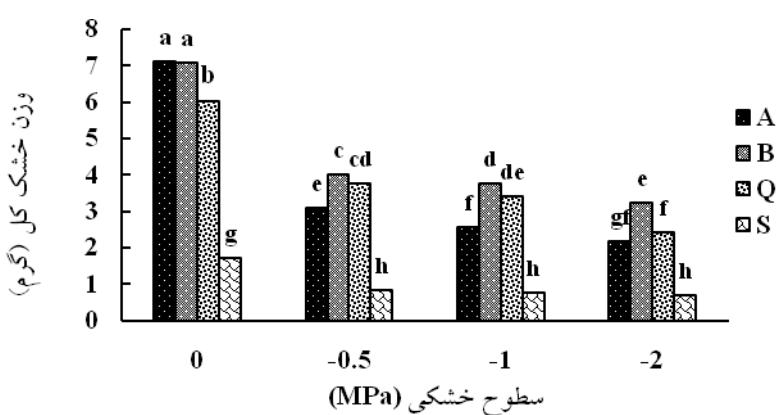
همان طور که در جدول تجزیه واریانس (جدول ۶) نمایش داده شده بر هmekش تنش خشکی و رقم بر میزان کلروفیل b اثر معنی داری در سطح یک درصد نشان داد. نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که با افزایش سطوح خشکی میزان کلروفیل b در همه ارقام کاهش یافت (شکل ۴). در سطح



شکل ۴- تاثیر برهمکنش خشکی بر غلظت کلروفیل b ارقام پسته A (ابارقی)، B (بادامی ریز زرند)، Q (قروینی)، S (سرخس). سطوح خشکی (۰، -۰/۵ و -۲- مگاپاسکال). ستون‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با استفاده از آزمون LSD ندارند.



شکل ۵- تاثیر برهمکنش خشکی بر غلظت کلروفیل کل ارقام پسته A (ابارقی)، B (بادامی ریز زرند)، Q (قروینی)، S (سرخس). سطوح خشکی (۰، -۰/۵ و -۲- مگاپاسکال). ستون‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با استفاده از آزمون LSD ندارند.



شکل ۶- تاثیر برهمکنش خشکی و رقم بر وزن خشک کل ارقام پسته A (ابارقی)، B (بادامی ریز زرند)، Q (قروینی)، S (سرخس). سطوح خشکی (۰، -۰/۵ و -۲- مگاپاسکال). ستون‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با استفاده از آزمون LSD ندارند.

(شکل ۶). با افزایش سطوح خشکی از میزان وزن خشک کل در بین ارقام کاسته شد به طوری که در بالاترین سطح از تنش

وزن خشک کل: نتایج نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش قابل توجهی در وزن خشک گیاهان مورد بررسی گردید

جدول ۷- ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات ارزیابی شده در ارقام پسته مورد آزمایش (n=4)

متغیر	F <sub>v</sub> /F <sub>0</sub>	F <sub>0</sub>	F <sub>m</sub>	F <sub>v</sub>	F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	Area	RC/ABS	V <sub>J</sub>	PI	Chl <sub>a</sub>	Chl <sub>b</sub>	ChlT	TDW
F <sub>v</sub> /F <sub>0</sub>	۱												
F <sub>0</sub>	-۰/۲۷ <sup>ns</sup>	۱											
F <sub>m</sub>	۰/۷۹ <sup>**</sup>	-۰/۱۴ <sup>ns</sup>	۱										
F <sub>v</sub>	۰/۹۳ <sup>**</sup>	-۰/۱۷ <sup>ns</sup>	۰/۹۰ <sup>**</sup>	۱									
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	۰/۹۳ <sup>**</sup>	-۰/۱۱ <sup>ns</sup>	۰/۸۰ <sup>**</sup>	۰/۹۷ <sup>**</sup>	۱								
Area	۰/۹۱ <sup>**</sup>	-۰/۱۲ <sup>ns</sup>	۰/۶۲ <sup>**</sup>	۰/۸۴ <sup>**</sup>	۰/۸۸ <sup>**</sup>	۱							
RC/ABS	۰/۹۲ <sup>**</sup>	-۰/۰۳ <sup>ns</sup>	۰/۷۹ <sup>**</sup>	۰/۸۴ <sup>**</sup>	۰/۸۷ <sup>**</sup>	۰/۹۰ <sup>**</sup>	۱						
V <sub>J</sub>	۰/۹۳ <sup>**</sup>	-۰/۲۸ <sup>ns</sup>	۰/۷۳ <sup>**</sup>	۰/۸۹ <sup>**</sup>	۰/۹۱ <sup>**</sup>	۰/۹۲ <sup>**</sup>	۰/۸۵ <sup>**</sup>	۱					
PI	۰/۹۲ <sup>**</sup>	-۰/۱۴ <sup>ns</sup>	۰/۷۷ <sup>**</sup>	۰/۸۳ <sup>**</sup>	۰/۸۴ <sup>**</sup>	۰/۸۲ <sup>**</sup>	۰/۸۳ <sup>**</sup>	۰/۸۵ <sup>**</sup>	۱				
Chl <sub>a</sub>	۰/۹۰ <sup>**</sup>	-۰/۴۵ <sup>*</sup>	۰/۷۳ <sup>**</sup>	۰/۷۷ <sup>**</sup>	۰/۸۰ <sup>**</sup>	۰/۸۲ <sup>**</sup>	۰/۸۲ <sup>**</sup>	۰/۸۳ <sup>**</sup>	۰/۹۰ <sup>**</sup>	۱			
Chl <sub>b</sub>	۰/۸۹ <sup>**</sup>	-۰/۴۷ <sup>ns</sup>	۰/۷۴ <sup>**</sup>	۰/۸۲ <sup>**</sup>	۰/۸۵ <sup>**</sup>	۰/۹۰ <sup>**</sup>	۰/۸۳ <sup>**</sup>	۰/۸۲ <sup>**</sup>	۰/۹۰ <sup>**</sup>	۰/۹۵ <sup>**</sup>	۱		
ChlT	۰/۹۰ <sup>**</sup>	-۰/۰۴ <sup>ns</sup>	۰/۷۰ <sup>**</sup>	۰/۸۰ <sup>**</sup>	۰/۸۱ <sup>**</sup>	۰/۸۳ <sup>**</sup>	۰/۷۸ <sup>**</sup>	۰/۸۳ <sup>**</sup>	۰/۹۲ <sup>**</sup>	۰/۹۹ <sup>**</sup>	۰/۹۸ <sup>**</sup>	۱	
TDW	۰/۳۸ <sup>ns</sup>	-۰/۲۱ <sup>ns</sup>	۰/۱۳ <sup>ns</sup>	۰/۲۵ <sup>ns</sup>	۰/۴۷ <sup>*</sup>	۰/۵۸ <sup>*</sup>	۰/۴۸ <sup>*</sup>	۰/۳۵ <sup>ns</sup>	۰/۶۱ <sup>**</sup>	۰/۳۶ <sup>ns</sup>	۰/۳۶ <sup>ns</sup>	۰/۱۸ <sup>ns</sup>	۱

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و ns تفاوت معنی داری وجود ندارد. TDW وزن خشک.

تیلاکوئید و کارآئی نسبی انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I را نشان می دهد (Bilger and Björkman, 2014). نتایج ما در این پژوهش نشان داد که پارامترهای فلورسانس کلروفیل مورد بررسی به جز فلورسانس کمینه، تحت شرایط تنش خشکی کاهش یافتند. کاهش پارامترهای فلورسانس در شرایط خشکی می تواند به دلیل اتلاف انرژی (Sheuermann et al., 1991) با افزایش سطوح خشکی افزایش یافت و در تیمار کمینه (F<sub>0</sub>) در شرایط مناسب رطوبتی به دلیل افزایش فعالیت دستگاه فتوستترزی و انتقال بیشتر الکترون از فتوسیستم II به زنجیره ای انتقال الکترون می باشد (Lu et al., 1999). تنش های محیطی با ایجاد تغییرات ساختاری و خسارت به مراکز واکنش فتوسیستم II موجب افزایش شدید فلورسانس اولیه می شوند و فلورسانس کمینه (F<sub>0</sub>) هرچه قدر کمتر باشد بدین معناست که فعالیت های فتوستترزی به نحو مطلوب تری در جریان هستند (Andrewes et al., 1995). افزایش پارامتر F<sub>0</sub> در شرایط خشکی گزارش شده که می تواند در نتیجه کاهش یکپارچگی غشاء تیلاکوئید ایجاد گردد (Wright et al., 2009). نتایج این پژوهش نشان داد که همبستگی منفی بین افزایش F<sub>0</sub> و

(۲- مگاپاسکال) دانه ها کمترین وزن خشک کل را تولید کردند (شکل ۶). اگرچه تنش خشکی سبب کاهش وزن خشک گیاهان مورد بررسی گردید ولی پاسخ آنها نسبت به شرایط تنش متفاوت بود به طوری که کاهش وزن خشک کل در رقم سرخس بین سطوح خشکی ۰/۵ و ۱-۲-۲ مگاپاسکال تفاوت معنی داری نشان نداد. رقم بادامی ریز زرند نسبت به سایر ارقام در بالاترین سطح از خشکی کمترین کاهش وزن خشک کل را با ۵۴ درصد نشان داد و رقم ابارقی از بیشترین کاهش وزن خشک کل در تیمار ۲- مگاپاسکال خشکی با ۶۵ درصد برخوردار بود.

نتایج ضرایب همبستگی (جدول ۷) نشان داد که همبستگی معنی داری بین پارامتر عملکرد کمی و کیفی دستگاه فتوستترز (PI) با وزن خشک گیاه وجود دارد (R<sup>2</sup>= 0.61) در حالی که همبستگی معنی داری بین محتوای کلروفیل برگ و وزن خشک گیاه مشاهده نگردید.

#### بحث:

فلورسانس کلروفیل به عنوان یک معیار سنجش تاثیر تنش های محیطی، از جمله تنش خشکی بر گیاهان و تعیین میزان مقاومت به خشکی آنها پیشنهاد شده است (Moffatt et al., 1990). در حقیقت، مقدار فلورسانس کلروفیل، تمامیت غشای

مخزن کینون مسدود شود (مثلاً در مواجهه با شرایط تنفس)، سطح مذکور به شدت کاهش می‌یابد (Misra *et al.*, 2001). پارامتر RC/ABS نشان دهنده تراکم مراکز واکنش به ازاء مقدار انرژی نورانی جذب شده می‌باشد (Mehta *et al.*, 2010). در پژوهش حاضر تنفس خشکی باعث کاهش میزان RC/ABS شد که نشان دهنده کاهش در تراکم مولکول‌های آتنن یا تعداد کلروفیل، در دریافت نور می‌باشد (Sterasser *et al.*, 2004). همان‌طور که نتایج ضرایب همبستگی (جدول ۷) نشان می‌دهد بین پارامتر RC/ABS و کلروفیل a, b و کل در این پژوهش همبستگی مثبت معنی‌داری وجود دارد ( $R^2 = 82$ ) -  $R^2 = 90$  و  $R^2 = 83$  ( $R^2 = 83$ ) به‌اینصورت که با کاهش برداشت کننده‌های نور (CHL) پارامتر RC/ABS نیز کاهش یافته است. گزارش شده که در اثر اعمال تنفس، بخشی از مراکز واکنش (RC) غیر فعال شده یا تعداد و گنجایش ظرفیت کینون‌ها در شرایط تنفس کم می‌شود (Misra *et al.*, 2001). مطالعات مختلف در گیاهان تحت شرایط تنفس نشان داد که تخریب پروتئین‌های D1 و D2 باعث مهار انتقال الکترون شده و در نتیجه جذب نور و در ادامه فتوسترن کاهش می‌یابد (Giardi *et al.*, 1996).

همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش سطوح خشکی و کاهش جذب آب توسط دانه‌الها، فعالیت کمپلکس تجزیه آب در سمت دهنده الکترون در فتوسیستم II کاهش معنی‌داری را نشان داد. این پارامتر حساس‌ترین جزء در زنجیره انتقال الکترون به شرایط تنفس می‌باشد (Kalaji *et al.*, 2011). کاهش این نسبت در نتیجه کاهش جذب آب و اختلال در فرآیند انتقال الکترون در فتوسترن رخ می‌دهد (Periera *et al.*, 2000). نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش پریرا و همکاران (۲۰۰۰) بر روی پایه‌های مرکبات تحت شرایط تنفس مطابقت دارد.

پارامتر  $J_{VJ}$  نشان دهنده فلوورسانس متغیر نسبی در مرحله J منحنی کائوتیسکی (شکل ۱) است. کاهش فلوورسانس در ناحیه J به دلیل تخلیه انرژی از مرکز واکنش به اولین دریافت کننده الکترون یعنی  $Q_A$  می‌باشد (Xia *et al.*, 2004). در پژوهش حاضر، در سطح خشکی ۱- و ۲- مگاپاسکال به

پارامترهای فلوورسانس کلروفیل و مخصوصاً کلروفیل a و b ( $R^2 = 47$ ) وجود دارد (جدول ۷). بین ارقام مورد بررسی رقم سرخس و بادامی‌ریز از کمترین پارامتر فلوورسانس کلروفیل کمینه ( $F_0$ ) برخوردار بودند. به‌نظر می‌رسد دستگاه فتوسترنی این ارقام تحت شرایط تنفس خشکی از کارآیی بالاتری در انتقال الکترون برخوردار می‌باشد. افزایش فلوورسانس کمینه ( $F_0$ ) در شرایط تنفس خشکی در زیتون (Wright *et al.*, 2009) و انگور (Angelopoulos *et al.*, 1996) نیز گزارش شده است. نتایج نشان داد که پارامترهای  $F_v$  و  $F_v/F_m$  با افزایش سطوح خشکی کاهش نشان دادند. کاهش در میزان فلوورسانس بیشینه ( $F_m$ )، فلوورسانس متغیر ( $F_v$ ) و نسبت فلوورسانس متغیر به فلوورسانس بیشینه ( $F_v/F_m$ ) در سطوح خشکی می‌تواند به دلیل مهار الکترون و جلوگیری از انتقال آن از سمت دهنده فتوسیستم II به محل پذیرش الکترون توسط مولکول‌های کینون ( $Q_A, Q_C$ ) باشد (Mahta *et al.*, 2010). تنفس خشکی با اثرات نامطلوبی که بر ثبت کردن می‌گذارد، ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون را کاهش داده، در نتیجه سیستم به سرعت به  $F_m$  می‌رسد که نتیجه آن کاهش در فلوورسانس متغیر ( $F_v$ ) خواهد بود از این رو، کارآیی فتوشیمیابی فتوسیستم II بصورت نسبت  $F_v/F_m$  بیان می‌شود، تحت تاثیر تنفس خشکی کاهش می‌یابد (Ma *et al.*, 1995). در بین ارقام مورد بررسی در این پژوهش، پارامتر  $F_v/F_m$  در رقم سرخس ۱۳ درصد نسبت به سایر ارقام بیشتر بود اما بین رقم بادامی، قزوینی و سرخس از نظر این پارامتر تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید. کاهش میزان  $F_v/F_m$  تحت شرایط تنفس خشکی روی Razavi *et al.*, 2008 توت فرنگی، کاهو و زیتون گزارش شده است (Petridis *et al.*, 2011؛ Hussain and Reigosa, 2008).

(2012)

در این پژوهش سطح بالای منحنی فلوورسانس بین  $F_0$  و  $F_m$ ، با افزایش تنفس خشکی کاهش یافت. سطح بالای منحنی فلوورسانس بین  $F_0$  و  $F_m$ ، متناسب با گنجایش مخزن پذیرنده الکترون یا همان  $Q_A$  در طرف احیاء کننده فتوسیستم II می‌باشد در صورتی که انتقال الکترون از مرکز واکنش به سمت

به عنوان رقمی برشمرد که دستگاه فتوستزی آن در مقایسه با سایر ارقام مورد آزمایش، از کارآیی و عملکرد فتوستز کمتری برخوردار است و سرخس را به عنوان رقمی در نظر گرفت که از بالاترین کارآیی سیستم فتوستزی بهره می‌برد.

کاهش پارامترهای فلورسانس کلروفیل تحت شرایط تنش خشکی می‌تواند به دلیل کاهش در محتوای کلروفیل باشد (Kocheva *et al.*, 2004). براساس نتایج بدست آمده تیمار خشکی باعث کاهش در میزان کلروفیل  $a$  و  $b$  و کل گردید. کاهش در محتوای کلروفیل برگ ممکن است به علت از بین رفتن آنزیم‌های خاصی باشد که در بیوستز رنگدانه‌های فتوستزی نقش دارند (Murkute *et al.*, 2006). از جمله این آنزیم‌ها آنزیم گلوتامات لیگاز است که نقش مهمی در سنتز کلروفیل دارد و کاهش سنتز کلروفیل تحت شرایط تنش خشکی به دلیل ممانعت از فعالیت آنزیم گلوتامات لیگاز می‌باشد (Dalal and Tripathy, 2012). در پژوهشی بررسی اثر تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول بر محتوای رنگدانه‌های فتوستزی گیاه برنج، کاهش محتوای کلروفیل تحت شرایط تنش خشکی به کاهش در سنتز آنزیم گلوتامات لیگاز نسبت داده شد (Dalal and Tripathy, 2012). همچنین کاهش میزان کلروفیل می‌تواند به دلیل فعالیت بیشتر آنزیم کلروفیلаз در شرایط تنش باشد (Sheng *et al.*, 2008). دلایل متعددی برای کاهش رشد در شرایط تنش خشکی گزارش شده است. از جمله آن می‌توان به کاهش فتوستز، کاهش سطح برگ، کاهش فشار تورژسانس سلول و محدودیت ثبیت  $\text{CO}_2$  اشاره کرد. بر اساس نتایج بدست آمده تنش خشکی اثر معنی‌داری بر میزان کلروفیل و کارآیی فتوشیمیابی فتوسیستم II و تولید وزن خشک ارقام مختلف پسته گذاشت. تحقیقات نشان داده که همبستگی مناسبی بین توقف فتوستز، پارامترهای فلورسانس کلروفیل و در نهایت تولید وزن خشک وجود دارد (Bongi and Loreto, 1989).

### نتیجه‌گیری کلی:

براساس داده‌های بدست آمده از این پژوهش پارامتر  $\text{F}_v/\text{F}_m$ ،  $\text{PI}$

ترتیب ۲۲ و ۳۵ درصد کاهش یافت. کاهش پارامتر  $V_f$  تحت تنش خشکی می‌تواند به دلیل کاهش در میزان  $Q_A$  باشد همچنین کاهش القای برانگیخته‌گی در فتوسیستم II می‌تواند به دلیل کاهش در سرعت احیاء شدن کینون‌ها اتفاق افتاد (Kocheva *et al.*, 2004). کاهش پارامتر  $V_f$  تحت تنش خشکی در گیاه زراعی جو (Kocheva *et al.*, 2004) و آفتاب گردان (Sheuermann *et al.*, 1991) گزارش شده است. در پژوهش حاضر پارامتر  $V_f$  در رقم سرخس نسبت به سایر ارقام بالاتر بود که نشان دهنده فعالیت بهتر مراکز واکنش در انتقال الکترون به  $Q_A$  در این رقم می‌باشد.

پارامتر  $\text{PI}$  در این پژوهش تحت تاثیر سطوح خشکی قرار گرفت. این پارامتر بیان کننده عملکرد کمی و کیفی دستگاه فتوستزی است و نقش مهمی در تعیین مقدار تنش وارد شده به گیاه و همچنین در شناسایی ارقام مقاوم و حساس به خشکی دارد (Barazzouk., *et al.*, 2005). کاهش پارامتر کارآیی فتوستزی ( $\text{PI}$ ) در شرایط تنش خشکی نشان دهنده از دست دادن کارآیی فتوشیمیابی نظام نوری II و I در گیاهان می‌باشد (Tach *et al.*, 2007). نتایج نشان داد که در شدیدترین سطح از خشکی (۲-مگاباسکال) پارامتر  $\text{PI}$  کمترین مقدار بود. گزارش شده، الکترون‌ها در شرایط تنش شدید به دلیل عدم انتقال آن در زنجیره انتقال الکترون تجمع یافته و در ادامه، در فتوسیستم I از طریق واکنش مهله با اکسیژن ترکیب شده و در نتیجه رادیکال‌های آزاد مانند سوپراکسید، هیدروکسیل و پراکسیدهیدروژن تولید می‌شوند، در صورتی که این رادیکال‌ها مهار نشوند سبب تنش اکسیداتیو شده و به دستگاه فتوستزی آسیب می‌رسانند (Aganchich *et al.*, 2009). به‌طوری که نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد، همبستگی قابل قبولی ( $R^2=61$ ) بین پارامتر  $\text{PI}$  و زیست توده گیاه (بر اساس وزن خشک) برقرار است که نشان دهنده حساسیت این پارامتر نسبت به تنش خشکی بوده و می‌توان از آن برای مقایسه میزان مقاومت ارقام و گونه‌ها نسبت به تنش خشکی و همچنین برای برآورد شدت تنش خشکی در یک گیاه استفاده کرد. بنابراین در بین ارقام مورد بررسی، بر اساس پارامتر  $\text{PI}$  رقم ابارقی را می‌توان

فتوستزی رقم اباقی حساسیت بیشتری به تنش خشکی نشان داد. همچنین کاهش وزن خشک در این رقم در سطح بالای خشکی بیشتر بود بنابراین نسبت به سایر ارقام مقاومت کمتری به تنش خشکی داشت. بر اساس نتایج این آزمایش، کاربرد فلورسانس کلروفیل به عنوان یک روش سریع و غیر مخرب و تجزیه و تحلیل متغیرهای آن می‌تواند در بررسی واکنش ارقام و پایه‌های پسته به تنش خشکی قابل توصیه باشد.

و محتوای کلروفیل در ارقام مورد بررسی همبستگی بالایی با تولید وزن خشک دارند (جدول ۷). در بین ارقام مورد بررسی رقم سرخس و بادامی ریز از ظرفیت فتوستزی بالاتری در شرایط تنش خشکی برخوردار بودند همچنین کاهش وزن خشک در این ارقام در سطوح خشکی نسبت به تیمار شاهد کمتر بود در نتیجه می‌توان گفت که در شرایط خشکی نسبت به سایر ارقام از عملکرد بهتری برخوردارند. در مقابل دستگاه

#### منابع:

- سلطانی، ا. (۱۳۸۳) فلورسانس کلروفیل و کاربرد آن. انتشارات داخلی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۱۹ صفحه.
- میرزایی خلیل آبادی، ح. ر. و چیذری، ا. ح. (۱۳۸۳) تعیین کارآیی فنی و مقدار بهینه آب در تولید پسته. مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی ۴۳: ۶۲-۴۹.
- Aganchich, B., Wahbi, S., Loreto, F. and Centritto, M. (2009) Partial root zone drying: regulation of photosynthetic limitations and antioxidant enzymatic activities in young olive (*Olea europaea*) saplings. *Tree Physiology* 29: 685-696.
- Andrews, J. R., Fryer, M. J. and Baker, N. R. (1995) Characterization of chilling effects on photosynthetic performance of maize crops during early season growth using chlorophyll fluorescence. *Journal of Experimental Botany* 46: 1195-1203.
- Angelopoulos, K., Dicio, B. and Xiloyannis, C. (1996) Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europaea* L.) during water stress and rewarding. *Journal of Experimental Botany* 47:1093-11301.
- Barazzouk, S., Kamat, P. V. and Hotchandani, S. (2005) Photoinduced Electron Transfer between Chlorophyll a and Gold Nanoparticles. *Journal Physiology and Chemistry* 109:716-723.
- Bilger, W. and Björkman, O. (2014) Relationships among violaxanthin deepoxidation, thylakoid membrane conformation, and nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching in leaves of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Planta* 193: 238-246.
- Bongi, G. and Loreto, F. (1989) Gas exchange properties of salt stressed olive (*Olea europaea* L.) leaves. *Plant physiology* 90:1408-1416.
- Dalal, V. K. and Tripathy, B. C. (2012) Modulation of chlorophyll biosynthesis by water stress in rice seedlings during chloroplast biogenesis. *Plant Cell and Environment* 35: 1685-1703.
- Giardi, M.T., Cona, A., Geiken, B., Kucera, T., Masjidek, J., Mattoo, A .K. (1996) Long-term drought stress induces structural and functional reorganization of photosystem II. *Planta* 199: 118–125.
- Hakam, N., Deell, J. R., Khanizadeh, S. and Richer, C. (2000) Assessing chilling tolerance s using in chlorophyll fluorescence. *Hort Science* 35: 184-186.
- Hussain, M. I. and Reigosa, M. J. (2011) A chlorophyll fluorescence analysis of photosynthetic efficiency, quantum yield and photon energy dissipation in PSII antennae of *Lactuca sativa* L. leaves exposed to cinnamic acid. *Journal of Experimental Botany* 51: 659-668.
- Kafkas, S. and Rperl, T. (2001) Morphological and molecular phylogeny of pistacia species in turkey. *Theoretical and Applied Genetics* 102: 908-915.
- Kalaji, H., Govindjee, I., Koscielniak, K., J. and Gołaszewska, K. (2011) Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO<sub>2</sub> assimilation of two Syrian barley landraces. *Journal Environmental and Experimental Botany* 73: 64–72.
- Kocheva, K., Lambrev, P., Georgiev, G., Goltsev, V. and Karabaliiev, M. (2004) Evaluation of chlorophyll fluorescence and membrane injury in the leaves of barley cultivars under osmotic stress. *Bio electrochemistry* 63: 121 – 124.
- Lichtenhaller, H. K. (1987) Chlorophylls and carote-noids: pigments of photosynthetic biomembra-nes. *Methods in Enzymology* 148:350-382.
- Lu, A. and Vonsh, K. (1999) Characterization of PSII photochemistry in salt adapted cells of cyan bacterium *Spirulina platensis*. *New Phytology* 141: 231- 239.
- Ma, B. L., Morison, M. J. and Videng, H. D. (1995) Leaf greenness and photosynthetic rates in soybean. *Crop Science* 35: 1411-1414.

- Maxwell, K. and Johnson, G. (2000) Chlorophyll fluorescence a practical guide Journal experimental botany 51:659-668.
- Mehta, P., Jajoo, A., Mathur, S. and Bharti, S. (2010) Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. Plant Physiology and Biochemistry 48: 16-20.
- Michel, B. E. and Kaufmann, M. R. (1973) The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiology 51: 914-916.
- Misra, A. N., Misra, M. and Singh, R. (2012) Chlorophyll fluorescence in plant biology. In: Biophysics (ed. Misra , A. N.) Pp. 171–192. InTech Europe , Rijeka.
- Misra, A. N., Srivastava, A. and Strasser, R. J. (2001) Utilization of fast chlorophyll a fluorescence technique in assessing the salt/ion sensitivity of mugbean and Brassica seedlings. Journal of Plant Physiology 158: 1173-1181.
- Moffatt, J., Sears, M. R. G. and Paulsen, G. (1990) Wheat height temperature tolerance during reproductive growth. Evaluation by chlorophyll fluorescence. Crop Science: 881-885.
- Montanaro, G., Dicio, B. and Xiloyannis, C. (2007) Response of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and re-watering. Photosynthetica 45: 533-540.
- Murkute, A., Sharma, S. and Singh, S. (2006) Studies on salt stress tolerance of citrus rootstock genotypes with arbuscular mycorrhizal fungi. Horticultural Science 33: 70-76.
- Oukarroum, A., El Madidi, S., Schansker, G. and Strasser, R. J. (2007) Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. Environmental and Experimental Botany 60: 438-446.
- Peeva, V. and Cornic, G. (2009) Leaf photosynthesis of *Haberlea rhodopensis* before and during drought. Environmental and Experimental Botany 65: 310-318.
- Penuelas, J. and Filella, I. (1998) Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. Trends in Plant Science 3: 151-156.
- Percival, G. and Henderson, A. (2003) An assessment of the freezing tolerance of urban trees using chlorophyll fluorescence. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 78: 254-260.
- Pereira, W.E., Siqueira, D.L., Martínez, C.A. and Puiatti, M. (2000) Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminium stress. Journal Plant Physiology 157: 513–520.
- Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S. and Giannakoula, A. (2012) Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive (*Olea europaea* L.) cultivars. Plant Physiology and Biochemistry 60: 1-11.
- Razavi, F., Pollet, B., Stepe, K. and Van Labeke, C. (2008) Chlorophyll fluorescence as a tool for evaluation of drought stress in strawberry. Photosynthetica 46: 631-633.
- Sayed, O.H. (2003) Chlorophyll fluorescence as a tool in cereal research. Photosynthetica 3: 321-330.
- Scheer, H. (2004) Chlorophylls and carotenoids. Encyclopedia of Biological Chemistry 1: 430-433.
- Sheng, M., tang, M., Chen, H., Yang, B., Zang, F. and Y. Huang. (2008) Influence of Arbuscular mycorrhizal on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. Mycorrhiza 18: 287- 296.
- Sheuermann, R., Biebler, K., Stuhlfauth, T. and Flock, H.P. (1991) Simultaneous gas exchange and fluorescence measurements indicate differences in the adaptation of sunflower, bean and maize to water stress. Photosynthetica Researched 27: 187 – 197.
- Strasser, R. J., Srivastava, A. and Tsimilli-Michael, M. (2000) The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaption (eds. Yanus, M., Pathre, U. and Mohanty, P.) Pp. 443-480. Taylor and Francis, London.
- Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M. and Srivastava, A. (2004) Analysis of the fluorescence transient. In: Chlorophyll fluorescence: A Signature of Photosynthesis (eds. Papageorgiou, G. and Govindjee, C.) Pp. 321 - 362. Advances in Photosynthesis and Respiration Series, Dordrecht: Springer.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2002) Plant Physiology. Sinecure Associates Inc. 690p.
- Wright, H., Delong, j., Lada, R. and Prange, R. (2009) The relationship between water status and chlorophyll a fluorescence in grapes (*Vitis* spp.). Postharvest Biology and Technology 51:193–199.
- Xia, J., Li, Y. and Zou, D. (2004) Effects of salinity stress on PSII in *Ulva lactuca* as probed by chlorophyll fluorescence measurements. Aquatic Botany 80: 129-137.
- Zhao, G. Q., Ma, B. L. and Ren, C. Z. (2007) Growth, Gas Exchange, chlorophyll fluorescence, and ion content of naked oat in response to salinity. Journal Crop Science 41: 123-131.

## Comparison of photosystem II efficiency in four Pistachio rootstocks under drought stress using chlorophyll fluorescence technique

Farooq Fahimi Kuyerdi and Mohammad Hussain Shamshiri

Department of Science Horticulcher, College of Agriculcher, Vali-Asr-University

(Received: 3 January 2015, Accepted: 3 October 2015)

### Abstract"

In a greenhouse experiment aimed to compare drought resistance, photosystem II efficiency was evaluated using chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll content of four pistachio (*Pistacia vera L.*) rootstocks based on a completely randomized design (CRD) as factorial with drought treatment (PEG + Hoagland solution) at four levels (0, -0.5, -1 and -2 MPa) and four pistachio rootstocks «Abareqi, Badami-Rize-zarand, Qazvini and sharakhs». After three months of stress, chlorophyll fluorescence and related transients ( $F_0$  ·  $F_v$  ·  $F_m$  ·  $F_v/F_m$  · Area ·  $V_J$  · PI ·  $F_v/F_0$  and RC /ABS) were measured by fluorimeter. Chlorophyll a, b, total chlorophyll content and total dry weight of plants were measured at the end of experiment. Results showed that chlorophyll fluorescence parameters were influenced by drought stress. The parameters of  $F_v$  ·  $F_m$  ·  $F_v/F_m$  and PI were decreased with increasing of drought stress level. PI, a photosynthesis efficiency index, was reduced by 90% at the highest level of drought intensity. These parameters showed the most correlation with total dry weight ( $R^2 = 0.61$ ) so it could be used as an effective parameter to identify drought susceptible or tolerance rootstocks. Our results showed that there was a significant correlation between chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters and total dry weight under drought stress. Results of the experiment revealed that sarakhs and Badami-Riz-zarand could be categorized as more drought resistant based on their higher photosynthetic capacity and dry weight as compared to Abareqi.

**Keywords:** Chlorophyll fluorescence, Drought stress, Pistachio, Polyethylene glycol (PEG).

\*corresponding author, Email: shamshiri88@gmail.com