تأثیر اسید اسید هومیک بر ویژگی‌های رویشی، جذب فسفر و پتاسیم و رنگدانه‌های فتوسنتزی دانهال‌های پسته تحت تنش خشکی

ناصر رشیدی[۱]، عبدالامیر معزی[۲*]، افراسیاب راهنما[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸)

چکیده

کمبود آب عامل عمده محدودکننده رشد و تولید پسته در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کاربرد اسید اسید هومیکبر ویژگی‌های رویشی ریشه و اندام هوایی، رنگدانه‌های فتوسنتزی و جذب فسفر و پتاسیم توسط دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی بود. این پژوهش در گلخانه به‌صورت آزمایش فاکتوریل با دو فاکتور تنش خشکی در سه سطح (شاهد یا ۸۰ درصد، ۶۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) و اسید اسید هومیکدر سه سطح (شاهد، ۱ و ۲ گرم اسید اسید هومیکدر کیلوگرم خاک)، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش تنش خشکی در خاک، سطح برگ، وزن خشک برگ و ساقه، وزن خشک کل ریشه و اندام هوایی، محتوای کلروفیل و غلظت و مقدار فسفر جذب شده در ریشه و اندام هوایی کاهش یافت، درحالی‌که مقدار کاروتنوئیدها و غلظت پتاسیم در ریشه و اندام هوایی افزایش یافت. کاربرد اسید هومیک سبب افزایش معنی‌دار طول بخش هوایی (۱۷ درصد)، سطح برگ (۳۹ درصد)، وزن خشک ریشه (۳۱ درصد)، وزن خشک برگ (۱۶ درصد)، وزن خشک ساقه (۲۸ درصد)، وزن خشک کل گیاه (۱۹ درصد)، کلروفیل کل (۳۷ درصد)، کاروتنوئیدها (۱۹ درصد)، غلظت فسفر در ریشه (۱۰ درصد) و اندام هوایی (۲۳ درصد) و مقدار پتاسیم جذب شده در ریشه (۱۱ درصد) و اندام هوایی (۲۲ درصد) شد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد اسید هومیک (به‌ویژه سطح دو گرم اسید هومیک در کیلوگرم خاک) می‌تواند با بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش جذب عناصر غذایی فسفر و پتاسیم در ریشه و اندام هوایی، سبب بهبود رشد دانهال‌های پسته و افزایش بردباری آن‌ها در شرایط تنش خشکی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رشد، عناصر غذایی، کاروتنوئید، کلروفیل، کمبود آب

رشیدی ن.، معزی ع. ا.، افراسیاب راهنما ا.۱۳۹۸. تأثیر اسید هومیک بر ویژگی‌های رویشی، جذب فسفر و پتاسیم و رنگدانه‌های فتوسنتزی دانهال-های پسته تحت تنش خشکی.تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷. شماره ۳. صفحه: ۱۳۴-۱۴۹.

۱- دانشجوی دکتری علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز (مکاتبه کننده)

۳- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*پست الکترونیک: Moezzi251@gmail.com

مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) گیاهی از خانواده *Anacardiaseae* و یکی از مهم‌ترین محصولات باغی ایران بوده و محصول عمده صادراتی کشاورزی ایران است (FAO, 2012). بخش عمده باغ‌های پسته ایران در نواحی خشک استان کرمان قرار دارد و خشکی، رشد و عملکرد درختان و تولید پسته در این مناطق را تحت تأثیر قرار داده است (Akbarpour *et al*., 2016; Esmaeilpour *et al*., 2016). تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی بوده که سبب کاهش عملکرد زیستی گیاهان می‌شود. حدود ۹۰ درصد از اراضی ایران در مناطق خشک و نیمه خشک قرار داشته که در بیش‌تر این نواحی مقدار بارندگی کم، تبخیر و تعرق زیاد و آب قابل دسترس کم می‌باشد. منابع آب در نواحی مرکزی فلات ایران در نتیجه برداشت بی رویه از منابع آب زیر زمینی و خشکسالی‌های شدید درسال‌های اخیر به‌شدت کاهش یافته است. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌باشد (Ghorchiani *et al*., 2018).

تنش خشکی می‌تواند با افزایش غلظت اتیلن و تخریب سیستم فتوسنتز رشد گیاهان را کاهش دهد (Delshadi *et al*., 2017). کاهش در شدت فتوسنتز خالص، کاهش هدایت روزنه‌ها، کم شدن کارآیی مصرف آب و کاهش مقدار کلروفیل گیاهان از جمله پیامدهای تنش خشکی می‌باشند. تنش خشکی به سیستم حمل و نقل الکترون نیز آسیب می‌رساند (Pizzeghello *et al*., 2013). تنش خشکی سبب ایجاد تنش اکسیداتیو و پیدایش گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند رادیکال اکسیژن ($O_2^{\bullet-}$)، رادیکال هیدروکسیل ($HO^{\bullet}$) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در گیاهان می‌شود. گونه‌های فعال اکسیژن سبب پراکسیداسیون لیپید، آسیب غشای یاخته‌ای و دگرگونی سوخت و ساز بیوشیمیایی یاخته‌ها و در پایان کاهش رشد گیاه می‌شوند (Pizzeghello *et al*., 2013; Aguiar *et al*., 2015). گیاهان دارای سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی از جمله آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز و گالاتیون ردوکتاز بوده و هم‌چنین سیستم دفاعی غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدانی هستند. در شرایط تنش‌های مختلف، سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاهان فعال شده و سلول‌ها را از تنش‌های اکسیداسیونی محافظت می‌نمایند (Aguiar *et al*., 2015). کاهش رشد و اختلال در ویژگی‌های بیوشیمیایی و تغذیه درختان پسته در شرایط کمبود آب توسط پژوهش‌گران گوناگون گزارش شده است (Ghasemi *et al*., 2013; Esmaeilpour *et al*., 2016). برای نمونه قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al*., 2013) گزارش کردند تنش خشکی سبب کاهش رشد و مقادیر کلروفیل ارقام مختلف دانهال‌های پسته شد. فهیمی خویردی و شمشیری (Fahimi Kuyerdi & Shamshiri, 2016) نیز کاهش وزن خشک و کاهش مقادیر کلروفیل‌های *a*، *b* و کلروفیل کل ارقام پایه‌ای پسته اهلی را در شرایط تنش خشکی گزارش کردند. امروزه کاربرد اسید هومیک برای بهبود رشد گیاهان و هم‌چنین افزایش بردباری آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است (Ozfidan-Konakci *et al*., 2018). استفاده از ترکیبات آلی مانند هیومیک اسید می‌تواند بسیاری از فرآیندهای ریخت‌شناسی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و استفاده از اسید هومیک یکی از روش‌های مناسب در افزایش بردباری گیاهان در برابر تنش‌های محیطی است (Ozfidan-Konakci *et al*., 2018). هیومیک اسید از مولکول‌های طبیعی آلی و حاصل تجزیه میکروبی مواد آلی بوده که هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد گیاهی و جذب عناصر غذایی توسط گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Orsi, 2014; Aguiar *et al*., 2015). نتایج مطالعات نشان داده که اسید هومیک از یک سو با توان بالای کلات‌کنندگی می‌تواند در بهبود فراهمی عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، آهن و روی به‌ویژه در خاک‌های قلیایی و آهکی مؤثر باشد (Ozfidan-Konakci *et al*., 2018; Ozdamar Unlu *et al*., 2011). از سوی دیگر همانند یک مخزن عمل کرده و عناصر غذایی خاک را جذب نموده و آن‌ها را به‌موقع در اختیار ریشه گیاهان قرار دهد که بدین ترتیب می‌تواند شرایط مناسبی برای رشد گیاهان را فراهم سازد (Turan *et al*., 2011). اسید هومیک می‌تواند با بهبود ساختمان خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک به‌ویژه در خاک‌های با درصد رس کم به نگه‌داری آب در خاک کمک نموده و سبب بهبود جذب آب توسط گیاهان شود. این ویژگی سبب شده تا کاربرد اسید

هومیک در شرایط تنش خشکی و در خاک‌های مناطق خشک مورد توجه قرار بگیرد (Asik *et al.*, 2009; Ozfidan-Konakci *et al.*, 2018). هم‌چنین مشاهده شده است که در شرایط تنش خشکی کاربرد اسید هومیک سبب بهبود فعالیت آنتی اکسیدانی و سیستم دفاعی گیاه و در نتیجه افزایش بردباری گیاه در برابر تنش شده است. کاربرد اسید هومیک سبب بهبود فعالیت آنتی اکسیدانی نیشکر و افزایش رشد آن در شرایط تنش خشکی شد (Aguiar *et al.*, 2015). نتایج پژوهش کانلاس و همکاران (Canellas *et al.*, 2015) نیز نشان داد کاربرد اسید هومیک اثرات نامطلوب تنش خشکی در گیاه ذرت را کاسته و بردباری آن را در شرایط تنش خشکی می‌افزاید.

خشک بودن خاک‌های مناطق تحت کشت پسته، افزایش سطح زیر کشت این گیاه و خشکسالی‌ها در این مناطق در سال‌های اخیر موجب کاهش قابلیت دسترسی به منابع آب زیرزمینی شده است. تاکنون مطالعات چندانی در زمینه تأثیر کاربرد اسید هومیک بر ویژگی‌های رویشی و بیوشیمیایی دانهال‌های پسته و جذب عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی انجام نشده است. بنابراین به‌منظور بررسی کاربرد اسید هومیک در ویژگی‌های رویشی و رنگدانه‌های فتوسنتزی دانهال‌های پسته و هم‌چنین جذب عناصر غذایی فسفر و پتاسیم توسط آن‌ها در شرایط تنش خشکی این پژوهش انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثرات اسید هومیک بر ویژگی‌های رویشی دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی، آزمایشی گلدانی در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان انجام شد. این پژوهش، به صورت آزمایش فاکتوریل، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. اسید هومیک در سه سطح شامل صفر (شاهد)، یک (HA_1) و دو گرم هومیک اسید بر کیلوگرم خاک (HA_2) و تنش خشکی در سه سطح شامل۸۰ درصد ظرفیت زراعی (به‌عنوان تیمار شاهد) و ۶۰ (تنش متوسط) و ۴۰ درصد (تنش شدید) ظرفیت زراعی بود. در این پژوهش برای تیمار هومیک اسید از منبع پودر هیومکس (شامل ۸۰ درصد هیومیک اسید و ۲۰ درصد فولویک اسید) استفاده شد. خاک مورد استفاده برای انجام این آزمایش از منطقه ماهان و از افق سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) نمونه‌برداری شد. پس از هواخشک کردن خاک و عبور از الک دو میلی‌متری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Carter & Gregorich, 2008). خاک مورد مطالعه دارای بافتی لوم شنی و pH آن در محدوده خاک‌های آهکی بود (جدول ۱). هم‌چنین ویژگی‌های آب استفاده شده برای آبیاری گلدان‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱-برخی ویژگی‌های فیزیکی وشیمیایی خاک استفاده شده

Table 1. Some physical and chemical properties of the used soil

EC	pH	Potassium	Phosphorus	CCE	Organic carbon	FC	Clay	Silt	Sand
$dS\ m^{-1}$		$mg\ kg^{-1}$				%			
2.7	7.7	122	7	23	0.1	14.5	6	34	60

جدول ۲- ویژگی‌های آب استفاده شده در این پژوهش

Table 2. Properties of the water used for the study

EC ($dS\ m^{-1}$)	pH	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
		$meq\ L^{-1}$					
0.65	7.8	2.2	0	3.1	3.2	2.6	1.1

برای جلوگیری از تنش تغذیه‌ای و با توجه به نتایج آزمون خاک و حدود بحرانی، عناصر غذایی نیتروژن، پتاسیم و فسفر مورد نیاز به خاک اضافه شد. بر اساس نتایج آزمون خاک ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک از منبع اوره، فسفر و پتاسیم از منبع فسفات پتاسیم به‌مقدار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به‌صورت محلول به هر گلدان اضافه شد. اسید هومیک مورد نظر به میزان تیمارهای مربوطه با خاک گلدان‌ها

مخلوط شد. بذرهای پسته پس از ضدعفونی توسط قارچ‌کش بنومیل (دو گرم در لیتر)، ابتدا جوانه دار شده، سپس درون پارچه مرطوب و در درجه حرارت مناسب به مدت ۴۸ ساعت برای جوانه‌دار شدن نگه‌داری شدند. شش عدد بذر جوانه‌زده در گلدان‌های پلاستیکی (به قطر ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر) کشت شدند و با آب با EC برابر ۰/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری انجام شد. سپس تعداد گیاهچه‌ها در هر گلدان در هفته دوم به چهار بوته و در هفته چهارم به دو بوته کاهش یافت. گلدان‌ها در گلخانه و در شرایط روشنایی ۱۵ ساعت و نه ساعت تاریکی، رطوبت نسبی ۳ ± ۴۰ درصد و درجه حرارت ۵ ± ۲۵ درجه سلسیوس نگه‌داری شدند. یک ماه پس از جوانه‌زنی بذرها، تیمارهای خشکی (سه سطح تیمار خشکی شامل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به تدریج اعمال شد و اعمال تیمارها برای ایجاد تنش خشکی به مدت هشت ماه ادامه داشت. اعمال تیمار خشکی بر اساس رطوبت ظرفیت زراعی و به روش وزنی انجام شد. بدین ترتیب که پس از تعیین ظرفیت زراعی، با توجه به اینکه ظرفیت زراعی در خاک مورد مطالعه ۱۴/۵ درصد بود. مقدار آب لازم به ازای هر کیلوگرم خاک در سطوح مختلف تنش خشکی (به‌صورت درصدی از ظرفیت زراعی، شامل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) محاسبه شد و مقدار آب لازم در هر کدام از تیمارها اضافه شد. سرانجام پس از پایان دوره رشد، اندام هوایی بوته‌ها از محل طوقه قطع شد. ویژگی‌های رویشی شامل طول اندام هوایی با استفاده از خط کش و سطح برگ‌ها با استفاده از دستگاه Leaf area meter اندازه-گیری شد. پس از شستشو با آب مقطر، اندام هوایی (برگ و ساقه) به مدت ۴۸ ساعت در درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس در آون قرار داده شد تا خشک شوند. سپس وزن خشک زیست توده هوایی اندازه‌گیری شد. هم‌چنین ریشه‌ها نیز از بستر کاشت با دقت کامل جدا شده و پس از شستشو با آب مقطر، طول محور اصلی ریشه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. سپس طول کل ریشه با استفاده از دستگاه اسکنر اندازه‌گیری شد. در پایان نیز ریشه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس در آون قرار داده شدند و وزن خشک ریشه‌ها اندازه‌گیری شد. کلروفیل‌ها و کارتنوئیدها به‌روش آرنون (Arnon, 1949) و استخراج با استون ۸۰ درصد و توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شدند. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر فسفر و پتاسیم در ریشه و اندام هوایی از روش خاکستر هضم خشک استفاده شد. بدین ترتیب که نمونه‌های آون خشک شده آسیاب شده و سپس در کوره و در دمای ۵۵۰ درجه خاکستر شدند. سپس عصاره‌گیری با استفاده از اسید کلریدریک دو نرمال انجام شد (Carter & Gregorich, 2008). غلظت پتاسیم در نمونه‌های گیاهی به‌روش نشر شعله‌ای و با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر در نمونه‌ها به روش رنگ-سنجی و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار فسفر و پتاسیم جذب شده در ریشه و اندام هوایی در هر یک از نمونه‌ها از حاصلضرب وزن خشک در غلظت آن‌ها محاسبه شد. تجزیه‌های آماری داده‌ها، به‌وسیله نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص‌های رویشی بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش خشکی، اسید هومیک و برهم‌کنش آن‌ها بر ارتفاع بخش هوایی معنی‌دار ($P\leq ۰/۰۱$) بود (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش شدت تنش خشکی، ارتفاع بخش هوایی گیاه در همه تیمارها به‌طور معنی-داری کاهش یافت (جدول ۴). در همه سطوح تنش خشکی، ارتفاع بخش هوایی در تیمارهای HA_1 و HA_2 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد (بدون افزودن اسید هومیک) بود. به‌طور میانگین، افزودن یک و دو گرم اسید هومیک بر کیلوگرم خاک ارتفاع بخش هوایی را نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۴ و ۱۷/۲ درصد افزایش داد. اگرچه در سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف بین ارتفاع بخش هوایی در تیمارهای HA_1 و HA_2 معنی‌دار نبود، اما در شرایط تنش خشکی ارتفاع بخش هوایی در تیمار HA_1 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار HA_2 بود. اثر تنش خشکی، اسید هومیک و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های رویشی بخش هوایی شامل وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه و وزن خشک کل معنی‌دار بود (جدول ۳). وزن خشک برگ، ساقه و

وزن خشک بخش هوایی در اثر افزایش شدت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کردند. به‌طوری که وزن خشک بخش هوایی در رطوبت ۴۰ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با ۸۰ درصد ظرفیت زراعی در تیمارهای شاهد، HA_1 و HA_2 به‌ترتیب ۶۰/۵، ۵۷/۹ و ۴۸/۳ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان داد که کاهش وزن خشک در تیمارهای کاربرد اسید هومیک کم‌تر از تیمار شاهد بود. در هر سه سطح رطوبتی کاربرد هر دو سطح اسید هومیک سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک برگ، ساقه و وزن خشک کل اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد شد. به‌طوری‌که وزن خشک برگ در تیمارهای HA_1 و HA_2 به‌ترتیب ۴/۸ و ۱۶/۲ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود. این در حالی است که کاربرد سطوح یک (HA_1) و دو گرم اسید هومیک (HA_2) بر کیلوگرم خاک سبب افزایش ۱۷/۸ و ۲۸/۳ درصدی وزن خشک ساقه و هم‌چنین افزایش ۱۰ و ۱۸/۷ درصدی وزن خشک کل بخش هوایی شد. این نتایج نشان دهنده اثر مثبت کاربرد اسید هومیک در بهبود رشد رویشی بخش هوایی دانهال‌های پسته بود.

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر اسید هومیک و خشکی بر ویژگی‌های رویشی بخش هوایی گیاه

Table 3. Variance analysis of humic acid and Drought Stress effects on shoot growth characteristics

Source of variation	Degree of freedom	Mean Square				
		Shoot length	Leaf area	Leaf dry weight	Shoot dry weight	Stem dry weight
Drought	2	198**	116207**	10.179**	37.96**	8.967**
Humic acid	2	23.054**	17740**	0.449**	1.728**	0.466**
Drought × Humic acid	4	3.826*	8537**	0.095**	0.165**	0.055*
Error	18	0.947	1268	0.005	0.023	0.017

** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

* and ** are significant at 5% and 1% probability levels, respectively

تنش خشکی سبب کاهش فشار آماس و در نتیجه کاهش رشد و توسعه سلول‌ها می‌شود (Bhatt & Srinivasa-Rao, 2005) کاهش سطح برگ و به دنبال آن کاهش فتوسنتز از جمله دلایل کاهش رشد ساقه در شرایط تنش خشکی می‌باشند (Bhatt & Srinivasa-Rao, 2005). هم‌چنین تنش آبی در گیاه هدایت روزنه‌ها را کاهش می‌دهد که این امر منجر به کاهش CO_2 در درون برگ و در نتیجه کاهش شدت فتوسنتز و کاهش تقاضا برای عناصر غذایی می‌گردد. از دیگر دلایل کاهش رشد گیاه در این پژوهش می‌توان به کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (جدول ۸) و هم‌چنین کاهش سطح برگ (جدول ۴) اشاره کرد. آب و عناصر غذایی در بافت‌های گیاهان با هم وجود دارند و در ارتباط با یکدیگرند، زیرا یون‌های غذایی در محلول خاک حل شده و جذب عناصر غذایی بستگی به جریان پیوسته آب از طریق خاک-ریشه-ساقه دارد (Burd *et al*., 2010). بنابراین تنش آبی احتمالاً با کاهش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه و در نتیجه کاهش جذب آن توسط گیاه رشد آن را کاهش داده است. به‌طور مشابه با این پژوهش سرچشمه‌پور و همکاران (Sarcheshmehpour *et al*., 2013) نیز کاهش رشد و وزن خشک پسته را در شرایط تنش خشکی گزارش کردند. یافته‌های سایر پژوهش‌گران نیز نشان داده که شاخص‌های رویشی بخش هوایی دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی کاهش می‌یابد (Maleki Kuhbanani & Karimi, 2013 ;Shool *et al*., 2014). از آنجایی که هیومیک اسید ویژگی شبه هورمونی دارد و در این پژوهش سبب افزایش طول و رشد ریشه شد (جدول ۶)، بنابراین اسید هومیک با افزایش رشد ریشه و افزایش جذب عناصر غذایی فسفر و پتاسیم (جدول ۱۰ و شکل ۲ و ۳) در افزایش رشد اندام هوایی موثر بوده است. بالا بودن ظرفیت تبادلی کاتیونی اسید هیومیک و اثرات مفید آن بر جمعیت و فعالیت میکروبی می‌تواند سبب بهبود فراهمی عناصر غذایی برای گیاهان شود (Aguiar *et al*., 2015; Amini *et al*., 2017). هم‌چنین یکی دیگر از ویژگی‌های مواد هیومیک ذخیره رطوبت در خاک است. بنابراین اسید هومیک در شرایط تنش خشکی می‌تواند در تأمین رطوبت برای گیاه موثر باشد. بیش‌تر بودن مقدار کاروتنوئیدها در تیمارهای اسید هومیک نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل تعدیل تنش

خشکی و بهبود رشد رویشی در این تیمارها باشد (جدول ۷). کاروتنوئیدها در شرایط تنش‌های اکسیداتیو به عنوان یک سیستم حفاظتی عمل کرده و می‌توانند با دریافت انرژی زیاد از طول موج‌های کوتاه و گرفتن رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاه اثرات سمی آن‌ها در گیاهان را در شرایط تنش‌های محیطی کاهش دهند (Ferrara *et al.*, 2008).

جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر سطوح گوناگون اسید هومیک و خشکی بر ویژگی‌های رویشی بخش هوایی

Table 4. Mean comparison of humic acid and drought effects on shoot growth characteristics

Drought levels	Humic acid levels			Mean
	Control	HA_1	HA_2	
80% F.C.	21.67 [b]	24.00 [a]	25.83 [a]	23.83 A
60 % F.C.	17.46 [cd]	20.53 [b]	18.53 [c]	18.84 B
40 % F.C.	12.73 [f]	14.57 [e]	16.40 [d]	14.57 C
Mean	17.28 C	19.7 A	20.25 A	
Leaf area (cm^2)				
80% F.C.	265.39 [c]	316.82 [b]	381.41 [a]	321.21 A
60 % F.C.	140.67 [de]	148.82 [de]	154.49 [d]	147.99 B
40 % F.C.	76.49 [f]	83.56 [f]	137.40 [e]	99.15 C
Mean	160.85 C	183.33 B	224.43 A	
Leaf dry weight (g $plant^{-1}$)				
80% F.C.	3.95 [b]	4.12 [a]	4.17 [a]	4.08 A
60 % F.C.	2.52 [d]	2.59 [d]	2.82 [c]	2.64 B
40 % F.C.	1.70 [f]	1.83 [e]	2.48 [d]	2.00 C
Mean	2.72 C	2.85 B	3.16 A	
Stem dry weight (g $plant^{-1}$)				
80% F.C.	2.93 [a]	3.50 [a]	3.37 [a]	3.26 A
60 % F.C.	1.99 [c]	2.10 [bc]	2.47 [b]	2.19 B
40 % F.C.	1.02 [e]	1.38 [de]	1.42 [d]	1.27 C
Mean	1.98 B	2.33 A	2.54 A	
Shoot dry weight (g $plant^{-1}$)				
80% F.C.	6.88 [b]	7.62[a]	7.54 [a]	7.35 A
60 % F.C.	4.51 [d]	4.69 [d]	5.29 [c]	4.83 B
40 % F.C.	2.72 [g]	3.21 [f]	3.90 [e]	3.28 C
Mean	4.70 C	5.17 B	5.58 A	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($P\leq ۰/۰۵$) ندارند.

Means similar letter(s) are not significantly different, according to the Duncan's -test at 5% probability level.

اثر مثبت کاربرد اسید هومیک در افزایش رشد سایر گیاهان در شرایط تنش خشکی توسط سایر پژوهش‌گران گزارش شده است (Canellas *et al.*, 2015; Aguiar *et al.*, 2015). شاخص سطح برگ نیز تحت تأثیر عوامل تنش خشکی و اسید هومیک و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش شدت تنش خشکی شاخص سطح برگ در همه تیمارها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۴). در همه سطوح تنش خشکی، سطح برگ در تیمار شاهد (بدون افزودن اسید هومیک) کم‌تر از تیمارهای HA_1 و HA_2 (جدول ۴). هرچند که اختلاف بین مقدار سطح برگ در تیمار شاهد و HA_1 در شرایط تنش خشکی از نظر آماری معنی‌دار نبود. به‌طور میانگین در تیمارهای یک و دو گرم اسید هومیک بر کیلوگرم خاک سطح برگ در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۳/۹۷ و ۳۹/۵۳ درصد بیش‌تر بود. کاهش سطح برگ در شرایط تنش خشکی به‌دلیل اختلال در فتوسنتز و آسیب کلروپلاست و در نتیجه کاهش گستردگی برگ‌ها به‌عنوان راهکاری برای بردباری به تنش خشکی می‌باشد (Madadi & Fallah 2017). احتمالاً کاهش سطح برگ و به‌دنبال آن کاهش وزن خشک برگ در شرایط تنش خشکی به دلیل کاهش محتوای نسبی آب و متعاقبا کوچک شدن اندازه سلولها، کاهش تقسیم سلول‌های مریستمی و در نتیجه کند شدن رشد برگ،

توقف تولید برگ، تسریع پیری و متعاقب آن ریزش برگ‌ها می‌باشد (Osuagwu *et al*., 2010). هم‌چنین کاهش سطح برگ در اثر تنش خشکی یک راهکار برای کاهش اتلاف آب و تعرق، انتشار دوباره مواد غذایی در گیاه و در نتیجه افزایش مقاومت گیاهان در برابر خشکی می‌باشد (Munne-Bosch & Alegre, 2004).

شاخص‌های رویشی ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی خشکی و اسید هومیک بر طول و وزن خشک ریشه اصلی، وزن خشک ریشه‌های فرعی و وزن خشک ریشه معنی‌دار ($P\leq$۰/۰۱) بود (جدول ۵). هم‌چنین اثر متقابل خشکی و اسید هومیک بر طول ریشه اصلی معنی‌دار بود، در حالی‌که اثر متقابل آن‌ها بر سایر شاخص‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار طول و وزن خشک ریشه اصلی شد (جدول ۶). هم‌چنین مقادیر طول و وزن خشک ریشه اصلی در سطح رطوبتی % 60 F.C. به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سطح رطوبتی % 40 F.C. بود. کاربرد اسید هومیک سبب افزایش معنی‌دار طول و وزن خشک ریشه اصلی شد. به‌طوری‌که به‌طور میانگین کاربرد سطوح یک و دو گرم اسید هومیک بر کیلوگرم خاک طول ریشه اصلی را به‌ترتیب ۱۲/۶ و ۲۱/۳ درصد و وزن خشک ریشه اصلی را ۱۶/۴ و ۲۹/۹ درصد افزایش داد (جدول ۶). اگرچه در شرایط بدون تنش اختلاف بین مقادیر طول و وزن خشک ریشه اصلی در تیمارهای HA_1 و HA_2 معنی‌دار نبود. اما در شرایط تنش خشکی مقادیر این دو شاخص در تیمار HA_2 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار HA_1 بود. وزن خشک ریشه‌های فرعی نیز در شرایط تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۶). این کاهش در تیمار شاهد (بدون کاربرد اسید هومیک) بیش‌تر از تیمارهای کاربرد اسید هومیک بود. کاربرد اسید هومیک سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه‌های فرعی شد. بدین ترتیب که وزن خشک ریشه‌های فرعی در تیمار HA_2 در مقایسه با تیمار شاهد ۲۹/۶ درصد بیش‌تر بود. افزایش رشد و وزن خشک ریشه در اثر کاربرد اسید هومیک را می‌توان به افزایش جذب عناصر غذایی فسفر و پتاسیم در ریشه دانهال‌ها در تیمارهای کاربرد اسید هومیک نسبت داد (جدول ۱۱). هم‌چنین مطالعات نشان داده که اسید هومیک با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هم‌چنین افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌تواند در افزایش رشد ریشه در شرایط تنش خشکی نقش موثری داشته باشد (Orsi, 2014; Aguiar *et al*., 2015). با افزایش تنش خشکی طول ریشه و وزن خشک ریشه اصلی و ریشه‌های فرعی کاهش یافت که این کاهش احتمالاً به‌دلیل کاهش نفوذپذیری خاک در اثر تنش خشکی و به‌دنبال آن کاهش رشد و وزن خشک ریشه بود. هم‌چنین دلایل دیگری از جمله کاهش تورژسانس و صرف ATP بیش‌تر برای هیدرولیز ترکیبات اسمزی برای کاهش رشد پسته در شرایط تنش خشکی توسط پژوهش‌گران دیگر گزارش شده است (Ghasemi *et al*., 2013). نتایج پژوهش سرچشمه‌پور و همکاران (Sarcheshmehpour *et al*., 2013) نیز نشان داد رشد و حجم ریشه دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی کاهش یافت. نتایج این پژوهش با نتایج سایر پژوهش‌گران مطابقت داشت (Ghasemi et al., 2013; Fahimi & Kuyerdi, 2016).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد وزن خشک کل ریشه و هم‌چنین وزن خشک کل گیاه (مجموع وزن کل ریشه و اندام هوایی) در اثر افزایش تنش خشکی در همه تیمارها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۵ و شکل ۱). هم‌چنین کاربرد هر دو سطح اسید هومیک سبب افزایش وزن خشک ریشه و وزن خشک کل گیاه شد. هم‌چنین اختلاف بین تیمارهای کاربرد اسید هومیک در سطح رطوبتی شاهد (۸۰ درصد ظرفیت زراعی) معنی‌دار نبود اما در دو سطح رطوبتی دیگر این مقادیر در تیمار HA_1 به‌طور معنی‌داری کم‌تر از تیمار HA_2 بود. به‌طور میانگین کاربرد اسید هومیک در سطوح یک و دو گرم بر کیلوگرم وزن خشک کل ریشه را به‌ترتیب ۲۳/۴ و ۳۱/۱ درصد افزایش داد (جدول ۶). این نتایج نشان دهنده اثرات چشم‌گیر کاربرد اسید هومیک در بهبود ویژگی‌های رویشی گیاه و افزایش بردباری آن به تنش خشکی بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که نسبت وزن خشک کل ریشه به وزن خشک کل اندام هوایی در همه تیمارها با افزایش شدت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲). این روند افزایشی در تیمار شاهد بیش‌تر از تیمارهای کاربرد اسید هومیک بود. بدین ترتیب که با افزایش شدت تنش خشکی نسبت

وزن خشک ریشه به اندام هوایی در تیمارهای شاهد، HA_1 و HA_2 به‌ترتیب ۳۱، ۲۶ و ۲۶/۲ درصد افزایش یافت. هم‌چنین مقادیر این نسبت در سطوح مختلف رطوبتی در تیمارهای کاربرد اسید هومیک بیش‌تر از تیمار شاهد بود.

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر اسید هومیک و خشکی بر ویژگی‌های رویشی ریشه

Table 5. Variance analysis of humic acid and drought effects on root growth characteristics

Source of variation	Degree of freedom	Mean Square			
		Primary root length	Primary root dry weight	Secondary root dry weight	Root dry weight
Drought	2	522.437**	6.943**	6.928**	27.451**
Humic acid	2	95.182**	3.905**	0.332**	6.395**
Drought × Humic acid	4	12.192**	0.273ns	0.003ns	0.304ns
Error	18	3.964	0.037	0.012	0.059

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

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

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف اسید هومیک و خشکی بر ویژگی‌های رویشی ریشه

Table 6. Mean comparison of humic acid and drought effects on root growth characteristics

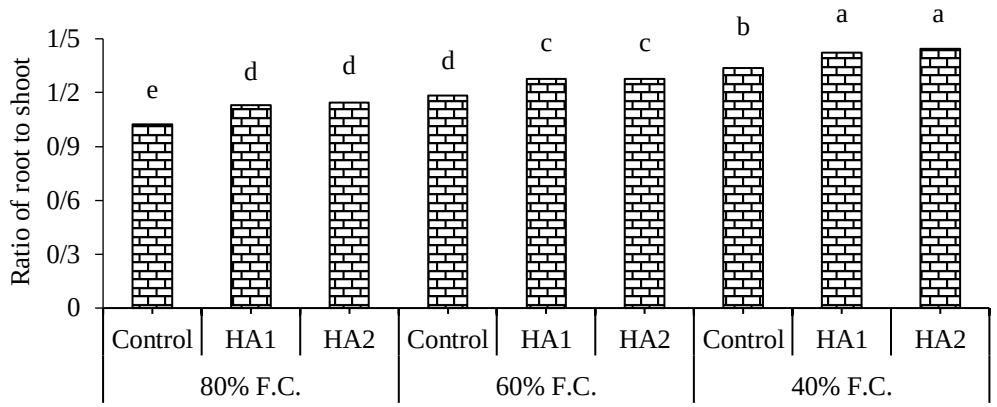
Drought levels	Humic acid levels			Mean
	Control	HA_1	HA_2	
Primary root length (cm)				
80% F.C.	38.66 b	46.67 a	45.70 a	43.68 A
60 % F.C.	30.33 de	33.33 cd	36.00 bc	33.22 B
40 % F.C.	26.33 f	27.33 ef	33.33 cd	28.99 C
Mean	31.77 C	35.78 B	38.34 A	
Primary root dry weight (g seedling^{-1})				
80% F.C.	4.92 b	6.14 a	6.11 a	5.72A
60 % F.C.	4.33 d	4.74 c	5.45 b	4.84 B
40 % F.C.	3.22 f	3.83 e	4.85 d	3.97 C
Mean	4.16 C	4.90 B	5.47 A	
Secondary root dry weight (g seedling^{-1})				
80% F.C.	2.11 b	2.47a	2.51 a	2.36 A
60 % F.C.	1.01 d	1.25 c	1.31 c	1.19 B
40 % F.C.	0.42 f	0.74 e	0.78 e	0.65 C
Mean	1.18 B	1.49 A	1.53 A	
Root dry weight (g seedling^{-1})				
80% F.C.	7.03 b	8.61 a	8.62 a	8.09 A
60 % F.C.	5.34 e	5.99 d	6.76 c	6.03 B
40 % F.C.	3.64 h	4.57 g	5.63 f	4.61 C
Mean	5.34 C	6.59 B	7.00 A	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

Means similar letter(s) are not significantly different, according to the Duncan's -test at 5% probability level

با توجه به اینکه ریشه‌ها نسبت به اندام هوایی به منبع رطوبت نزدیکتر هستند، بنابراین کمبود فشار تورگر برای توسعه اندامهای هوایی نسبت به ریشه‌ها سریع‌تر رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی را به توسعه بیشتر ریشه در مراحل اولیه رشد برای جذب آب قابل دسترس و کمبود فشار تورگر برای گسترش و توسعه اندام‌های هوایی در تیمار تنش خشکی مربوط دانست. این در حالی است که فراهمی رطوبت در تیمار شاهد سبب افزایش زیست‌توده اندامهای هوائی نسبت به ریشه و کاهش نسبت ریشه به اندام هوائی در مقایسه با شرایط تنش خشکی شده است. هم‌چنین نتایج سایر مطالعات نشان داده گیاه در شرایط تنش خشکی، ترجیح می‌دهد بیشتر تولید فتوسنتز خود را به تجمع ماده خشک در ریشه اختصاص دهد تا این‌که ماده را در ساقه و اندام هوایی ذخیره کند، زیرا با این کار توانایی خود برای جذب مقدار بیشتری از

آب موجود در خاک را حفظ خواهد کرد (Ozfidan-Konakci *et al*., 2018). از آن‌جایی که نسبت بالاتر ریشه به اندام‌های هوایی سبب افزایش بردباری به خشکی می‌شود، می‌توان گفت کاربرد اسید هومیک در افزایش بردباری گیاه به خشکی موثر بوده است. افزایش وزن خشک ریشه در اثر کاربرد هیومیک اسید می‌تواند به این دلیل باشد که اسید هومیک موجب افزایش کلروفیل و در پی آن افزایش فتوسنتز و ماده خشک گیاه شد (جدول ۴ و ۸). هم‌چنین اسیدهیومیک احتمالاً با داشتن اثرات شبه هورمونی سبب افزایش رشد ریشه و وزن خشک ریشه شده است.



شکل ۱- اثر سطوح مختلف خشکی و اسید هومیک بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی

Figure 1. Effect of different levels of drought and humic acid on ratio of root to shoot dry weight

رنگدانه‌های فتوسنتزی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر اصلی اسید هومیک و سطوح تنش خشکی بر محتوای کلروفیل‌ها (کلروفیل a، b و کل) و کاروتنوئیدها معنی‌دار (P≤۰/۰۱) بود، اما اثر متقابل آن‌ها تنها بر کلروفیل a معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در اثر تنش خشکی مقادیر محتوای کلروفیل‌ها (کلروفیل *a*، *b* و کل) در همه تیمارها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۸). این در حالی است که در اثر تنش خشکی مقادیر کاروتنوئیدها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در همه تیمارها بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار کلروفیل‌ها به‌ترتیب در سطوح رطوبتی ۸۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. در هر سه سطح رطوبتی خاک مقادیر کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها در تیمارهای HA_1 و HA_2 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود. کاربرد سطح یک گرم بر کیلوگرم اسید هومیک مقادیر کلروفیل کل و کاروتنوئیدها را به‌طور میانگین (میانگین مقادیر در سه سطح رطوبتی خاک) به‌ترتیب ۲۷/۱ و ۱۵ درصد افزایش داد. هم‌چنین میانگین مقادیر کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در اثر کاربرد دو گرم اسید هومیک بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب ۳۶/۶ و ۱۹ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت.

کاهش محتوای کلروفیل‌ها در شرایط تنش خشکی، کاهش کارآیی استفاده از کربن و افزایش تولید اتانول و لاکتات می‌باشد. تنش خشکی، با افزایش تنفس و تولید اتیلن سبب فعالسازی آنزیم‌های مسیر کاتابولیسم کلروفیل (کلروفیلاز، پراکسیداز و لیپوکسیژناز) و به‌دنبال آن سبب تجزیه کلروفیل می‌شود (Dalal & Tripathy, 2012). از عوامل دیگر کاهش محتوای کلروفیل در هنگام مواجه گیاهان با تنش خشکی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدها و تخریب کلروفیل در اثر تنش است (Dalal & Tripathy, 2012; Lotfi *et al*., 2015). افزایش مقادیر کاروتنوئیدها در اثر تنش خشکی نشان‌دهنده نقش حفاظتی آن‌ها در شرایط تنش است. کاروتنوئیدها در شرایط تنش می‌توانند با دریافت انرژی زیاد طول موج‌های کوتاه و گرفتن رادیکال‌های اکسیژن ایجاد شده نقش آنتی اکسیدانی ایفا نمایند (Ferrara *et al*., 2008).

جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر اسید هومیک و خشکی بر کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها

Table 7. Variance analysis of humic acid and drought effects on chlorophylls and carotenoids

Source of variation	Degree of freedom	Mean Square			
		Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll a+b	Carotenoid
Drought	2	0.893**	0.736**	6.928**	0.065**
Humic acid	2	0.209**	0.471**	0.332**	0.017**
Drought × Humic acid	4	0.014**	0.002ns	0.003ns	0.001ns
Error	18	0.003	0.002	0.012	0.001

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

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

بیش‌تر بودن مقادیر کاروتنوئیدها در تیمارهای کاربرد اسید هومیک را می‌توان به اثرات مثبت اسید هومیک در بهبود متابولیسم درون سلول‌ها نسبت داد (Ferrara *et al*., 2008). فرارا و همکاران (Ferrara *et al*., 2008) نیز با انجام پژوهشی گزارش کردند که کاربرد اسید هومیک سبب افزایش رشد ریشه و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی از جمله کارتنوئیدها در برگ‌ها می‌شود.

جدول ۸- مقایسه میانگین تأثیر هومیک اسید و خشکی بر مقادیر کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها

Table 8. Mean comparison of humic acid and drought effects on chlorophylls and carotenoeids

Drought levels	Humic acid levels			Mean
	Control	HA_1	HA_2	
Chlorophyll a (mg g^{-1}FW)				
80% F.C.	1.59 c	1.82 b	1.98 a	1.80 A
60 % F.C.	1.38 d	1.55 c	1.53 c	1.49 B
40 % F.C.	0.96 f	1.23 e	1.27 e	1.15 C
Mean	1.31 B	1.53 A	1.59 A	
Chlorophyll b (mg g^{-1}FW)				
80% F.C.	1.01 d	1.29 b	1.43 a	1.24 A
60 % F.C.	0.61 e	0.98 d	1.09 c	0.89 B
40 % F.C.	0.43 h	0.74 g	0.86 f	0.68 C
Mean	0.68 C	1.00 B	1.13 A	
Chlorophyll a+b (mg g^{-1}FW)				
80% F.C.	2.60 c	3.11 b	3.41 a	3.04 A
60 % F.C.	1.99 d	2.53 c	2.62 c	2.38 B
40 % F.C.	1.39 e	1.97 d	2.13 d	1.83 C
Mean	1.99 C	2.53 B	2.72 A	
Carotenoid (mg g^{-1}FW)				
80% F.C.	0.335 d	0.409 c	0.428 c	0.391 A
60 % F.C.	0.417 c	0.468 b	0.487 b	0.457 B
40 % F.C.	0.511 b	0.576 a	0.589 a	0.559 C
Mean	0.421 B	0.484 A	0.501 A	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

Means similar letter(s) are not significantly different, according to the Duncan's -test at 5% probability level

غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی در جدول ۹ نشان داده شده است. تأثیر خشکی و اسید هومیک بر غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی معنی‌دار بود. اما اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود. افزایش تنش خشکی در خاک سبب کاهش معنی‌دار غلظت و مقدار فسفر جذب شده در ریشه و اندام هوایی شد (جدول ۱۰ و شکل ۲). غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۶/۵ و ۱۱/۲ درصد کم‌تر از تیمار شاهد (۸۰ درصد ظرفیت زراعی) بود. هم‌چنین غلظت فسفر در اندام هوایی بیشتر از ریشه تحت تاثیر تنش خشکی قرار گرفت. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده که یکی از اولین پیامدهای تنش خشکی در خاک کاهش جذب فسفر در گیاهان می‌باشد. کاهش غلظت و جذب فسفر در شرایط تنش خشکی به این دلیل است که در اثر کمبود آب

پخشیدگی فسفر و تحرک و فراهمی آن در خاک کاهش یافته و بنابراین جذب فسفر توسط گیاه کاهش می‌یابد (Salehi *et al*., 2016). عباسپور و همکاران (Abbaspour *et al*., 2012) نیز با انجام پژوهشی گزارش کردند کمبود آب و تنش خشکی سبب کاهش غلظت و مقدار فسفر جذب شده توسط دانهال‌های پسته شد. مقایسه میانگین داده‌ها در سطوح مختلف اسید هومیک نشان داد بیش‌ترین غلظت و مقدار فسفر جذب شده در ریشه و اندام هوایی مربوط به تیمار HA_2 بود (جدول ۱۰ و شکل ۲). کاربرد اسید هومیک سبب افزایش معنی‌دار غلظت و مقدار فسفر جذب شده فسفر جذب شده توسط ریشه و اندام هوایی شد.

جدول ۹- تجزیه واریانس تأثیر اسید هومیک و خشکی بر غلظت فسفر و پتاسیم در ریشه و اندام هوایی

Table 9. Variance analysis of humic acid and drought Stress effects on P and K concentrtion in root and shoot

Source of variation	Degree of freedom	Mean Square			
		Root P concentration	Shoot P concentration	Root K uptake	Shoot P uptake
Drought	2	0.005^{**}	0.047^{**}	0.110^{*}	0.191^{**}
Humic acid	2	0.013^{**}	0.125^{**}	0.039^{ns}	0.020^{ns}
Drought × Humic acid	4	0.001^{ns}	0.002^{ns}	0.005^{ns}	0.002^{ns}
Error	18	0.001	0.004	0.016	0.012

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

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

جدول ۱۰- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف هومیک اسید و خشکی بر جذب فسفر در ریشه و اندام هوایی

Table 10. Mean comparison of humic acid and drought Stress effects on P uptake in root and shoot

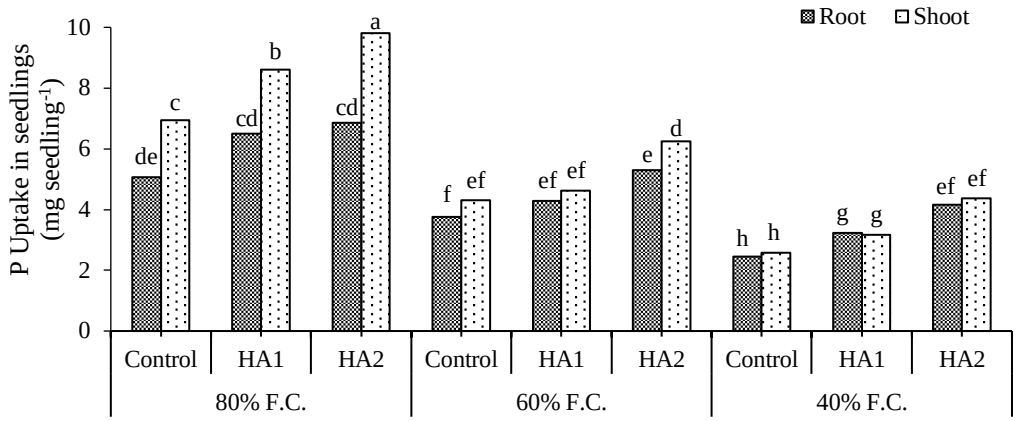
Drought levels	Humic acid levels			Mean
	Control	HA_1	HA_2	
	Root P concentration (mg g^{-1} DW)			
80% F.C.	0.721 c	0.750 b	0.795 a	0.755 A
60 % F.C.	0.702 d	0.714 c	0.783 a	0.733 B
40 % F.C.	0.674 f	0.706 e	0.739 b	0.706 C
Mean	0.699 C	0.723 B	0.772 A	
	Shoot P concentration (mg g^{-1} DW)			
80% F.C.	1.01 cd	1.13 bc	1.30 a	1.148 A
60 % F.C.	0.955 e	0.987 d	1.18 b	1.042 A
40 % F.C.	0.947 e	0.989 d	1.12 bc	1.019 B
Mean	0.974 C	1.035 B	1.20 A	
	Root K concentration (mg g^{-1} DW)			
80% F.C.	7.4 b	7.33 b	7.36 b	7.36 B
60 % F.C.	7.52 ab	7.38 b	7.42 b	7.44 AB
40 % F.C.	7.7 a	7.52 ab	7.53 ab	7.58A
Mean	7.54 A	7.41 A	7.44 A	
	Shoot K concentration (mg g^{-1} DW)			
80% F.C.	7.36 b	7.33 b	9.56 b	9.50 B
60 % F.C.	7.42 b	7.38 b	9.59 b	9.57 B
40 % F.C.	7.53 ab	7.52 ab	9.79 a	9.78 A
Mean	7.44 A	7.41 A	9.65 A	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

Means similar letter(s) are not significantly different, according to the Duncan's -test at 5% probability level

نتایج این تحقیق نشان داد با وجود بیش‌تر بودن وزن خشک ریشه و اندام هوایی در تیمارهای اسید هومیک (جدول ۴ و ۶) و به‌وجود آمدن اثر رقت در آن‌ها، اما غلظت فسفر در ریشه و اندام‌هوایی در این تیمارها بیش‌تر از تیمار شاهد بود. این نتایج نشان‌دهنده اثر چشم‌گیر اسید هومیک در افزایش جذب فسفر توسط دانهال‌های پسته بود. به‌طور کلی غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی در تیمارهای اسید هومیک بدین ترتیب بود: $HA_2 < HA_2 <$ شاهد (جدول ۹). نتایج مطالعات نشان داده اسید هومیک می‌تواند با کاهش ظرفیت

تثبیت فسفر در خاک داده و افزایش حلالیت فسفر غیرمحلول خاک سبب افزایش جذب فسفر توسط گیاهان شود (Amini *et al*., 2017). هم‌چنین از دیگر دلایل افزایش جذب بیش‌تر فسفر در تیمارهای اسید هومیک می‌توان به اثرات مثبت اسید هومیک در بهبود فعالیت جمعیت میکروبی خاک، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و هم‌چنین بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و در نتیجه افزایش قابلیت نگهداری آب اشاره کرد (Canellas *et al*., 2015). افزایش جذب فسفر می‌تواند در افزایش رشد ریشه در عمق خاک و جذب آب در شرایط تنش خشکی کمک کند. بنابراین یکی از دلایل افزایش رشد ریشه در تیمارهای اسید هومیک در این تحقیق می‌تواند مربوط به این امر باشد (جدول ۶).



شکل ۲- اثر سطوح مختلف خشکی و اسید هومیک بر مقدار فسفر جذب شده توسط دانهال‌های پسته

Figure 2. Effect of different levels of drought and humic acid on P uptake by Pistachio seedlings

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

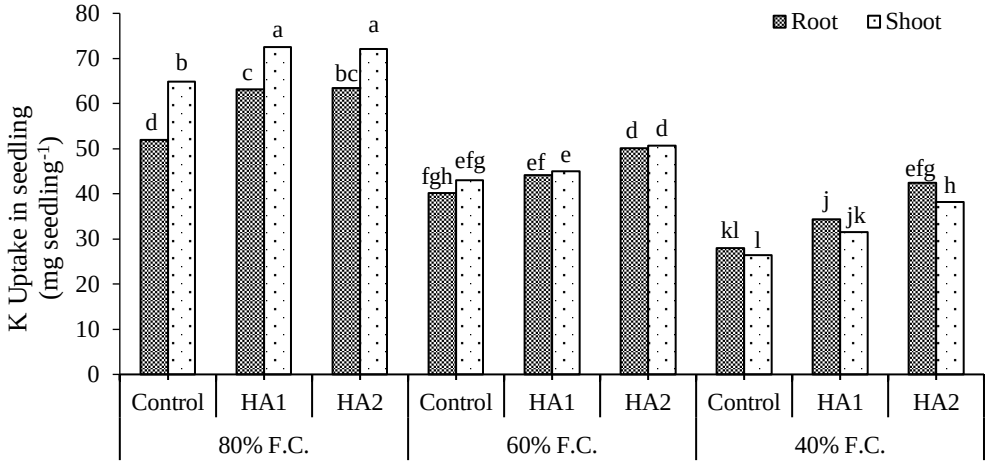
Means similar letter(s) are not significantly different level, according to the Duncan's -test at 5% probability level.

غلظت پتاسیم در ریشه و اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مشخص نمود از بین اثر اصلی تیمارهای خشکی و اسید هومیک تنها اثر اصلی خشکی بر غلظت پتاسیم ریشه و اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۹). هم‌چنین اثر متقابل خشکی و اسید هومیک بر غلظت پتاسیم در ریشه و اندام هوایی معنی-دار نبود (جدول ۹). مقایسه میانگین داده‌های غلظت پتاسیم در ریشه و اندام هوایی در تیمارهای خشکی نشان داد در اثر افزایش تنش خشکی غلظت پتاسیم در ریشه و اندام هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۱۰). نتایج مربوط به اثر اصلی سطوح اسید هومیک نشان داد اختلاف معنی‌داری میان تیمارهای اسید هومیک مشاهده نشد. اگر چه غلظت پتاسیم در اندام هوایی در تیمارهای اسید هومیک بیش‌تر از شاهد بود اما این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۱۰). این نتیجه را می‌توان به افزایش وزن خشک در تیمارهای کاربرد اسید هومیک و به‌وجود آمدن اثر رقت نسبت داد (جدول ۴). چرا که نتایج مربوط به مقدار کل پتاسیم جذب شده در ریشه و اندام هوایی در تیمارهای مختلف نشان داد که مقدار جذب پتاسیم در تیمارهای کاربرد اسید هومیک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۳). بیش‌تر بودن جذب پتاسیم در تیمارهای اسید هومیک را می‌توان به رشد و گستردگی بیش‌تر ریشه در این تیمارها و در نتیجه افزایش جذب پتاسیم، نسبت داد (جدول ۶). هم‌چنین نتایج مطالعات نشان داده اسید هومیک به‌دلیل ویژگی کلات کنندگی می‌تواند در افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک موثر باشد (Ozdamar ;Ozfidan-Konakci *et al*., 2018 .(Unlu *et al*., 2011

پتاسیم نقش اساسی را در تنظیم اسمزی گیاه در شرایط خشکی دارد. دلیل افزایش جذب پتاسیم در هنگام تنش خشکی جذب فعال این عنصر است. چرا که در هنگام تنش خشکی، گیاه برای افزایش بردباری به تنش و حفظ هدایت روزنه‌ای و تورژسانس و هم‌چنین تنظیم اسمزی و سنتز پروتئین، با مصرف انرژی جذب پتاسیم را در ریشه و اندام هوایی افزایش می‌دهد (Galindo *et*

al., 2017). افزایش غلظت پتاسیم در دانهال‌های ارقام مختلف پسته در شرایط تنش خشکی توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است که نشان‌دهنده نقش این عنصر برای حفظ تورژسانس در شرایط تنش خشکی می‌باشد (Maleki Kuhbanani & Karimi, 2013). شول و همکاران (Shool *et al*., 2014) نیز افزایش جذب پتاسیم توسط نهال‌های پسته را در شرایط تنش خشکی گزارش کردند. هم‌چنین شمشیری و همکاران (Shamshiri *et al*., 2015) گزارش کردند افزایش تنش خشکی سبب افزایش غلظت پتاسیم در اندام هوایی دانهال‌های پسته شد.



شکل ۳- اثر سطوح مختلف خشکی و اسید هومیک بر مقدار پتاسیم جذب شده توسط دانهال‌های پسته

Figure 3. Effect of different levels of drought and humic acid on K uptake by Pistachio seedlings

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که اگر چه تنش خشکی در خاک، ویژگی‌های رویشی ریشه و اندام هوایی و رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی دانهال‌های پسته را کاهش داد. اما کاربرد اسید هومیک سبب افزایش رشد و وزن خشک ریشه و اندام هوایی و افزایش مقدار فسفر و پتاسیم جذب شده در ریشه و اندام هوایی و هم‌چنین افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه شد. در پی کاربرد اسید هومیک پیامدهای نامطلوب تنش خشکی در گیاه کاهش یافته و بردباری گیاه در شرایط تنش خشکی بهبود یافت. با توجه به نتایج این پژوهش کاربرد اسید هومیک به‌ویژه سطح دو گرم هیومیک بر کیلوگرم خاک می‌تواند در بهبود رشد و افزایش جذب غذایی فسفر و پتاسیم توسط دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی سودمند باشد. بنابراین می‌توان کاربرد اسید هومیک را برای بهبود رشد دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی توصیه کرد.

References

Abbaspour H., Saeidi-Sar S., Afshari H. and Abdel-Wahhab M. A. 2012. Tolerance of mycorrhiza infected pistachio (*Pistacia vera* L.) seedling to drought stress under glasshouse conditions. *Journal of Plant Physiology*, 169(7): 704-709.

Akbarpour M., Khavari-Nejad R.A., Moumeni A., and Najafi F. 2016. Molecular and physiological performance in response to drought stress in Iranian rice cultivars. *Russian Journal of Plant Physiology*, 63(1): 158-165.

Amini B., Farahbakhsh M., and Kianirad M., 2017. Study on the Effects of Humic Acid-Urea Fertilizers Application on Some Agronomic Characteristics of Maize (*Zea Mays* L.). *Applied Soil Research*, 5(2): 31- 40 .(In Persian).

Asik B.B., Turan M.A., Celik H., and Katkat, A.V. 2009. Effect of humic substances to dry weigth and mineral nutrients uptake of wheat on saline soil conditions. *Asian Journal of Crop Science*, 1(2): 87-95.

Arnon D.T. 1949. Copper enzymes in isolation chloroplast phenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1-15.

Bhatt R.M., and Srinivasa-Rao N.K. 2005. Influence of pod load on response of okra to water stress. *Indian Journal Plant Physiology*, 10: 54-59.

Burd G.I., Dixon, D.G., and Glick, B.R. 2010. A plant growth-promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings. *Applied and Environmental Microbiology*, 64: 3663-3668.

Canellas L.P., Silva S.F., Olk D.C., and Olivares F.L. 2015 Foliar application of plant growth-promoting bacteria and humic acid increase maize yields. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 13: 131-138.

Carter M.R., and Gregorich E.G. 2008. Soil sampling and methods of analysis (2nd ed). CRC Press. Boca Raton. FL. 1204p.

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.

Delshadi S., Ebrahimi M., and Shirmohammadi E. 2017. Effectiveness of plant growth promoting rhizobacteria on Bromus tomentellus Boiss seed germination, growth and nutrients uptake under drought stress. *South African Journal of Botany*, 113: 11-18.

Esmaeilpour A., Van Labeke M.C., Samson R., Boeckx P., and Van Damme, P. 2016. Variation in biochemical characteristics, water status, stomata features, leaf carbon isotope composition and its relationship to water use efficiency in pistachio (*Pistacia vera* L.) cultivars under drought stress condition. *Scientia Horticulturae*, 211: 158-166.

Fahimi kuyerdi F., and Shamshiri, M.H. 2016. Comparison of photosystem II efficiency in four Pistachio rootstocks under drought stress using chlorophyll fluorescence technique. *Journal of Plant Process and Function*, 5 (17): 95-108. (In Persian).

FAO, O., 2012. http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx.

Ferrara G., Pacifico A., Simeone P., and Ferrara, E. 2008. Preliminary study on the effects of foliar applications of humic acids on 'Italia' table grape. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 42: 79-87.

Galindo A., Collado-González J., Griñán I., Corell M., Centeno A., Martín-Palomo M. J., Girón I. F., Rodríguez P., Cruz Z. N., Memmi H. and Carbonell-Barrachina A. A. 2017. Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. Agricultural Water Management. *Agricultural Water Management*, 202: 311-324.

Ghasemi M., Arzani K., Yadollahi A., and Hokmabadi H., 2013. Effect of drought stress on fluorescence, chlorophyll content and indices of four Pistachio Seedlings. *Water Research in Agriculture*, 27(4): 475-485. (In Persian).

Ghorchiani M., Etesami H., and Alikhani. H.A. 2018. Improvement of growth and yield of maize under water stress by co-inoculating an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant growth promoting rhizobacterium together with phosphate fertilizers. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 258: 59-70.

Lotfi R., Gharavi-Kouchebagh P., and Khoshvaghti H. 2015. Biochemical and physiological responses of Brassica napus plants to humic acid under water stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 62(4): 480-486.

Madadi E., and Fallah S. 2017. Effects of jasmonic acid and humic acid to mitigate drought dtress Effect during pollination of forage Maize. *Journal of Water and Soil*, 31(5): 1396-1408. (In Persian)

Maleki Kuhbanani A. and Karimi H. 2013. An evaluation of the resistance of Pistachio rootstocks and one inter-spicific hybrid, *P. atlantica* × *P. vera cv.* 'Badami- Riz- Zarand' against drought Stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 44(1): 81-93. (In Persian).

Munne-Bosch S., and Alegre L. 2004. Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. *Functional Plant Biology*, 31: 203-216.

Orsi M. 2014. Molecular dynamics simulation of humic substances. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1: 10.

Osuagwu G. G. E., Edeoga H. O., and Osuagwu A. N. 2010. The influence of water stress (drought) on the mineral and vitamin potential of the leaves *Ocimum gratissimum* L. *Recent Research in Science and Technology*, 2: 27-33.

Ozdamar Unlu H., Unlu H., Karakurt Y., and Padem, H. 2011. Changes in fruit yield and quality in response to foliar and soil humic acid application in cucumber. *Scientific Research and Essays*, 6: 2800-2803.

Ozfidan-Konakci C., Yildiztugay E., Bahtiyar M., and Kucukoduk M. 2018. The humic acid-induced changes in the water status, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense systems of wheat leaves with cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 155: 66–75.

Pizzeghello D., Francioso O., Ertani A., Muscolo A., and Nardi, S., 2013. Isopentenyladenosine and cytokinin-like activity of different humic substances. *Journal of Geochemical Exploration*, 129: 70–75.

Salehi A., Tasdighi H., Gholamhoseini M. 2016. Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(10): 886–891.

Sarcheshmehpour M., Savaghebi G. R., Siadat H., Alikhani H. A. 2013. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on improvement of nutrition and growth of Pistachio Seedlings under drought Stress. *Iranian Journal of Soil Research*, 27(1): 107-119. (In Persian)

Shamshiri M., Hasani M., Karimi H., and Esmaail Zadeh M. 2015. Effect of arbuscular mycorrhizae and salicylic acid on nutrient elements content of abareqi pistachio seedling under drought stress. *Journal of Plant Productions*, 38(1): 75-89.

Shool A., Shamshiri M., Akhgar A., Esmaeilizadeh M. 2014. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and Pseudomonas fluorescence on vegetative growth of pistachio seedlings (*Pistacia vera* cv. *Qazvini*) under four different irrigation regimes. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 45(3): 297-307. (In Persian).

Turan M.A, Asik B.B., Katkat A.V., and Celik H. 2011. The effects of soil-applied humic substances to the dry weight and mineral nutrient uptake of maize plants under soil salinity conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39: 171-177.

Effect of Humic Acid on Growth Characteristics, Phosphorous and Potassium Uptake and Photosynthesis Pigments of Pistachio Seedlings under Drought Stress

Naser Rashidi[1], Abdoilamir Moezzi[2*], Afrasyab Rahnama[۳]

(Received: April 2018 Accepted: July 2018)

Abstract

Water deficit is the main growth-limiting factor for pistachio (*Pistacia vera* L.) production in semiarid and arid soils of Iran. The objective of this study was to evaluate the effect of humic acid application on root and shoot growth characteristics, phosphorus (P) and potassium (K) uptake and photosynthetic pigments of *P. vera* L. seedlings under drought stress condition. This study was carried out in greenhouse condition as a factorial experiment based on a randomized complete block design with two factors including drought stress (in three levels: 80% (control), 60% and 40% of field capacity moisture content) and humic acid (in three levels including control, 1 g HA kg^{-1} soil and 2 g HA kg^{-1} soil) in three replications. Results indicated that leaf area, dry weights of leaf and stem, shoot and root dry weights, chlorophyll contents and shoot and root P content decreased by increasing of soil drought levels, while the reverse result was found in carotenoids and shoot and root K concentrations. application of humic acid leads to significant increase ($P \leq 0.05$) in shoot length (17 %), leaf area (39 %) root dry weight (31 %), leaf dry weight (16 %), Stem dry weight (28 %), total plant dry weight (19 %), total chlorophyll (37 %), carotenoids (19 %), root P concentration (10 %), shoot P concentration (23 %) and K content in root (11 %) and shoot (22 %) in all moisture levels. It can be concluded that application of humic acid (especially at level of 2 g HA kg^{-1} soil) results in improve of the plant growth properties and tolerance to drought stress due to increase of photosynthesis pigments and enhance of shoot and root P and K contents.

Keywords: Carotenoid, Chlorophyll, Growth, Nutrients, Water deficit

Rashidi N., Moezzi A. A., Rahnama A. 2019. Effect of Humic Acid on Growth Characteristics, Phosphorous and Potassium Uptake and Photosynthesis Pigments of Pistachio Seedlings under Drought Stress. *Applied Soil Research*, 7(3):134-149.

1- Ph.D Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz
2- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz
3- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz
* Corresponding Author Email: Moezzi251@gmail.com