نشریهٔ پژوهش‌های حبوبات ایران
جلد ۳، شمارهٔ ۱، صفحهٔ ۸۰-۶۷، نیمهٔ اول ۱۳۹۱

Iranian Journal of Pulses Research
Vol. 3, No. 1, 2012, p. 67-80

ارزیابی گزینش به تنش خشکی حاصل از پلی‌اتیلن‌گلیکول در محیط هیدروپونیک در دوازده ژنوتیپ نخود (*Cicer arietinum* L.)

محمد زارع مهرجردی[1*]، عبدالرضا باقری[2]، احمدرضا بهرامی[3]، جعفرنباتی[4] و علی معصومی[5]

۱- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی شیروان، دانشگاه فردوسی مشهد
۲ و ۳- به‌ترتیب عضو هیئت علمی دانشکده کشاورزی و دانشکده علوم پایه دانشگاه فردوسی مشهد
۴- دکتری فیزیولوژی زراعی، شرکت فن‌آوران بذر یکتا
۵- استادیار دانشگاه پیام‌نور

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۰۷

چکیده

تنش خشکی انتهای فصل، یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد نخود، به‌خصوص در ارقام دیررس به‌شمار می‌رود. این آزمایش با هدف مطالعهٔ تحمل به تنش خشکی در ۱۲ژنوتیپ نخود، از طریق بررسی عکس‌العمل خصوصیات ریشه و اندام‌های هوایی آن‌ها انجام شد. برای این منظور، تأثیر دو تیمار خشکی القاءشده با استفاده از پلی‌اتیلن‌گلیکول ۶۰۰۰ در سطوح ۳- و ۶- بار و یک تیمار شاهد بدون تنش در محیط هیدروپونیک بر روی ژنوتیپ‌های مورد نظر، در گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. دوهفته پس از اعمال تیمار، مقدار نسبی آب برگ، ارتفاع بوته، تعداد شاخه، طول ریشهٔ اصلی، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در ژنوتیپ‌ها اندازه‌گیری شد. شاخص‌های کمّی مقاومت و حساسیت به خشکی در ژنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد زیست‌توده محاسبه شد. نتایج نشان داد علاوه بر اختلاف معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها از نظر صفات مختلف، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار مقدار نسبی آب برگ، ارتفاع بوته، تعداد شاخهٔ جانبی و وزن خشک اندام هوایی و ریشه و نیز افزایش طول ریشه در تیمار ۳- بار نسبت به تیمار شاهد، در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه گردید. با بهره‌گیری از شاخص‌های مقاومت و ترسیم نمودار بای‌پلات و میانگین تولید زیست‌توده، ژنوتیپ‌های MCC783 وMCC877 به‌ترتیب با ۲/۸۷ و ۱/۵۴گرم بر بوته، بیشترین و کمترین میزان مقاومت به خشکی را دارا بودند. به‌طور کلی باوجود ارزیابی صفات مختلف تحمل به خشکی در شرایط هیدروپونیک و انتخاب بر اساس زیست‌توده، ژنوتیپ‌های گزینش‌شده در این شرایط، احتمالاً با ژنوتیپ‌های گزینش‌شده در شرایط طبیعی و عملکرد دانه مطابقت نداشته باشند.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات ریشه و اندام هوایی، شاخص‌های کمّی مقاومت، مقدار نسبی آب برگ، نخود

مقدمه

تنش‌های محیطی از جمله خشکی از مهم‌ترین عوامل کاهش تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌روند. در این میان گیاه زراعی نخود (*Cicer arietinum* L.) نیز که جایگاه ویژه‌ای در جیرهٔ غذایی مردم خاورمیانه دارد، از این قاعده مستثنی نبوده و از آنجا که این محصول در ایران توسط کشاورزان در اواخر زمستان و اوایل بهار و بیشتر به‌صورت دیم کشت می‌شود، به‌دلیل برخورد دورهٔ زایشی گیاه با شرایط نامناسب محیطی و کاهش نزولات جوی، به‌طور چشمگیری از عملکرد آن کاسته می‌شود (Nezami, 2001)، به‌نحوی‌که بر اساس آمار فائو (FAO, 2008)، ایران با وجود داشتن سومین سطح زیرکشت، در میان ۵۱کشور تولیدکنندهٔ نخود، از نظر میزان تولید در واحد سطح در مقام چهل‌ونهم قرار گرفته است. در ارتباط با گزینش ارقام متحمل به خشکی در نخود، مطالعات مختلفی صورت گرفته و در مواردی گزینش برای ارقام زودرس با موفقیت همراه بوده است (Kumar *et al.*, 1985; Subarao *et al.*, 1995; Kumar & Rao, 2001). در این رابطه، گرچه ارقام زودرس از ثبات عملکرد مناسبی برخوردار هستند، اما به‌علت حساسیت به کشت زمستانه و تولید زیست تودهٔ کمتر به‌علت کوتاهی دورهٔ رشد، به نسبت ارقام دیررس در سال‌هایی که میزان بارندگی مناسب باشد، عملکرد پایین‌تری

* **نویسنده مسئول:** مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده کشاورزی
همراه: ۰۹۳۵۹۹۲۶۷۲۰، mzarem1381@yahoo.com

دارند. در مجموع، استفاده از این ارقام در مناطق با آب و هوای مدیترانه‌ای و ازجمله برخی از مناطق کشور ما که دارای سال‌های پُرباران و کم‌باران است، می‌تواند به کاهش تولید منجر شود (Kumar & Shahal, 2001) . با این حال، کشت ارقام دیررس نیز مستلزم دستیابی به ارقام متحمل به خشکی است تا در سال‌های کم‌باران، در مقایسه با ارقام زودرس از عملکرد قابل‌قبولی برخوردار باشند.

راهکارهای مقاومت در برابر خشکی در گیاهان در بردارندهٔ مسیرهای فنولوژیکی، مورفولوژیکی و مولکولی مختلف است که در مواجهه با خشکی، راهکارهای فرار، اجتناب و تحمل را برای گیاه فراهم می‌سازند (Cattivelli *et al.*, 2008). شناسایی این راهکارها و خصوصیاتی که باعث بهبود عملکرد در شرایط تنش می‌شود، می‌تواند در اصلاح گیاهان مقاوم‌تر، مؤثر باشد. در این ارتباط مشخص شده که برخی از خصوصیات اندام‌های هوایی و ریشه می‌توانند در بروز این فرایندها مؤثر باشد. مطالعات بر روی ارقام نخود نشان داده ارقامی که از سطح برگ کمتری برخوردار هستند، از مقاومت به خشکی بیشتری برخوردارند (Anbessa & Bejiga, 2002). علاوه بر این مشخص شده ژنوتیپ‌هایی که از ارتفاع بوته بیشتری برخوردار هستند، از عملکرد بیشتری نیز نسبت به ژنوتیپ‌های پاکوتاه برخوردار هستند (Upadhyaya *et al.*, 2002). اصلاح برای خصوصیات اندام هوایی در نخود، باعث بهبود عملکرد شده است (Gupta, 1997). در ارتباط با ریشه نیز مطالعات نشان داده که در نخود، ژنوتیپ‌هایی که طول ریشهٔ اصلی بلندتر و تعداد ریشهٔ جانبی بیشتری دارند، از تحمل به خشکی بیشتری برخوردارند (Kashiwagi *et al.*, 2006) . به‌علاوه گزارش شده که صفت ریشه در نخود، تحت تأثیر ژن‌های با اثرات افزایشی است که گزینش در بین ژرم‌پلاسم متنوع، می‌تواند شیوهٔ خوبی برای دستیابی به ژنوتیپ‌های با سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر باشد (Kashiwagi *et al.*, 2008) .

روش‌های متفاوتی برای ارزیابی میزان مقاومت به خشکی در گیاهان مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از این روش‌ها که بر اساس مدل‌های محاسباتی، به‌منظور مقایسهٔ عملکرد در شرایط بدون تنش با شرایط تنش استوار هستند، از پتانسیل خوبی برای گزینش ارقام مقاوم به خشکی برخوردار بوده است (Ganjeali *et al.*, 2005; Reynolds *et al.*, 2007; Nazari & Pakniyat, 2010). بر اساس نتایج حاصل از تحقیق Ganjeali *et al.* (2005) شاخص‌های زیر شامل شاخص بهره‌وری متوسط(MP)، شاخص میانگین هندسی بهره‌وری(GMP)، شاخص تحمل به تنش(STI) و شاخص میانگین هارمونیک(HM)، مناسب‌ترین شاخص‌ها برای گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در نخود معرفی شده‌اند. با این حال، مقاومت به خشکی یک صفت چندژنی و بسیار متأثر از محیط است، از این رو نتایج گزینش می‌تواند تحت تأثیر عوامل و متغیرهای محیطی قرار گیرد (Piepho, 2000). در گزینش ارقام، تکرارپذیری محیط تنش برای بررسی صفات کمّی که با تنش خشکی در ارتباط هستند، حایز اهمیت است (Fussell *et al.*, 1991) به‌نظر می‌رسد که گزینش در شرایط کنترل‌شده و بررسی تأثیر هر یک از خصوصیات ارقام در میزان تحمل آن‌ها به خشکی، می‌تواند در افزایش کارایی گزینش ارقام متحمل مؤثر باشد.

مطالعه بر روی برنج (Balch *et al.*,1996; Wang *et al.*,2005) ، بادام‌زمینی (Pandey & Pendleton, 1986)، لوبیا چشم‌بلبلی (Ogbonnaya *et al.*, 2003) و یونجه (Safarnejad, 2008) نشان داده که گزینش برای تحمل به خشکی در شرایط هیدروپونیک، می‌تواند به عنوان یک روش سریع و باارزش مطرح باشد. کشت در این شرایط علاوه بر این‌که امکان کنترل شدت تنش با استفاده از اُسمولیتی نظیر PEG را فراهم می‌سازد، محیط یکنواختی را از نظر مواد غذایی ایجاد می‌کند.

بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی نقاط ضعف و قدرت گزینش برای تحمل به خشکی در محیط هیدروپونیک با استفاده از پلی‌اتیلن‌گلیکول، بر اساس معیار گزینشی عملکرد زیست‌توده و بررسی تنوع ژنتیکی ژنوتیپ‌های نخود مورد مطالعه، از نظر خصوصیات اندام هوایی و ریشه و تأثیر این خصوصیات بر روی مقاومت به خشکی صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

بر اساس نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای Saxena *et al.*(1993)، Sedaghatkhahi (2007) و Ganjeali *et al.* (2009)، دوازده ژنوتیپ نخود متنوع از لحاظ مقاومت به خشکی، انتخاب و بذر آن‌ها از بانک بذر حبوبات پژوهشکدهٔ علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد، تهیه شد (جدول۱). بذرهای سالم و بدون شکستگی ژنوتیپ‌ها، پس از شستشوی سطحی با آب، به‌مدت سه‌روز بر روی کاغذ صافی مرطوب‌شده با آب در پتری‌دیش‌های با قطر نُه‌سانتی‌متر، به‌مدت یک‌هفته جوانه‌دار شدند. این گیاهچه‌ها به‌منظور رشد و اِعمال تیمار در هفتهٔ آخر اسفندماه به محیط هیدروپونیک در گلخانه در شرایط دمای متوسط ۲۵درجهٔ سانتی‌گراد منتقل شدند. سیستم هیدروپونیک مورد استفاده، شامل لوله‌هایی از جنس

پلی‌ونیل‌کلراید (PVC) با قطر شِش‌سانتی‌متر و طول ۱/۵متر بود که با فاصلهٔ ۵۰سانتی‌متری از یکدیگر به‌صورت افقی قرار گرفته بودند. بر روی این لوله‌ها حفره‌هایی با فاصلهٔ ۱۰سانتی‌متر از یکدیگر تعبیه شده بود که گیاهچه‌های تولیدشده در این حفره‌ها مستقر شدند. هر یک از لوله‌ها با سه‌لیتر محلول غذایی هوگلند (Hoagland & Arnon, 1950) پُر شده بود که هر دوهفته یک‌بار تا پایان آزمایش تعویض می‌شد. چهارهفته پس از انتقال گیاهچه‌ها به محیط هیدروپونیک (در مرحلهٔ ۱۰برگی)، به‌منظور تعیین میزان تحمل به خشکی ژنوتیپ‌ها، تیمار تنش خشکی بر روی آن‌ها اِعمال شد. برای این منظور، تیمار تنش خشکی با استفاده از پلی‌اتیلن‌گلیکول ۶۰۰۰ و بر اساس معادلهٔ Michel & Kaufman (1973) در دو سطح اسمزی ۳- و ۶-بار اعمال شد. جهت جلوگیری از واردشدن تنش شدید، تنش به‌صورت تدریجی و با نرخ ۰/۵بار در روز برای تیمار ۳- و یک‌بار در روز برای تیمار ۶- به‌مدت شِش‌روز اعمال شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خُردشده، بر اساس طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام پذیرفت که در آن تیمارهای تنش به‌عنوان کرت اصلی و ژنوتیپ‌ها به‌عنوان کرت فرعی توزیع شدند. دوهفته پس از اِعمال تیمارها (۴۷روز پس از جوانه‌زنی بذرها) و در شرایطی که حدود نیمی از ژنوتیپ‌ها به گل رفته بودند، نمونه‌های گیاهی برداشت و ارتفاع بوته، طول ریشهٔ اصلی، تعداد شاخه‌های فرعی و وزن خشک ریشه و اندام هوایی اندازه‌گیری شد.

مقدار نسبی آب برگ (RWC) با هدف بررسی میزان شدت تنش در تیمارها مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور در زمان برداشت، نمونه‌هایی از برگ تهیه و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. این نمونه‌ها در دمای چهار درجه سانتی‌گراد و به‌مدت یک‌شب در آب‌مقطر قرار داده شدند. پس از حذف رطوبت سطحی، وزن تورژسانس آن‌ها تعیین شد. سپس نمونه‌های برگ در دمای ۸۰درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۴۸ساعت خشک شدند و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت، مقدار نسبی آب برگ از طریق رابطهٔ زیر محاسبه شد:

$$RWC(\%) = ((\text{وزن‌خشک}-\text{وزن تورژسانس})/(\text{وزن‌خشک}-\text{وزن‌تر}))\times 100$$

همچنین با استفاده از روابط ریاضی زیر، شاخص‌های مختلف ارزیابی میزان تحمل به خشکی بر اساس مقدار تولید زیست‌توده (وزن خشک اندام هوایی و ریشه) و به‌صورت مجزا برای هر یک از تیمارهای تنش ۳- و ۶-بار نسبت به تیمار شاهد محاسبه شد.

در نهایت بر اساس معیارهای فوق، با استفاده از نمودارهای پراکنش سه‌بعدی و بای‌پلات، ژنوتیپ‌های برتر از نظر تولید مادهٔ خشک بیشتر، شناسایی شدند و در ادامه، همبستگی بین صفات فنوتیپی اندازه‌گیری شد و مقدار نسبی آب برگ با شاخص‌های مقاومت و حساسیت به خشکی گیاه، تعیین و میزان و چگونگی روابط بین آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین روابط بین صفات، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و رسم نمودارها، از نرم‌افزارهای JMP، STATISTICA و Excel استفاده شد.

۱) شاخص تحمل $TOL^{1} = Y_p - Y_s$

۲) شاخص بهره‌وری متوسط $MP^{2} = (Y_p + Y_s)/2$

۳) شاخص حساسیت به تنش $SSI^{3} = (1 - Y_s/Y_p)/(1 - \bar{Y}_s/\bar{Y}_p)$

۴) شاخص میانگین هندسی بهره‌وری $GMP^{4} = (Y_p \times Y_s)^{0.5}$

۵) شاخص تحمل به تنش $STI^{5} = (Y_p \times Y_s)/(\bar{Y}_p)^{2}$

در معادلات فوق، Y_s : تولید مادهٔ خشک ژنوتیپ در شرایط تنش (۳- یا ۶-بار)، Y_p: تولید مادهٔ خشک ژنوتیپ در شرایط بدون‌تنش، $\bar{Y}_p$: میانگین تولید مادهٔ خشک کلیه ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش، $\bar{Y}_s$: میانگین تولید مادهٔ خشک کلیه ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش (۳- یا ۶-بار) می‌باشد.

1. Stress tolerance
2. Mean productivity
3. Stress susceptibility index
4. Geometric mean productivity
5. Stress tolerance index

جدول۱- ژنوتیپ‌های مورد استفاده در آزمایش و منشاء آن‌ها

Table 1. Used chickpea genotypes and their origin

ردیف No.	شناسه در بانک بذر Seed bank ID		منشاء Origin	پاسخ به خشکی Response to drought	وضعیت گل دهی Flowering situation	منبع Reference
1	MCC333	(Flip87-84c)	ایکاردا-ICARDA	متحمل-T	حد واسط - MF	Sedaghatkhahi, 2007
2	MCC537		ایران-Iran	متحمل-T	زود گل - EF	Ganjeali *et al.*,2009
3	MCC544		ایران-Iran	متحمل-T	زود گل - EF	Ganjeali *et al.*,2009
4	MCC674		ایران-Iran	حساس-S	زود گل - EF	Ganjeali *et al.*,2009
5	MCC753	(Sel96TH11439)	ایکاردا-ICARDA	حساس-S	حد واسط - MF	Sedaghatkhahi, 2007
6	MCC759	(Flip97-41c)	ایکاردا-ICARDA	حساس-S	دیر گل - LF	Ganjeali *et al.*,2009
7	MCC760	(Flip97-43c)	ایکاردا-ICARDA	متحمل-T	زود گل - EF	Ganjeali *et al.*,2009
8	MCC770	(Flip97-91c)	ایکاردا-ICARDA	متحمل-T	حد واسط - MF	Ganjeali *et al.*,2009
9	MCC773	(Flip97-97c)	ایکاردا-ICARDA	حساس-S	زود گل - EF	Sedaghatkhahi, 2007
10	MCC783	Flip97-120c)	ایکاردا-ICARDA	حساس-S	دیر گل - LF	Ganjeali *et al.*,2009
11	MCC806	(Flip97-196c)	ایکاردا-ICARDA	حساس-S	دیر گل - LF	Ganjeali *et al.*,2009
12	MCC877	(ICC4958)	ایکریست-ICRISAT	متحمل-T	زود گل - EF	Saxena *et al.*,1993

Abb.: MCC: Mashhad Chickpea Collection, T: Drought tolerant, S: Drought susceptible. EF: Early flowering, MF: Mid flowering, LF: Late flowering

نتایج و بحث

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش میزان شدت تنش خشکی از میزان ارتفاع بوته، وزن اندام هوایی، وزن ریشه و ماده خشک کل ژنوتیپ‌های مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری کاسته شدند. همچنین افزایش شدت تنش موجب کاهش تعداد شاخه‌های جانبی شد، اما این کاهش معنی‌دار نبود. از نظر نسبت ریشه به اندام هوایی بین تیمارهای مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. طول ریشهٔ اصلی در تیمار ۳-بار به‌طور معنی‌داری بیشتر از دو تیمار شاهد و ۶-بار بود (جدول‌های ۲ و ۳). همچنین ژنوتیپ‌ها از نظر صفات فوق با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشتند. در میان ژنوتیپ‌ها، دو ژنوتیپ MCC537 و MCC760 با متوسط ۲۸/۴سانتی‌متر بیشترین و ژنوتیپ MCC753 با متوسط ۱۴سانتی‌متر کمترین ارتفاع بوته را دارا بودند که این اختلاف در ارتفاع، بیشتر در اثر خصوصیت‌های ژنتیکی ژنوتیپ بود (جدول۲).

جدول۲- اثر تنش خشکی بر ارتفاع بوته، طول ریشهٔ اصلی و تعداد شاخه در بوتهٔ دوازده ژنوتیپ نخود

Table 2. Effect of drought stress on plant height, main root length and branch number in 12 chickpea genotypes

تعداد شاخه در بوته Branch number				طول ریشه اصلی (سانتی‌متر) Main root length (cm)				ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)			
میانگین Mean	۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control	میانگین Mean	۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control	میانگین Mean	۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control	ژنوتیپ Genotype
8.0b	8.0	6.0	10.0	31.3abc	21.3	41.7	30.8	22.9cd	20.3	20.0	28.3	MCC333
6.4c	5.7	7.0	6.7	26.6abc	18.3	32.0	29.3	28.4a	24.3	28.3	32.7	MCC537
5.8c	6.3	5.3	5.7	32.6ab	23.3	38.0	36.3	27.0ab	26.0	25.3	29.7	MCC544
6.3bc	5.7	6.3	7.0	28.0abc	20.7	38.3	25.0	25.9abc	20.3	28.7	28.7	MCC674
11.1a	11.3	10.3	11.7	27.1abc	17.7	36.7	27.0	14.0e	13.0	13.0	16.0	MCC753
5.2c	3.3	6.3	6.0	28.6abc	23.0	39.7	23.0	25.3abc	22.0	26.0	28.0	MCC759
6.3bc	4.0	8.5	6.3	28.7abc	36.0	26.0	24.0	28.4a	26.7	27.3	31.3	MCC760
6.6bc	7.0	5.0	7.7	33.5a	30.7	39.5	30.3	19.2d	16.7	18.0	23.0	MCC770
7.2bc	5.7	8.7	7.3	28.8abc	19.3	38.7	28.3	20.4d	18.7	20.3	22.3	MCC773
8.8b	10.0	8.7	7.7	25.8abc	20.7	35.0	21.7	21.3d	20.3	19.0	24.7	MCC783
6.6bc	5.7	6.3	7.7	24.6bc	31.7	21.3	20.7	20.6d	17.0	19.7	25.0	MCC806
5.2c	4.3	3.0	8.3	23.1c	26.3	16.7	26.3	23.2bcd	21.3	19.0	29.3	MCC877
LSD=1.8	**6.4a**	**6.8a**	**7.7a**	**LSD=10.2**	**24.1b**	**33.6a**	**26.9b**	**LSD=6.82**	**20.6b**	**22.1b**	**26.6a**	**Mean میانگین**

مقایسه میانگین اثرات ساده بر اساس آزمون مقایسه میانگین چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۰/۰۵. مقدار LSD برای مقایسه میانگین اثرات متقابل در سطح ۰/۰۵.

Simple effect mean comparison based on Duncan's multiple-range test, significant difference at 5% level of probability.
Interaction compare with LSD, significant difference at 5% level of probability.

جدول۳- اثر تنش خشکی بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی دوازده ژنوتیپ نخود

Table 3. Effect of drought stress on shoot dry weight, root dry weight and root per shoot ratio in 12 chickpea genotypes

میانگین Mean	نسبت ریشه به اندام هوایی Root per shoot ratio			میانگین	وزن خشک ریشه (گرم بر بوته) Root dry weight (g/plant)			میانگین Mean	وزن خشک اندام هوایی (گرم بر بوته) Shoot dry weight (g/plant)			ژنوتیپ
	۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control		۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control		۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control	Genotype
0.61ab	0.62	0.65	0.56	0.86abc	0.76	0.83	0.99	1.50abcd	1.44	1.27	1.79	MCC333
0.54b	0.48	0.43	0.73	1.05ab	0.64	0.84	1.67	1.86a	1.24	2.02	2.32	MCC537
0.64ab	0.58	0.78	0.57	0.66bc	0.52	0.68	0.78	1.12defg	1.03	0.86	1.47	MCC544
0.67ab	0.81	0.53	0.66	0.90abc	0.82	0.83	1.03	1.37bcdef	0.94	1.63	1.55	MCC674
0.84a	0.73	0.93	0.84	0.82abc	0.59	0.76	1.12	0.99fg	0.81	0.86	1.32	MCC753
0.87a	0.84	0.71	1.06	0.88abc	0.39	1.07	1.18	1.03efg	0.46	1.40	1.21	MCC759
0.53b	0.63	0.58	0.36	0.74bc	0.42	0.99	0.82	1.60abc	0.68	1.85	2.27	MCC760
0.83a	0.95	0.77	0.79	0.70bc	0.58	0.57	0.95	0.85g	0.65	0.69	1.20	MCC770
0.68ab	0.64	0.80	0.60	0.86abc	0.45	1.00	1.12	1.28cdef	0.72	1.25	1.87	MCC773
0.69ab	0.55	0.81	0.71	1.14a	0.84	1.17	1.41	1.73ab	1.60	1.62	1.98	MCC783
0.66ab	0.77	0.65	0.57	0.89abc	0.59	0.95	1.11	1.43bcde	0.81	1.53	1.96	MCC806
0.64ab	0.56	0.81	0.56	0.58c	0.19	0.44	1.12	0.96fg	0.35	0.61	1.91	MCC877
-	**0.68**	**0.70**	**0.67**	**LSD=0.56**	**0.57**	**0.84**	**1.11**	**LSD=0.59**	**0.89c**	**1.30b**	**1.74a**	**میانگین Mean**

مقایسه میانگین اثرات ساده بر اساس آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۰/۰۵. مقدار LSD برای مقایسه میانگین اثرات متقابل در سطح ۰/۰۵.

Simple effect mean comparison base on Duncan's multiple-range test, significant difference at 5% level of probability.
Interaction compare with LSD, significant difference at 5% level of probability.

از نظر طول ریشهٔ اصلی نیز ژنوتیپ MCC770 با متوسط ۳۳/۵سانتی‌متر به‌طور میانگین در تمامی تیمارها بیشترین طول ریشه و ژنوتیپ MCC877 با ۲۴/۱سانتی‌متر کمترین طول ریشه را به خود اختصاص دادند. در این ارتباط اگرچه در اکثر ژنوتیپ‌ها، در تیمار تنش ۳-بار نسبت به شاهد، طول ریشهٔ اصلی افزایش و در تیمار ۶-بار کاهش نشان دادند، با این حال در دو ژنوتیپMCC760 و MCC806 افزایش معنی‌دار طول ریشهٔ اصلی نسبت به شاهد در تیمار تنش ۶-بار مشاهده شد (جدول ۲). اگرچه در اکثر مطالعات انجام‌شده بر روی گیاهان مختلف در شرایط هیدروپونیک، تنش خشکی باعث کاهش طول ریشه شده (Wu *et al.*,2008)، در برنج در این شرایط در برخی از ارقام و در شدت‌های کم تنش، افزایش در طول ریشه و وزن تر ریشه گزارش شده است (Balch *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2005). به‌نظر می‌رسد که اِعمال تیمار تنش در القای رشد طولی ریشه مؤثر باشد. با این حال در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، با افزایش شدت تنش، از میزان وزن خشک ریشه‌ها کاسته شد. از این نظر نیز در بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. به‌طور میانگین در تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین وزن خشک ریشه با ۱/۱۷گرم در بوته در ژنوتیپ MCC783 و کمترین وزن خشک ریشه با ۰/۵۸گرم در بوته در ژنوتیپ MCC877 مشاهده شد (جدول ۳). در این ارتباط، اثر تنش خشکی بر روی تنوع مشاهده شده، بیشتر از نوع ژنوتیپ بود. با وجود این‌که ژنوتیپ MCC877 در مطالعات به‌عنوان یک مدل برای ژنوتیپ‌های با ریشهٔ گسترده و مقاوم به خشکی معرفی شده است (Saxena *et al.*, 1993)، اما این ژنوتیپ تنها در شرایط شاهد، ریشه مناسبی را تولید کرده بود و در دو تیمار تنش، رشد و گسترش ریشه‌ها به‌شدت تحت تأثیر تنش قرار گرفته بود. به‌نظر می‌رسد که کاهش رشد ریشه در شرایط تنش در این ژنوتیپ، بیشتر در اثر کاهش تولید در اندام هوایی در اثر تنش بوده است.

در میان ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، ژنوتیپ‌های MCC753، MCC759 وMCC770 بیشترین و ژنوتیپ‌های MCC760 وMCC537 کمترین نسبت ریشه به اندام هوایی را دارا بودند. مشخص شده که نسبت ریشه به اندام هوایی در ژنوتیپ‌های متحمل نخود در شرایط تنش، بیشتر از ارقام حساس است و این خصوصیت به حفظ رطوبت نسبی در برگ ارقام متحمل منجر می‌شود (Anbessa & Bejiga, 2003).

نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش از میزان مقدار نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری کاسته شد (جدول۴). بین ژنوتیپ‌ها نیز از نظر مقدار نسبی آب برگ، اختلاف معنی‌دار مشاهده شد، به‌طوری‌که ژنوتیپ MCC806 بیشترین میانگین مقدار نسبی آب برگ را به‌طور میانگین در تیمارهای مورد مطالعه دارا بود و کمترین مقدار نسبی آب برگ نیز در ژنوتیپ MCC544 مشاهده شد (جدول۴).

جدول۴- اثر خشکی بر مقدار نسبی آب برگ دوازده ژنوتیپ نخود

Table 4. Effect of drought stress on relative water content (RWC) in 12 chickpea genotypes

ژنوتیپ Genotype	مقدار نسبی آب برگ (درصد) Relative water content (%)			میانگین Mean
	شاهد Control	۳-بار -3bar	۶-بار -6bar	
MCC333	75	59	56	63ab
MCC537	75	77	49	67a
MCC544	66	51	23	47d
MCC674	67	59	33	53bcd
MCC753	72	69	50	64ab
MCC759	75	44	32	50cd
MCC760	69	52	29	50cd
MCC770	72	38	39	50cd
MCC773	74	71	30	58abc
MCC783	76	72	42	63ab
MCC806	84	61	60	0.68a
MCC877	65	40	39	48cd
میانگینMean	73a	58b	40c	LSD=16

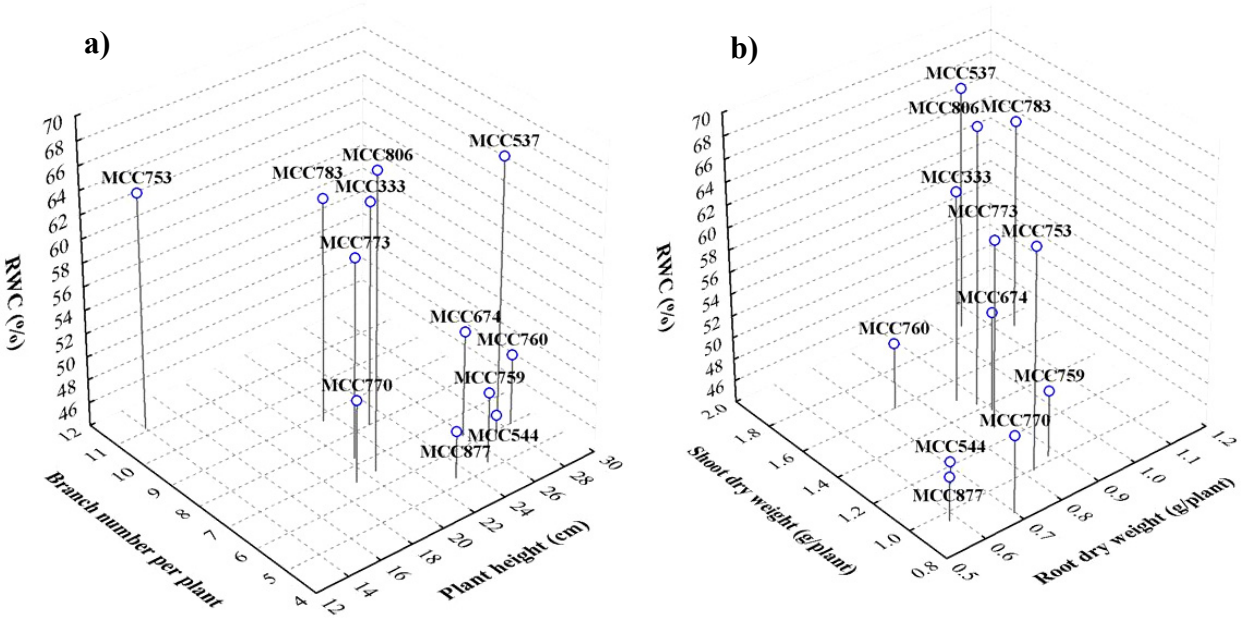
مقایسه میانگین اثرات ساده بر اساس آزمون مقایسه میانگین چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۰/۰۵. مقدار LSD برای مقایسه میانگین اثرات متقابل در سطح ۰/۰۵.

Simple effect mean comparison based on Duncan's multiple-range test, significant difference at 5% level of probability. Interaction compare with LSD, significant difference at 5% level of probability.

بررسی همبستگی صفات مورد مطالعه با هم در مجموع و در هر یک از تیمارهای مورد مطالعه نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ارتفاع بوته با تولید ماده خشک وجود دارد (جدول۵). در مقابل، همبستگی منفی و معنی‌داری بین تعداد شاخه در بوته با ارتفاع بوته در تیمارهای مورد مطالعه مشاهده شد. به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد ژنوتیپ‌هایی که دارای ارتفاع بیشتری هستند، از تعداد شاخهٔ کمتر و ژنوتیپ‌هایی که ارتفاع کمتری دارند از تعداد شاخه بیشتری به‌ازای هر بوته برخوردارند. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر روشن می‌شود که اغلب ژنوتیپ‌های زودرس نظیر ژنوتیپ‌های MCC537، MCC544، MCC760 و MCC877 از ارتفاع بوتهٔ بیشتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بودند (شکل۱). در مطالعه بر روی خصوصیات مورفولوژیک مجموعهٔ ژرم‌پلاسم نخود که قبلاً توسط Upadhyaya *et al.* (2002) در نخود انجام شده است نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین روز تا گل‌دهی و ارتفاع بوته گزارش شده است. اگرچه تعداد شاخهٔ جانبی به‌عنوان یکی از اجزای عملکرد در مجموع تیمارهای مورد مطالعه، همبستگی مثبت و معنی‌داری با میزان تولید مادهٔ خشک در بوته نشان داد، اما در تیمار شاهد بین این دو متغیر، همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵). از طرف دیگر در تیمارهای تنش، همبستگی مثبت و معنی‌داری از این نظر وجود داشت (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد که در شرایط شاهد، تولید زیست‌توده در بوته، بیشتر تابع ارتفاع بوته باشد و از آنجایی که تعداد شاخه با ارتفاع بوته همبستگی منفی دارد، تعادل این دو متغیر، تعیین‌کنندهٔ میزان مادهٔ خشک در بوته است، اما در شرایط تنش، وجود شاخه‌های فرعی بیشتر می‌تواند به‌عنوان یک مزیت نسبی برای افزایش تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ‌ها مد نظر باشد. بنابراین ممکن است که کاهش نسبت طول ساقه و افزایش تعداد دستجات آوندی، به‌واسطهٔ افزایش تعداد شاخهٔ جانبی و در نتیجه بهبود انتقال آب در ژنوتیپ های دارای تعداد شاخهٔ بیشتر، دلیل این مزیت نسبی باشد. بررسی ارتباط این دو متغیر با مقدار نسبی آب برگ نشان داد که غالب ژنوتیپ‌هایی که از ارتفاع بوتهٔ بیشتر و تعداد شاخهٔ کمتری برخوردار هستند، به‌طور میانگین از میزان نسبی آب برگ کمتری برخوردار بودند (شکل ۱). بر این اساس، بین تعداد شاخه و ارتفاع بوته، با مقدار نسبی آب برگ در مجموع تیمارهای مورد مطالعه، همبستگی مثبت و معنی‌دار مشاهده شد. همچنین بین تیمارهای مورد مطالعه، تعداد شاخه در تیمار ۳-بار، همبستگی مثبت و معنی‌دار با مقدار نسبی آب برگ نشان داد ولی همبستگی معنی‌داری بین ارتفاع بوته با مقدار نسبی آب برگ به صورت مجزا، در هر یک از تیمارهای مورد مطالعه مشاهده نشد (جدول‌های ۵ و ۶).

با وجود پاسخ طول ریشهٔ اصلی به تنش در مجموع تیمارها، همبستگی معنی‌داری بین این صفت با سایر صفات اندازه‌گیری‌شده مشاهده نشد (جدول۵). با این حال در تیمار تنش ۳-بار، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین طول ریشهٔ اصلی با میزان مادهٔ خشک ریشه مشاهده شد. به‌علاوه در تیمار تنش ۶-بار، طول ریشهٔ اصلی با تعداد شاخه در بوته، همبستگی منفی و معنی‌دار داشت (جدول۶). در مقابل، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین مادهٔ خشک ریشه با مادهٔ خشک اندام هوایی و مادهٔ خشک کل در مجموع و در هریک از تیمارهای مورد مطالعه، مشاهده شد. پیش‌تر نیز برخی محققان، وجود همبستگی بالا بین وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه را در ژنوتیپ‌های نخود گزارش کرده بودند (Krishnamurthy *et al.*, 2003; Ganjeali & Kafi, 2007).

اگر چه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وزن خشک ریشه با وزن خشک اندام هوایی و مقدار نسبی آب برگ مشاهده شد (جدول۵)، هیچ‌گونه همبستگی معنی‌داری بین طول ریشه یا نسبت ریشه به اندام هوایی با وزن خشک بوته و مقدار نسبی آب برگ مشاهده نشد.



شکل۱- a) نمودار سه‌بعدی تغییرات میانگین ارتفاع بوته، تعداد شاخه در بوته و مقدار نسبی آب برگ در نخود؛
b) نمودار سه‌بعدی تغییرات میانگین وزن خشک اندام هوایی بوته، وزن خشک ریشه و مقدار نسبی آب برگ در نخود

Fig. 1. a) 3D scatter plots of plant height, branch number per plant and RWC in chickpea genotypes;
b) 3D scatter plots of shoot dry weight, root dry weight and RWC in chickpea genotypes

با وجود این‌که طول ریشهٔ اصلی و نسبت ریشه به اندام هوایی از جمله صفات مؤثر در مکانیزم اجتناب از خشکی به‌شمار می‌رود، در این مطالعه، این صفات تأثیر چندانی در حفظ مقدار نسبی آب برگ نداشت که به‌نظر می‌رسد این خصوصیات تأثیر چندانی در گزینش ژنوتیپ‌ها در محیط هیدروپونیک نداشته است. Ganjeali *et al.*(2007) نیز عدم وجود ارتباط معنی‌دار بین طول ریشه در شرایط هیدروپونیک، با طول ریشه در بستر شن را در گیاهان ۳۰روزهٔ نخود گزارش کرده بودند. بنابراین اگرچه طول ریشهٔ اصلی در مزرعه، یک مزیت مثبت برای دسترسی ژنوتیپ‌ها به رطوبت در اعماق بیشتر خاک به‌شمار می‌رود، اما در محیط هیدروپونیک، ممکن است به‌دلیل دسترسی یکنواخت ریشه به محلول غذایی، طول ریشهٔ اصلی تأثیری در مقاومت گیاه به خشکی نخود نداشته باشد. به‌نظر می‌رسد اگرچه در محیط هیدروپونیک امکان گزینش ژنوتیپ‌ها با طول ریشهٔ بیشتر وجود دارد، بررسی این خصوصیت در جهت مقاومت به خشکی در ژنوتیپ‌ها، مستلزم آزمایشات مبتنی بر خاک است. به‌نظر می‌رسد که وزن خشک ریشه نیز در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، تابع نوع ژنوتیپ و وضعیت رشدی گیاه و میزان رشد اندام هوایی است و نوعی تعادل بین این دو متغیر وجود دارد.

با وجود این‌که در کل، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین مادهٔ خشک کل و شاخص‌های مرتبط با مقدار نسبی آب برگ مشاهده شد (جدول۷ و شکل۱)، در تیمار شاهد، همبستگی معنی‌داری از این نظر وجود نداشت. بیشترین همبستگی بین مقدار نسبی آب برگ و مادهٔ خشک، در تیمار تنش ۳-بار مشاهده شد. در تیمار تنش ۶-بار، مقدار نسبی آب، تنها با مادهٔ خشک اندام هوایی همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت (جدول۶). به‌علاوه، بررسی رابطه بین مقدار نسبی آب برگ ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با شاخص‌های مقاومت در ژنوتیپ‌ها نشان داد که مقدار نسبی آب برگ در تیمارهای شاهد و تنش ۶-بار، ارتباط معنی‌داری با شاخص‌های مقاومت در ژنوتیپ‌ها نداشت. این درحالی است که مقدار نسبی آب برگ در تیمار تنش ۳-بار، همبستگی مثبت و معنی‌داری با شاخص‌های STI، MP و GMP داشت (جدول ۸). به‌نظر می‌رسد اِعمال تیمار تنش خشکی با شدت ۳-بار، در گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی از برتری بیشتری نسبت به تیمار تنش ۶-بار برخوردار است. با این وجود، Massomi *et al.*(2005) شدت تنش در محدودهٔ ۳- تا ۶-بار را مناسب‌ترین شدت اِعمال تنش برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل نخود کشت‌شده در گلدان با بستر

خاک معرفی کردند. علاوه بر این، به‌نظر می‌رسد که حفظ رطوبت برگ در تیمارهای خشکی، همبستگی بالایی با میزان تولید و مقاومت ژنوتیپ های نخود در شرایط تنش خشکی داشت. Jamshidi-Moghadam *et al.* (2007) نیز وجود رابطه بین تحمل به خشکی و مقدار نسبی آب برگ را گزارش کرده بودند.

جدول۵- ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری‌شدهٔ نخود در مجموع (قطر بالایی) و شاهد (قطر پایینی)

Table 5. Correlation matrix of chickpea morphological properties in total (above diagonal) and control (lower diamond)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
1	0.11	-0.25**	0.33**	0.57**	0.50**	0.22*	1) ارتفاع بوته Plant height
0.19	1	-0.04	0.14	0.01	0.07	0.07	2) طول ریشه Main root length
-0.45**	0.01	1	0.38**	0.35**	0.41**	0.30**	3) تعداد شاخه Branch number
0.12	0.11	0.19	1	0.68**	0.88**	0.49**	4) مادهٔ خشک ریشه Root dry weight
0.56**	0.07	-0.08	0.41**	1	0.94**	0.56**	5) مادهٔ خشک اندام هوایی Shoot dry weight
0.42**	0.11	0.05	0.82**	0.86**	1	0.58**	6) مادهٔ خشک کل Total dry mater
-0.19	-0.14	0.07	0.24	0.03	0.15	1	7) مقدار نسبی آب برگ Relative water content

* و **: به ترتیب معنی‌دار در در سطح 0.05 =α و 0.01 =α.

*and **: Significant at α= 0.05 & α= 0.01, respectively.

جدول۶- ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری‌شدهٔ نخود در ۳-بار (قطر بالایی) و ۶-بار (قطر پایینی)

Table 6. Correlation matrix of chickpea properties in -3 bar (above diagonal) and -6 bar (below diagonal)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
1	0.05	-0.25	0.21	0.54**	0.44**	0.00	1) ارتفاع بوته Plant height
0.15	1	0.12	0.28*	-0.09	0.07	0.10	2) طول ریشه Main root length
-0.43**	-0.33*	1	0.36*	0.32*	0.43**	0.30*	3) تعداد شاخه Branch number
0.13	-0.18	0.51**	1	0.50**	0.78**	0.19	4) مادهٔ خشک ریشه Root dry weight
0.26	-0.22	0.58**	0.82**	1	0.92**	0.44**	5) مادهٔ خشک اندام هوایی Shoot dry weight
0.22	-0.21	0.58**	0.92**	0.98**	1	0.40**	6) مادهٔ خشک کل Total dry mater
-0.13	-0.16	0.26	0.19	0.28*	0.26	1	7) مقدار نسبی آب برگ Relative water content

* و **: به ترتیب معنی‌دار در در سطح 0.05 =α و 0.01 =α.

*and **: Significant at α= 0.05 & α= 0.01, respectively.

از نظر میزان تولید مادهٔ خشک به ازای بوته، ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار با یکدیگر داشتند. دو ژنوتیپ MCC537 و MCC783 بیشترین و دو ژنوتیپ MCC770 وMCC877 کمترین میزان تولید مادهٔ خشک در بوته را به خود اختصاص داده بودند. در بین تیمارهای مورد مطالعه، با بهره‌گیری از شاخص‌های TOL و SSI مشخص شد که برخی از ژنوتیپ‌ها نظیر MCC333 و MCC783 از ثبات بیشتری از نظر میزان تولید مادهٔ خشک در پاسخ به تنش خشکی برخوردار بودند. در مقابل در برخی دیگر نظیر MCC877 افزایش شدت تنش به کاهش معنی‌دار وزن بوته منجر شد (جدول۷).

بررسی همبستگی بین شاخص‌های مقاومت در ژنوتیپ‌ها نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین میزان زیست‌توده با شاخص‌هایMP، GMP و STI در تیمار تنش و شاهد وجود دارد. همچنین شاخص‌های TOL و SSI نیز با تولید بیومس در شرایط تنش، همبستگی معنی‌دار نشان دادند (جدول۹). همبستگی مثبت و معنی‌داری بین شاخص‌های MP، GMP و STI در هر دو تیمار ۳- و ۶-بار وجود داشت. در مقابل، شاخص‌های TOL و SSI نیز با یکدیگر همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند (جدول۸). در میان شاخص‌های مورد مطالعه، شاخصMP از همبستگی بیشتری با مقدار زیست‌توده در شرایط تنش و شاهد نسبت به سایر شاخص‌ها برخوردار بود (جدول۹). نتایج به‌دست‌آمده از تجزیهٔ بای‌پلات بر اساس متغیرهای ارائه‌شده در جدول۱۰، مؤید همبستگی مشاهده‌شده بین شاخص‌های تحمل به خشکی بود. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مؤلفهٔ اول،۵۸/۰درصد از تغییرات شاخص‌های MP، STI، GMP و عملکرد در تیمار تنش ۳- و ۶-بار و شاهد را توضیح داد (جدول۱۰). این نتایج مطابق با گزارش‌های Ganjeali *et al.* (2005; 2009) است. در شکل۲، بُعد اول نمودار را می‌توان بُعد پتانسیل تولید و مقاومت به خشکی نام نهاد درحالی‌که مؤلفهٔ دوم که توضیح‌دهندهٔ شاخص‌های SSI و TOL بود، ۲۵/۱درصد از تغییرات را شامل می‌شود. بنابراین مؤلفهٔ دوم را می‌توان به‌عنوان بُعد تحمل به تنش معرفی کرد که با این شرایط، انتخاب ژنوتیپ‌هایی که دارای مقدار PCA1 و PCA2 پایین‌تر می‌باشند، تولید بیشتری هم در شرایط تنش و هم بدون تنش نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها دارا هستند. در این آزمایش، ژنوتیپ‌های MCC674، MCC333 و MCC783 دارای ویژگی یادشده بودند. بر این اساس، ژنوتیپ‌های MCC544، MCC770 و MCC753 از پتانسیل تولید پایین‌تری در شرایط تنش و شرایط غیرتنش برخوردار بودند؛ با این حال، کاهش تولید زیست‌توده در اثر تنش در این ژنوتیپ‌ها نیز پایین بود. در بین ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ MCC877 از کمترین مقدار مقاومت به خشکی برخوردار بود درحالی‌که میزان تولید این ژنوتیپ در شرایط بدون تنش، نسبتاً بالا بود. در مقابل، ژنوتیپ MCC537 بیشترین تولید را در بین ژنوتیپ‌ها دارا بود. سایر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نیز در قالب یک گروه در مرکز نمودار تجمع پیدا کرده بودند و پاسخی حد واسط از میزان تحمل به خشکی و پتانسیل عملکرد برخوردار بودند (شکل۲).

جدول۷- اثر خشکی بر مقدار تولید مادهٔ خشک در بوته و شاخص‌های مقاومت به خشکی دوازده ژنوتیپ نخود

Table 7. Effect of drought stress on biomass and drought resistance indexes in 12 chickpea genotypes

شاخص‌های مقاومت به خشکی drought resistance indexes										مادهٔ خشک کل (گرم بر بوته) Total dry mater (g/plant)			ژنوتیپ
GMP (-6bar)	GMP (-3bar)	STI (-6bar)	STI (-3bar)	TOL (-6bar)	TOL (-3bar)	MP (-6bar)	MP (-3bar)	SSI (-6bar)	SSI (-3bar)	میانگین Mean	۶-بار -6bar	۳-بار -3bar	شاهد Control	Genotype
2.47	2.41	0.76	0.72	0.58	0.69	2.49	2.44	0.43	0.98	2.36ab	2.20	2.09	2.78	MCC333
2.74	3.38	0.93	1.41	2.10	1.13	2.93	3.42	1.08	1.12	2.91a	1.88	2.86	3.99	MCC537
1.87	1.87	0.43	0.43	0.70	0.70	1.90	1.90	0.64	1.24	1.78bc	1.55	1.55	2.25	MCC544
2.13	2.52	0.56	0.78	0.82	0.12	2.17	2.52	0.65	0.19	2.27ab	1.76	2.46	2.58	MCC674
1.85	1.99	0.42	0.49	1.03	0.81	1.92	2.03	0.87	1.32	1.82bc	1.40	1.62	2.43	MCC753
1.42	2.43	0.25	0.73	1.55	-0.08	1.62	2.43	1.33	-0.13	1.90bc	0.85	2.47	2.39	MCC759
1.85	2.85	0.42	1.00	1.98	0.45	2.09	2.86	1.32	0.58	2.27ab	1.10	2.63	3.08	MCC760
1.63	1.65	0.33	0.34	0.92	0.89	1.69	1.71	0.88	1.64	1.55c	1.23	1.26	2.15	MCC770
1.87	2.60	0.43	0.83	1.82	0.74	2.08	2.62	1.25	0.97	2.14bc	1.17	2.26	2.99	MCC773
2.88	3.08	1.02	1.17	0.95	0.60	2.91	3.09	0.58	0.70	2.87a	2.44	2.79	3.39	MCC783
2.07	2.76	0.53	0.94	1.67	0.60	2.24	2.77	1.12	0.77	2.32ab	1.40	2.48	3.07	MCC806
1.28	1.78	0.20	0.39	2.48	1.98	1.78	2.04	1.68	2.59	1.54c	0.55	1.05	3.02	MCC877
										LSD=1.1	1.46c	2.13b	2.84a	میانگین Mean

مقایسه میانگین اثرات ساده بر اساس آزمون مقایسه میانگین چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۰/۰۵. مقدار LSD برای مقایسه میانگین اثرات متقابل در سطح ۰/۰۵.

Simple effect mean comparison based on Duncan's multiple-range test, significant difference at 5% level of probability.
Interaction compare with LSD, significant difference at 5% level of probability.

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش و مقایسهٔ آن با نتایج سایر آزمایشات انجام‌شده بر روی این ژنوتیپ‌ها به‌منظور تعیین میزان تحمل به خشکی نشان داد که ژنوتیپ‌هایی نظیر MCC544، MCC770 وMCC877 با وجود این‌که در

مطالعات قبلی به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شده بودند (Saxena *et al.*,1993; Ganjeali *et al.*, 2009) در این آزمایش جزو ژنوتیپ‌های حساس یا با توانایی تولید پایین، طبقه‌بندی شدند و برخی از ژنوتیپ‌های دیگر مانند ژنوتیپMCC783 که به‌عنوان ژنوتیپ حساس به خشکی شناسایی شده بود، دارای مقاومت خوبی به تنش خشکی بودند. عمدهٔ دلیل این تفاوت در نتایج، می‌تواند معیار تعیین ژنوتیپ حساس از مقاوم باشد. در مطالعاتی که اساس تعیین مقاومت، بر اساس تولید بذر استوار است، گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی بیشتر تحت تأثیر زودرسی و مکانیسم فرار قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه، بر اساس مطالعه Ganjeali *et al.* (2009) ژنوتیپ‌های MCC544 و MCC770، تعداد روز کاشت تا گل‌دهی کوتاه‌تری نسبت به ژنوتیپ MCC753 داشتند.

جدول ۸- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های مقاومت به خشکی و مقدار نسبی آب برگ (RWC) در تیمارهای تنش در نخود
Table 8. Correlation matrix of drought tolerance indexes and RWC in drought treatments in chickpea

(1) SSI (-3bar)	(2) SSI (-6bar)	(3) MP (-3bar)	(4) MP (-6bar)	(5) TOL (-3bar)	(6) TOL (-6bar)	(7) STI (-3bar)	(8) STI (-6bar)	(9) GMP (-3bar)	(10) GMP (-6bar)	(11) RWC (Control)	(12) RWC (-3bar)	(13) RWC (-6bar)	
1	0.27	-0.45	-0.17	0.95**	0.28	-0.48	-0.24	-0.54	-0.28	-0.35	-0.24	0.14	1) SSI (۳- بار)
	1	0.03	-0.41	0.37	0.92**	-0.03	-0.58*	-0.04	-0.63*	-0.09	-0.32	-0.18	2) SSI (۶- بار)
		1	0.81**	-0.19	0.35	0.99**	0.72**	0.99**	0.71**	0.46	0.69**	0.23	3) MP (۳- بار)
			1	0.03	-0.04	0.83**	0.97**	0.80**	0.96**	0.38	0.78**	0.42	4) MP (۶- بار)
				1	0.47	-0.23	-0.09	-0.29	-0.14	-0.27	-0.09	0.21	5) TOL (۳- بار)
					1	0.28	-0.25	0.26	-0.29	0.01	-0.03	-0.03	6) TOL (۶- بار)
						1	0.75**	0.99**	0.74**	0.48	0.70**	0.22	7) STI (۳- بار)
							1	0.73**	0.99**	0.38	0.75**	0.40	8) STI (۶- بار)
								1	0.73**	0.50	0.70**	0.22	9) GMP (۳- بار)
									1	0.40	0.78**	0.40	10) GMP (۶- بار)
										1	0.43	0.67**	11) RWC (شاهد)
											1	0.35	12) RWC (۳- بار)
												1	13) RWC (۶- بار)

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در در سطح $\alpha= 0.05$ و $\alpha= 0.01$.
*and **: Significant at $\alpha= 0.05$ & $\alpha= 0.01$, respectively.

جدول ۹- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های مقاومت به خشکی و مقدار تولید زیست‌توده در تیمارهای تنش در نخود
Table 9. Correlation matrix of drought tolerance indexes and biomass in drought treatments in chickpea

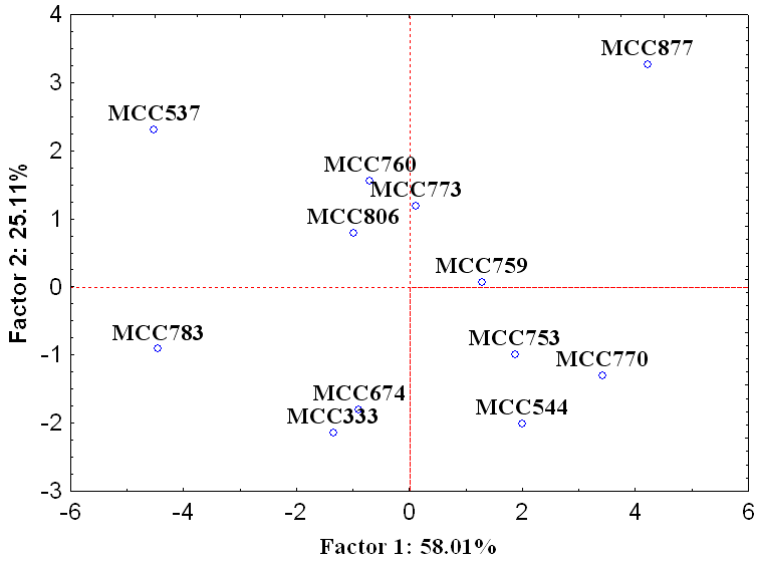
GMP (-6bar)	GMP (-3bar)	STI (-6bar)	STI (-3bar)	TOL (-6bar)	TOL (-3bar)	MP (-6bar)	MP (-3bar)	SSI (-6bar)	SSI (-3bar)	عملکرد Yield	
0.61*	0.82**	0.65*	0.85**	0.56*	0.30	0.80**	0.87**	0.21	0.02	(control)	(شاهد)
0.64*	0.94**	0.63*	0.92**	0.09	-0.57*	0.66**	0.91**	-0.13	-0.77**	(-3 bar)	(۳- بار)
0.93**	0.49	0.91**	0.49*	-0.60*	-0.24	0.81**	0.44	-0.85**	-0.29	(-6 bar)	(۶- بار)

* و **: به ترتیب معنی‌دار در در سطح $\alpha= 0.05$ و $\alpha= 0.01$.
*and **: Significant at $\alpha= 0.05$ & $\alpha= 0.01$, respectively.

جدول ۱۰- سهم هر یک از متغیرها در دو مؤلفهٔ برتر آزمون PCA برای متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در نخود

Table 10. Principal component loading for the measured trait of chickpea genotypes

GMP (-6bar)	GMP (-3bar)	STI (-6bar)	STI (-3bar)	TOL (-6bar)	TOL (-3bar)	MP (-6bar)	MP (-3bar)	SSI (-6bar)	SSI (-3bar)	Y (-6bar)	Y (-3bar)	Y (Control)	سهم از واریانس کل Proporation of total variation (%)	مؤلفه Factor
-0.92	-0.93	-0.92	-0.93	0.04	0.30	-0.93	-0.91	0.37	0.50	-0.77	-0.89	-0.74	58.01	اول PCA1
-0.22	0.28	-0.17	0.31	0.99	0.54	0.04	0.37	0.88	0.34	-0.54	0.09	0.63	25.11	دوم PCA2



شکل ۲- نمودار بای‌پلات بر مبنای دو مؤلفهٔ اول و دوم با بیشترین توجیه واریانس داده‌ها

Fig. 2. Biplot based on two major principal component factors

ژنوتیپMCC877 نیز در این آزمایش، در مدت زمانی کمتر از سه‌هفته پس از کاشت وارد مرحلهٔ گلدهی شد. زمانی که معیار گزینشی بر اساس وزن خشک گیاه انتخاب شود، سایر روش‌های مقاومت به خشکی نظیر اجتناب و تحمل، در انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم، مؤثرتر هستند. در این ارتباط مشخص شده که اگرچه در شرایط مناسب رطوبتی، همبستگی مثبتی بین عملکرد دانه و میزان تولید زیست‌توده درنخود وجود دارد، در شرایط تنش خشکی چنین همبستگی مشاهده نشده است (Jamshidi-Moghadam *et al.*, 2007). دلیل دیگر برای عدم مطابقت نتایج این آزمایش با نتایج آزمایشات دیگر را می‌توان در روش آزمایش جستجو کرد. مشخص شده که خصوصیات ریشه تأثیر به‌سزایی در جذب آب از خاک و اجتناب گیاه از خشکی دارد (Kashiwagi *et al.*, 2006). همان‌طور که در مورد خصوصیات ریشه بحث شد، به‌علت استفاده از محیط هیدروپونیک و دسترسی یکنواخت ریشه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه به آب، خصوصیات دیگری نظیر طول ریشه، در گزینش مقاومت ژنوتیپ‌ها به خشکی مؤثر نبود. به‌عنوان نمونه، دو ژنوتیپ MCC544 و MCC770 از طول ریشهٔ بیشتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بودند که این طول ریشهٔ بیشتر می‌تواند در آزمایش‌های مبتنی بر خاک به‌عنوان یک مزیت نسبی برای افزایش تحمل به تنش خشکی در این ژنوتیپ‌ها مطرح باشد. Saxena *et al.* (1993) در آزمایش مبتنی بر خاک، وجود ارتباط بین عمق ریشه و مقدار نسبی آب برگ را در ارقام نخود گزارش کرده بودند. به‌علاوه در مطالعه بر روی پراکنش توسعهٔ ریشهٔ نخود در خاک، مشخص شد که تراکم ریشه در لایهٔ ۳۰ تا ۶۰سانتی‌متری از سطح خاک،

همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد در شرایط تنش خشکی دارد (Kashiwagi *et al.*, 2006).

در مجموع نتایج این آزمایش نشان داد که تنش خشکی در شرایط هیدروپونیک باعث کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک ریشه و اندام هوایی و تعداد شاخهٔ جانبی شد؛ اما طول ریشه در پاسخ به تنش خشکی در بیشتر ژنوتیپ‌ها در ۳-بار نسبت به شاهد، افزایش یافت. وجود اختلاف معنی‌دار در تمامی صفات فوق در بین ژنوتیپ‌ها، مؤید وجود تنوع در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بود. وجود این تنوع و ارزیابی تأثیر صفات فوق در حفظ مقدار نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌ها نشان داد که ارتفاع کمتر و تعداد شاخهٔ بیشتر می‌تواند به‌عنوان یک مزیت نسبی برای جذب آب در گیاه مد نظر باشد. بررسی میزان مقاومت ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با بهره‌گیری از شاخص‌های مقاومت و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایشات دیگران بر روی این ژنوتیپ‌ها نشان داد که معیار گزینش ژنوتیپ‌ها، در نتیجهٔ گزینش برای تحمل به خشکی مؤثر است. انتخاب بر اساس عملکرد بذر، اگرچه توانایی خوبی در گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی دارد در نخود، بیشتر تحت تأثیر زودرسی ژنوتیپ‌ها قرار می‌گیرد و لزوماً به انتخاب ژنوتیپ‌ها که از سایر روش‌های مقاومت بهره می‌گیرند، منجر نمی‌شود. انتخاب بر اساس عملکرد زیست‌توده، کمتر تحت تأثیر راهکارهای فرار قرار می‌گیرد و به‌واسطهٔ آن می‌توان ژنوتیپ‌هایی را که دارای راهکارهای دیگر مقاومتی نظیر اجتناب و تحمل هستند، گزینش کرد. به‌علاوه شرایط محیطی نیز در گزینش ژنوتیپ‌ها مؤثر است. در این آزمایش، با توجه به همبستگی بیشتر شاخص‌های مقاومت با میزان تولید زیست‌توده و امکان بروز برخی از صفات مؤثر در تحمل به خشکی نظیر طول ریشه، تیمار تنش ۳-بار در گزینش ژنوتیپ‌های متحمل از برتری بیشتری نسبت به تیمار تنش ۶-بار برخوردار بود. به‌نظر می‌رسد که هرچه میزان شدت تنش کمتر باشد، شرایط برای فعال‌شدن راهکارهای مقاومتی، بیشتر فراهم می‌شود. به‌علاوه این نتایج نشان داد که اگرچه در شرایط هیدروپونیک، امکان بررسی خصوصیات ریشه وجود دارد، خصوصیاتی نظیر طول ریشه و پراکنش ریشه، تأثیرگذاری کمتری در مقاومت به خشکی ژنوتیپ‌ها در این شرایط دارند و لزوم آزمایشات مبتنی بر خاک برای بررسی تأثیر این صفات بر روی مقاومت به خشکی ژنوتیپ‌ها وجود دارد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله لازم می‌بینم از آقایان دکتر علی گنجعلی و مهندس حسن پُرسا به‌دلیل همکاری‌های بی‌دریغ‌شان در فراهم‌آوردن ژرم‌پلاسم و اطلاعات اولیهٔ لازم برای این مطالعه، صمیمانه تشکر کنم.

منابع

1. Anbessa, Y., and Bejiga, G. 2002. Evaluation of ethiopian chickpea landraces for tolerance to drought. Genetic Resources and Crop Evolution 49: 557-564.
2. Balch, E.P.M., Gidekel, M., Nieto, M.S., Estrella L.H., and Alejo, N.O. 1996. Effects of water stress on plant growth and root proteins in three cultivars of rice (*Oryza sativa*) with different levels of drought tolerance. Physiologia Plantarum 96: 284-290.
3. Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F.W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A.M., Francia, E., Mare, C., Tondelli, A., and Stanca, A.M. 2008. Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. Field Crops Research 105: 1-14.
4. FAOSTAT Database. 2008. http://apps.fao.org/faostat/
5. Fussell, L.K., Bidinger, F.R., and Bieler, P. 1991. Crop physiology and breeding for drought tolerance: research and development. Field Crops Research 27: 183-199.
6. Ganjeali, A., and Kafi, M. 2007. Genotypic differences for allometric relationships between root and shoot characteristics in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Pakestanian Journal of Botany 39: 1523-1531.
7. Ganjeali, A., Bagheri, A., and Porsa, H. 2009. Evaluation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm for drought resistance. Journal of Iranian Field Crop Research 7:185-196. (In Persian with English Summary).
8. Ganjeali, A., Kafi, M., Bagheri, A., and Shahriyari, F. 2005. Screening for drought tolerance in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). Journal of Iranian Field Crop Research. 3: 103-122. (In Persian with English Summary).
9. Ganjeali, A., Porsa, H., and Hojjat, S. 2007. Genotypic diversity of root and shoot characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in hydroponic culture and in the greenhouse. Journal of Iranian Field Crop Research 5: 143-153. (In Persian with English Summary).
10. Gupta, U.S. 1997. Crop Improvement: Vol II. Stress Toleronce. Oxford and IBH Publishing CO. PVT. LTD.

11. Hoagland, D.R. and Arnon, D.I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station Circular p. 337.
12. Jamshidi-Moghadam, M., Pakniyat, H., and Farshadfar, E. 2007. Evaluation of drought tolerance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) lines using agrophysiologic characteristics. Seed and Plant Improvement 23: 325-342. (In Persian with English Summary).
13. Kashiwagi, J., Krishnamurthy, L., Crouch, J.H., and Serraj, R. 2006. Variability of root length density and its contributions to seed yield in chickpea (*Cicerarietinum* L.) under terminal drought stress. Field Crops Research 95: 171-181.
14. Kashiwagi, J., Krishnamurthy, L., Gaur, P.M., Chandra, S., and Upadhyaya, H.D. 2008. Estimation of gene effects of the drought avoidance root characteristics in chickpea (*C. arietinum* L.). Field Crops Research 105: 64-69.
15. Krishnamurthy, L., Kashiwagi, J., and Upadhyaya, H.D. 2003. Genetic diversity of drought avoidance root traits in the mini-core germplasm collection of chickpea. International Chickpea and Pigeonpea Newsletters 10: 21-24.
16. Kumar, J., and Rao, B.V. 2001. Registration of ICCV96029, super early and double podded chickpea germplasm. Crop Science 41: 605-606.
17. Kumar, J., and Shahal, A. 2001. Genetic of flowering time in chickpea and its bearing on prouductivity in semiarid environments. Advances in Agronomy 72: 107-138.
18. Kumar, J., Haware, M.P., and Smithon, J.B. 1985. Registration of four shortduration Fusarium wilt-resistant Kabuli (Garbanzo) chickpea germplasm. Crop Science 25: 576-577.
19. Massomi, A., Kafi, M., Nezami, A., and Hosseini, S.H. 2005. Effects of drought stress on morphological trait in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in green house. Journal of Iranian Field Crop Research. 3: 277-289. (In Persian with English Summary).
20. Michel, B.E., and Kaufman, M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylenglycol 6000. Plant Physiology 51: 914-916.
21. Nazari, L., and Pakniyat, H. 2010. Assessment of drought tolerance in barley genotypes. Journal of Applied Sciences 10: 151-156.
22. Nezami, A. 2001. Evaluation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) for autumn planting in highlands. Ph.D. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian with English Summary).
23. Ogbonnaya, C.I., Sarr, B., Brou, C., Diouf, O., Diop N.N., and Roy-Macauley, H. 2003. Selection of cowpea genotypes in hydroponics, pots, and field for drought tolerance. Crop Science 43: 1114-1120.
24. Pandey, R.K., and Pendleton, J.W. 1986. Genotypic variation in root and shoot growth of peanut in hydroponics. Philipp. J. Crop Sci. 11: 189-193.
25. Piepho, H.P. 2000. A mixture-model approach to mapping quantitative traitloci in barley on the basis of multiple environment data. Genetics 156: 2043-2050.
26. Reynolds, M.P., Pierre, C.S., Saad, A.S.I., Vargas, M., and Condon, A.G. 2007. Evaluating potential genetic grains in wheat associated with stress-adaptive trait expression in elite genetic resources under drought and heat stress. Crop Science 47: 172-189.
27. Safarnejad, A. 2008. Morphological and biochemical response to osmotic stress in alfalfa (*Medicago sativa* L.). Pakestanian Journal of Botany 40: 735-746.
28. Saxena, N.P., Krishnamurthy, L., and Johansen, C. 1993. Registration of a drought resistant chickpea germplasm. Crop Science 33: 1424.
29. Sedaghatkhahi H. 2007. Evaluation of Entezary sowing of cold tolerant chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes under rainfed conditions of Mashhad. Msc. Thesis. Ferdwosi University of Mashhad, Iran. (In Persian with English Summary).
30. Subarao, G.V., Johanson, C., Slinkard, A.E., Nageswara Rao, R.C., Saxena, N.P., and Chauhan, Y.S. 1995. Strategies for improving drought resistance in grain legumes. Critical Reviews in Plant Sciences 14: 469-523.
31. Upadhyaya, H.D., Ortiz, R., Bramel P.J., and Singh, S. 2002. Phenotypic diversity for morphological and agronomic characteristics in chickpea core collection. Euphytica 123: 333-342.
32. Wang, H., Inukai, Y., Kamoshita, A., Wade, L., Siopongco, J., Nguyen, H., and Yamauchi, A. 2005. QTL analysis on plasticity in lateral root development in response to water stress in the rice plant In: K.L. Heong (Ed.). Rice is life: scientific perspectives for the 21st century. International Rice Research Institute p. 463-465.
33. Wu, F.Z., Bao, W.K., Li, F.L., and Wu, N. 2008. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings. Environmental and Experimental Botany 63: 248-255.

Iranian Journal of Pulses Research
Vol. 3, No. 1, 2012, p. 67-80

Evaluation of selection to drought by PEG in hydroponic condition of twelve chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes

Zare Mehrjerdi[1*], M., Bagheri[2], A., Bahrami[3], A., Nabati[4], J. & Massomi[5], A.

1- Assistant Professor of Faculty of Agriculture of Shirvan, Ferdowsi University of Mashhad
2- Contribution from Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3- Contribution from Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad
4- Ph.D. of physiology, Fanavaran Bazr Yekta Corporation
5- Assistant Professor of Payame Noor University

Received: 31 July 2010
Accepted: 27 April 2011

Abstract

Late-season drought is the major constraint reducing the productivity of chickpea. This experiment was carried out to study response of root and shoot characteristics in 12 chickpea genotypes to drought stress. Two-drought stress levels (-3 and -6 Bar) induced by PEG 6000 and control in hydroponic condition at green house was performed. Leaf relative water content (RWC), plant height, number of branches, root length, shoot and root biomass measured two weeks after drought imposition. In addition, drought susceptibility and resistance indices based on biomass calculated and correlation matrix was obtained among the traits studied. Result showed that leaf relative water content (RWC), plant height, branch number and shoot and root biomass significantly reduced by water stress and root length increased in -3 bar compare with control condition. Biplot analysis on drought resistance indices showed that MCC783 and MCC877 genotypes with 2.87 and 1.54 g/plant had the highest and lowest dry matter production, respectively. It seems that selection for drought tolerance of chickpea genotypes in hydroponic condition is not applicable to soil condition.

Key words: Chickpea, Drought resistance indices, Root and shoot property, RWC

[*] **Corresponding Author:** mzarem1381@yahoo.com, Mobile: 09359926720