تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد چهاردهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰
۱۰۸۱-۱۱۰۳
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.3409.1855

مقاله پژوهشی

اثر شوری بر برخی صفات مورفولوژیک شنبلیله و تعیین حد آستانه تحمل به شوری در مرحله رویشی با استفاده از برخی مدل‌های تجربی

محمدحسین بناکار[۱،۲]، حمزه امیری[۳*]، غلامحسن رنجبر[۴]، محمدرضا سرافراز اردکانی[۵]

۱. دانشجوی دکتری گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲. عضو هیئت‌علمی (مربی) مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد
۳. عضو هیئت‌علمی (دانشیار) گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
۴. عضو هیئت‌علمی (استادیار) مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد
۵. عضو هیئت‌علمی (استادیار) گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، یزد

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۲۳

چکیده

این پژوهش به‌منظور ارزیابی اثرات آب‌شور بر عملکرد شنبلیله و تعیین حد آستانه تحمل به شوری آن در مرحله رشد رویشی انجام شد. تیمارهای موردنظر شامل هفت سطح شوری (دسی‌زیمنس بر متر ۱۲، ۱۰، ۸، ۶، ۴، ۲، ۰/۵) بود. طرح آماری مورداستفاده به‌صورت بلوک کامل تصادفی با سه تکرار بود. در این پژوهش، از برخی مدل‌های مختلف تجربی برای تعیین حد آستانه تحمل به شوری، شیب کاهش عملکرد (وزن خشک اندام هوایی)، مقدار شوری که در آن عملکرد به‌اندازه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و نیز شاخص تحمل به شوری استفاده شد. نتایج نشان داد که ازنظر آماری تفاوت معنی‌داری بین سطوح شوری وجود داشت. بر اساس نتایج، شوری موجب کاهش ارتفاع بوته (۲۷/۶۶٪)، تعداد برگ (۱۸/۰۳٪)، تعداد انشعاب (۵/۱۴٪)، تعداد گره (۸/۷۷٪)، قطر ساقه (۲۷/۰۴٪)، طول میانگره (۵۴/۲۱٪)، میانگین سطح برگ‌های گسترش‌یافته (۴۶/۹۱٪)، نسبت ریشه به اندام هوایی (۱۶/۹۷٪)، محتوای آبی (۱۴/۶۲٪)، کارایی مصرف آب (۱۴/۷۰٪) و افزایش ضخامت برگ (۷۳/۵۵٪) و شاخص سبزینگی (۴۷/۵۸٪) شد، لیکن، تأثیر معنی‌داری بر سطح ویژه برگ نداشت. اگرچه تنش شوری بر اغلب صفات موردمطالعه اثر بازدارنده داشت، لیکن روند این تأثیر بسته به صفت متفاوت بود. بر اساس مدل خطی، حد آستانه تحمل به شوری شنبلیله دسی‌زیمنس بر متر ۱/۲۸ و شیب کاهش عملکرد آن ۴/۹۱ درصد برآورد شد. لیکن، مطابق با مدل‌های غیرخطی، کاهش ۱۰ و ۲۵ درصدی در عملکرد به ترتیب در شوری عصاره اشباع خاک ۳/۳۸ و دسی‌زیمنس بر متر ۶/۲۸ اتفاق افتاد. بر اساس نتایج این پژوهش، مقدار شوری که در آن عملکرد به میزان ۵۰ درصد کاهش یافت در شوری خاک دسی‌زیمنس بر متر ۱۱/۶۷ مشاهده شد. در این پژوهش، شاخص تحمل به شوری شنبلیله ۱۲/۲۴ محاسبه شد؛ بنابراین، بر اساس اعداد حد آستانه تحمل به شوری، شیب کاهش عملکرد و شاخص تحمل به شوری، می‌توان شنبلیله را در مرحله رشد رویشی در گروه گیاهان نسبتاً حساس به شوری طبقه‌بندی کرد.

واژه‌های کلیدی: **ارتفاع بوته، بقولات، خاک‌های شور، سبزی‌ها، سطح برگ، شورورزی، نمک**

مقدمه

شنبلیله (*Trigonella Foenum*-graecum L.) یکی از گیاهان دارویی است که در طب سنتی ایران و جهان سابقه مصرف طولانی داشته و خواص درمانی فراوانی برای آن ذکر شده است (Hassanzadeh, et al., 2010). گیاهان جنس *Trigonella* مخصوصاً گونه T. foenum-graecum از زمان‌های قدیم برای اهداف مختلف در برخی مناطق به‌ویژه یونان، مصر و آفریقای شمالی کشت می‌شده‌اند. ازنظر تاریخی، شنبلیله یکی از قدیمی‌ترین گیاهان دارویی شناخته شده

است (Zargari, 1992; Amuthaselvi and Ambrose, 2016). این گیاه بومی ایران بوده و در اکثر مناطق ازجمله آذربایجان، اصفهان، فارس، خراسان، سمنان و دامغان به‌عنوان سبزی خوراکی مورد کشت می‌شده است (Kooti, et al., 2017). مهم‌ترین ماده مؤثره شنبلیله، آلکالوئید تریگونلین است که خواص دارویی مهمی از قبیل ضد درد، ضد سرطان، ضد دیابت، ملین، کاهش‌دهنده کلسترول و بسیاری از اثرات مفید دیگر برای آن گزارش شده است. دانه شنبلیله علاوه بر تریگونلین، دارای ساپوژنین‌ها، روغن‌ها، ترکیبات موسیلاژی، فلاونوئیدها، ترکیبات پروتئینی، املاح معدنی، کربوهیدرات‌ها، استرول‌ها و کومارین است (Hassanzadeh, et al., 2010; Amuthaselvi and Ambrose, 2016; Moradikor, et al., 2013; Petropoulos, 2002; Mehrafarin, et al., 2011; Tsay, et al., 2016).

تنش شوری کشت و تولید بسیاری از گیاهان زراعی و دارویی مرسوم را با محدودیت‌هایی مواجه ساخته است. نگاهی گذرا به وضعیت اقلیمی ایران نشان می‌دهد که مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب در قسمت‌های مرکزی ایران پراکنده‌اند و شوری در این مناطق یکی از عوامل محدودکننده تولید گیاهان زراعی به شمار می‌رود (Banakar, et al., 2012). تنش شوری رشد گیاهان را از راه‌های گوناگون تحت تأثیر قرار می‌دهد. ابتدا، حضور نمک در خاک ظرفیت جذب آب را در گیاه از طریق کاهش پتانسیل آب تحت تأثیر قرار داده و از این راه موجب کاهش سرعت رشد می‌شود. در اغلب موارد، شوری طی فرایندی دومرحله‌ای رشد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مرحله اول کاهش رشد، فرایندی سریع‌تر بوده و ناشی از اثر اسمزی یون‌های نمک است. مرحله دوم، فرایندی به‌مراتب آهسته‌تر بوده و ناشی از تجمع املاح در برگ‌هاست و به سمیت نمک در گیاه منجر می‌شود. فرایند اخیر ممکن است به مرگ برگ‌ها، کاهش سطح فتوسنتزی و رشد گیاه منجر شود. ازنظر متابولیکی، شوری موجب آسیب غشاء، عدم توازن مواد غذایی، تغییر سطوح تنظیم‌کنندگان رشد و مهار آنزیمی می‌شود. غلظت‌های زیاد نمک می‌تواند اثر مخربی بر متابولیسم گیاه، از بین رفتن هومئوستازی سلولی و عدم جفت شدن فرایندهای عمده فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، داشته باشد (Hasanuzzaman, et al., 2013). گونه‌های گیاهی تفاوت‌های قابل‌توجهی را ازنظر تحمل به شوری نشان می‌دهند و بنابراین کاشت گیاهان زراعی متحمل به شوری از دیرباز به‌عنوان یکی از راه‌های بهره‌برداری از اراضی شور مطرح بوده است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که شنبلیله یکی از گیاهان دارویی است که ازنظر تحمل به شوری موردتوجه بوده و پژوهش‌های متعدد و پراکنده‌ای بر روی آن انجام شده است. این پژوهش‌ها عمدتاً محدود به جوانه‌زنی و یا مراحل اوایل رشد بوده و منبع شوری نیز اغلب نمک کلرید سدیم بوده است. در آزمایشی اثر سطوح مختلف شوری (mM NaCl ۱۶۰، ۱۲۰، ۸۰، ۴۰ و صفر) بر رشد و تجمع برخی عناصر در سه توده شنبلیله (شیرازی، هندی، یزدی) بررسی و معلوم شد که افزایش شوری موجب کاهش ارتفاع، طول ریشه، تعداد برگ و وزن ریشه و اندام هوایی شد. به‌علاوه، معلوم شد که تفاوت‌های معنی‌داری بین توده‌های مختلف موردبررسی وجود داشت به‌طوری‌که توده شیرازی شنبلیله با توجه به رشد بهتر و تجمع املاح کمتر به‌عنوان یک توده برتر انتخاب شد (Archangi, et al., 2012). بررسی تغییرات رشد هشت توده بومی شنبلیله در تنش شوری نشان داد که شوری موجب کاهش ارتفاع، تعداد انشعاب، طول ریشه، وزن ریشه و وزن اندام هوایی شد و توده مشهدی بیشترین ارتفاع بوته را دارا بود (Farhadi, et al., 2015). مطالعات سطوح مختلف شوری (دسی‌زیمنس بر متر ۱۵، ۱۲/۵، ۱۰، ۷/۵، ۵، ۰/۲۱) روی پارامترهای رشد شنبلیله نشان داد که تمام گیاهچه‌های شنبلیله تا شوری دسی‌زیمنس بر متر ۷/۵ زنده بودند، لیکن در شوری‌های زیادتر، ۸۰، ۸۰ و ۴۰ درصد از گیاهچه‌ها به ترتیب در شوری‌های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵دسی‌زیمنس بر متر زنده ماندند (Zahir and Hussein, 2010). در آزمایشی، اثر شوری (mM NaCl ۱۸۰، ۱۲۰، ۶۰ و صفر) بر رشد شنبلیله بررسی و نشان داده شد که اعمال شوری در سطوح ۶۰، ۸۰ و ۱۸۰ mM NaCl وزن خشک اندام هوایی را به ترتیب به میزان ۳۷، ۵۰ و ۵۳ درصد کاهش داد. دلیل این امر به کاهش سطح برگ و فعالیت‌های فتوسنتزی نسبت داده شد (Naseri, et al., 2016). در آزمایش دیگری، تأثیر برخی تنش‌های غیرزنده بر گیاهچه‌های شنبلیله بررسی و نشان داده شد که شوری موجب کاهش محتوی آبی و وزن خشک اندام هوایی شد (Sindhu, et al., 2017). مطالعات چادهوری و همکاران (Chowdhury, et al. 2016) بر روی شنبلیله نشان داد که شوری رشد گیاه را تحت تأثیر قرار داد. در مرحله جوانه‌زنی، هنگامی‌که شوری خاک از ۴ دسی‌زیمنس بر متر زیادتر رفت میزان تلفات گیاهچه‌های شنبلیله به مقدار زیادی

تحت تأثیر واقع شد. لیکن، در مراحل بعدی رشد تا زمان رسیدگی، شنبلیله توانست شوری‌های زیادتر (۱۲-۴دسی‌زیمنس بر متر(را تحمل کند. در زمان رسیدگی، اعمال تنش شوری ۱۲دسی‌زیمنس بر متر نتوانست تأثیر قابل‌توجهی بر بقا گیاهان داشته باشد. این آزمایش نشان داد که اعمال شوری زیادتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر طی جوانه‌زنی و مرحله رشد رویشی ممکن است عملکرد محصول را ۴۰-۳۰ درصد کاهش دهد. مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف شوری تا ۳۵۰ mM NaCl روی مقدار عناصر معدنی شنبلیله طی دوره کامل رشد نشان داد که با افزایش شوری عناصری نظیر سدیم، کلر، فسفر، آهن، منگنز و روی افزایش و عناصری مانند کلسیم و پتاسیم کاهش یافتند (Tunctürk, 2011). در بررسی اثرات تنش شوری (۲۲۵، ۱۵۰، ۷۵ و صفر mM NaCl) بر شنبلیله، نوح پیشه و همکاران (Noohpisheh, et al., 2020) نشان دادند که شوری در غلظت mM NaCl 225 موجب کاهش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی و ریشه شد. این محققین گزارش کردند که تحت تنش شوری، کاربرد نانو ذرات روی موجب تخفیف اثرات تنش شوری و بهبود شرایط رشدی گیاهان شد. در یک آزمایش مزرعه‌ای اثرات مقادیر مختلف ورمی‌کمپوست بر عملکرد شنبلیله تحت شرایط شور بررسی و معلوم شد که مصرف ورمی‌کمپوست عملکرد و اجزای عملکرد را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. این در حالی است که تیمار شوری در سطوح ۱۰۰ و ۱۲۰۰ mM NaC موجب کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه، تعداد نیام، تعداد دانه در نیام و تعداد انشعاب شد (Barahouee and Sabbagh, 2017). گزارش‌هایی در دست است که نشان می‌دهد شنبلیله می‌تواند شرایط خشکی را نیز تحمل کند. به‌عنوان نمونه زمانی و همکاران (Zamani, et al., 2018) اثرات سطوح مختلف خشکی (۷- bar، ۵-، ۳-) را روی دو جمعیت شنبلیله در مرحله جوانه‌زنی موردمطالعه قرار داده و خاطرنشان کردند که صرف مقاومت و یا حساسیت به خشکی در مرحله جوانه‌زنی نمی‌تواند بیانگر مقاومت و یا حساسیت گیاه در مراحل بعدی رشد باشد. این محققین، نشان دادند که کاربرد ملاتونین موجب تخفیف اثرات تنش خشکی شنبلیله در مراحل اولیه رشد رویشی شد (Zamani, et al., 2020).

برای تحمل به شوری گیاهان، مدل‌های مختلفی به کار برده شده‌اند. برخی از این مدل‌ها واکنش عملکرد گیاهان به شوری را به‌صورت خطی بیان می‌دارند. بر اساس مدل خطی، هنگامی‌که شوری محیط ریشه بین صفر و حد آستانه باشد، عملکرد نسبی برابر ۱۰۰ درصد است، لیکن، در شوری‌های زیادتر از آن عملکرد گیاه متناسب با شوری محیط کاهش می‌یابد (Maas and Hoffman, 1977). در مدل‌های غیرخطی، با افزایش شوری، کاهش عملکرد به‌صورت خطی نبوده و عملکرد از همان ابتدا متناسب با شوری محیط به‌صورت غیرخطی شروع به کاهش پیدا می‌کند (Van Genuchten and Hoffman, 1984). عوامل مختلفی عملکرد محصولات زراعی را در تنش شوری تحت تأثیر قرار می‌دهند و بنابراین داشتن شاخصی برای مقایسه تحمل به شوری گیاهان می‌تواند مفید باشد. محققان، بر اساس مدل غیرخطی شاخص تحمل به شوری (ST-index) را به‌عنوان معیاری برای مقایسه تحمل به شوری گیاهان زراعی پیشنهاد کردند (Steppuhn, et al., 2005a; Steppuhn, et al., 2005b).

با توجه به گسترش اراضی شور و وجود منابع عظیم آب‌شور، شناخت گیاهان دارویی متحمل به شوری برای بهره‌برداری از منابع آب‌وخاک شور اهمیت دارد. این پژوهش به‌منظور ارزیابی تحمل به شوری شنبلیله در مرحله رشد رویشی و اثرات مصرف آب‌شور بر عملکرد آن انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور مطالعه تأثیر شوری بر برخی صفات مورفولوژیک شنبلیله، تعیین حد آستانه تحمل به شوری و ارزیابی واکنش آن به تنش شوری با استفاده از مدل‌های تجربی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. ابتدا بذرهای شنبلیله در گلدان‌های استوانه‌ای شکل پلاستیکی به ارتفاع ۳۰ cm و قطر دهانه ۲۵ cm پرشده با خاک دارای بافت لوم شنی در عمق ۲ cm در پانزدهم آذرماه سال ۱۳۹۶ کاشت شد. مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورداستفاده در جدول ۱ درج شده است. خاک مورداستفاده از عمق ۳۰ cm مزرعه تحقیقات شوری صدوق واقع در شمال استان یزد با مختصات جغرافیایی mE239179 و mN 3549685 تهیه شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورداستفاده قبل از آبشویی

Table 1. Physicochemical peroperties of soil used in the experiment before leaching

ویژگی Peroperty	واحد Unit	نماد Symbol	مقدار Value	روش / دستگاه اندازه‌گیری Method / Device	منبع Reference
قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity	دسی‌زیمنس بر متر	EC	11.91	EC meter, WTW Co.	-
واکنش خاک pH	-	pH	7.48	pH meter, Metrohm Co.	-
کربنات Carbonate	Meq/lit	CO_3^{-2}	0.00	تیتراسیون کمپلکسومتری Complexometric titration	ISRIC, 1986
بی‌کربنات Bicarbonate	Meq/lit	HCO_3^-	1.21	تیتراسیون کمپلکسومتری Complexometric titration	ISRIC, 1986
کلر Chloride	Meq/lit	Cl^-	61.8	تیتراسیون کمپلکسومتری Complexometric titration	ISRIC, 1986
سولفات Sulphate	Meq/lit	SO_4^{2-}	66.54	محاسباتی Computational	ISRIC, 1986
کلسیم محلول Calcium (aq)	Meq/lit	Ca^{2+}	61.1	تیتراسیون کمپلکسومتری Complexometric titration	ISRIC, 1986
منیزیم محلول Magnesium (aq)	Meq/lit	Mg^{2+}	21.18	تیتراسیون کمپلکسومتری Complexometric titration	ISRIC, 1986
سدیم Sodium	Meq/lit	Na^+	47.3	شعله‌سنجی Flamephotometric	ISRIC, 1986
پتاسیم محلول Aqueous Potassim	Meq/lit	K^+	little	شعله‌سنجی Flamephotometric	ISRIC, 1986
نسبت جذب سدیم Sodium absorbtion ratio	-	SAR	7.37	محاسباتی Computational	ISRIC, 1986
مواد آلی Organic matter	%	O.M.	0.02	والکی بلاک Walkley-Black	ISRIC, 1986
نیتروژن کل Total nitrogen	%	T.N.	0.001	محاسباتی Computational	ISRIC, 1986
فسفر قابل‌جذب Available phosphorous	mg/kg	P_{av}	6.64	اولسن، عصاره‌گیر بی‌کربنات‌پتاسیم Olsen, $KHCO_3$ extractor	ISRIC, 1986
پتاسیم قابل‌جذب Available potassium	mg/kg	K_{av}	155	استات آمونیوم Ammonium Acetate	ISRIC, 1986
شن Sand	%	Sand	80.36	هیدرومتری Hydrometric	Carter and Gregorich, 2008
سیلت Silt	%	Silt	8.64	هیدرومتری Hydrometric	Carter and Gregorich, 2008
رس Clay	%	Clay	11	هیدرومتری Hydrometric	Carter and Gregorich, 2008
بافت خاک Soil texture	-	Texture	Sandy loam	مثلث بافت خاک Soil texture triangle	Carter and Gregorich, 2008

گلدان‌ها پس از پر شدن با خاک به درون گلخانه تحقیقاتی مرکز ملی تحقیقات شوری واقع در یزد (دمای حداکثر ۲۵°C، دمای حداقل ۲۰°C) منتقل شدند. قبل از کاشت، با توجه به شوری زیاد خاک (۱۱/۹۱ دسی‌زیمنس بر متر)، عملیات آبشویی با آب غیر شور (دارای قابلیت هدایت الکتریکی ۳۷۵ µmos/cm) جهت شستشوی املاح اضافی از منطقه توسعه ریشه و سبز شدن یکنواخت بذور، انجام شد، به‌طوری‌که شوری عصاره اشباع خاک پس از آبشویی به ۳/۸۱

دسی‌زیمنس بر متر تقلیل یافت. پس از کاشت، آبیاری گلدان‌ها با آب غیر شور تا مرحله پنج‌برگی انجام و سپس تیمارهای شوری اعمال شدند. طرح آماری مورداستفاده به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. تیمارهای موردنظر شامل هفت سطح شوری (۱۲، ۱۰، ۹، ۶، ۴، ۲، ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر) بودند که از طریق اختلاط آب‌شور زیرزمینی (با قابلیت هدایت الکتریکی ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر) و آب غیر شور تأمین شد. در جدول ۲ مشخصات تجزیه شیمیایی آب‌شور مورداستفاده ارائه شده است.

جدول ۲. تجزیه شیمیایی آب‌شور مورداستفاده

Table 2. Chemical analysis of saline water used in the experiment

قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS/m)	pH	کاتیون‌ها (میلی الی والان در لیتر) Cations (meq/lit)				آنیون‌ها (میلی الی والان در لیتر) Anions (meq/lit)				نسبت جذب سدیم SAR
		K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	
14	8.26	0.41	141	42.81	22.19	22.36	184.5	1.98	0.92	24.73

برای تخمین کسر آبشویی از روش ارائه شده توسط آیرز و وسکات (Ayers and Westcot, 1989) استفاده شد. این محققین جدولی ارائه کردند که در آن به ازای هریک از مقادیر عامل غلظت، کسر آبشویی متناظر با آن محاسبه و ارائه شد. لذا به کمک این جدول می‌توان کسر آبشویی را به‌صورت تابعی از عامل غلظت به‌صورت یک معادله ریاضی بیان کرد که در آن قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک برابر با حاصل‌ضرب عامل غلظت در قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری بود. به‌منظور جلوگیری از افزایش شوری خاک در طول فصل رشد، آبیاری گلدان‌ها با در نظر گرفتن ۳۰ درصد آب بیشتر از نیاز آبی به‌عنوان کسر آبشویی برای شستشوی املاح اضافی و جلوگیری از تجمع آن‌ها در منطقه توسعه ریشه انجام شد. اعمال تیمار شوری به‌صورت تدریجی انجام شد تا از ایجاد شوک ناگهانی به گیاهان جلوگیری شود. آبیاری گلدان‌ها با توجه به تغییرات وزن آن‌ها و نیاز آبشویی تا رسیدن به ظرفیت زراعی بود. برای این منظور، ضمن اندازه‌گیری وزن خاک خشک گلدان‌ها (۴۸ ساعت در آون با دمای $^{\circ}C$ ۷۰)، میزان رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم توسط دستگاه صفحات فشاری (Pressure Plate Apparatus، مدل ۱۵۰۰، ساخت شرکت Soil Moisture، آمریکا)، اندازه‌گیری شد. به‌منظور کنترل شوری خاک و جلوگیری از افزایش شوری در منطقه توسعه ریشه، عملیات آبیاری گلدان‌ها در هنگام نیاز و به مقدار معین انجام شد. قبل از هر آبیاری، برای کنترل دقیق‌تر شوری خاک و اطمینان از تجمع بیش‌ازحد نمک در خاک، میزان شوری عصاره خاک با نصب سنسورهای کالیبره شده مخصوص اندازه‌گیری شوری خاک در عمق خاک گلدان توسط دستگاه سنجش شوری خاک (Soil Salinity Bridge، مدل ۵۵۰۰، ساخت شرکت Soil Moisture، آمریکا)، تعیین شد.

حجم و قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری و نیز حجم و قابلیت هدایت الکتریکی آب زهکش شده در تمام عملیات آبیاری برای هر یک از تیمارها، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی از دستگاه ECمتر پرتابل (مدل LF318، ساخت شرکت WTW، آلمان) استفاده شد. در این پژوهش مجموع دفعات آبیاری و کل حجم آب مصرفی در طول آزمایش برای تمام سطوح شوری یکسان نبود، به‌طوری‌که در سطوح کم شوری گیاهان آب بیشتر و با فاصله کمتری دریافت می‌کردند، لیکن به‌تدریج با افزایش شوری آب آبیاری، میزان حجم آب مصرفی و دفعات آن کاهش می‌یافت. در پایان آزمایش، به‌منظور تعیین قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، نمونه خاک با استفاده از نمونه‌گیر نوک اردکی از خاک هر یک از تیمارها گرفته شد.

با توجه محدودیت حجم خاک گلدان و عدم امکان نمونه‌گیری متعدد از آن در طول فصل رشد، پایش متعدد و منظم میزان شوری خاک قبل از هر آبیاری با استفاده سنسورهای مخصوص دستگاه سنجش شوری خاک (Soil Salinity Bridge، مدل ۵۵۰۰، ساخت شرکت Soil Moisture، آمریکا) و نیز اندازه‌گیری حجم آب زهکشی و قابلیت هدایت الکتریکی آن بیانگر کنترل مطلوب شوری خاک بود. در جدول ۳، کل حجم آب مصرفی و متوسط شوری عصاره اشباع خاک در عمق توسعه ریشه که گیاه در طول فصل رشد با آن روبرو بوده درج شده است.

جدول ۳. قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری، حجم آب مصرفی و متوسط شوری عصاره اشباع خاک

Table 3. Electrical conductivity of irrigation water, total volume of water and the average salinity of soil saturated extract

قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS/m)	کل حجم آب مصرفی Total valume (lit)	متوسط قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک Average salinity of soil saturated extract (dS/m)			
		تکرار ۱ Replicate 1	تکرار ۲ Replicate 2	تکرار ۳ Replicate 3	میانگین Average
0.5	75.01	1.46	1.37	1.37	1.40
2	62.99	3.52	3.48	3.57	3.52
4	54.01	5.40	5.45	5.43	5.43
6	47.88	7.15	6.97	7.30	7.14
8	37.38	9.36	8.82	9.36	9.18
10	32.34	10.69	10.70	10.41	10.60
12	30.24	11.51	11.56	11.62	11.56

گیاهان برای مدت سه ماه در گلخانه رشد کرده و سپس در نیمه اسفندماه سال ۱۳۹۶ در انتهای مرحله رشد رویشی و قبل از گلدهی جهت اندازه‌گیری‌های موردنظر برداشت شدند. پس از برداشت، نمونه‌های گیاهی در داخل پاکت‌های کاغذی قرار داده‌شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. صفاتی که در این پژوهش اندازه‌گیری شدند شامل ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، تعداد انشعاب در بوته، تعداد گره روی ساقه اصلی در بوته، قطر ساقه، طول میانگره، ضخامت برگ، شاخص سبزینگی برگ (عدد SPAD)، میانگین سطح برگ‌های گسترش‌یافته، سطح ویژه برگ، نسبت ریشه به اندام هوایی، محتوی آبی گیاه و کارایی مصرف آب بود. در این پژوهش، قطر ساقه و ضخامت برگ با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر، شاخص سبزینگی برگ از طریق اندازه‌گیری میانگین میزان رنگ سبز ده عدد برگ گسترش‌یافته با استفاده از دستگاه سنجش رنگ برگ (مدل CCM-200، ساخت شرکت ADC، انگلستان)، وزن ویژه برگ از تقسیم وزن خشک برگ بر سطح برگ و کارایی مصرف آب از طریق تقسیم وزن خشک اندام هوایی بر مقدار آب آبیاری مصرفی در کل دوره رشد محاسبه شد. همچنین، سطح برگ از طریق میانگین سطح ده عدد برگ گسترش‌یافته اندازه‌گیری شده به‌وسیله دستگاه پرتابل سنجش سطح برگ (مدل AM-100، ساخت شرکت ADC، انگلستان) محاسبه شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه و اندام هوایی، پس از جداسازی آن‌ها و شستشوی ریشه‌ها با آب و خشک‌کردن سطحی، وزن خشک آن‌ها پس از قرار داده شدن در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، با ترازوی حساس با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم، اندازه‌گیری شد. در پایان، داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از نرم‌افزار SAS آنالیز آماری شدند و مقایسه میانگین‌ها پس از اطمینان از معنی‌دار بودن F با استفاده از آزمون حداقل اختلافات معنی‌دار در سطح پنج درصد انجام شد.

در این پژوهش، همچنین، حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد (وزن خشک اندام هوایی) به ازای هر واحد افزایش شوری با استفاده از مدل سه‌قسمتی پیشنهادی توسط ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977) برآورد شد. هنگامی‌که شوری (EC) بین صفر و حد آستانه (a_0) باشد، عملکرد نسبی (Y) برابر ۱۰۰ درصد است. لیکن، در شوری‌های زیادتر از حد آستانه عملکرد نسبی با شیب ثابتی (l) به‌صورت خطی شروع به کاهش می‌کند (معادله ۱):

$$Y = 100 - l\,(EC - a_0) \qquad [۱]$$

در این پژوهش برخی مدل‌های غیرخطی نیز آزمون شدند. بر اساس مدل وانگنوختن و هافمن (Van Genuchten and Hoffman, 1984)، عملکرد نسبی از همان ابتدا به‌صورت غیرخطی شروع به کاهش کرده و در نقطه EC50 مقدار آن به ۵۰٪ کاهش می‌یابد (معادله ۲). در این رابطه، Y_m عملکرد حداکثر در شرایط غیر شور بوده و p یک ضریب تجربی است که همیشه زیادتر از یک است.

$$Y = Y_m / [(1 + (EC / EC_{50})^p] \qquad [۲]$$

در این پژوهش، با استفاده از معادله چند جزئی نزولی تغییریافته (Steppuhn, et al., 2005a) مدل دیگری آزمون شد که در آن کاهش عملکرد در اثر افزایش شوری به‌صورت غیرخطی است (معادله ۳). پارامتر s در این رابطه شیب

منحنی است که از قدر مطلق مشتق تغییرات عملکرد نسبی به تغییرات شوری محیط (|dY/dEC|) به دست می‌آید. همچنین، عبارت نمایی (s. EC_{50}) میزان برآمدگی و یا فرورفتگی دو طرف منحنی را نسبت به EC_{50} نشان می‌دهد.

$$Y = 1 / [(1+ (EC / EC50)^{(s. EC50)}] \quad [۳]$$

همچنین، با معلوم بودن مقادیر EC50 و s، شاخص تحمل به شوری شنبلیله در مرحله رشد رویشی مطابق معادله ۴ محاسبه شد. با محاسبه شاخص تحمل به شوری، روند واکنش تحمل به شوری در مدل خطی با سایر مدل‌های غیرخطی تجربی مطالعه و ارزیابی شد.

$$ST\text{-}index = EC_{50} + s.\ EC_{50} \quad [۴]$$

نتایج و بحث

در جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس برای میانگین مربعات صفات مختلف موردمطالعه نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر شوری روی صفات موردمطالعه در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

جدول ۴. تجزیه واریانس برای میانگین مربعات صفات مختلف اندازه‌گیری شده

Table 4. Analysis of variance for mean squars of measured different traits

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع Height	تعداد برگ Number of leaves	تعداد انشعاب Number of branches	تعداد گره Number of nodes	قطر ساقه Stem diameter	طول میانگره Internode length	ضخامت برگ Leaf thickness
تکرار Replicate	2	4.884^{ns}	1.576^{ns}	0.0278^{ns}	0.2356^{ns}	0.0139^{ns}	0.2785^{ns}	33.286^{ns}
شوری Salinity	6	403.73**	234.53**	0.2299**	6.1265**	1.1325**	740.83**	28465**
خطا Error	12	8.0519	4.3604	0.0226	0.1243	0.0117	1.2227	129.05
ضریب تغییرات C.V%		*5.50*	*4.57*	*1.96*	*1.89*	*3.28*	*3.16*	*2.67*

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

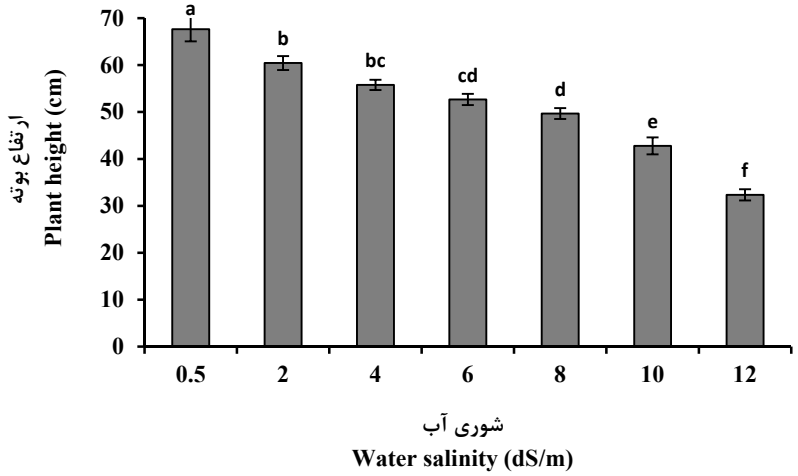
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	سطح برگ Leaf area	شاخص سبزینگی SPAD number	سطح برگ ویژه Special leaf area	نسبت ریشه به اندام هوایی LS ratio	محتوی آبی Water content	کارایی مصرف آب WUE
تکرار Replicate	2	0.0213^{ns}	385.89^{ns}	2.8483^{ns}	3.3194^{ns}	0.0011^{ns}	412.34^{ns}	0.0021^{ns}
شوری Salinity	6	0.3763**	4103.3**	200.82**	11.507^{ns}	0.0115**	11953**	0.0503**
خطا Error	12	0.0160	122.33	1.6619	9.2726	0.0023	385.36	0.0058
ضریب تغییرات C.V%		*9.21*	*11.72*	*2.83*	*9.98*	*14.09*	*3.29*	*6.11*

**: معنی‌دار در سطح ۱٪، *: معنی‌دار در سطح ۵٪، ns: غیرمعنی‌دار

**:Significant at the level of 1%, *: Significant at the level of 5%, ns: not significant

نتایج نشان داد که تیمار شوری به‌طورکلی موجب کاهش ارتفاع بوته گیاه شنبلیله شد. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۱، اعمال شوری در سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته به مقدار ۱۰/۶۷ درصد نسبت به شاهد شد. این در حالی است که افزایش شوری در سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر اگرچه که موجب کاهش بیشتر ارتفاع بوته شد، لیکن این کاهش (۷/۷۱ درصد) نسبت به سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نبود. بر اساس نتایج

ارائه شده در شکل ۱، اعمال شوری در سطوح ۶ و ۸دسی‌زیمنس بر متر، موجب کاهش ارتفاع اندام هوایی به ترتیب به میزان ۲۲/۱۵ و ۲۶/۵۹ درصد نسبت به شاهد شد، اما تفاوت آماری معنی‌داری بین سطوح ۶ و دسی‌زیمنس بر متر8 ازنظر تأثیر بر ارتفاع اندام هوایی مشاهده نشد؛ به‌عبارت‌دیگر، سطوح شوری ۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر، ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر و ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر، هر سه تأثیر مشابهی بر ارتفاع بوته نشان دادند. افزایش شوری در سطح ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، ارتفاع بوته را با شدت بیشتری به‌اندازه ۱۳/۸۷ درصد نسبت به سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر و ۳۶/۷۷ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. بر اساس نتایج حاصله بیشترین مقدار کاهش ارتفاع بوته نسبت به شاهد (۵۲/۲ درصد) از اعمال زیادترین سطح شوری (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) به دست آمد که این کاهش نسبت به همه سطوح شوری ازنظر آماری معنی‌دار بود. درواقع، بیشترین مقدار شیب کاهش ارتفاع بوته از اعمال سطوح شوری زیادتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد (شکل ۱).



شکل ۱. تأثیر سطوح مختلف تنش شوری روی ارتفاع گیاه (cm) شنبلیله

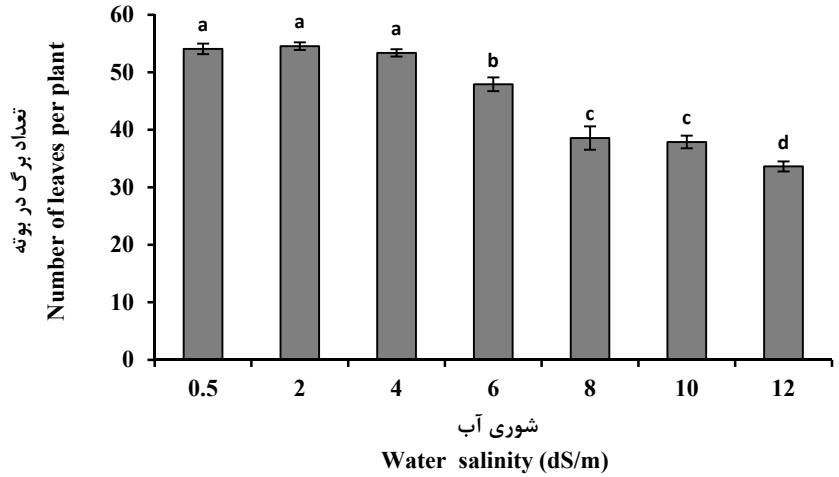
Fig. 1. Effect of different levels of salinity stress on height (cm) of fenugreek

تأثیر شوری بر تعداد برگ در بوته در شکل ۲ نشان داده شده است. شوری درمجموع موجب کاهش تعداد برگ شد که میزان این کاهش بسته به سطح شوری متفاوت بود. اعمال شوری تا سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری در تعداد برگ نسبت به شاهد ایجاد نکرد، لیکن در سطوح زیادتر، افزایش شوری موجب کاهش تعداد برگ در بوته شد، به‌طوری‌که اعمال شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش ۱۱/۳۸ درصد در تعداد برگ نسبت به شاهد شد که ازنظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۲). نتایج ارائه شده در شکل ۲ نشان داد که اگرچه اعمال تیمار شوری در سطح ۸دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش معنی‌دار تعداد برگ در بوته به مقدار ۱۹/۵۲ درصد نسبت به سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر ایجاد کرد، لیکن تنش شوری در سطح ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر تفاوت معنی‌داری با سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر تأثیر بر تعداد برگ در بوته نداشت. بر اساس نتایج حاصله، بیشترین مقدار کاهش تعداد برگ در بوته (۳۷/۷۹ درصد نسبت به شاهد) از اعمال زیادترین سطح شوری (۱۲دسی‌زیمنس بر متر) حاصل شد که علاوه بر شاهد نسبت به سایر تیمارها نیز معنی‌دار بود (شکل ۲).

نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار شوری درمجموع تعداد انشعاب در بوته را کاهش داد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۳، اعمال شوری تا سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری در تعداد انشعاب در بوته نسبت به شاهد ایجاد نکرد، لیکن شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر، به‌طور معنی‌داری تعداد انشعاب در بوته را به‌اندازه ۴/۷۴ درصد نسبت به شاهد کاهش داد.

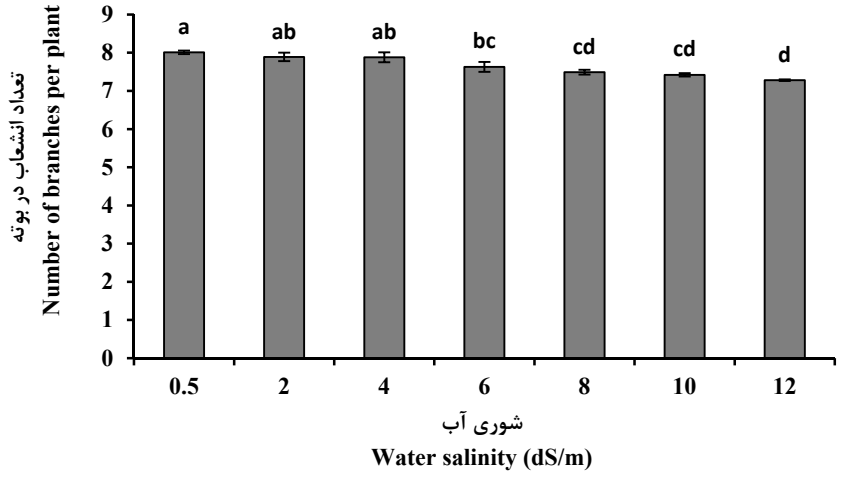
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۳، اعمال شوری در سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش بیشتر و معنی‌دار تعداد انشعاب در بوته (۶/۴۹ درصد نسبت به شاهد) شد، لیکن این کاهش نسبت به سطوح شوری کم‌تر (۶ دسی‌زیمنس بر متر) و زیادتر (۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) ازنظر آماری معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که اعمال شوری در

سطوح ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بدون داشتن تفاوت معنی‌دار نسبت به یکدیگر به ترتیب موجب ۷/۳۷ و ۹/۱۱ درصد کاهش در تعداد انشعاب در بوته نسبت به شاهد شدند؛ بنابراین، تنش شوری تعداد انشعاب در بوته را با شیب بسیار ملایمی کاهش داد. اگرچه اعمال زیادترین سطح شوری (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر)، بیشترین کاهش را در تعداد انشعاب در بوته شنبلیله ایجاد کرد، لیکن تفاوت آماری معنی‌داری بین تیمارهای شوری ۸، ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر تعداد انشعاب در بوته مشاهده نشد. درواقع، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سطوح شوری ۲، ۴، ۶ دسی‌زیمنس بر متر و نیز سطوح ۶، ۸، ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر مشابهی بر تعداد انشعاب در بوته داشتند.



شکل ۲. تأثیر سطوح مختلف شوری روی تعداد برگ در بوته

Fig. 2. Effect of different levels of salinity on the numper of leaves per plant

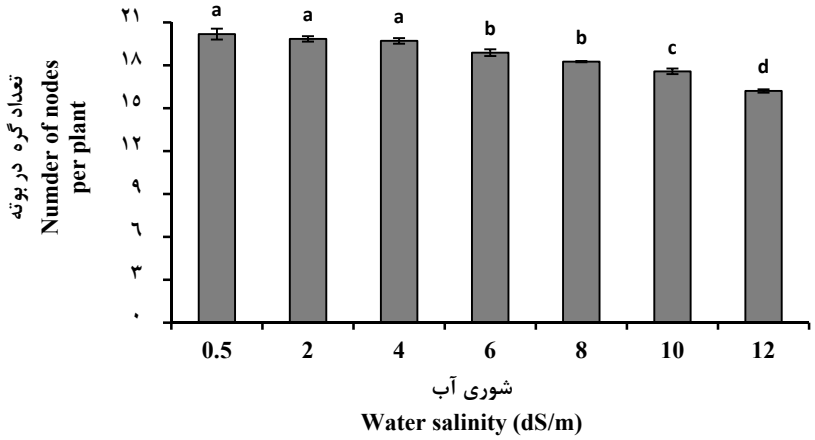


شکل ۳. تأثیر سطوح مختلف شوری روی تعداد انشعاب در بوته

Fig. 3. Effect of different levels of salinity on the numper of branches per plant

تأثیر شوری بر تعداد گره روی ساقه اصلی در بوته شنبلیله در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با داده‌های ارائه شده در شکل ۴، شوری تا سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر آماری معنی‌داری بر تعداد گره روی ساقه اصلی نداشت. لیکن، افزایش شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش معنی‌دار تعداد گره در بوته به میزان ۶/۴۴ درصد شد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، اگرچه اعمال شوری زیادتر در سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش بیشتری در تعداد گره

نسبت به سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر ایجاد نکرد، اما نسبت به تیمار شاهد، تعداد گره در بوته را به‌طور معنی‌داری به میزان ۹/۵۴ درصد کاهش داد. نتایج نشان داد که اعمال شوری در سطوح زیادتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر، تعداد گره در بوته را به‌طور معنی‌داری به میزان ۱۲/۹ و ۱۹/۷۲ درصد به ترتیب در سطوح ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به شاهد کاهش داد. این اثرات کاهنده شوری روی تعداد گره در بوته حاصل از سطوح زیاد شوری، علاوه بر اینکه نسبت به شاهد ازنظر آماری معنی‌دار بودند، نسبت به سایر سطوح شوری نیز معنی‌دار بودند؛ بنابراین، به‌موازات افزایش شوری، تعداد گره در بوته ابتدا تا سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر با شیب ملایمی شروع به کاهش پیدا کرد، لیکن این کاهش، در سطوح زیاد شوری (۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) با شیب به‌مراتب تندتری ادامه یافت (شکل ۴).



شکل ۴. تأثیر سطوح مختلف شوری روی تعداد گره در بوته

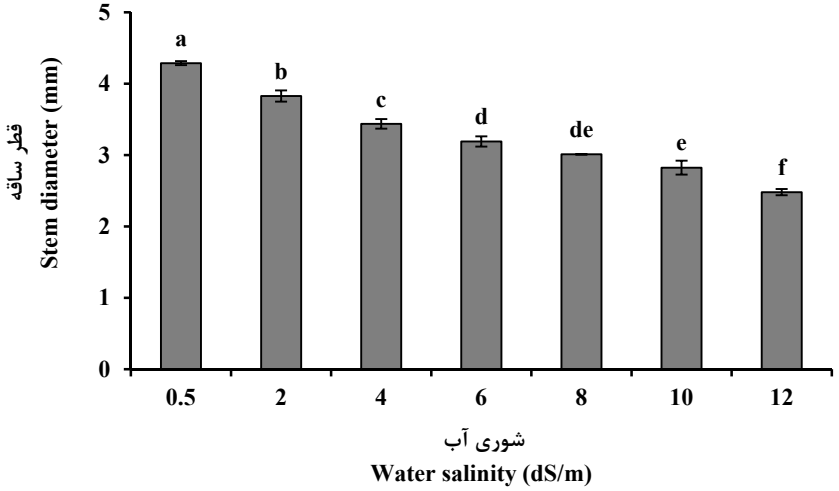
Fig. 4. Effect of different levels of salinity on the numper of nodes per plant

نتایج نشان داد که شوری در اولین سطح (۲ دسی‌زیمنس بر متر) قطر ساقه را به‌طور معنی‌داری به میزان ۱۰/۷۳ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. با ادامه افزایش شوری، قطر ساقه شنبلیله کاهش بیشتری پیدا کرد، به‌طوری‌که تنش شوری در سطوح ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر، قطر ساقه را به ترتیب به میزان ۱۹/۸۳ و ۲۵/۵۸ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. بر اساس نتایج حاصله، افزایش شوری در سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش بیشتری را در قطر ساقه ایجاد کرد، به‌طوری‌که این کاهش نسبت به شاهد و نیز سطوح شوری ۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار بود، لیکن نسبت به سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر آماری معنی‌دار نشد. نتایج ارائه شده در شکل ۵ نشان داد که افزایش شوری در سطح ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بدون داشتن تغییر معنی‌دار نسبت به سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش قطر ساقه به میزان ۳۴/۱۴ درصد نسبت به شاهد شد؛ بنابراین، سطوح شوری ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و نیز سطوح ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر آماری تأثیر مشابهی بر قطر ساقه داشتند. با ادامه افزایش شوری قطر ساقه کاهش بیشتری پیدا کرد، به‌طوری‌که کمترین مقدار قطر ساقه (mm۲/۴۸) از اعمال زیادترین سطح شوری (۱۲دسی‌زیمنس بر متر) حاصل شد که نسبت به شاهد ۴۲/۱۵ درصد کاهش داشت (شکل ۵).

نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال شوری در سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر طول میانگره ساقه را به‌شدت کاهش داد. مطابق با داده‌های ارائه شده در شکل ۶، شوری در سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر، طول میانگره را به میزان ۳۷/۹ درصد نسبت به شاهد کاهش داد.

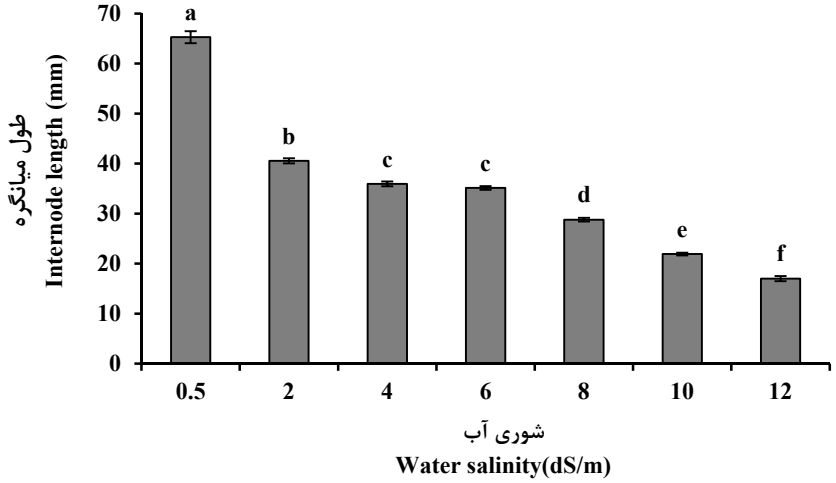
ادامه افزایش شوری در سطح ۴، موجب کاهش بیشتر طول میانگره ساقه شد، لیکن، این کاهش با شیب معنی‌دار و ملایم‌تری همراه بود (۱۱/۳۵ درصد نسبت به سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر). نتایج نشان داد که افزایش بیشتر شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر، نتوانست کاهش آماری معنی‌داری نسبت به سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر تأثیر بر طول میانگره ایجاد کند؛ به‌عبارت‌دیگر، سطوح شوری ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر هر دو تأثیر آماری یکسانی بر طول

میانگره ساقه داشتند. بر اساس نتایج حاصله، اعمال سطوح شوری ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش طول میانگره ساقه به ترتیب به میزان ۵۵/۹ و ۶۶/۴۲ درصد نسبت به شاهد شد که علاوه بر شاهد نسبت به یکدیگر و نیز نسبت به سایر سطوح شوری نیز معنی‌دار بود. با ادامه افزایش شوری طول میانگره کاهش بیشتری پیدا کرد، به‌طوری‌که با اعمال زیادترین سطح شوری (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر)، طول میانگره به میزان ۷۳/۹۴ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت؛ بنابراین، سطوح شوری ۸، ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، طول میانگره ساقه را با شدت بیشتری نسبت به سطوح شوری ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر کاهش دادند (شکل ۶).



شکل ۵. تأثیر سطوح مختلف تنش شوری روی قطر ساقه (mm) شنبلیله

Fig. 5. Effect of different levels of salinity stress on stem diameter (mm) of fenugreek

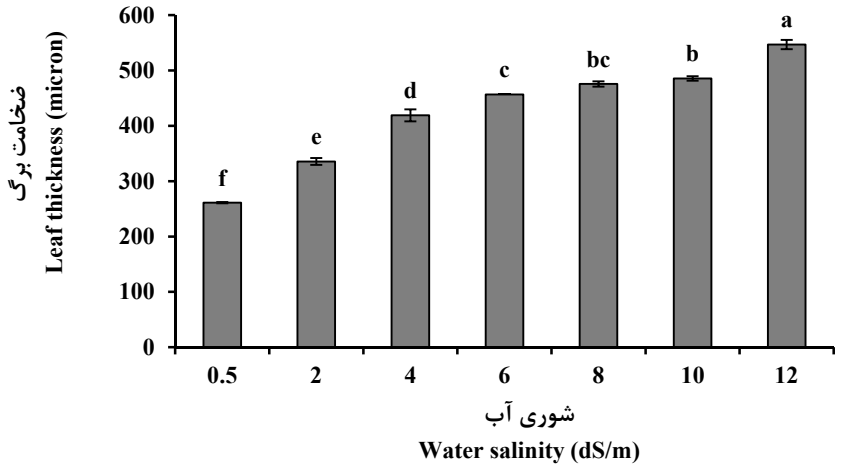


شکل ۶. تأثیر سطوح مختلف تنش شوری روی طول میانگره (mm) ساقه شنبلیله

Fig. 6. Effect of different levels of salinity stress on stem internode length (mm) of fenugreek

نتایج نشان داد که تنش شوری درمجموع ضخامت برگ را در شنبلیله افزایش داد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، اعمال شوری در سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر ضخامت برگ را به میزان ۲۸/۵۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. با افزایش تنش شوری، ضخامت برگ افزایش بیشتری پیدا کرد به‌طوری‌که اعمال شوری در سطوح ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر، موجب افزایش ضخامت برگ به ترتیب به میزان ۶۰/۴۲ و ۷۴/۹۱ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار شد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است علیرغم اینکه تنش شوری تا سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر ضخامت برگ را با شیب

به‌مراتب شدیدی افزایش داد، اعمال شوری در سطوح زیادتر (۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) موجب افزایش ضخامت برگ با آهنگ نسبتاً آهسته‌تری شد. درواقع، شوری در سطوح ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر ضخامت برگ را بدون داشتن اختلاف معنی‌دار نسبت به یکدیگر به ترتیب به میزان ۴/۱۳ و ۶/۳۱ درصد نسبت به شوری سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر افزایش داد. این افزایش نسبت به شاهد به ترتیب معادل ۸۲/۱۴ و ۸۵/۹۶ درصد بود. بر اساس نتایج حاصله درحالی‌که افزایش شوری در سطوح ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر اندکی بر افزایش ضخامت برگ نشان داد، اعمال زیادترین سطح شوری (۱۰دسی‌زیمنس بر متر)، ضخامت برگ را با شدت بیشتری افزایش داد، به‌طوری‌که افزایش نسبت به شاهد معادل ۱۰۹/۳۷ درصد و نسبت به سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر معادل ۱۲/۵۹ درصد بود (شکل ۷).



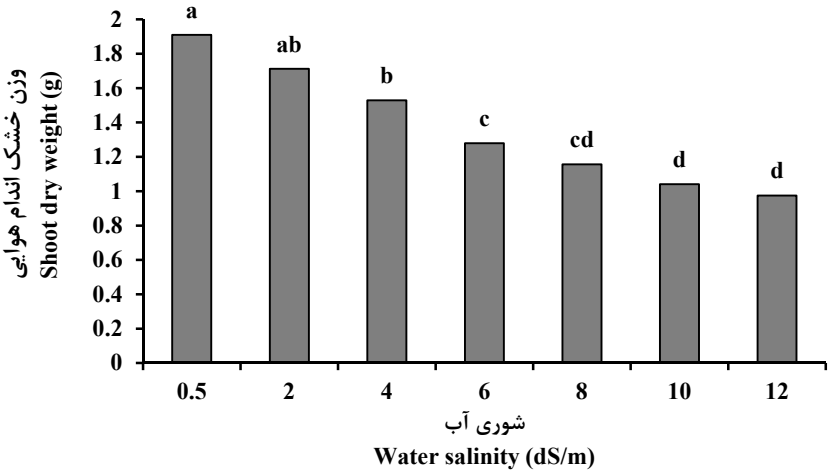
شکل ۷. تأثیر سطوح مختلف شوری روی ضخامت برگ (µm) شنبلیله

Fig. 7. Effect of different levels of salinity on leaf thickness (µm) of fenugreek

نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار شوری وزن خشک اندام هوایی در بوته را کاهش داد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۸، اعمال شوری در سطح ۲دسی‌زیمنس بر متر وزن خشک اندام هوایی را به میزان ۱۰/۳۳ درصد نسبت به شاهد کاهش داد، لیکن این کاهش ازنظر آماری معنی‌دار نبود. ادامه افزایش شوری در سطح ۴دسی‌زیمنس بر متر وزن خشک اندام هوایی را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری به میزان ۱۹/۹۶ درصد کاهش داد، هرچند که این کاهش نسبت به سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نشد. بر اساس نتایج حاصله افزایش شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر وزن خشک اندام هوایی را با شیب به‌مراتب بیشتری کاهش داد. این کاهش نسبت به شاهد معادل ۳۳/۰۲ درصد بود. ادامه افزایش شوری در سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر وزن خشک اندام هوایی را با آهنگ ملایم‌تری کاهش داد، به‌طوری‌که این کاهش نسبت به سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر آماری معنی‌دار نبود. نتایج، همچنین نشان داد که اگرچه ادامه افزایش بیشتر شوری موجب کاهش بیشتر وزن خشک اندام هوایی شد، لیکن اعمال سطوح شوری زیادتر (۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) تأثیر معنی‌داری بر کاهش وزن خشک اندام هوایی نسبت به سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر ایجاد نکرد؛ به‌عبارت‌دیگر، در سطوح زیاد شوری، کاهش وزن خشک اندام هوایی با شیب به‌مراتب کندتری دنبال شد و اعمال سطوح شوری ۸، ۱۰ و ۱۲ هر سه تأثیر آماری مشابهی بر وزن خشک اندام هوایی در بوته داشتند (شکل ۸).

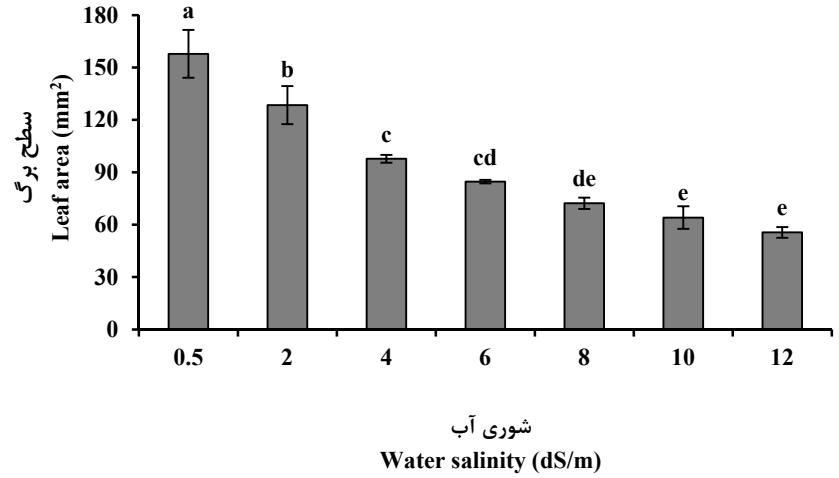
نتایج نشان داد که شوری میزان سطح برگ را کاهش داد. شوری در سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر سطح برگ را به میزان ۱۸/۶۱ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. ادامه افزایش شوری در سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش سطح برگ به مقدار ۳۸/۰۷ درصد شد. اگرچه شوری در سطوح کم (۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر) سطح برگ را با شدت زیادی کاهش داد، لیکن همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، سطوح زیادتر شوری کاهش سطح برگ را با آهنگ به‌مراتب کندتری دنبال کردند، به‌طوری‌که اعمال شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر سطح برگ را به‌طور غیر معنی‌داری به میزان ۱۳/۳۹ درصد نسبت به سطح برگ در شوری ۴

دسی‌زیمنس بر متر کاهش داد. نتایج نشان داد که با ادامه افزایش شوری در سطوح زیادتر، سطح برگ کاهش بیشتری پیدا کرد. اعمال شوری در سطح ۸ موجب کاهش سطح برگ به میزان ۵۴/۲۲ درصد نسبت به شاهد شد، ولی این کاهش نسبت به سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر آماری معنی‌دار نبود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۹، بیشترین مقدار کاهش سطح برگ (۶۴/۷۹ درصد نسبت به تیمار شاهد) از اعمال سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد، لیکن این کاهش نسبت به سطوح شوری کم‌تر (۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) معنی‌دار نبود.



شکل ۸. تأثیر سطوح مختلف شوری روی وزن خشک اندام هوایی (g) شنبلیله

Fig. 8. Effect of different levels of salinity on shoot dry weight (g) of fenugreek

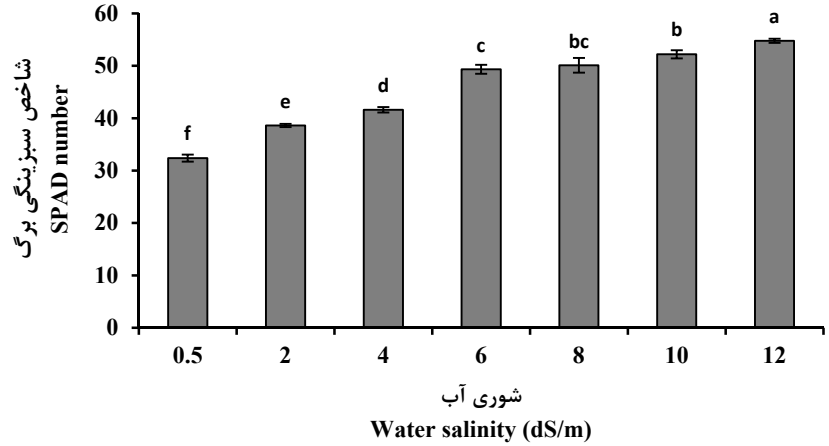


شکل ۹. تأثیر سطوح مختلف تنش شوری بر سطح برگ (mm^2) شنبلیله

Fig. 9. Effect of different levels of salinity stress on leaf area (mm^2) of fenugreek

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌موازات افزایش شوری، شاخص سبزینگی برگ (عدد SPAD) به‌تدریج افزایش یافت. اعمال تیمار شوری در سطح ۲دسی‌زیمنس بر متر شاخص سبزینگی برگ را نسبت به شاهد به میزان ۱۹/۳ درصد افزایش داد. با افزایش شوری در سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر، شاخص سبزینگی افزایش بیشتری پیدا کرد که هم نسبت شاهد (۲۸/۵۳ درصد) و هم نسبت به سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر (۷/۴۷ درصد) ازنظر آماری معنی‌دار بود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰، افزایش شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر، شاخص سبزینگی را به میزان ۵۲/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. درحالی‌که افزایش شوری تا سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر، شاخص سبزینگی را با شیب زیادی افزایش داد، اعمال سطوح شوری زیادتر از ۶ دسی‌زیمنس بر متر، این شاخص را با شیب به‌مراتب کندتری

ادامه داد، به‌طوری‌که تنش شوری در سطوح ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر شاخص سبزینگی برگ را به ترتیب به میزان ۱/۵۶ و ۵/۸۱ درصد نسبت به شوری سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر افزایش داد. درواقع، تفاوت شاخص سبزینگی برگ حاصل از سطوح شوری ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و نیز سطوح ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر آماری معنی‌دار نبود. بیشترین مقدار شاخص سبزینگی از اعمال سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد که نسبت به تمام سطح شوری و نیز شاهد (۶۹/۱۸ درصد افزایش) معنی‌دار بود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. تأثیر سطوح مختلف شوری بر شاخص سبزینگی برگ شنبلیله

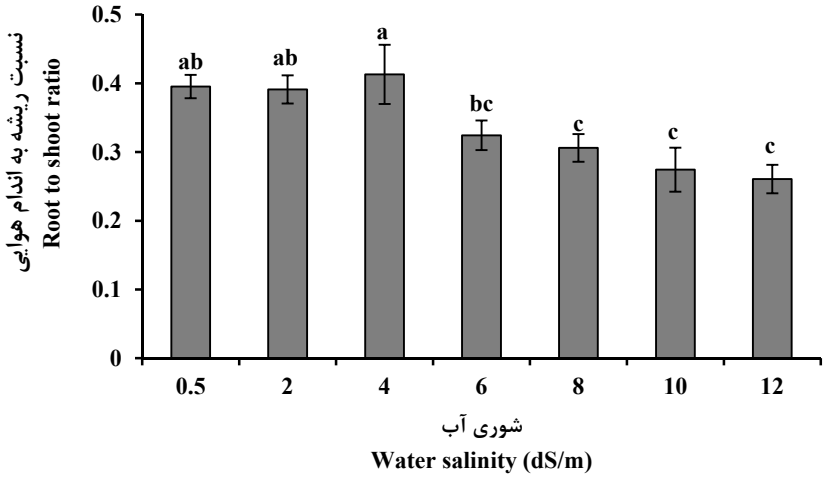
Fig. 10. Effect of different levels of salinity on leaf SPAD number of fenugreek

نتایج تأثیر سطوح مختلف شوری بر نسبت ریشه به اندام هوایی شنبلیله نشان داد که شوری به‌طورکلی نسبت ریشه به اندام هوایی را کاهش داد، لیکن روند این کاهش در سطوح مختلف شوری متفاوت بود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، شوری در سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر تأثیری روی نسبت ریشه به اندام هوایی نداشت. همچنین، بااینکه افزایش شوری در سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر نسبت ریشه به اندام هوایی را افزایش داد، لیکن این افزایش اندک و ازنظر آماری معنی‌دار نبود. درواقع، شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر نسبت ریشه به اندام هوایی را به میزان ۱۷/۹۶ درصد کاهش داد. با ادامه افزایش شوری این نسبت کاهش بیشتری پیدا کرد، لیکن این کاهش (به میزان ۲۲/۶ درصد) تا سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به شاهد ازنظر آماری معنی‌دار نشد. نتایج نشان داد که اعمال تنش شوری در سطوح ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش نسبت ریشه به اندام هوایی به ترتیب به میزان ۳۰/۶۱ و ۳۴/۰۶ درصد نسبت به شاهد شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است نسبت ریشه به اندام هوایی در سطوح شوری ۶ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر ازنظر آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداد.

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طورکلی تنش شوری محتوی آبی اندام هوایی شنبلیله کاهش داد. افزایش شوری تا سطح ۲ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر آماری معنی‌داری بر محتوی آبی اندام هوایی شنبلیله نداشت و مقدار آن را تنها ۴/۱۲ درصد کاهش داد.

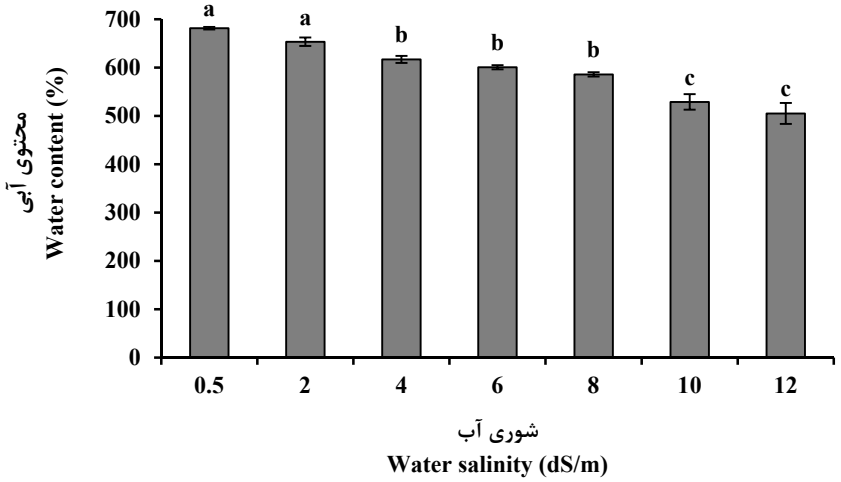
در محتوی آبی، تأثیر معنی‌داری بر آن نداشت. ادامه افزایش شوری موجب کاهش بیشتر محتوی آبی شد، به‌طوری‌که افزایش شوری در سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر، محتوی آبی را ۹/۴۷ درصد کاهش داد (شکل ۱۲). نتایج، همچنین نشان داد که افزایش بیشتر شوری در سطوح ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر، موجب کاهش بیشتر محتوی آبی شد، به‌طوری‌که مقدار آن را به ترتیب به میزان ۱۱/۸۵ و ۱۴/۰۲ درصد نسبت به شاهد کاهش داد، لیکن، این کاهش نسبت به سطح شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نبود؛ به‌عبارت‌دیگر، سطوح شوری ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر هر سه تأثیر آماری مشابهی بر محتوی آبی اندام هوایی نشان دادند. بر اساس نتایج حاصله، اعمال شوری در سطح ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش ۲۲/۳۷ درصدی در محتوی آبی نسبت به شاهد شد که این کاهش نسبت به سایر

سطوح شوری کم‌تر نیز معنی‌دار بود. افزایش بیشتر شوری در سطح ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، باوجود کاهش ۲۵/۸۷ درصدی در محتوی آبی نسبت به شاهد، نتوانست تغییر آماری معنی‌داری در محتوی آبی اندام هوایی نسبت به سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر ایجاد کند؛ بنابراین، سطوح شوری ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر یکسانی بر محتوی آبی نشان دادند (شکل ۱۲).



شکل ۱۱. تأثیر سطوح مختلف شوری بر نسبت ریشه به اندام هوایی شنبلیله

Fig. 11. Effect of different levels of salinity on the root to shoot ratio of fenugreek

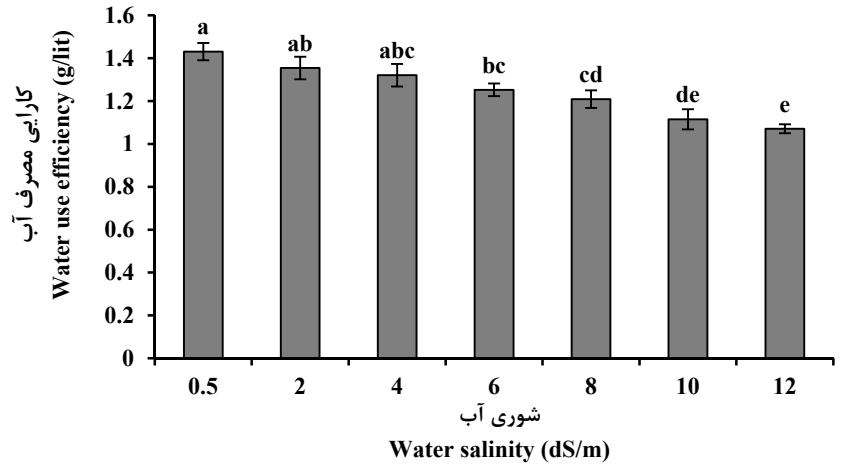


شکل ۱۲. تأثیر سطوح مختلف شوری محتوی آبی شنبلیله

Fig. 12. Effect of different levels of salinity on water content of fenugreek

در این پژوهش کارایی مصرف آب شنبلیله در تیمارهای مختلف بر اساس ماده خشک تولیدشده به ازای واحد حجم آب مصرفی در طول دوره رشد، محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری درمجموع کارایی مصرف آب را در شنبلیله کاهش داد. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است افزایش شوری تا سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری در کارایی مصرف آب ایجاد نکرد، لیکن ادامه افزایش بیشتر شوری، موجب کاهش بیشتر کارایی مصرف آب شد، به‌طوری‌که اعمال شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش معنی‌دار آن به میزان ۱۲/۴۴ درصد نسبت به شاهد شد. این کاهش تنها نسبت به شاهد معنی‌دار بود، ولی نسبت به سطوح کم‌تر شوری (۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر) تفاوت آماری زیادی نداشت. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۳، اگرچه اعمال تنش شوری در

سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر کارایی مصرف آب را به میزان ۱۵/۴۹ درصد نسبت به شاهد کاهش داد، لیکن نسبت به سطوح شوری ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نشد؛ به‌عبارت‌دیگر، کارایی مصرف آب در تیمارهای سطوح شوری ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر مشابه و غیر معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است تنش شوری کارایی مصرف آب را در شنبلیله با شیب کاهشی ملایمی تحت تأثیر قرار داد، به‌طوری‌که اعمال سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر باوجوداینکه کارایی مصرف آب را نسبت به شاهد به میزان ۲۲/۰۶ کاهش داد، نتوانست تأثیر آماری قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر ایجاد کند. سطوح شوری ۱۰ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر نیز هر دو تأثیر مشابهی بر کارایی مصرف آب شنبلیله داشتند (شکل ۱۳).



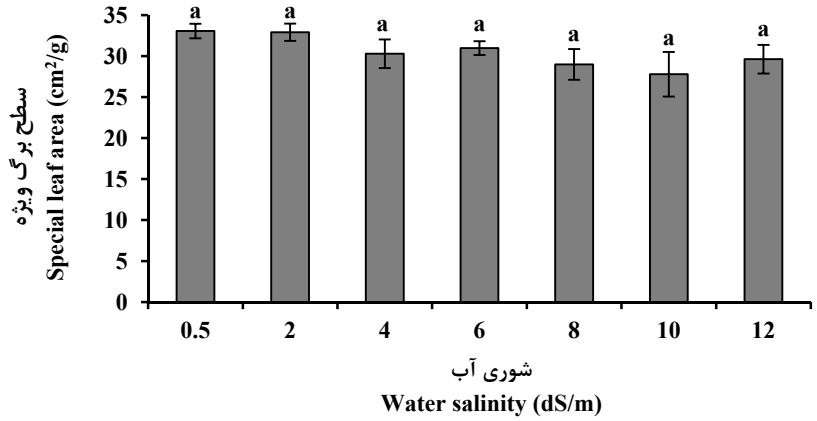
شکل ۱۳. تأثیر سطوح مختلف شوری بر کارایی مصرف آب شنبلیله

Fig. 13. Effect of different levels of salinity on water use efficiency of fenugreek

در شکل ۱۴ تأثیر سطوح مختلف شوری بر سطح برگ ویژه شنبلیله نشان داده شده است. سطح برگ ویژه از تقسیم سطح برگ بر وزن خشک برگ حاصل شد. علیرغم اینکه شوری سطح برگ و وزن خشک برگ را به‌طور معنی‌داری کاهش داد، لیکن، تأثیر آن بر سطح برگ ویژه معنی‌دار نبود. درواقع، همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است حداکثر تأثیر شوری بر سطح برگ ویژه از اعمال سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد که موجب کاهش آن به میزان ۱۵/۹۳ درصد نسبت به شاهد شد، لیکن این کاهش ازنظر آماری معنی‌دار نبود. سایر سطوح شوری تأثیری به‌مراتب کمتر از سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بر سطح برگ ویژه داشتند؛ بنابراین، اعمال شوری در تمام سطوح تأثیری بر سطح برگ ویژه نشان نداد (شکل ۱۴). این بدان معنی است که به‌موازات کاهش سطح برگ در اثر شوری، تولید ماده خشک نیز کاهش یافته و لذا نسبت آن‌ها به یکدیگر با نوساناتی اندک، تقریباً ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند.

در این پژوهش از مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی تحمل به شوری شنبلیله استفاده شد. برای این منظور، از ماده خشک تولیدشده در اندام هوایی (وزن خشک اندام هوایی) برای بررسی واکنش تحمل به شوری استفاده شد. بر اساس مدل خطی ارائه شده توسط مس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977) که در آن واکنش شنبلیله به شوری به‌صورت خطی پیشنهاد شده است، هنگامی‌که شوری خاک (EC) بین صفر و حد آستانه (a_0) باشد، عملکرد نسبی (Y) برابر ۱۰۰ درصد بوده و هیچ‌گونه کاهش عملکردی دیده نمی‌شود. لیکن، در شوری‌های زیادتر از حد آستانه عملکرد نسبی با شیب ثابتی (l) به‌صورت خطی شروع به کاهش می‌کند. بر اساس روابط مندرج در جدول ۵، مقدار حد آستانه (a_0) و شیب کاهش عملکرد (l) بر اساس مدل خطی به ترتیب برابر ۱/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر و ۴/۹۱ درصد برآورد شد. این بدان معنی است که مطابق با مدل خطی میزان عملکرد نسبی شنبلیله تا ۱/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر برابر ۱۰۰ درصد بوده، لیکن در شوری‌های زیادتر از آن به‌تدریج عملکرد آن شروع به کاهش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که کاهش عملکرد ماده

خشک معادل ۴/۹۱ درصد به ازای هر واحد افزایش شوری خاک است. بر این اساس، مطابق با مدل خطی، کاهش عملکرد نسبی به میزان ۱۰ درصد در شوری عصاره اشباع خاک ۳/۲۳ دسی‌زیمنس بر متر و کاهش ۲۵ و ۵۰ درصدی عملکرد نسبی به ترتیب در شوری خاک ۶/۳۸ و ۱۱/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر اتفاق می‌افتد (شکل ۱۵). همچنین، بر اساس مدل خطی عملکرد نسبی ماده خشک در شوری خاک ۲۱/۶۶ دسی‌زیمنس بر متر به صفر خواهد رسید.



شکل ۱۴. تأثیر سطوح مختلف شوری بر سطح برگ ویژه (cm^2/g) شنبلیله

Fig. 14. Effect of different levels of salinity on special laef area (cm^2/g) of fenugreek

جدول ۵. معادلات برازش داده شده برای واکنش شنبلیله به شوری با استفاده از مدل‌های تجربی

Table 5. Fitted functions for responses of fenugreek to salinity using experimental models

نوع مدل Type of model	معادله مرجع Reference function	معادله برازش داده شده Fitted function	مرجع Reference
مدل سه‌قسمتی خطی Three-piece linear model	Y=100-l*(EC-a_0)	Y=100-4.91*(EC-1.28)	Maas and Hoffman, 1977
مدل سیگموئیدی Sigmoidal model	$Y=\frac{Y_m}{1+\left(\frac{EC}{EC_{50}}\right)^{P}}$	$Y=\frac{Y_m}{1+\left(\frac{EC}{11.67}\right)^{1.77}}$	Van Genuchten and Hoffman, 1984
مدل چند جزئی نزولی تغییریافته Modified multi-component discount model	$Y=\frac{Y_m}{1+\left(\frac{EC}{EC_{50}}\right)^{\exp(s*EC_{50})}}$	$Y=\frac{Y_m}{1+\left(\frac{EC}{11.67}\right)^{\exp 0.572}}$	Steppuhn, Van Genuchten and Grieve, 2005a
مدل عامل نمایی دوگانه Duble expontial factor model	Y=100*exp[a(EC)-b(EC)^2]	Y=100*exp[-0.0236(EC)-0.00323(EC)^2]	Wang *et al*., 2002

در این معادلات Y_m، Y، EC، EC_{50} به ترتیب عملکرد حداکثر، عملکرد نسبی (٪)، متوسط شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد (دسی‌زیمنس بر متر)، شوری عصاره اشباع خاک به ازای ۵۰٪ کاهش عملکرد (دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشند. همچنین، a_0، l، p و s به ترتیب حد آستانه تحمل به شوری، شیب خط، ثابت تجربی و شیب منحنی بوده و مقادیر a و b ضرایب ثابت هر معادله می‌باشند.

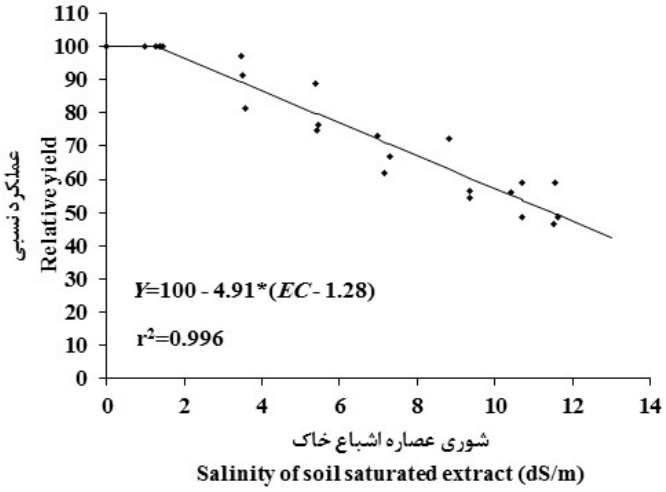
In these functions, Y_m, Y, EC, EC_{50} are maximum yield, relative yield (%), the average of soil salinity saturated extract during the growth season (dS/m), soil salinity saturated extract for yield reduction by 50% (dS/m), respectively. a_0, l, p and s are the salt tolerance threshold, line slope, empirical constant and curve slope as well, and the values of a and b are the constant coefficients of each equation.

سایر مدل‌های ارائه شده در جدول ۵، واکنش شنبلیله به شوری را به‌صورت غیرخطی پیش‌بینی می‌کنند. بر این اساس، در مدل‌های غیرخطی همراه با افزایش هر سطح شوری، میزان عملکرد نسبی ماده خشک به‌طور تدریجی از همان ابتدا به‌طور

سیگموئیدی و یا نمایی شروع به کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۶). بر اساس مدل غیرخطی ارائه شده توسط وان و هافمن (Van Genuchten and Hoffman, 1984)1984، کاهش ۱۰ و ۲۵ درصدی در عملکرد نسبی دانه به ترتیب در شوری عصاره اشباع خاک ۳/۳۸ و ۶/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر رخ می‌دهد. همچنین، مقدار شوری که در آن عملکرد نسبی ماده خشک به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (EC_{50}) معادل ۱۱/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر است (جدول ۵ و شکل ۱۶).

بر اساس نتایج حاصله، در شکل دیگری از مدل سیگوئیدی که در آن منحنی واکنش به شوری را به‌صورت نمایی پیش‌بینی شده است (Wang et al., 2002)، افزایش شوری خاک در ۳/۲۳ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش عملکرد نسبی به میزان ۱۰ درصد می‌شود. همچنین، شوری خاک در ۷/۴۲ و ۱۴/۲۴ دسی‌زیمنس بر متر منجر به کاهش عملکرد نسبی ماده خشک به ترتیب به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد خواهد شد (جدول ۵ و شکل ۱۶).

بر اساس رابطه چند جزئی نزولی تغییریافته که شکل دیگری از مدل سیگموئیدی است، کاهش عملکرد در اثر افزایش شوری را به‌صورت غیرخطی نشان می‌دهد. در این رابطه، پارامتر s شیب منحنی است که از قدر مطلق مشتق تغییرات عملکرد نسبی به تغییرات شوری محیط (|dY/dEC|) به دست می‌آید. در این رابطه، عبارت نمایی ($s. EC_{50}$) میزان برآمدگی و یا فرورفتگی دو طرف منحنی را نسبت به EC_{50} نشان می‌دهد. بر اساس پارامتر غیرخطی EC_{50} و s، شاخص تحمل به شوری (ST-index) به‌عنوان معیاری برای مقایسه تحمل به شوری پیشنهاد شده است. در این پژوهش، مقدار EC_{50} و ضریب s به ترتیب ۱۱/۶۷ و ۰/۰۴۹ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. با قرار دادن این اعداد در رابطه (۴)، شاخص تحمل به شوری (ST-index) برای شنبلیله ۱۲/۲۴ محاسبه شد.



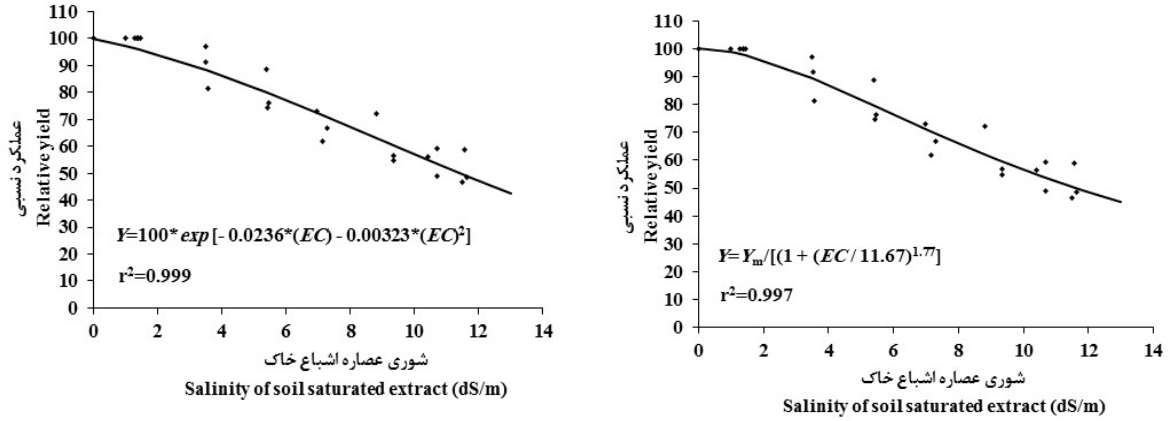
شکل ۱۵. واکنش عملکرد نسبی ماده خشک به شوری عصاره اشباع خاک مطابق با مدل خطی

Fig. 15. Responces of dry matter ralative yield to soil salinity of saturated extract acorning to linear model.

بحث

معمولاً حساس‌ترین پاسخ به شوری کاهش رشد است که این کاهش در ارتفاع گیاه و عملکرد بیولوژیک منعکس می‌شود. کاهش ارتفاع گیاه به دلیل کاهش رشد طولی سلول‌هاست. تنش شوری در ابتدا رشد سلول‌های گیاهی را از طریق اثر بر روی فشار تورژسانس (تورگر) سلول تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش فشار تورگر در اثر شوری مهم‌ترین عامل بازدارندگی رشد گیاهان تحت شرایط شور شناخته شده است (Mirmohammadi Meybodi and Qreyazi, 2002؛ Volkmar, et al., 1997). نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد شوری موجب کاهش ارتفاع گیاه شد. این کاهش به دلیل اثرات مضر تنش شوری روی کاهش تورژسانس سلولی و کاهش تولید فراورده‌های فتوسنتزی است. در حقیقت کاهش ارتفاع گیاه به اثر شوری روی تعداد گره و کم شدن فاصله طولی گره‌ها از یکدیگر (طول میانگره) مربوط می‌شود. گفته می‌شود مکانیسم‌هایی که به‌وسیله آن‌ها شوری رشد گیاه را

تحت تأثیر قرار می‌دهد به مقیاس زمانی که گیاه در معرض شوری قرار داده شده است بستگی داشته و طی یک فرایند دومرحله‌ای باعث کاهش رشد می‌شود (Ranjbar and Anaqoli, 2018). در اولین مرحله، شوری ظرفیت جذب آب توسط گیاه را از طریق پایین بردن پتانسیل آب خاک کاهش داده و بنابراین موجب کاهش رشد شده که می‌تواند تا هفته‌ها به طول بیانجامد. به دنبال آن در دومین مرحله آسیب واقعی نمک اتفاق می‌افتد. در این مرحله، نمک جذب‌شده از خاک نمی‌تواند در بخش‌های مختلف توزیع شود. این غلظت‌های زیاد نمک می‌تواند تا سرحد مرگ در درون بافت‌های گیاهی تجمع یافته و نهایتاً به مرگ آن‌ها منجر شود (Hasanuzzaman, et al., 2013)؛ بنابراین، تنش شوری با سه مؤلفه کمبود آب، سمیت یونی و عدم تعادل عناصر غذایی رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. (Hagemeyer, 1997).



شکل ۱۶. پیش‌بینی تغییرات عملکرد نسبی ماده خشک به شوری عصاره اشباع خاک مطابق با مدل‌های غیرخطی. سیگموئیدی (راست)، نمایی (چپ)

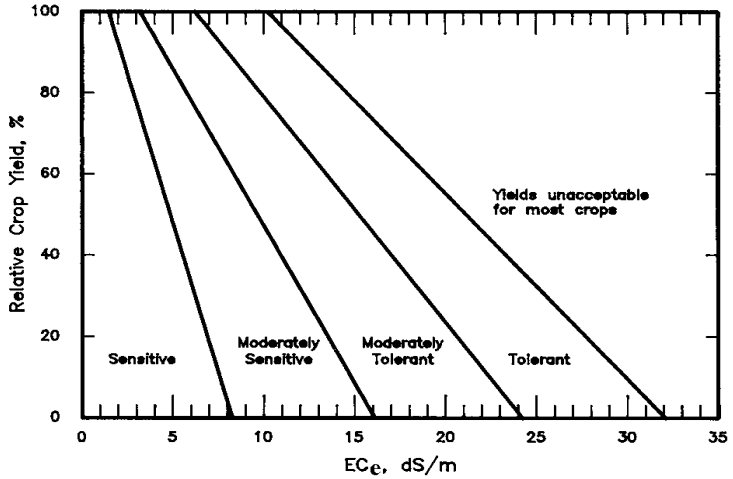
Fig. 16. Estimation of the changes in dry matter relative yield to soil salinity of saturated extract acording to non-linear models. Sigmoidal (right), expontial (left)

اغلب تولید ماده خشک برای مشخص ساختن واکنش گیاه به شوری بکار می‌رود. ازآنجاکه محتوای آبی گیاه در شرایط تنش متفاوت است، تولید ماده خشک به‌عنوان شاخص مناسبی برای ارزیابی اثرات شوری در گیاه بکار می‌رود (Hagemeyer, 1997). کاهش عملکرد بیولوژیک یا ماده خشک در اثر تنش شوری ناشی از کاهش جذب آب، کاهش تعرق، کاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و فراورده‌های فتوسنتزی است که هریک از آن‌ها معلول عوامل دیگری است. همچنین، بنا به اعتقاد تستر و دیونپورت (Tester and Davenport, 2003)، ساخت پروتئین و آنزیم مستلزم وجود غلظت‌های زیادی از پتاسیم است، لیکن، در تنش شوری حضور مقادیر زیاد یون‌های سدیم بجای پتاسیم موجب اختلال در الگوی پروتئین‌سازی و رشد شده که یکی از آسیب‌های مهم تنش شوری در گیاهان است (Tester and Davenport, 2003). نتایج این پژوهش نشان داد که شوری درمجموع موجب کاهش رشد گیاه شد. کاهش رشد به‌صورت کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی، کاهش تعداد برگ، کاهش سطح برگ، کاهش تعداد گره و تعداد انشعاب در بوته منعکس شد. این کاهش با افزایش شوری شدت بیشتری یافت، به‌طوری‌که بیشترین مقدار کاهش در اثر اعمال زیادترین سطح شوری (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) حاصل شد. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط ناصری و همکاران (Naseri, et al., 2016) همخوانی دارد. این محققین گزارش کردند که در شنبلیله با افزایش شوری، وزن خشک اندام هوایی کاهش پیدا کرد. بنا به گزارش ارچنگی و همکاران (Archangi, et al., 2012) با افزایش شوری وزن خشک اندام هوایی شنبلیله به‌تدریج کاهش پیدا کرد، به‌طوری‌که بیشترین مقدار کاهش در غلظت ۱۶۰ mM NaCl (تقریباً معادل ۶۱ دسی‌زیمنس بر متر) آب آبیاری حاصل شد. در تائید نتایج فوق، فرهادی و همکاران (Farhadi, et al., 2015) نیز گزارش کردند که با افزایش شوری وزن خشک اندام هوایی، وزن تر و خشک کاهش یافت.

نتایج مشابهی از تأثیر منفی شوری بر رشد شنبلیله توسط آرویی و همکاران (Arouii, et al., 2014) منتشر شد. این نتایج با نتایج پژوهش حاضر که بیان می‌دارد اعمال تنش شوری موجب کاهش رشد، کاهش تعداد برگ، سطح برگ، تعداد انشعاب، وزن تر و خشک گیاه شد همخوانی و مطابقت دارد. گزارش شده است که اعمال تنش شوری ۱۰ g/lit NaCl موجب کاهش شدید رشد، ارتفاع گیاه، سطح برگ، وزن خشک ریشه و اندام هوایی شد. این کاهش به عدم توازن یونی، کاهش سطح برگ، تجمع املاح، کاهش فعالیت فتوسنتزی و متعاقباً کاهش تولید فراورده‌های موردنیاز جهت رشد و نمو گیاه نسبت داده شد (Soughir, et al., 2013). در آزمایشی بر روی اثرات شوری بر ژنوتیپ‌های مختلف انار که با افزایش تنش شوری، تعداد برگ، قطر ساقه و تعداد انشعابات روی ساقه در ژنوتیپ‌های مختلف انار به‌تدریج کاهش پیدا کرد، ولی میزان این کاهش در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود. دلیل کاهش ویژگی‌های مورفولوژیک مذکور، محدودیت دسترسی به آب و کاهش سرعت رشد گزارش شد (Jamaati Ardakani, et al., 2020). نتایج این پژوهش نشان داد که شوری درمجموع نسبت ریشه به اندام هوایی را کاهش داد، هرچند که نسبت ریشه به اندام هوایی در مقایسه با سایر صفات با شدت کمتری از شوری متأثر شد. درواقع، شوری تا سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری روی نسبت ریشه به اندام هوایی ایجاد نکرده و با افزایش شدت تنش شوری در سطوح زیاد موجب کاهش معنی‌دار آن شد. این نتایج با نتایج سایر محققین که بیان می‌دارند رشد اندام هوایی به شوری حساس‌تر بوده و با اعمال تنش شوری رشد ریشه نسبت به رشد اندام هوایی کمتر کاهش می‌یابد مطابقت دارد (Heidari Sharifabad, 2001).

از طرف دیگر، نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال تنش شوری درمجموع موجب کاهش کارایی مصرف آب شد. بر اساس نتایج حاصله، افزایش شوری تا سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری در کارایی مصرف آب ایجاد نکرد، لیکن ادامه افزایش بیشتر شوری، موجب کاهش بیشتر کارایی مصرف آب شد، به‌طوری‌که اعمال شوری در سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش معنی‌دار آن به میزان ۱۲/۴۴ درصد نسبت به شاهد شد. این کاهش در کارایی مصرف آب تنها نسبت به شاهد معنی‌دار بود، ولی نسبت به سطوح کم‌تر شوری (۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر) تفاوت آماری قابل‌ملاحظه‌ای نداشت. گزارش شده است که تنش شوری در سطوح کم و متوسط به دلیل تأثیر روی بسته شدن روزنه‌ها و به دنبال آن کاهش تعرق موجب بهبود کارایی مصرف آب می‌شود، لیکن در شوری‌های زیاد کارایی مصرف آب را کاهش می‌دهد. بااین‌حال، نشان داده شده است که در گلرنگ و یونجه شوری موجب کاهش کارایی مصرف آب می‌شود. دلیل افزایش کارایی مصرف آب در شوری‌های کم، مصرف آب کمتر است، لیکن در شوری‌های زیاد مقدار عملکرد بیولوژیک بیشتر از مقدار آب مصرفی کاهش یافته و بنابراین کارایی مصرف آب به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (Heidari Sharifabad, 2001). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر همخوانی و مطابقت دارد. در حقیقت، بر اساس نتایج این پژوهش، با توجه به اینکه کارایی مصرف آب از تقسیم وزن خشک اندام هوایی بر میزان آب آبیاری مصرف‌شده حاصل شده است، باوجود کاهش تدریجی و معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی ناشی از اعمال سطوح مختلف شوری، کارایی مصرف آب در شوری‌های کم بدون تغییر باقی‌مانده و سپس از شوری سطح ۶ دسی‌زیمنس بر متر به زیاد شروع به کاهش نماید. این بدان معنی است که گیاه در سطوح کم شوری در استفاده از آب کاراتر عمل کرده و میزان کاهش وزن خشک اندام هوایی به‌مراتب کمتر از مقدار آب مصرفی بوده است، لیکن در سطوح زیاد شوری این کاهش در وزن خشک اندام هوایی شدیدتر و بیشتر بوده است.

در این پژوهش از شاخص تحمل به شوری برای ارزیابی واکنش شنبلیله به شوری استفاده شد. شاخص تحمل به شوری معیار قبل اندازه‌گیری برای گیاهانی است که بتوانند EC_{50} زیاد محیط را تحمل کنند. در محاسبه این شاخص از آزمایش‌هایی که ماس و هافمن (Mass and Hoffman, 1977) انجام دادند استفاده شده است (Ranjbar and Anaqli, 2018). در بررسی شاخص تحمل به شوری گیاهان زراعی مختلف، استفن و همکاران (Steppuhn, et al., 2005a, Steppuhn, et al., 2005b) با استفاده از روابط ریاضی، کاربردهای عملی این شاخص را برای بیش از صد گونه و رقم از گیاهان زراعی مختلف محاسبه و جمع‌آوری نمودند. آن‌ها شاخص تحمل به شوری برای یونجه، ذرت، نیشکر، گندم، برنج، سویا، آفتابگردان و سورگوم را به ترتیب ۹/۴۳، ۶/۵۶، ۱۰/۶۸، ۱۴، ۸/۰۸، ۹/۳۴، ۱۵/۴۶ و ۱۱/۸۹ گزارش کردند. همچنین، مقادیر متناظر EC_{50} برای گونه‌های زراعی فوق به ترتیب ۸/۴۹، ۵/۵۴، ۹/۸۰، ۱۲/۶۳، ۶/۸۳، ۷/۱۶، ۱۴/۳۷ و ۹/۵۷ دسی‌زیمنس بر متر بود.



شکل ۱۷. گروه‌بندی گیاهان ازنظر تحمل به شوری (اقتباس از Ayers and Wescot, 1989)

Fig. 17. Classification of crops for salinity tolerance (Adapted from Ayers and Wescot, 1989)

مقایسه پارامترهای محاسبه‌شده شاخص تحمل به شوری و EC_{50} شنبلیله (به ترتیب ۱۲/۲۴، ۱۱/۶۷دسی‌زیمنس بر متر) با مقادیر ارائه شده برای گونه‌های زراعی فوق می‌تواند برآوردی از تحمل به شوری شنبلیله به دست دهد. بر این اساس، اعداد شاخص تحمل به شوری و EC_{50} شنبلیله خیلی نزدیک به سورگوم بوده و بنابراین احتمالاً اندکی متحمل‌تر از آن است. لیکن، مطابق با مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (Mass and Hoffman, 1977) که در آن گروه‌بندی گیاهان ازنظر تحمل به شوری بر اساس اعداد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد است، می‌توان شنبلیله را در یکی از این گروه‌ها طبقه‌بندی کرد. با توجه به نتایج این پژوهش، بر اساس مدل خطی ماس و هافمن (Mass and Hoffman, 1977) حد آستانه تحمل به شوری شنبلیله بر اساس عملکرد خشک معادل ۱/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر با شیب کاهش عملکرد ۴/۹ درصد بود. با مکان‌یابی این اعداد در نمودار واکنش تغییرات عملکرد گیاهان به شوری (Ayers and Westcot, 1989)، شنبلیله را می‌توان ازنظر عملکرد ماده خشک در مرحله رشد رویشی در گروه گیاهان نسبتاً حساس (moderately sensitive) به شوری گروه‌بندی نمود (شکل ۱۷).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق نشان داد که تنش شوری در مرحله رشد رویشی بسیاری از صفات مورفولوژیک شنبلیله را تحت تأثیر قرار داد. تنش شوری درمجموع ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، طول میانگره و سطح برگ را به ترتیب به میزان ۲۷/۶۶، ۱۸/۰۳، ۵۴/۲۱ و ۴۶/۹۱ درصد کاهش داد. شوری همچنین موجب کاهش نسبت ریشه به اندام هوایی، محتوی آبی و کارایی مصرف آب به ترتیب به میزان ۱۶/۹۷، ۱۴/۶۲ و ۱۴/۷۰ درصد شد. بر اساس مدل‌های تجربی، حد آستانه تحمل به شوری شنبلیله ۱/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر و شیب کاهش عملکرد آن ۴/۹۱ درصد به ازای هر واحد افزایش شوری تخمین زده شد. مطابق با مدل‌های غیرخطی، کاهش ۱۰ و ۲۵ درصدی در عملکرد شنبلیله به ترتیب در شوری عصاره اشباع خاک ۳/۳۸ و ۶/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر اتفاق افتاد. بر اساس نتایج این پژوهش، مقدار شوری که در آن عملکرد به میزان ۵۰ درصد کاهش یافت در شوری خاک ۱۱/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. در این پژوهش، شاخص تحمل به شوری شنبلیله ۱۲/۲۴ محاسبه شد؛ بنابراین، بر اساس اعداد حد آستانه تحمل به شوری، شیب کاهش عملکرد و شاخص تحمل به شوری، می‌توان شنبلیله را در مرحله رشد رویشی در گروه گیاهان نسبتاً حساس به شوری طبقه‌بندی کرد.

منابع

Amuthaselvi, G., Ambrose, D.C.P., 2016. Leafy medicinal herbs: botany, chemistry, postharvest technology and uses. In: Ambrose, D.C.P., Manickavasagan, A., Naik, R. (eds.) Fenugreek. CABI Press. India.

Archangi, A., Khodambashi, M., Mohammadkhani, A., 2012. The effect of salt stress on morphological characteristics and Na^{+}, K^{+} and Ca^{++} ion contents in medicinal plant fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.) under hydroponic culture. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture. 3, 33-41. [In Persian with English summary].

Arouii, H., Naseri, M., Neamati, S.H., Kafi, M., 2014. The effect of silica on decreasing effects of salinity stress in fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L). Journal of Pajouhesh and Sazandegi. Agronomy. 104, 165-172. [In Persian with English summary].

Ayers R.S., Westcot, D.W., 1989. Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper. No. 29. FAO Press. Italy.

Banakar, M.H., Ranjbar, G.H., Soltani, V., 2012. Physiological response of some halophyte forages under saline conditions. Journal of Environmental Stresses in Crop Science. 5, 55-65. [In Persian with English summary].

Barahouee, M., Sabbagh, E., 2017. Influence of vermicompost and salt stress on some characteristics of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). International Journal of Agricultural Biosciences. 6, 60-63.

Carter, M.R., Gregorich, E.G., 2008. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. CRC Press. 198 PP.

Chowdhury, M.M.U., Bhowal, S.K., Farhad, I.S.M., Choudhury, A.K., Khan, A.S.M.M.R., 2014. Productivity of fenugreek varieties (*Trigonella foenum-graecum* L.) in the coastal saline areas of Noakhali. The Agriculturists. 12, 18-23.

Farhadi, H., Azizi, M., Neamati, S.H., 2015. Effect of salinity stress on morphological characteristics and proline content of eight indigenous fenugreek (*Trigonella foenum*-graceum L.) populations. Iranian Journal of Agronomy Research. 13, 411-419. [In Persian with English summary].

Hagemeyer, J., 1997. Salt. In: Prasad, M.N.V. (ed), Plant Ecophysiology. Wiley and Sons. Inc. New York.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Fujita, M., 2013. Plant response to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt-induced damages. In: Ahmad, P., Azooz, M.M., Prasad, M.N.V. (eds.), Ecophysiology and responses of plants under salt stress. Springer. New York.

Hasanzadeh, E., Rezazadeh, S.A., Shamsa, S.F., Dolatabadi, R., Zarringhalam, J., 2010. Review on phytochemistry and therapeutic properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.). Journal of Medicinal Plants. 2, 1-18. [In Persian with English summary].

Heidari Sharifabad, H., 2001. Plants and Salinity. Research Institute of Forests and Rangelands Press. Tehran. Iran. [In Persian].

International Soil Reference and information Center (ISRIC)., 1986. Procedure for soil analysis. Wageningen Agriculture University.

Jamaati Ardakani, Z., Momenpour, A., Dehestani, M., Shirmardi, M., 2020. Salinity tolerance evaluation in two selected pomegranate (*Punica granatum*) genotypes compared with Rabab Neyriz cultivar. Journal of Water Research in Agriculture. 33, 535-550. [In Persian with English summary].

Kooti, W., Servatyari, K., Behzadifar, M., Asadi Samani, M., Sadeghi, F., Nouri, B., Zare Marzouni, H., 2017. Effective medicinal plant in cancer treatment. Part II: Review Study. Journal of Evidence Based Complementary and Alternative Medicine. 22(4), 982-995.

Maas, E.V., Hoffman, G.L., 1977. Crop salt tolerance-current assessment. Journal of Irrigation and Drainage. 103, 115-134.

Mehrafarin, A., Qavami, N., Naqdibadi, H.A., Qaderi. A., 2011. Alkaloid Trigonline, a valuable herbal drug metabolite. Journal of Medicinal Plants. 11, 12-29. [In Persian with English summary].

Mirmohammadi Meybodi, S.A.M., Qreyazi, B., 2002. Physiological Aspects and Breeding for Salinity Stress in Plants. Isfahan University of Technology Press. Isfahan. Iran. [In Persian].

Moradikor, N., Didarshetaban, M.B., Saeid Pour, H.R., 2013. Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as a valuable medicinal plant.

International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research. 1(8), 922-931 .

Naseri, M., Arouii, A., Kafi, M., Neamati, H., 2016. Effects of saline water on physiological characteristics of fenugreek in a hydroponic culture. Journal of Water Research in Agriculture. 30, 65-71. [In Persian with English summary].

Noohpisheh, Z., Amiri, H., Gholami, A., Farhadi, S., 2020. Investigating the application of ZnO nanoparticle on morphological and physiological parameters of two cultivars of Fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.) under salinity stress. Johrnal of Plant Process and Function. 35, 423-438. [In Persian with English summary].

Petropoulos, G.A., 2002. Fenugreek, the genus Trigonella. Taylor and Francis Inc. New York .

Ranjbar, G.H., Anaqoli, A., 2018. Concepts of Salt Stress and Plant Response. AREEO Press. Iran. [In Persian with English summary].

Sindhu, S.N., Prathika, G., Sindhuja, U., Akshaya, S., Abhilasha, V.G., 2017. Evaluation of abiotic stress induced physiological and biochemical changes in *Trigonella foenum-graecum*. Journal of Biotechnology and Biochemistry. 3, 89-97.

Soughir, M., Elouaer, M.A., Hannachi. C., 2013. The effect of NaCl priming on emergence, growth and yield of fenugreek under saline conditions. Journal of Cercetari Agronomice in Moldova. 154, 73-83.

Steppuhn, H., Van Genuchten, M.Th., Grieve, C.M., 2005a. Root-zone salinity: I: selecting and product-yield index and response functions for crop tolerance. Journal of Crop Science. 45, 209-220.

Steppuhn, H., Van Genuchten, M.Th., Grieve, C.M., 2005b. Root-zone salinity: II: Indices for tolerance in agricultural crops. Journal of Crop Science. 45, 221-232.

Tester, M., Davenport, R., 2003. Na+ tolerance and Na+ transport in higher plants. Annuls of Botany. 91, 503-527.

Tsay, H.S., Shyur, L.F., Agrawal, D.C., Wu, Y.C., Wang, S.Y., 2016. Medicinal plants - Recent advances in research and development. Springer Press. Taiwan .

Tunctürk, R., 2011. Salinity exposure modifies nutrient concentrations in fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.). African Journal of Agricultural Research. 6, 3685-3690 .

Van Genuchten, M.Th., Hoffman, G.J., 1984. Analyzing crop salt tolerance data. In: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (eds.), Soil salinity under irrigation, process and management, Springer-Verlag, NewYork.

Volkmar, K. M., Hu, Y., Steppuhn, H., 1997. Physiological responses of plants to salinity: A review. Canadian Journal of Plant Science. 78, 19-27.

Wang, D., J.A. Poss, Donovan, T.J., Shannon, M.C., Lesch, S.M., 2002. Biophysical properties and biomass production of elephant grass under saline conditions. Journal of Arid Environments. 52, 447–456 .

Zahir, M., Hussain, F., 2010. Vegetative growth performance of five medicinal plants under NaCl salt stress. Pakistan Journal of Botany. 42, 303-316 .

Zamani, Z., Amiri, H., Ismaili, A., 2018. Effect of drought stress on germination characteristics of two populations of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). Journal of Nova Biologica Reperta. 5, 183-191. [In Persian with English summary].

Zamani, Z., Amiri, H., Ismaili, A., 2020. Improving Drought Stress tolerance in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) by exogenous melatonin. Journal of Plant Biosystems. 154(5), 643-655.

Zargari, A., 1992. Medicinal Plants. Vol. 1. Tehran University Press. Iran. [In Persian].