

Threshold of Salinity Tolerance and Yield Reduction Slope of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) at Different Growth Stages

Mohammad Hossein Banakar^{1*}, Hamzeh Amiri², Gholam Hassan Ranjbar³ and Mohammad Javad Babaie Zarch⁴

1- Faculty member, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran. mh_banakar@yahoo.com

2- Faculty member, Department of Biology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorram Abad, Iran. amiri_h_lu@yahoo.com

3- Faculty member, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran. ranjbar71@gmail.com

4- Faculty member, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran. javadbabaie67@gmail.com

«Research Article»

Received: April 28, 2025, and Accepted: July 15, 2025

Abstract

The increasing trend of salinity in water and soil resources has made it important to identify medicinal plants that are tolerant to salinity. This study was conducted in four separate experiments to evaluate the salinity tolerance of the medicinal plant fenugreek and the changes in its threshold of tolerance to salinity at different growth stages (germination, emergence, vegetative growth, reproductive growth). In the laboratory, the salinity tolerance of fenugreek was studied at ten salinity levels (control, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 dS.m⁻¹). In the greenhouse, the fenugreek salinity tolerance was studied at seven salinity levels (0.5, 3, 6, 9, 12, 15, 18 dS.m⁻¹) during the emergence stage and at seven salinity levels (0.5, 2, 4, 6, 8, 10, 12 dS.m⁻¹) during the vegetative and reproductive stages. The experiment was conducted in the form of randomized complete block design with three replications. In this research, some empirical models (linear, sigmoidal, exponential, and multicomponent models) were used. Results showed that the salinity tolerance of fenugreek changed during different growth stages as fenugreek had the highest tolerance at the germination stage, at which, the threshold was 20.3 dS.m⁻¹ and the germination reduction slope was 10.3% for the Isfahani variety. However, this tolerance gradually decreases in the later growth stages, such that fenugreek showed lower tolerance to salinity at emergence stage compared to the germination stage (the salt threshold of 4.9 dS.m⁻¹ with a reduction slope of 25.7%). In the vegetative growth stage, the salt tolerance of fenugreek decreased, such that its threshold was 1.3 dS.m⁻¹ with a yield reduction slope of 4.9%. Fenugreek showed the least tolerance to salinity at seed ripening stage, at which, the threshold of salinity tolerance was 1.30 dS.m⁻¹ with a yield reduction slope of 64.8%. According to nonlinear models, the corresponding salinity values at which yield is reduced by 50% (EC₅₀) for the Isfahan fenugreek population at the germination, emergence, vegetative growth and seed ripening stages were 25.8, 11.5, 11.7, and 6.5 dS.m⁻¹, respectively. Therefore, in areas with different qualities of water, farmers can irrigate fenugreek with saline water in the early stages of growth and gradually with higher quality water in the later stages.

Keywords: Experimental models, Salinity tolerance index, Saline water, Saline soil, Medicinal plants

* - Corresponding author's email: mh_banakar@yahoo.com

Cite this article: Banakar, M.H., Amiri, H., Ranjbar, Gh., 2025. The threshold of salinity tolerance and the yield reduction slope of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) at different growth stages. Journal of Soil Research, 39 (1), 53-73 .



حد آستانه تحمل شوری و شیب کاهش عملکرد شنبلیله (*Trigonella foenum-*

graecum L. در مراحل مختلف رشد

محمدحسین بناکار^{۱*}، حمزه امیری^۲، غلامحسین رنجبر^۳ و محمدجواد بابایی زارچ^۴

۱ - عضو هیئت علمی (استادیار) مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. mh_banakar@yahoo.com

۲ - عضو هیئت علمی (استاد) گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. amiri_h_lu@yahoo.com

۳ - عضو هیئت علمی (دانشیار) مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. ranjbar71@gmail.com

۴ - عضو هیئت علمی (استادیار) مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، javadbabaei67@gmail.com

« مقاله پژوهشی »

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۸ و پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۳

چکیده

روند رو به افزایش شوری منابع آب و خاک، شناخت گیاهان دارویی متحمل به شوری را برای بهره‌برداری از منابع آب و خاک شور حائز اهمیت ساخته است. این تحقیق، به منظور ارزیابی تحمل به شوری گیاه دارویی شنبلیله و تغییرات حد آستانه تحمل به شوری آن در مراحل مختلف رشد (جوانه‌زنی، سبز شدن، رشد رویشی، رشد زایشی) در قالب ۴ آزمایش جداگانه انجام شد. در آزمایشگاه، تحمل به شوری شنبلیله در مرحله جوانه‌زنی با ۱۰ سطح شوری (دسی زیمنس بر متر ۲۷، ۲۴، ۲۱، ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۳، شاهد) بررسی گردید. در گلخانه، تحمل به شوری شنبلیله در مرحله سبز شدن با هفت سطح شوری (دسی زیمنس بر متر ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۳، ۰/۵) و در مراحل رشد رویشی و زایشی نیز با ۷ سطح شوری (دسی زیمنس بر متر ۱۲، ۱۰، ۸، ۶، ۴، ۲، ۰/۵) بررسی شد. آزمایش در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. در این تحقیق، از مدل‌های تجربی (خطی، سیگموئیدی، نمایی و چند جزئی) استفاده شد. نتایج نشان داد که تحمل به شوری شنبلیله در مراحل مختلف رشد متفاوت است بطوری‌که شنبلیله در مرحله جوانه‌زنی بیشترین میزان تحمل به شوری را داشت. در مرحله جوانه‌زنی حد آستانه تحمل به شوری برابر ۲۰/۳ دسی زیمنس بر متر و شیب کاهش جوانه‌زنی ۱۰/۳۷٪ برای توده اصفهانی بدست آمد. لیکن، این تحمل در مراحل بعدی رشد و نمو به تدریج کمتر شد. به‌طوری‌که شنبلیله در مرحله سبز شدن نسبت به جوانه‌زنی تحمل به شوری پایین‌تری از خود نشان داد (حد آستانه ۴/۹ دسی زیمنس بر متر با شیب کاهش ۷/۲۵٪). در مرحله رشد رویشی، تحمل به شوری شنبلیله کمتر شد به‌طوری‌که آستانه تحمل به شوری آن ۱/۳ دسی زیمنس بر متر همراه با شیب کاهش عملکرد ۴/۹٪ بود. شنبلیله در مرحله رسیدگی دانه کمترین تحمل را به شوری نشان داد و حد آستانه تحمل به شوری آن ۱/۳ دسی زیمنس بر متر با شیب کاهش عملکرد ۸/۶۴٪ بود. مطابق مدل‌های غیرخطی، مقادیر متناظر شوری که در آن عملکرد ۵۰٪ کاهش می‌یابد (EC_{50}) برای توده اصفهانی شنبلیله در مراحل جوانه‌زنی، سبز شدن، رشد رویشی و رسیدگی دانه به‌ترتیب ۲۵/۸، ۱۱/۵، ۱۱/۷ و ۶/۵ دسی زیمنس بر متر به‌دست آمد. بنابراین، در مناطقی که دسترسی به منابع آب با کیفیت متفاوت وجود دارد می‌توان از آنها برای آبیاری شنبلیله در مراحل اولیه رشد از آب شور و به تدریج در مراحل بعدی رشد از آب‌های با کیفیت بهتر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های تجربی تحمل به شوری، شاخص تحمل به شوری، آب شور، خاک شور، گیاهان دارویی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mh_banakar@yahoo.com

استناد: بناکار، م.ح.، امیری، ح.، رنجبر، غ.، بابایی زارچ، م.ح.، ۱۴۰۴. حد آستانه تحمل شوری و شیب کاهش عملکرد شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L. در مراحل مختلف رشد. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۳۹، ۷۳-۵۳.

مقدمه

کشت و تولید گیاهان دارویی به عنوان یکی از گزینه‌ها در بهره‌برداری از منابع آب و خاک شور مطرح بوده است. 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 (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). این گیاه دارای آلکالوئیدی بنام تریگونلین است (زرگری، ۱۳۷۱؛ حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹؛ پتروپولوس، ۲۰۰۲). تریگونلین، خواص دارویی مهمی نظیر ضد سرطان، ضد میگرن، ضد عفونی کنندگی، پایین آورنده چربی خون و ضد دیابت را دارا می‌باشد. پزشکان ایرانی و عرب از زمان‌های قدیم از دانه شنبلیله برای مداوای بیماری قند استفاده می‌کردند (ولکمار و همکاران، ۱۹۹۷؛ مهرآفرین و همکاران، ۱۳۹۰).

بررسی منابع نشان می‌دهد که شنبلیله از نظر تحمل به شوری مورد توجه بوده و پژوهش‌های متعدد و پراکنده‌ای بر روی آن انجام شده است. اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثرات تنش شوری روی شنبلیله، اغلب در مرحله جوانه‌زنی و یا مراحل اولیه رشد رویشی بوده و تعداد اندکی از آنها رشد زایشی و عملکرد گیاه را در بر گرفته‌اند. این در حالی است که مرحله سبز شدن که به دنبال مرحله جوانه‌زنی رخ داده و به خروج گیاهچه از خاک منجر می‌گردد، در مطالعات تنش شوری در شنبلیله کمتر مورد توجه واقع شده است. از نظر تحمل یا حساسیت به شوری، سه مرحله نمودی در گیاهان قابل تشخیص است که شامل جوانه‌زنی، رشد رویشی و رشد زایشی می‌باشد. گفته می‌شود تحمل به شوری ممکن است به‌طور قابل ملاحظه‌ای در طی رشد و نمو گیاه تغییر کند. بسیاری از شواهد بیانگر این هستند که در اغلب گیاهان زراعی مرحله جوانه‌زنی متحمل به نمک است، لیکن، مرحله رشد رویشی به نمک حساس می‌باشد (هاجمیر، ۱۹۹۷؛ بناکار و همکاران، ۲۰۲۲).

گزارش شده است که شنبلیله در مرحله جوانه‌زنی می‌تواند تنش شوری تا $1/2 \text{ MPa}$ را تحمل کند (رومانی و احتشامی، ۱۳۹۳). دادخواه (۱۳۸۹)، در آزمایشی تاثیر تنش شوری ($0/81 \text{ MPa}$ ، $0/59 \text{ MPa}$ ، $0/37 \text{ MPa}$) و نوع نمک را بر جوانه زنی و رشد گیاهچه چند گیاه دارویی از جمله شنبلیله مطالعه کرده و نشان داد که کاهش پتانسیل آب تا $0/59 \text{ MPa}$ - تاثیر زیادی بر درصد جوانه‌زنی بذر شنبلیله نداشت، اما کاهش بیشتر، جوانه‌زنی را به شدت کاهش داد. زهیر و حسین (۲۰۱۱)، کاهش ۶۲ درصدی جوانه زنی شنبلیله را در شوری 15 dS.m^{-1} گزارش کردند. همچنین، در آزمایشی، جوانه‌زنی شنبلیله در سطوح مختلف شوری و خشکی (۹-، ۶-، ۳- بار) مطالعه و نشان داده شد که اعمال خشکی ۶- بار و شوری ۳- بار موجب کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی گردید (قربان‌پور و همکاران، ۲۰۱۱). شرما و ویمالا (۲۰۱۶)، جوانه‌زنی و رشد دانه‌رست‌ها را در شنبلیله تحت تنش شوری مطالعه کرده و نشان دادند که تمام بذرها تا شوری 100 mM کلرید سدیم جوانه زده، اما در شوری 200 mM میزان جوانه‌زنی ۶۰ درصد کاهش پیدا کرد. بناکار و همکاران (۱۴۰۰ الف) اثرات تنش شوری را در مرحله جوانه‌زنی روی چندین توده شنبلیله مطالعه کرده و نشان دادند که توده‌های مختلف شنبلیله از نظر تحمل به شوری متفاوت بودند. همچنین، افزایش شوری تا سطح 6 dS.m^{-1} بر درصد جوانه‌زنی بذور تاثیر نداشت، لیکن با اعمال سطوح شوری بالاتر، درصد جوانه‌زنی به تدریج شروع به کاهش یافتن کرد، بطوری که اعمال شوری ۲۴ و 27 dS.m^{-1} ، درصد جوانه‌زنی بذور را به ترتیب به میزان $29/8$ و $80/81$ درصد نسبت به شاهد کاهش داد (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰ الف). عبدالمومن و مصباح‌الادریسی (۲۰۰۹)، گزارش کردند که جوانه‌زنی بذرهای شنبلیله تا شوری 140 mM کلرید سدیم تحت تاثیر قرار نگرفته لیکن سطوح بالاتر شوری موجب کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی گردید.

مطالعات سطوح مختلف شوری (15 dS.m^{-1} ، $12/5$ ، 10 ، $7/5$ ، 5 ، $0/21$) روی پارامترهای رشد شنبلیله نشان

داد که تمام گیاهچه‌های شنبلیله تا شوری $7/5 \text{ dS.m}^{-1}$ زنده بودند؛ لیکن در شوری‌های بالاتر، زنده‌مانی گیاهچه‌ها به تدریج کاهش یافت (زهیر و حسین، ۲۰۱۰). تنش شوری رشد توده‌های مختلف شنبلیله را تحت تاثیر قرار داد و موجب کاهش وزن ریشه و اندام هوایی گردید (ارچنگی و همکاران، ۱۳۹۱؛ فرهادی و عزیزی، ۱۳۹۵؛ ناصری و همکاران، ۱۳۹۵؛ برهویی و صباغ، ۲۰۱۷؛ سیندهو و همکاران، ۲۰۱۷؛ نوح‌پیشه و همکاران، ۱۳۹۹). چودهاری و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که در مرحله جوانه‌زنی هنگامی که شوری خاک از 4 dS.m^{-1} بالاتر رفت میزان تلفات دانه‌رست‌های شنبلیله به مقدار زیادی تحت تاثیر قرار گرفت. لیکن، در مراحل بعدی رشد تا زمان رسیدگی توانست شوری بالاتر ($4-12 \text{ dS.m}^{-1}$) را تحمل کند. در زمان رسیدگی اعمال تنش شوری dS.m^{-1} ۱۲ نتوانست تاثیر قابل توجهی بر بقا گیاهان داشته باشد. این آزمایش نشان داد که اعمال شوری بالاتر از 8 dS.m^{-1} طی جوانه‌زنی و مرحله رشد رویشی ممکن است عملکرد محصول را ۳۰-۴۰ درصد کاهش دهد (چودهاری و همکاران، ۲۰۱۴). اخیراً در یک آزمایش نشان داده شد که در شنبلیله مرحله سبز شدن گیاهچه نسبت به مرحله جوانه‌زنی به شوری حساس‌تر است؛ بطوری‌که در بررسی واکنش توده‌های مختلف شنبلیله به شوری، توده هندی بیشترین مقدار درصد و سرعت سبز شدن و شاخص بنیه گیاهچه را دارا بود (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰).

نشان داده شده است که شوری بسیاری از فرایندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی را در شنبلیله تحت تاثیر قرار داده و باعث کاهش رشد و عملکرد می‌گردد (بناکار و همکاران، ۲۰۲۲). بناکار و همکاران (۱۴۰۰) در آزمایشی نشان دادند که اعمال تنش شوری در مرحله رشد رویشی برخی صفات مورفولوژیک شنبلیله را تحت تاثیر قرار داده و در مجموع موجب ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، طول میانگره و سطح برگ را به ترتیب به میزان ۲۷/۶۶، ۱۸/۰۳ و ۵۴/۲۱ درصد گردید. تنش شوری، همچنین، نسبت ریشه به اندام هوایی، محتوی آبی و

کارایی مصرف آب به ترتیب به میزان ۱۶/۹۷، ۱۴/۶۲ و ۱۴/۷۰ درصد کاهش داد (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰). به علاوه، معلوم شد که ادامه تنش شوری تا مرحله رشد زایشی تاثیر معنی‌داری بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه شنبلیله داشت. تنش شوری، طول نیام، وزن نیام، تعداد دانه در نیام، تعداد نیام در بوته، تعداد دانه پر در بوته، نسبت دانه پر به پوک، وزن خشک اندام هوایی، وزن کاه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب را کاهش و درمقابل، درصد دانه پوک، میزان تریگونلین و آلکالوئید کل دانه را افزایش داد. (بناکار و همکاران، ۱۳۹۹).

در مطالعات تحمل به شوری، مدل‌های تجربی مختلفی برای بررسی واکنش گیاهان به شوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی از این مدل‌ها واکنش به شوری را به صورت خطی توصیف کرده و برای آن پارامترهای حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد را در نظر گرفته‌اند. برخی دیگر از مدل‌ها واکنش به شوری را به صورت غیر خطی پیش‌بینی کرده و شکل سیگموئیدی یا نمایی را برای آن در نظر گرفته‌اند (بناکار و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به اینکه تحمل به شوری در مراحل مختلف رشد و نمو گیاه متفاوت است، هدف از انجام این تحقیق ارزیابی واکنش به شوری توده اصفهانی شنبلیله در مراحل مختلف رشد بود. در این تحقیق، در هر یک از مراحل رشدی، حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد دانه به ازای هر واحد افزایش شوری با استفاده از مدل خطی (ماس و هافمن، ۱۹۷۷). برآورد گردید و در هر مرحله شاخص تحمل به شوری شنبلیله محاسبه شد و واکنش آن به شوری برای مراحل رشدی مختلف با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی تجربی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

مواد و روشها

به منظور بررسی واکنش شنبلیله به شوری در مراحل مختلف رشد (جوانه‌زنی، سبز شدن، رشد رویشی، رشد

زایشی)، پژوهشی در آزمایشگاه و گلخانه مرکز ملی تحقیقات شوری انجام گرفت. توده شنبلیله مورد بررسی در این پژوهش، توده اصفهانی بود که بذره‌های آن از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد.

الف) ارزیابی تحمل به شوری در مرحله جوانه

زنی: این مرحله، در آزمایشگاه مرکز ملی تحقیقات شوری در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. تعداد ۳۰ عدد بذر یک‌اندازه، سالم و یکنواخت پس از شستشو با محلول هیپوکلریت سدیم ۰/۵٪ و آب مقطر، در داخل پتری دیش‌های نه سانتیمتری حاوی کاغذ صافی واتمن شماره یک قرار گرفته و به هر پتری دیش مقدار ۵ml آب با هدایت‌های الکتریکی مورد نظر افزوده و درب آنها بسته شد. تیمار شوری شامل ده سطح ($dS.m^{-1}$ ۲۷، ۲۴، ۲۱، ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۳، شاهد) بود که از طریق مخلوط کردن آب مقطر و آب شور چاه زیرزمینی مزرعه تحقیقات شوری صدوق با هدایت الکتریکی $dS.m^{-1}$ ۱۴ حاصل گردید. بعد از افزودن آب، پتری دیش‌ها در داخل ژرمیناتور با دمای $25^{\circ}C$ / ۲۰، رطوبت نسبی ۶۰٪ و دوره نوری ۱۶/۸h قرار گرفتند. طرح آماری مورد استفاده به صورت کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. در هر روز، تعداد بذره‌های جوانه‌زده به مدت دو هفته در ساعت معین شمارش شد. در پایان، حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش جوانه‌زنی به ازای هر واحد افزایش شوری با استفاده از مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (۱۹۷۷) برآورد گردید. همچنین، شاخص تحمل به تنش شوری و روند واکنش تحمل به شوری شنبلیله در مدل خطی با سایر مدل‌های غیر خطی تجربی (استفن و همکاران، ۲۰۰۵الف؛ استفن و همکاران، ۲۰۰۵ب؛ وانگنختن و هافمن، ۱۹۸۴) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

ب) ارزیابی تحمل به شوری در مرحله سبز شدن:

به منظور بررسی واکنش شنبلیله به شوری در مرحله سبز شدن، آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی مرکز ملی تحقیقات شوری انجام گرفت. بذره‌های شنبلیله پس از ضدعفونی

داخل گلدان‌های پلاستیکی به ابعاد ۱۵*۱۲ سانتی‌متر در عمق ۱/۵ سانتی‌متری در محیط شن قرار گرفتند. تیمار شوری شامل هفت سطح ($dS.m^{-1}$ ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۳، ۰/۵) بود که از طریق مخلوط کردن آب شرب و آب بسیار شور (با هدایت الکتریکی حدود $dS.m^{-1}$ ۵۰۰) حاصل گردید. برای تخمین کسر آبشویی از روش ارائه شده توسط آیز و وسکات (۱۹۸۹) استفاده شد. با معلوم بودن هدایت الکتریکی آب آبیاری و آب زهکش شده و همچنین حجم آب آبیاری و آب زهکش شده، با استفاده از معادله پیشنهادی آیز و وسکات (۱۹۸۹) کسر آبشویی تخمین زده شده و از آن برای محاسبه حجم آب مورد نیاز برای آبیاری و شستشوی املاح اضافی و جلوگیری از تجمع آن‌ها در منطقه توسعه ریشه استفاده شد. در هر کسر آبشویی، مقداری تحت عنوان عامل غلظت (X) را می‌توان محاسبه کرد که با متوسط شوری خاک منطقه ریشه (EC_e) و شوری آب آبیاری (EC_{iw}) به صورت $EC_e = EC_{iw} * X$ در ارتباط است. کسر آبشویی، در واقع درصدی از حجم آب آبیاری است که آبشویی شده و عملاً از زیر منطقه ریشه خارج شده است. در طول یک دوره سه هفته‌ای، تعداد بذور سبز شده بطور روزانه در ساعت معین شمارش شدند. طرح آماری مورد استفاده به صورت کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. در این تحقیق، حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش سبز شدن به ازای هر واحد افزایش شوری برآورد گردید و شاخص تحمل به تنش شوری شنبلیله در مرحله سبز شدن مشخص گردید.

ج) ارزیابی تحمل به شوری در مرحله رشد رویشی

و زایشی: بذره‌های شنبلیله پس از ضدعفونی در گلدان‌های پلاستیکی به ارتفاع ۳۰ cm و قطر دهانه ۲۵ cm پر شده با ۸ کیلوگرم خاک دارای بافت لوم شنی (جدول ۱) در عمق ۲ سانتیمتری کشت شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده قبل از آبخشویی

ویژگی	واحد	نماد	مقدار	ویژگی	واحد	نماد	مقدار
هدایت الکتریکی	dS.m ⁻¹	EC	11.91	نسبت جذب سدیم	-	SAR	7.37
واکنش خاک	-	pH	7.48	مواد آلی	%	O.M.	0.02
کربنات	Meq/lit	CO ₃ ⁻²	0.00	نیتروژن کل	%	T.N.	0.001
بی کربنات	Meq/lit	HCO ₃ ⁻	1.21	فسفر قابل جذب	mg/kg	P _{av}	6.64
کلر	Meq/lit	Cl ⁻	61.8	پتاسیم قابل جذب	mg/kg	K _{av}	155
سولفات	Meq/lit	SO ₄ ⁻²	66.54	شن	%	Sand	80.36
کلسیم محلول	Meq/lit	Ca ²⁺	61.1	سیلت	%	Silt	8.64
منیزیم محلول	Meq/lit	Mg ²⁺	21.18	رس	%	Clay	11
سدیم	Meq/lit	Na ⁺	47.3	بافت خاک	-	بافت	شنی لوم
پتاسیم محلول	Meq/lit	K ⁺	اندک	نسبت جذب سدیم	-	SAR	7.38

گلدان‌ها پس از پر شدن با خاک به درون گلخانه تحقیقاتی با دمای حداکثر ۲۵°C و حداقل ۲۰°C منتقل شدند. قبل از کاشت، با توجه به شوری زیاد خاک (۱۱/۹۱ dS.m⁻¹)، عملیات آبخشویی با آب غیر شور انجام شد، به طوری که شوری عصاره اشباع خاک پس از آبخشویی به ۳/۸۱ dS.m⁻¹ کاهش یافت. پس از کاشت و سبز شدن بذور، تا مرحله پنج‌برگی آبیاری گلدان‌ها با آب غیر شور انجام گرفت و تیمارهای شوری آب (۲، ۴، ۶، ۹، ۱۰، ۱۲، ۰/۵ dS.m⁻¹) اعمال شدند. برای جلوگیری از آسیب شوک به گیاهان، تیمارهای شوری به تدریج تا رسیدن به سطح شوری مورد نظر اعمال گردید. طرح آماری به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. این تیمارها از طریق اختلاط آب شور زیرزمینی (با هدایت الکتریکی ۱۴ dS.m⁻¹) و آب شرب حاصل شد. اعمال تیمار شوری و آبیاری گلدان‌ها با توجه به تغییرات وزن آن‌ها و نیاز آبخشویی تا رسیدن به ظرفیت زراعی بود. برای این منظور، رطوبت خاک در حالت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم توسط دستگاه صفحات فشاری (Pressure Plate Apparatus، مدل ۱۵۰۰، ساخت شرکت Soil Moisture، آمریکا)، اندازه‌گیری شد. برای کنترل شوری خاک و جلوگیری از تجمع نمک در ناحیه توسعه ریشه، میزان شوری عصاره 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 هدایت الکتریکی از دستگاه EC متر 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، به طوری که در سطوح پایین شوری گیاهان آب بیشتر و با فاصله کمتری دریافت می‌کردند، لیکن به تدریج با افزایش شوری آب آبیاری، میزان حجم آب مصرفی و دفعات آن کاهش می‌یافت. در پایان آزمایش، به منظور تعیین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، از مته مخصوص نمونه‌برداری خاک هر یک از تیمارها استفاده شد. در جدول ۲، حجم آب مصرفی و متوسط شوری عصاره اشباع خاک در عمق توسعه ریشه در طول فصل رشد درج شده است.

جدول ۲- هدایت الکتریکی آب آبیاری، حجم آب مصرفی و متوسط شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد

هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)	کل حجم آب مصرفی (lit)	متوسط قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (dS.m ⁻¹)			
		تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	میانگین
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

(۱)

$$Y=100 - I (EC-a_0)$$

در این پژوهش برخی مدل‌های غیرخطی نیز آزمون شدند. بر اساس مدل وانگنوختن و هافمن (۱۹۸۴) عملکرد نسبی از همان ابتدا به صورت غیرخطی شروع به کاهش کرده و در نقطه EC_{50} 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.

(۲)

$$Y=Y_m$$

$$/ [(1+ (EC / EC_{50})^p)]$$

علاوه بر مدل غیرخطی فوق، با استفاده از معادله چند جزئی نزولی تغییر یافته (استفن و همکاران ۲۰۰۵ الف) مدل دیگری آزمون شد که در آن کاهش عملکرد در اثر افزایش شوری به صورت 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.

(۳)

$$Y=Y_m /$$

$$[(1+ (EC / EC_{50})^{(s \cdot EC_{50})})]$$

همچنین، با معلوم بودن مقادیر EC_{50} و s ، شاخص تحمل به شوری شنبلیله در مرحله رشد رویشی مطابق معادله ۴ محاسبه شد (استفن و همکاران ۲۰۰۵ ب). با محاسبه شاخص تحمل به شوری، روند واکنش تحمل به

سه ماه پس از کاشت در انتهای مرحله رشد رویشی میزان عملکرد ماده خشک بخش هوایی در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی واکنش شنبلیله شوری از نظر عملکرد دانه، شش ماه پس از کاشت گیاهان در خرداد ماه در انتهای مرحله رشد زایشی برداشت شدند و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. طرح آماری مورد استفاده به صورت کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. در این مرحله، حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش سبز شدن به ازای هر واحد افزایش شوری برآورد گردید و شاخص تحمل به تنش شوری شنبلیله در مراحل رشد رویشی و زایشی تعیین گردید.

نتایج و بحث

در این پژوهش، تحمل به شوری شنبلیله در مراحل مختلف رشد با استفاده از مدل‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مدل سه‌قسمتی پیشنهادی توسط ماس و هافمن (۱۹۷۷) حد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد (جوانه‌زنی، سبز شدن، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد دانه) به ازای افزایش هر واحد شوری تعیین شد. در این مدل پیشنهادی، هنگامی که شوری (EC) بین صفر و حد آستانه (a_0) باشد، عملکرد نسبی (Y) برابر ۱۰۰ درصد است. لیکن، در شوری‌های بالاتر از حد آستانه عملکرد نسبی با شیب ثابتی (l) به صورت خطی شروع به کاهش می‌کند (معادله ۱):

شوری در مدل خطی با سایر مدل‌های غیرخطی تجربی مطالعه و ارزیابی شد.

(۴) ST-index

$$= EC_{50} + s. EC_{50}$$

الف) تحمل به شوری شنبليله در مرحله جوانه‌زنی

در این تحقیق مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی واکنش شنبليله به شوری در مرحله جوانه‌زنی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (۱۹۷۷)، حد آستانه تحمل به شوری شنبليله $dS.m^{-1}$ ۲۰/۳ و شیب کاهش جوانه‌زنی آن $10/37$ درصد به‌دست آمد (جدول ۳). این بدان معنی است که با افزایش هر واحد شوری بالاتر از حد آستانه، جوانه‌زنی

بذر به میزان $10/37$ درصد کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود کاهش ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد جوانه‌زنی به‌ترتیب در سطوح شوری $22/7$ ، $25/1$ و $27/6$ $dS.m^{-1}$ رخ داده و در سطح شوری $dS.m^{-1}$ ۳۰ جوانه‌زنی بذر کاملاً متوقف گردد (جدول ۳). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است حد آستانه تحمل به شوری شنبليله در مرحله جوانه‌زنی بالا و شیب کاهش میزان جوانه‌زنی نیز بالاست. این امر موجب می‌شود در شوری‌های بالاتر از حد آستانه کاهش ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد جوانه‌زنی سطوح شوری نزدیک به هم مشاهده شود و با شیب نسبتاً شدیدی دنبال شود.

جدول ۳- معادلات برازش داده شده مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی واکنش توده اصفهانی شنبليله به تنش شوری در مرحله جوانه‌زنی

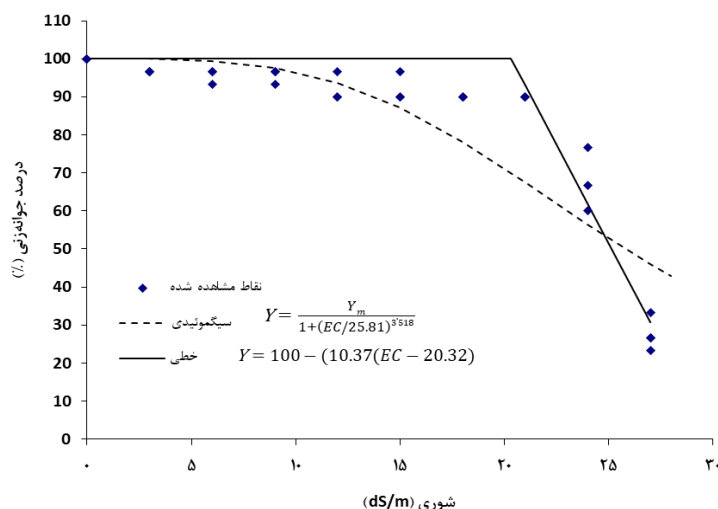
نوع مدل	معادله برازش داده شده	معادله مرجع	r	مرجع
مدل سه قسمتی خطی	$Y=100-10.37*(EC-20.32)$	$Y=100-l*(EC-a_0)$	0.581	Maas and Hoffman, 1977
مدل سیگموئیدی	$Y=Y_m/[1+(EC/25.81)^{3.52}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^p]$	0.997	Van Genuchten and Hoffman, 1984
مدل سیگموئیدی تغییر یافته	$Y=Y_m/[1+(EC/25.63)^{exp_{0.256}}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^{exp_{s*EC_{50}}}]$	0.997	Steppuhn, Van Genuchten and Grieve, 2005a
مدل عامل نمایی دوگانه	$Y=100*exp[-0.015(EC)-0.0015(EC)^2]$	$Y=100*exp[a(EC)-b(EC)^2]$	0.882	Wang et al., 2002

در این معادلات EC_{50} ، Y ، EC ، به ترتیب عملکرد حداکثر، عملکرد نسبی (%، متوسط شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد $(dS.m^{-1})$ ، شوری عصاره اشباع خاک به ازای ۵۰٪ کاهش عملکرد $(dS.m^{-1})$ می‌باشند. همچنین، p ، l ، a_0 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.

سایر مدل‌های ارائه شده در جدول ۳، واکنش به شوری شنبليله را در مرحله جوانه‌زنی به صورت غیر خطی پیش‌بینی می‌کنند. در مدل‌های غیر خطی، با افزایش هر سطح شوری میزان جوانه‌زنی بذر بطور تدریجی از همان ابتدا شروع به کاهش یافتن می‌کند (شکل ۱). بر اساس مدل سیگموئیدی، حدی از شوری که در آن بذور شنبليله به مقدار ۵۰ درصد جوانه می‌زنند (EC_{50})، برابر $dS.m^{-1}$ ۲۵/۸ بود (جدول ۳).

بر اساس مدل سیگموئیدی تغییر یافته (استفن و همکاران، ۲۰۰۵ الف؛ استفن و همکاران، ۲۰۰۵ ب)، مقدار

شوری که در آن بذور شنبليله به مقدار ۵۰ درصد جوانه می‌زنند (EC_{50}) نزدیک به مقادیر EC_{50} پیش‌بینی شده به وسیله مدل سیگموئیدی معمولی (وانگنوختن و هافمن، ۱۹۸۴) بود. مقایسه مقادیر EC_{50} پیش‌بینی شده به وسیله مدل سیگموئیدی با مدل خطی سه قسمتی، نشان داد که مقدار شوری که در آن درصد جوانه‌زنی بمیزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد برای توده اصفهانی شنبليله مشابه مدل سیگموئیدی ($dS.m^{-1}$ ۲۵/۸) و معادل $dS.m^{-1}$ ۲۵/۱ بود (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار واکنش توده اصفهانی شبلیله به شوری در مرحله جوانه‌زنی بر اساس مدل‌های خطی و سیگموئیدی

کاهش درصد جوانه‌زنی نیز از توده هندی (۲۹/۱۷ درصد) بدست آمد (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰ الف). بر اساس نتایج این تحقیق، حد آستانه تحمل به شوری توده اصفهانی شبلیله $20/3 \text{ dS.m}^{-1}$ با شیب کاهش ۱۰/۳۷ درصد بدست آمد. کمترین مقدار را از آن خود کرد. پایین بودن شیب کاهش مزیت مهمی است و سبب می‌شود در مواجهه با شوری‌های بالاتر از حد آستانه، کاهش رشد با آهنگ به مراتب خفیف‌تری دنبال گردد. این امر موجب می‌شود کاهش ۵۰ درصد عملکرد برای توده‌هایی که شیب کاهشی ملایم‌تری دارند در سطوح شوری‌های بالاتر اتفاق افتد. در تایید این موضوع، برازش نتایج مدل‌های غیر خطی نیز نشان داد که در توده اصفهانی شبلیله بیشترین شوری که در آن بذور به مقدار ۵۰ درصد جوانه می‌زنند (EC_{50}) در شوری $25/8 \text{ dS.m}^{-1}$ حاصل گردید.

نتایج محاسبه شاخص تحمل به شوری برای شبلیله نشان داد که مقدار این شاخص برای توده اصفهانی ۲۹/۱۵ حاصل گردید. شاخص تحمل به شوری شبلیله بسته به نوع توده و رقم متفاوت است. شاخص تحمل به شوری برای توده‌های مشهدی، هندی و اردستانی به ترتیب ۲۵/۹۵، ۲۹/۲۴ و ۲۶/۵ بدست آمد. بنابراین، توده اصفهانی شبلیله از نظر شاخص تحمل به شوری بسیار

جوانه‌زنی مهمترین مرحله رشدی گیاه است و تنش شوری می‌تواند مقدار و سرعت آن را محدود سازد. عقیده بر این است که اثرات مضر نمک روی جوانه‌زنی بذر ناشی از اثرات سمی تجمع برخی یون‌ها باشد که در غلظت‌های بالا موجب کاهش پتانسیل آب در محیط، کاهش جذب آب توسط بذرهای در حال جوانه‌زنی و نهایتاً کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود. برخی محققین معتقدند که اثر محدودکننده شوری روی جوانه‌زنی ناشی از جزء اسمزی املاح محلول است، در حالی که برخی دیگر بر این باورند که اثرات سمیت نمک نقش اصلی را در کاهش جوانه‌زنی بذرهای بر عهده دارد (شرما و ویمالا، ۲۰۱۶). معلوم شده است که غلظت‌های بالای نمک هموستتازی اسمزی و یونی را برهم زده و موجب کاهش قابلیت دسترسی به آب برای بذر و کاهش جوانه‌زنی و به تاخیر انداختن آن می‌گردند (تستر و داوینپورت، ۲۰۰۳). نتایج برازش مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی تحمل به شوری توده‌های مختلف شبلیله نشان داد که تحمل به شوری شبلیله بین توده‌های مختلف متفاوت بود. بر اساس مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (۱۴)، بیشترین حد آستانه تحمل به شوری از توده هندی ($24/2 \text{ dS.m}^{-1}$) و کمترین آن از توده مشهدی ($20/2 \text{ dS.m}^{-1}$) حاصل گردید، بیشترین مقدار شیب

نزدیک به توده هندی می‌باشد (بناکار و همکاران ۱۴۰۰ الف).

نتایج این تحقیق نشان داد که شنبلیله در مرحله جوانه‌زنی به تنش شوری متحمل است بطوری که بذره‌های شنبلیله می‌توانند تا شوری $21/8 \text{ dS.m}^{-1}$ بدون هیچگونه کاهش قابل توجهی در درصد جوانه‌زنی، جوانه بزنند. اگرچه نتایج آزمایشات قبل نشان داد که بیشترین حد

آستانه تحمل به شوری ($24/2 \text{ dS.m}^{-1}$) از توده هندی شنبلیله حاصل گردید (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰ الف)، لیکن، بر اساس نتایج این تحقیق و با در نظر گرفتن سایر صفات به ویژه شاخص بنیه بذر، طول دانه‌رست و شاخص تحمل به شوری (ST-index) می‌توان در مرحله جوانه‌زنی توده اصفهانی شنبلیله را به‌عنوان یک توده متحمل به شوری در نظر داشت.

جدول ۴- ضرایب معادله سیگموئیدی و شاخص تحمل به شوری (ST-index) توده اصفهانی شنبلیله در مرحله جوانه‌زنی

ST-index	شاخص تحمل به شوری	Exp($s \cdot EC_{50}$)	ضریب S	$EC_{50} (\text{dS.m}^{-1})$
29.15		3.52	0.0490	25.6

ب) تحمل به شوری شنبلیله در مرحله سبز شدن مطابق با مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (۱۹۷۷)، حد آستانه تحمل به شوری شنبلیله در مرحله سبز شدن (ظهور گیاهچه بر روی سطح خاک)، dS.m^{-1} ۴/۹ و شیب کاهش سبز شدن آن ۷/۲۵ درصد بدست آمد (جدول ۵). به عبارت دیگر، بر اساس مدل خطی، با افزایش هر واحد شوری بالاتر از حد آستانه، میزان سبز شدن ۷/۲۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. پیش‌بینی می‌شود کاهش ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد سبز شدن بذر، به ترتیب در سطوح شوری $11/8$ ، $15/2$ و $18/3 \text{ dS.m}^{-1}$ رخ داده و در سطح شوری $18/7 \text{ dS.m}^{-1}$ سبز شدن بذر کاملاً متوقف گردد (جدول ۵). گزارش شده است که بر اساس مدل خطی بالاترین مقدار حد آستانه تحمل به شوری در مرحله سبز شدن متعلق به توده هندی ($7/8 \text{ dS.m}^{-1}$) بود. این در حالی است که پایین‌ترین مقدار حد آستانه تحمل به شوری از توده‌های مشهدی و نی‌ریزی شنبلیله (به ترتیب $1/7$ و $1/6 \text{ dS.m}^{-1}$) گزارش گردید (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰ ب).

بسیاری از شواهد بیانگر این هستند که در گیاهان زراعی مرحله رشد رویشی حساس به نمک است. با این وجود، برخی از گیاهان دیگر ممکن است در مرحله جوانه‌زنی حساس و در مرحله بعدی متحمل به شوری باشند. سازوکار این امر ناشناخته است و تصور بر این

است که این امر می‌تواند به تغییر در توازن هورمون‌های گیاهی نسبت داده شود (هاجمیر، ۱۹۹۷). در شرایط شور، مرحله سبز شدن گیاه مرحله‌ای بحرانی محسوب می‌گردد. به دلیل اینکه آب توسط نیروی اسمزی در محلول خاک قرار دارد، غلظت بالای نمک می‌تواند در جذب آب توسط بذر و فرآیند جوانه‌زنی اختلال ایجاد کرده و در نتیجه درصد سبز شدن را کاهش دهد (رنجبر و قدیری، ۱۳۹۵). گزارش شده است که برخی گیاهان در زمان جوانه‌زنی نسبت به زمان سبز شدن و استقرار بوته، به شوری متحمل‌تر می‌باشند (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۲). با این حال تنش شوری سرعت جوانه‌زنی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌تواند ظهور کلئوپتیل در سطح خاک را به تأخیر بیندازد. تأخیر در سبز شدن گیاهچه به ویژه زمانی که با سله شدید خاک همراه باشد؛ می‌تواند به کاهش تعداد گیاهچه‌های سبز شده منجر گردد. از طرف دیگر به دلیل اینکه تبخیر معمولاً از سطح خاک و لایه‌های خاک که بذر در آن قرار دارد بیشتر از عمق‌های پایین خاک می‌باشد، گیاهچه‌های جوان در معرض تنش شوری بالاتری قرار گرفته، در نتیجه مرگ و میر بوته‌ها افزایش می‌یابد (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج مشابهی از تأثیر منفی شوری بر درصد سبز شدن بذور کوشیا گزارش شد که در آن اعمال شوری ۱۰ و

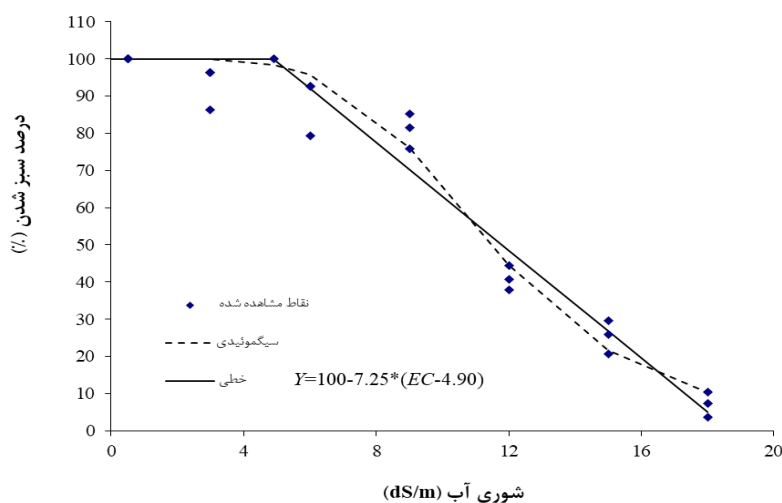
$dS.m^{-1}$ ۲۰ درصد سبز شدن بذور کوشیا را به ترتیب به میزان ۳۵ و ۶۷ درصد کاهش داد (نظامی و همکاران، ۱۳۸۷). این نتایج با نتایج تحقیق حاضر که نشان داد افزایش شوری موجب کاهش تدریجی میزان درصد سبز شدن گیاهچه‌های شنبلیله داشت، همخوانی دارد. برخی مدل‌های ارائه شده در جدول ۵، واکنش به شوری شنبلیله را به صورت غیرخطی پیش‌بینی می‌کنند. در مدل‌های غیرخطی با افزایش هر سطح شوری میزان سبز شدن به طور تدریجی از همان ابتدا شروع به کاهش یافتن می‌کند و با توجه به شکل منحنی سیگموئیدی ممکن است میزان سبز شدن هیچگاه به صفر نرسد (شکل ۲). در مدل سیگموئیدی، بیشترین شوری که

در آن بذور شنبلیله به مقدار ۵۰ درصد جوانه می‌زنند (EC_{50}) معادل $11/5 dS.m^{-1}$ بود. بر اساس مدل سیگموئیدی تغییر یافته (استفن و همکاران، ۲۰۰۵ الف؛ استفان و همکاران، ۲۰۰۵ ب)، مقدار EC_{50} توده‌های شنبلیله برابر مقادیر EC_{50} پیش‌بینی شده به وسیله مدل سیگموئیدی معمولی (وانگنختن و هافمن، ۱۹۸۴) بود. مقایسه مقادیر EC_{50} پیش‌بینی شده به وسیله مدل سیگموئیدی با مدل خطی سه قسمتی، نشان داد که مقدار شوری که در آن درصد سبز شدن بذور به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (EC_{50}) در مدل سیگموئیدی ($11/5 dS.m^{-1}$) اندکی کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل خطی ($11/8 dS.m^{-1}$) بود (شکل ۲).

جدول ۵- معادلات برازش داده شده مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی واکنش توده اصفهانی شنبلیله به تنش شوری در مرحله سبز شدن

نوع مدل	معادله برازش داده شده	معادله مرجع	r	مرجع
مدل سه قسمتی خطی	$Y=100-7.25*(EC-4.90)$	$Y=100-l*(EC-a_0)$	0.945	Maas and Hoffman, 1977
مدل سیگموئیدی	$Y=Y_m/[1+(EC/11.47)^{4.78}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^p]$	0.998	Van Genuchten and Hoffman, 1984
مدل سیگموئیدی تغییر یافته	$Y=Y_m/[1+(EC/11.47)^{exp_{1.56}}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^{exp_{s*EC_{50}}}]$	0.998	Steppuhn, Van Genuchten and Grieve, 2005a
مدل عامل نمایی دوگانه	$Y=100*exp[-0.0304(EC)-0.00803(EC)^2]$	$Y=100*exp[a(EC)-b(EC)^2]$	0.714	Wang et al., 2002

در این معادلات EC_{50} ، EC ، Y ، Y_m به ترتیب عملکرد حداکثر، عملکرد نسبی (%)، متوسط شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد ($dS.m^{-1}$)، شوری عصاره اشباع خاک به ازای ۵۰٪ کاهش عملکرد ($dS.m^{-1}$) 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.



شکل ۲- نمودار واکنش توده اصفهانی شنبلیله به شوری در مرحله سبز شدن بر اساس مدل‌های خطی و سیگموئیدی

نتایج محاسبه شاخص تحمل به شوری برای توده اصفهانی شنبلیله نشان داد که مقدار این شاخص $13/04$ بدست آمد (جدول ۶). شاخص تحمل به شوری شنبلیله بسته به نوع توده و رقم متفاوت است. بر اساس گزارشات ارائه شده، شاخص تحمل به شوری برای توده‌های مشهدی، هندی و اردستانی شنبلیله به ترتیب $12/01$ ، $15/91$ و $13/03$ بود. بنابراین، در مرحله سبز شدن توده اصفهانی شنبلیله از نظر شاخص تحمل به شوری بسیار نزدیک به توده اردستانی می‌باشد. توده اصفهانی شنبلیله نسبت به توده مشهدی به شوره متحمل‌تر است ولی نسبت به توده هندی تحمل کمتری به شوری دارد (بناکار

و همکاران، ۱۴۰۰ ب). در این تحقیق از شاخص تحمل به شوری برای ارزیابی واکنش شنبلیله به شوری استفاده شد. استغن و همکاران، (۲۰۰۵ ب) کاربردهای عملی این شاخص را برای بیش از صد گونه و رقم از گیاهان زراعی محاسبه و جمع‌آوری نمودند. آن‌ها شاخص تحمل به شوری را برای یونجه، ذرت، نیشکر، گندم، برنج، سویا، آفتابگردان و سورگوم به ترتیب $9/43$ ، $6/56$ ، $10/68$ ، 14 ، $8/08$ ، $9/34$ ، $15/46$ و $11/89$ گزارش کردند. همچنین، مقادیر متناظر EC_{50} برای گونه‌های فوق به ترتیب $8/5$ ، $9/8$ ، $12/6$ ، $6/8$ ، $7/2$ ، $14/4$ و $9/6 \text{ dS.m}^{-1}$ بود.

جدول ۶- ضرایب معادله سیگموئیدی و شاخص تحمل به شوری (ST-index) توده اصفهانی شنبلیله در مرحله سبز شدن

ST-index	شاخص تحمل به شوری	Exp($s*EC_{50}$)	ضریب S	$EC_{50} (\text{dS.m}^{-1})$
13.04		4.78	0.1364	11.5

ج) تحمل به شوری شنبلیله در مرحله رشد رویشی

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 ماس و هافمن (۱۹۷۷) که در آن واکنش شنبلیله به شوری به صورت خطی پیشنهاد شده است، هنگامی که 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) به صورت 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 $1/3 \text{ dS.m}^{-1}$ و $4/91$ درصد برآورد شد. این بدان معنی است که مطابق با مدل خطی میزان عملکرد نسبی شنبلیله تا $1/3 \text{ dS.m}^{-1}$ برابر ۱۰۰ درصد بوده، لیکن در شوری‌های زیادتر از آن به تدریج عملکرد آن شروع به کاهش پیدا می‌کند، به طوری که کاهش

عملکرد ماده خشک معادل $4/91$ 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 $3/2 \text{ dS.m}^{-1}$ و کاهش ۲۵ و ۵۰ درصدی عملکرد نسبی به ترتیب در شوری خاک $6/4$ و $11/5 \text{ dS.m}^{-1}$ اتفاق می‌افتد (شکل ۳). همچنین، بر اساس مدل خطی عملکرد نسبی ماده خشک در شوری خاک $21/7 \text{ dS.m}^{-1}$ به صفر خواهد رسید.

سایر مدل‌های ارائه شده در جدول ۷، واکنش شنبلیله به شوری را به صورت غیرخطی پیش‌بینی می‌کنند. بر این اساس، در مدل‌های غیرخطی همراه با افزایش هر سطح شوری، میزان عملکرد نسبی ماده خشک به طور تدریجی از همان ابتدا به طور سیگموئیدی و یا نمایی شروع به کاهش پیدا می‌کند (شکل ۴). بر اساس مدل غیرخطی ارائه شده توسط وانگنوختن و هافمن (۱۹۸۴)، کاهش ۱۰ و ۲۵ درصدی در عملکرد ماده خشک به ترتیب در شوری عصاره اشباع خاک $3/4$ و $6/3 \text{ dS.m}^{-1}$ رخ می‌دهد. همچنین، مقدار شوری که در آن عملکرد نسبی ماده خشک به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (EC_{50})، در

شوری $11/7 \text{ dS.m}^{-1}$ پیش‌بینی می‌شود (جدول ۷ و شکل ۴).

بر اساس نتایج حاصله، در شکل دیگری از مدل سیگموتیدی که در آن منحنی واکنش به شوری را به صورت نمایی پیش‌بینی شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۲) افزایش شوری خاک در $3/23 \text{ dS.m}^{-1}$ موجب کاهش عملکرد نسبی به میزان ۱۰ درصد می‌شود. همچنین، شوری خاک در $7/42$ و $14/24 \text{ dS.m}^{-1}$ منجر به کاهش عملکرد نسبی ماده خشک به ترتیب به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد خواهد شد (جدول ۷ و شکل ۴).

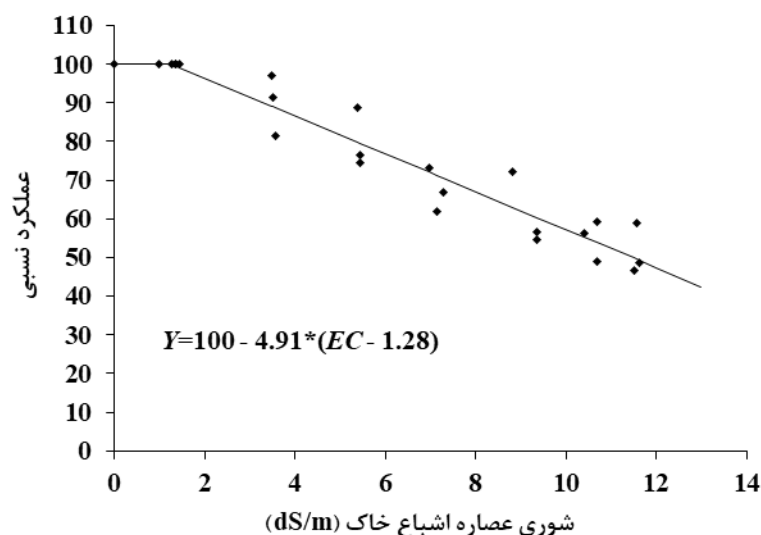
بر اساس رابطه چند جزئی نزولی تغییر یافته که شکل دیگری از مدل سیگموتیدی است، کاهش عملکرد در اثر

افزایش شوری را به صورت 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 $(s \cdot EC_{50})$ 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) به عنوان معیاری برای مقایسه تحمل به شوری پیشنهاد شده است. در این پژوهش، مقدار EC_{50} و ضریب s به ترتیب $11/7 \text{ dS.m}^{-1}$ و $0/049$ به دست آمد. با قرار دادن این اعداد در معادله مرجع، شاخص تحمل به شوری (ST -index) برای سنبليله $12/24$ محاسبه شد.

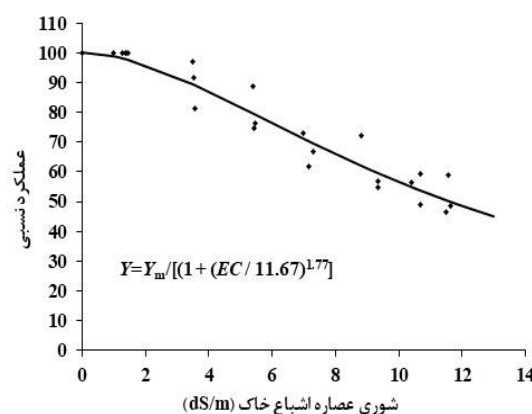
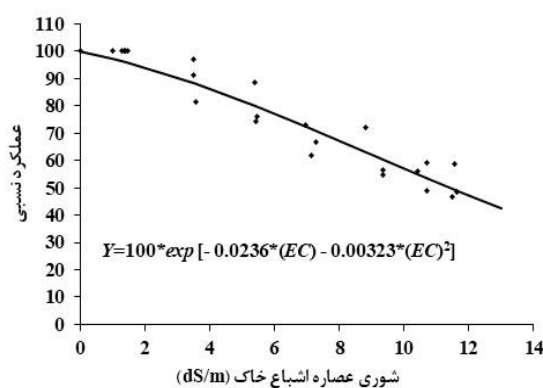
جدول ۷- معادلات برازش داده شده مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی واکنش توده اصفهانی سنبليله به تنش شوری در مرحله رشد رویشی

نوع مدل	معادله برازش داده شده	معادله مرجع	r	مرجع
مدل سه قسمتی خطی	$Y=100-4.91*(EC-1.28)$	$Y=100-l*(EC-a_0)$	0.996	Maas and Hoffman, 1977
مدل سیگموتیدی	$Y=Y_m/[1+(EC/11.67)^{1.77}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^p]$	0.999	Van Genuchten and Hoffman, 1984
مدل سیگموتیدی تغییر یافته	$Y=Y_m/[1+(EC/11.67)^{exp_{0.572}}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^{exp_{s*EC_{50}}}]$	0.999	Steppuhn, Van Genuchten and Grieve, 2005a
مدل عامل نمایی دوگانه	$Y=100*exp[-0.0236(EC)-0.00323(EC)^2]$	$Y=100*exp[a(EC)-b(EC)^2]$	0.974	Wang et al., 2002

در این معادلات EC_{50} ، EC ، Y ، Y_m به ترتیب عملکرد حداکثر، عملکرد نسبی (%، متوسط شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد (dS.m^{-1}))، شوری عصاره اشباع خاک به ازای ۵۰٪ کاهش عملکرد (dS.m^{-1}) می‌باشند. همچنین، a_0 ، 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.



شکل ۳- نمودار واکنش توده اصفهانی شنبليله به شوری در مرحله رشد رویشی بر اساس مدل خطی



شکل ۴- پیش‌بینی تغییرات عملکرد نسبی ماده خشک توده اصفهانی شنبليله به شوری عصاره اشباع خاک مطابق با مدل‌های غیر خطی. سیگموتیدی (راست)، نمایی (چپ)

می‌باشد، می‌توان شنبليله را در یکی از این گروه‌ها طبقه‌بندی کرد. با توجه به نتایج این تحقیق، بر اساس مدل خطی ماس و هافمن (۱۹۷۷) حد آستانه تحمل به شوری شنبليله بر اساس عملکرد خشک معادل $1/3 \text{ dS.m}^{-1}$ با شیب کاهش عملکرد $4/9$ درصد بود. با مکان یابی این اعداد در نمودار واکنش تغییرات عملکرد گیاهان به شوری (آیرز و وسکات، ۱۹۸۹)، شنبليله را می‌توان از نظر عملکرد ماده خشک در مرحله رشد رویشی در گروه گیاهان نسبتاً حساس به شوری گروه‌بندی نمود (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰ج).

مقایسه پارامترهای محاسبه شده شاخص تحمل به شوری و EC_{50} شنبليله (به ترتیب $12/24$ ، $11/7 \text{ dS.m}^{-1}$) با مقادیر ارائه شده برای گونه‌های زراعی رایج می‌تواند برآوردی از تحمل به شوری شنبليله به دست دهد. بر این اساس، اعداد شاخص تحمل به شوری و EC_{50} شنبليله خیلی نزدیک به سورگوم بوده و بنابراین احتمالاً اندکی متحمل‌تر از آن می‌باشد (جدول ۸). معذک، مطابق با مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (۱۹۷۷) که در آن گروه‌بندی گیاهان از نظر تحمل به شوری بر اساس اعداد آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد

جدول ۸- ضرایب معادله سیگموئیدی و شاخص تحمل به شوری (ST-index) توده اصفهانی شنبلیله در مرحله رشد رویشی

شاخص تحمل به شوری -ST	Exp(s*EC ₅₀)	ضریب S	EC ₅₀ (dS.m ⁻¹)
index			
12.24	1.77	0.0490	11.7

اغلب تولید ماده خشک برای مشخص ساختن واکنش گیاه به شوری بکار می‌رود. از آنجا که محتوای آبی گیاه در شرایط تنش متفاوت است، تولید ماده خشک به عنوان شاخص مناسبی برای ارزیابی اثرات شوری در گیاه بکار می‌رود (هاجمیر، ۱۹۷۷). 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 می‌باشد که هریک از آنها معلول عوامل دیگری است. همچنین، بنا به اعتقاد تستر و داوینپورت (۲۰۰۳)، ساخت پروتئین و آنزیم مستلزم وجود غلظت‌های بالایی از پتاسیم است، لیکن، در تنش شوری حضور مقادیر بالای یون‌های سدیم بجای پتاسیم موجب اختلال در الگوی پروتئین‌سازی و رشد شده که یکی از آسیب‌های مهم تنش شوری در گیاهان است (تستر و داوینپورت، ۲۰۰۳؛ بناکار و همکاران، ۲۰۲۲).

د) تحمل به شوری شنبلیله در مرحله رشد زایشی

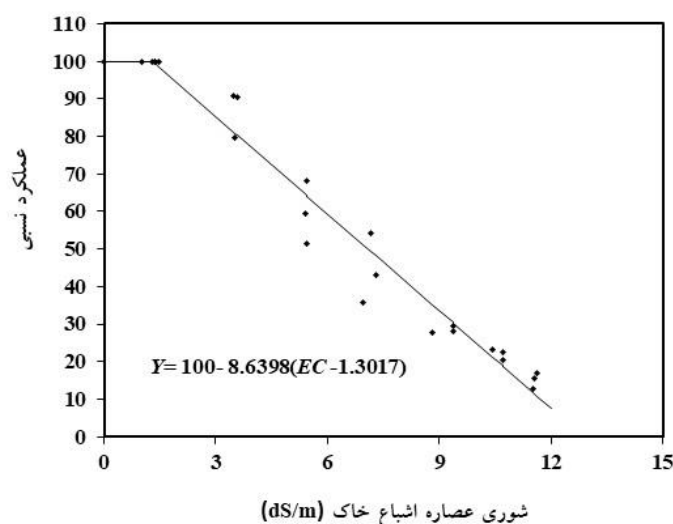
در این تحقیق از مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی تحمل به شوری شنبلیله در مرحله رشد زایشی استفاده

شد. برای این منظور صفت عملکرد دانه برای بررسی واکنش تحمل به شوری مورد استفاده قرار گرفت. مطابق با مدل خطی ارائه شده توسط ماس و هافمن (۱۹۷۷) و روابط مندرج در جدول ۵، مقدار حد آستانه (a₀) و شیب کاهش عملکرد (l) بر اساس مدل خطی به ترتیب برابر 1 dS.m^{-1} و $8/64$ درصد برآورد گردید. این بدان معنی است که مطابق با مدل خطی میزان عملکرد نسبی دانه شنبلیله تا 1 dS.m^{-1} برابر ۱۰۰ درصد بوده، اما در شوری‌های بالاتر از آن به تدریج عملکرد دانه شروع به کاهش پیدا می‌کند، به طوری که مقدار کاهش عملکرد دانه معادل $8/64$ درصد به ازای هر واحد افزایش شوری خاک می‌باشد (شکل ۵). بر این اساس، مطابق با مدل خطی، کاهش عملکرد نسبی دانه به میزان ۱۰ درصد در شوری عصاره اشباع خاک $2/5 \text{ dS.m}^{-1}$ و کاهش ۲۵ و ۵۰ درصدی عملکرد دانه به ترتیب در شوری خاک $4/2$ و $7/1 \text{ dS.m}^{-1}$ اتفاق می‌افتد. همچنین، عملکرد نسبی دانه در شوری خاک $12/9 \text{ dS.m}^{-1}$ به صفر خواهد رسید (جدول ۸).

جدول ۹- معادلات برازش داده شده مدل‌های مختلف تجربی برای ارزیابی واکنش توده اصفهانی شنبليله به تنش شوری در مرحله رشد زایشی و تشکیل دانه

نوع مدل	معادله برازش داده شده	معادله مرجع	r	مرجع
مدل سه قسمتی خطی	$Y=100-8.64*(EC-1.30)$	$Y=100-l*(EC-a_0)$	0.996	Maas and Hoffman, 1977
مدل سیگموئیدی	$Y=Y_m/[1+(EC/6.51)^{2.79}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^p]$	0.999	Van Genuchten and Hoffman, 1984
مدل سیگموئیدی تغییر یافته	$Y=Y_m/[1+(EC/6.51)^{\exp 1.027}]$	$Y=Y_m/[1+(EC/EC_{50})^{\exp s*EC_{50}}]$	0.999	Steppuhn, Van Genuchten and Grieve, 2005a
مدل عامل نمایی دوگانه	$Y=100*\exp[-0.00022(EC)-0.0149(EC)^2]$	$Y=100*\exp[a(EC)-b(EC)^2]$	0.913	Wang et al., 2002

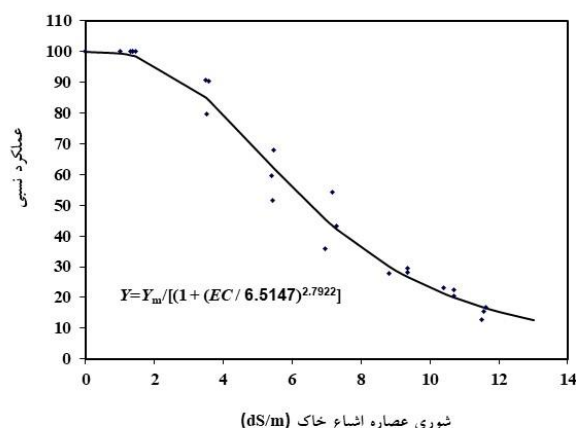
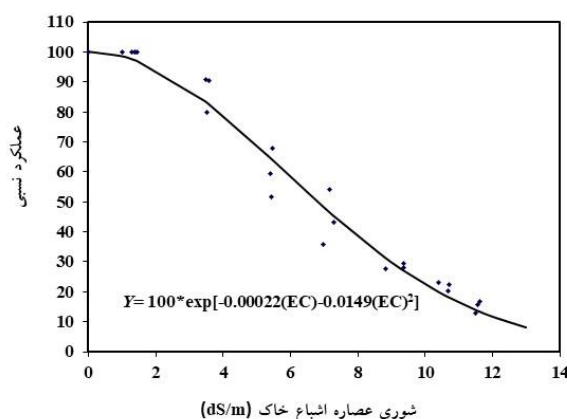
در این معادلات EC_{50} , EC , Y , Y_m به ترتیب عملکرد حداکثر، عملکرد نسبی (%، متوسط شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد ($dS.m^{-1}$)، شوری عصاره اشباع خاک به ازای ۵۰٪ کاهش عملکرد ($dS.m^{-1}$) می‌باشند. همچنین، a , p و s به ترتیب حد آستانه تحمل به شوری، شیب خط، ثابت تجربی و شیب منحنی بوده و مقادیر a و b ضرایب ثابت هر معادله می‌باشند.



شکل ۵- نمودار واکنش توده اصفهانی شنبليله به شوری در مرحله رشد زایشی بر اساس مدل خطی

توسط وانگنوختن و هافمن (۱۹۸۴)، کاهش ۱۰ و ۲۵ درصدی در عملکرد نسبی دانه به ترتیب در شوری عصاره اشباع خاک ۳/۰ و ۴/۴ $dS.m^{-1}$ رخ می‌دهد. همچنین، مقدار شوری که در آن عملکرد نسبی دانه به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (EC_{50}) معادل $dS.m^{-1}$ ۶/۵ می‌باشد (جدول ۹ و شکل ۶).

سایر مدل‌های ارائه شده در جدول ۹، واکنش شنبليله به شوری را به صورت غیر خطی پیش‌بینی می‌کنند. بر این اساس در مدل‌های غیر خطی همراه با افزایش هر سطح شوری، میزان عملکرد دانه به صورت تدریجی از همان ابتدا به طور سیگموئیدی و یا نمایی شروع به کاهش یافتن می‌کند (شکل ۶). بر اساس مدل غیر خطی ارائه شده



شکل ۶- پیش‌بینی تغییرات عملکرد دانه توده اصفهانی سنبليله به شوری عصاره اشباع خاک مطابق با مدل‌های غیرخطی. سیگموتیدی (راست)، نمایی (چپ)

مطلق مشتق تغییرات عملکرد نسبی به تغییرات شوری محیط ($|dY/dEC|$) به دست می‌آید. در این رابطه، عبارت نمایی ($s \cdot EC_{50}$) میزان برآمدگی و یا فرو رفتگی دو طرف منحنی را نسبت به EC_{50} نشان می‌دهد (بناکار و همکاران، ۱۴۰۰ ج). بر اساس پارامتر غیر خطی EC_{50} و s ، شاخص تحمل به شوری ($ST-index$) به عنوان معیاری برای مقایسه تحمل به شوری پیشنهاد شده است. در این تحقیق، مقدار EC_{50} و ضریب s به ترتیب $dS.m^{-1}$ و $۰/۱۵۷۶$ به دست آمد. با قرار دادن این اعداد در رابطه (۴)، شاخص تحمل به شوری ($ST-index$) برای سنبليله $۷/۵۴$ محاسبه گردید (جدول ۱۰).

بر اساس نتایج حاصله، در شکل دیگری از مدل سیگموتیدی که در آن منحنی واکنش به شوری را به صورت نمایی پیش‌بینی شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۲)، افزایش شوری خاک در $dS.m^{-1}$ $۲/۷$ موجب کاهش عملکرد نسبی دانه به میزان ۱۰ درصد می‌گردد. همچنین، شوری خاک در $۴/۴$ و $۶/۸$ $dS.m^{-1}$ منجر به کاهش عملکرد نسبی دانه به ترتیب به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد خواهد گردید (جدول ۹ و شکل ۶).

بر اساس رابطه چند جزئی نزولی تغییر یافته که شکل دیگری از مدل سیگموتیدی می‌باشد، کاهش عملکرد در اثر افزایش شوری را به صورت غیر خطی نشان می‌دهد. در این رابطه، پارامتر s شیب منحنی می‌باشد که از قدر

جدول ۱۰ - ضرایب معادله سیگموتیدی و شاخص تحمل به شوری ($ST-index$) توده اصفهانی سنبليله در مرحله رشد زایشی

شاخص تحمل به شوری - $ST-index$	$Exp(s \cdot EC_{50})$	ضریب s	EC_{50} ($dS.m^{-1}$)
7.54	2.79	0.1576	6.5

دانه، عقیم شدن قسمت انتهایی سنبله گزارش شده است. علاوه بر این، عامل دیگری که باعث کاهش عملکرد می‌گردد، تأثیری است که شوری بر اجزای عملکرد گذاشته و منجر به کاهش تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه می‌شود (رنجبر و بناکار، ۱۳۹۲). در جو، اثرات منفی شوری بر عملکرد دانه، وزن دانه، تعداد دانه در سنبله، تعداد سنبله‌های عقیم و وزن هزار دانه گزارش

شوری می‌تواند بسیاری از فرایندهای مربوط به رشد زایشی که مرتبط با عملکرد دانه است را مختل نموده و به نمو گیاه صدمه وارد سازد. تنش شوری از طریق کاهش قدرت زنده ماندن دانه کرده و کاهش قدرت جوانه‌زنی آن، باروری و پر شدن دانه را تحت تأثیر قرار داده و به کاهش عملکرد دانه منجر می‌شود (میرمحمدی میبیدی و قره یاضی، ۱۳۸۱). در گندم یکی از علل کاهش عملکرد

که در شنبلیله تنش شوری موجب کاهش تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در نیام، وزن هزار دانه تعداد دانه‌های پر، عملکرد دانه و افزایش درصد دانه‌های پوک گردید (بناکار و همکاران، ۱۳۹۹).

نتایج این تحقیق نشان داد که تحمل به شوری شنبلیله در مراحل مختلف رشد متفاوت بود. در جدول ۱۱ خلاصه‌ای از تغییرات حد آستانه تحمل به شوری، شیب کاهش، شاخص تحمل به شوری، حداکثر شوری که در آن عملکرد به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد درج شده است.

شده است (شهیدی و همکاران، ۱۳۸۹). گزارش شده است که در کلزا کاهش تعداد غلاف در بوته ممکن است ناشی از هورمون اسید آبسیزیک باشد، زیرا بالا بودن این هورمون می‌تواند موجب مرگ دانه‌های گرده شده و بنابراین تعداد گل‌های لقاح یافته و نهایتاً تعداد غلاف را کاهش دهد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۵). نشان داده شده است که تنش شوری در بادام زمینی موجب کاهش وزن خشک نیام شده است. همچنین، در برنج آبیاری با آب شور، کاهش تعداد دانه‌های گرده زنده را به دنبال داشته که به کاهش تعداد سنبله‌های بارور و کاهش عملکرد دانه منجر شده است (هاجمیر، ۱۹۷۷). نشان داده شده است

جدول ۱۱- تغییرات حد آستانه تحمل به شوری، شیب کاهش، شاخص تحمل به شوری (ST-index) و حداکثر شوری که در آن عملکرد به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (EC50) برای توده اصفهانی شنبلیله در مراحل مختلف رشد

مرحله رشد	حد آستانه تحمل به شوری (dS.m ⁻¹)	شیب کاهش (%)	شاخص تحمل به شوری ST-index	EC ₅₀ (dS.m ⁻¹)
جوانه‌زنی	20.3	10.37	25.6	29.15
سبز شدن	4.9	7.25	13.04	11.5
رشد رویشی	1.3	4.9	12.24	11.7
رشد زایشی	1.3	8.64	7.54	6.5

نتیجه گیری

در این تحقیق، از مدل‌های مختلف تجربی برای بررسی تغییرات حد آستانه تحمل به شوری، شیب کاهش عملکرد و شاخص تحمل به شوری در هر یک از مراحل مختلف رشد استفاده شد. نتایج نشان داد که تحمل به شوری شنبلیله در مراحل مختلف رشد متفاوت بود بطوری‌که این گیاه در مرحله جوانه‌زنی بیشترین میزان تحمل را به شوری نشان داد. در مرحله جوانه‌زنی حد آستانه تحمل به شوری $20/3 \text{ dS.m}^{-1}$ و شیب کاهش جوانه‌زنی $10/37$ درصد بود. لیکن، این تحمل در مراحل بعدی رشد و نمو به تدریج کمتر شد. به‌طوری‌که شنبلیله در مرحله سبز شدن نسبت به جوانه‌زنی تحمل به شوری پایین‌تری از خود نشان داد (حد آستانه $4/9 \text{ dS.m}^{-1}$ با شیب کاهش $7/25$ درصد). در مرحله رشد رویشی تحمل به شوری شنبلیله کمتر شده به‌طوری‌که حد آستانه تحمل به شوری آن در این مرحله $1/3 \text{ dS.m}^{-1}$ همراه با شیب کاهش عملکرد $4/9$ درصد بود. شنبلیله در مرحله رسیدگی دانه کمترین تحمل را به شوری نشان داد. در مرحله رسیدگی دانه حد آستانه تحمل به شوری شنبلیله $1/3 \text{ dS.m}^{-1}$ با شیب کاهش عملکرد $8/64$ درصد همراه بود. مطابق مدل‌های غیرخطی مقادیر متناظر شوری که در آن عملکرد به‌اندازه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (EC_{50}) برای توده اصفهانی شنبلیله در مراحل جوانه‌زنی، سبز شدن، رشد رویشی و رسیدگی دانه به‌ترتیب $25/8$ ، $11/5$ ، $11/7$ ، $6/5$ dS.m^{-1} به‌دست آمد. بنابراین، در مناطقی که دسترسی به منابع آب با کیفیت متفاوت وجود دارد می‌توان از آنها برای آبیاری شنبلیله در مراحل اولیه رشد از آب شور و به تدریج در مراحل بعدی رشد از آب‌های با کیفیت بالاتر استفاده کرد.

فهرست منابع

۱. بناکار، م.ح.، امیری، ح.، رنجبر، غ.ح. و سرافراز اردکانی، م.ر. ۱۴۰۰ الف. تعیین آستانه تحمل به شوری توده‌های مختلف شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) در مرحله جوانه‌زنی با استفاده از مدل‌های تجربی. مجله پژوهش‌های گیاهی. جلد ۳۴. شماره ۴. ۱-۲۲.
۲. بناکار، م.ح.، امیری، ح.، رنجبر، غ.ح. و سرافراز اردکانی، م.ر. ۱۴۰۰ اب. ارزیابی و تعیین حد آستانه تحمل به شوری برخی توده‌های شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) در مرحله سبز شدن گیاهچه. مجله پژوهش‌های بذر ایران. سال هشتم. شماره ۲. ۵۱-۶۷.
۳. بناکار، م.ح.، امیری، ح.، رنجبر، غ.ح. و سرافراز اردکانی، م.ر. ۱۴۰۰ ج. اثر شوری بر برخی صفات مورفولوژیک شنبلیله و تعیین حد آستانه تحمل به شوری در مرحله رویشی با استفاده از برخی مدل‌های تجربی. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی. جلد چهاردهم. شماره ۴. ۱۱۰۳-۱۰۸۱.
۴. بناکار، م.ح.، امیری، ح.، رنجبر، غ.ح. و سرافراز اردکانی، م.ر. ۱۳۹۹. تعیین حد آستانه تحمل به شوری و اثرات استفاده از آب شور بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*). مجله فرایند و کارکرد گیاهی. جلد ۹. شماره ۳۹. ۲۸۹-۳۰۹.
۵. حسن زاده، ا.، رضازاده، ش.، ع.، شمس‌ا، س.، ف.، دولت آبادی، ر. و زرین قلم، ر.، ۱۳۸۹. مروری بر خواص درمانی و فیتوشیمیایی شنبلیله (*Fenugreek*). فصلنامه گیاهان دارویی. سال نهم. دوره دوم. شماره ۳۴. ۱-۱۳.
۶. دادخواه، ع.، ر.، ۱۳۸۹. مطالعه اثر تنش شوری و نوع نمک بر جوانه زنی و رشد گیاهچه چهار گیاه دارویی شنبلیله، کنجد، شاه‌دانه و زنیان. فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. جلد ۲۶. شماره ۳. ۳۵۸-۳۶۹.
۷. میرمحمدی میبدی، س.ع.م. و قره یاضی، ب. ۱۳۸۱. جنبه‌های فیزیولوژیک و بهنژادی تنش شوری گیاهان، انتشارات دانشگاه صنعتی، اصفهان، ۲۸۸ صفحه.
۸. رنجبر، غ.ح. و غدیری، ح. ۱۳۹۵. کمی‌سازی سبزشدن بذر کوشیا (*Kochia indica*) تحت تاثیر دما، شوری و عمق کاشت، مجله پژوهش‌های بذر ایران، سال ۳، شماره ۲، ۴۱-۵۵.
۹. رنجبر، غ.ح.؛ پیراسته انوشه، ه.؛ امام، ی. و حسین‌زاده، س.ح. ۱۳۹۲. تاثیر تنش شوری بر مراحل مختلف رشد گندم رقم روشن، فصلنامه تولید گیاهان زراعی در شرایط تنش‌های محیطی، سال ۵، شماره ۱، ۳۱-۲۳.
۱۰. رومانی، ا. و احتشامی، س.م. ر.، ۱۳۹۳. اثر سطوح مختلف تنش شوری بر جوانه زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*). پژوهش‌های بذر ایران. سال اول. شماره ۱. ۳۳-۴۵.
۱۱. زرگری، ع.، ۱۳۷۱. گیاهان دارویی. جلد اول. چاپ ششم. انتشارات دانشگاه تهران. ۹۴۶ صفحه.

۱۲. شهیدی، ر.؛ کامکار، ب.؛ لطیفی، ن. و گالشی، س. ۱۳۸۹. اثر سطوح مختلف شوری و زمان تیمار روی عملکرد و اجزای عملکرد دانه جو بدون پوشه (*Hordeum vulgare* L.)، *مجله تولید گیاهان زراعی*، دوره ۳، شماره ۲، ۴۹-۶۳.
۱۳. نوح‌پیشه، ز.، امیری، ح.، محمدی غلامی، ع. و فرهادی، س. ۱۳۹۹. تأثیر نانوذر اکسید روی (ZnO) بر برخی پارامترهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی دو رقم از شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) در شرایط تنش شوری. فرآیند و کارکرد گیاهی. ۹ (۳۵): ۴۲۳-۴۳۸.
۱۴. فرهادی، ح. و عزیزی، م. ۱۳۹۵. اثر پیش تیمار بذر با اسید سالیسیلیک بر جوانه‌زنی چهار توده بومی شنبلیله در شرایط تنش شوری (*Trigonella foenum-graecum* L.). پژوهش‌های تولید گیاهی. جلد بیست و سوم، شماره ۳. ۱-۱۹.
۱۵. مهرآفرین، ع.، قوامی، ن.، نقدی بادی، ح. ع. و قادری، ا. ۱۳۹۰. آلکالوئید تریگونلین، یک متابولیت دارویی ارزشمند گیاهی. فصلنامه گیاهان دارویی. سال ۱۱. دوره اول. شماره ۸. ۱۲-۲۹.
۱۶. ناصری، م.؛ آرویی، ح.؛ کافی، م. و نعمتی، ح. ۱۳۹۵. تأثیر آب شور بر ویژگی‌های فیزیولوژیک شنبلیله در کشت هیدروپونیک، "نشریه پژوهش آب در کشاورزی"، دوره ۳۰، شماره ۱. ۶۵-۷۱. ۱۳۹۵.
۱۷. ارچنگی، آ.؛ خدامباشی، م. و محمدخانی، ع. ۱۳۹۱. تأثیر تنش شوری بر خصوصیات مورفولوژیک و میزان عناصر سدیم، پتاسیم و کلسیم در گیاه دارویی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) تحت شرایط کشت هیدروپونیک، *مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای*، سال ۳، شماره ۱۰، ۳۳-۴۰.
۱۸. نظامی، ا.؛ نباتی، ج.؛ کافی، م. و محسنی، م. ۱۳۸۷. ارزیابی تحمل به شوری کوشیا (*Kochia scoparia* Schrad (L.)) در مرحله سبزشدن و گیاهچه‌ای تحت شرایط کنترل شده، *مجله تنش‌های محیطی در علوم کشاورزی*، دوره ۱، شماره ۱، ۶۹-۷۷.
19. Ayers, R.S. and Westcot, D.W. 1989. Water quality for agriculture, FAO, Irrigation and drainage paper 29, Food and agriculture Organization of the United Nations, Rome, 174PP.
20. Abdelmoumen, H. and Missbah El Idrissi, M., 2009. Germination, growth and nodulation of *Trigonella foenum-graecum* (Fenu Greek) under salt stress. African Journal of Biotechnology. 8 (11): 2489-2496.
21. Banakar, M.H.; Amiri, H. Sarafraz Ardakani, M.R.; Ranjbar, G.H. 2022. Susceptibility and tolerance of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) to salt stress: Physiological and biochemical inspections. Journal of Environmental and Experimental Botany. 194. 104748. 1-10.
22. Chowdhury, M.M.U., Bhowal, S.K., Farhad, I.S.M., Choudhury, A.K. and Khan, A.S.M.M.R., 2014. Productivity of Fenugreek Varieties (*Trigonella foenum-graecum* L.) in the Coastal Saline Areas of Noakhali. The Agriculturists Journal. 12(2): 18-23.
23. Ghorbanpour, A., Mami, Y., Ashournezhad, M., Abri, F. and Amani, M., 2011. Effect of salinity and drought stress on germination of fenugreek. African Journal of Agricultural Research. 6(24): 5529-5532.
24. Hagemeyer, J., 1997. Salt. In: Prasad, M. N. V. Plant Ecophysiology. Wiley and Sons, Inc. New York. 173-206.

25. Maas, E.V. and Hoffman G.L., 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage*. Div. ASCE. 103: 115-134.
26. Barahouee, M. and Sabbagh, E. 2017. Influence of vermicompost and salt stress on some characteristics of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.), *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 6(1): 60-63.
27. Petropoulos, G.A. 2002. Fenugreek, the genus *Trigonella*. London and New York. 214 pages.
28. Sharma, Sh. And Vimala, Y. 2016. Effect of Salt Stress on Germination and Growth of *T. foenum graecum* Seedlings. *International Journal of Advanced Research*. 4 (3): 40-45.
29. Sindhu, S.N., Prathika G., Sindhuja U., Akshaya, S. and Abhilasha, V.G. 2017. Evaluation of abiotic stress induced physiological and biochemical changes in *Trigonella Foenum-Graecum*. *IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry*. 3 (1): 89-97.
30. Steppuhn, H., Van Genuchten, M.Th. and Grieve, C.M., 2005a. Root-zone salinity: I: selecting and product-yield index and response functions for crop tolerance. *Crop Science*, 45: 209-220.
31. Steppuhn, H., Van Genuchten, M.Th. and Grieve, C.M., 2005b. Root-zone salinity: II: Indices for tolerance in agricultural crops. *Crop Science*, 45: 221-232.
32. Tester, M. and Davenport, R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annual Journal of Botany*, 91: 503–550.
33. Van Genuchten, M.Th. and Hoffman, G.J., 1984. Analyzing crop salt tolerance data. P: 285-271, In: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (eds.), *Soil salinity under irrigation- process and management*, Springer-Verlag, NewYork, NY.
34. Volkmar, K. M., Hu, Y. & Steppuhn, H., 1997. Physiological responses of plants to salinity: A review. *Canadian Journal of Plant Science*, 78: 19-27.
35. Maas, E.V. and Hoffman G.L. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *Irrigation and Drainage Division*, ASCE 103:115-134.
36. Zahir, M. and Hussain, F. 2010. Vegetative growth performance of five medicinal plants under NaCl salt stress, *Pakistan Journal of Botany*, 42(1): 303-316.
37. Zahir, M. and Hussain, F. 2011. Effect of NaCl salinity on the germination and seedling growth of some medicinal plants. *Pakistan Journal of Botany*. 42(2): 889-897.
38. Wang, D., Poss, J.A., Donovan, T.J., Shannon, M.C. and Lesch, S.M. 2002. Biophysical properties and biomass production of elephant grass under saline conditions, *Journal of Arid Environments*, 52 (4): 447-456.