Research Article

Nova Biologica Reperta 11(2): 57-70 (2024)

Print ISSN: 2423-6330/Online ISSN: 2476-7115

https://nbr.khu.ac.ir; Kharazmi University Press; DOI:10.22034/NBR.11.2.57

مقاله پژوهشی

یافته‌های نوین در علوم زیستی

جلد ۱۱، شماره ۲، صفحات ۷۰ الی ۵۷ (۱۴۰۳)

انتشارات دانشگاه خوارزمی

استفاده از یادگیری ماشین برای مدل‌سازی سطوح مختلف تنش شوری و کوددهی سیلیس گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecumL.*)

ابراهیم فانی[۱*] و مجتبی مکاری[۲]

[۱]گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران، [۲] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

مسئول مکاتبات: ابراهیم فانی، fani@bkatu.ac.ir

چکیده. در پژوهش حاضر، با توجه به نتایج حاصل از آزمایش اولیه با سطوح تنش شوری و کوددهی مشخص که از قبل انجام شده و با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی (NLR) و زبان برنامه‌نویسی پایتون، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی شنبلیله در سطوح تنش شوری و کوددهی سیلیس تعریف‌شدهٔ جدید (شوری تا سطح ۳۰۰ میلی‌مولار و کوددهی سیلیس در دو سطح ۱ و ۲ گرم در لیتر) بدون انجام آزمایش عملی و براساس سطوح شوری و کوددهی اولیه پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد که تاثیر مثبت سیلیس بر میزان کلروفیل فلوئورسانس (Fv/Fm) از صفر تا سطح شوری ۱۸۰ میلی‌مولار و میزان شاخص سبزینگی (SPAD) از صفر تا سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار نمایان می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر، می‌توان با استفاده از یادگیری ماشین، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی شنبلیله را در سطوح تنش شوری و کوددهی سیلیس تعریف‌شدهٔ دیگر بدون انجام آزمایش عملی، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد.

واژه‌های کلیدی: روش رگرسیون غیر خطی، شنبلیله، صفات فیزیولوژیکی، صفات مورفولوژیکی، یادگیری ماشین.

Using machine learning to model different levels of salinity stress and silica fertilization of fenugreek (Trigonella foenum-graecum L.)

Ebrahim Fani[1]* & Mojtaba Mokari[2]

[1] Department of Biology, Faculty of Basic Science, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran; [2] Department of Physics, Faculty of Basic Science, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology Behbahan, Iran;

Corresponding author: Ebrahim Fani, fani@bkatu.ac.ir

Abstract. In the current research, according to the results of the preliminary experiment carried out previously with specific levels of salinity stress and fertilization which were previously carried out and using the nonlinear regression model (NLR) and Python programming language, the morphological and physiological traits of the fenugreek medicinal plant at the newly defined levels of salinity stress and silica fertilization (salinity of up to 300 mM level and silica fertilization in two levels of 1 and 2 grams per liter) were predicted without conducting practical tests and based on the levels of salinity and initial fertilizationThe results showed that the positive effect of silica on the amount of chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) can be seen from zero to 180 mM salinity level and the amount of greenness index (SPAD) from zero to 100 mM salinity level. It seems that according to the results of the present research, it is possible to use machine learning to investigate and analyze the morphological and physiological characteristics of the fenugreek medicinal plant at other defined levels of salinity stress and other defined silica fertilization with no need conduct a practical experiment.

Key words. Fenugreek, machine learning, morphological characteristics, nonlinear regression method, physiological characteristics

Received 08.03.2024/ Revised 17.06.2024/ Accepted 27.08.2024/ Published 17.09.2024

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸/ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸/ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶/ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]

[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

مقدمه

شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum L.*)گیاه دارویی قدیمی و شناخته شده است که از گذشته تاکنون در مناطق مختلف دنیا برای اهداف مختلفی، مورد کشت قرار گرفته است و خواص درمانی فراوانی دارد (زرگری، ۱۳۷۱؛ Amuthaselvi and Ambrose, 2016). شنبلیله به‌عنوان داروی گیاهی در درمان بسیاری از بیماری‌ها مانند دیابت کاربرد دارد. همچنین برگ و دانه‌های شنبلیله دارای لیپید اندک اما مواد معدنی، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های فراوان هستند (Pasandi Pour *et al.*, 2014).

ایران در اکثر مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه-خشک است که شوری ناشی از آن یکی از عوامل محدودکننده تولید گیاهان به‌شمار می‌رود و تاکنون تولید بسیاری از گیاهان دارویی و زراعی تحت تأثیر تنش شوری با محدودیت مواجه شده است (بناکار و همکاران، ۱۳۹۱). حضور نمک در خاک، ظرفیت جذب آب گیاه را کاهش داده که موجب کاهش رشد گیاه می‌گردد. آسیب به غشاء، عدم توازن مواد غذایی، مهار آنزیمی و تغییر سطوح تنظیم‌کنندگان رشد از اثرات متابولیکی شوری بر گیاه است. تنش شوری شدید می‌تواند اثرات مخربی بر متابولیسم، فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه داشته باشد (Hasanuzzaman *et al.*, 2013). در مطالعه‌ای با عنوان یادگیری ماشین برای مدل‌سازی تنش گیاهی، مدیریت درانگیختن (Hormesis) را مورد بررسی قرار دادند (Rico- Chavez *et al.*, 2022). آنها نشان دادند که تنش‌های ملایم به‌دلیل تولید متابولیت‌های مخصوص تحمل به تنش، اثرات مثبتی بر افزایش بهره‌وری و کیفیت محصول خواهد داشت. همچنین ایشان برای تفسیر دقیق داده‌ها از ابزارهای هوش مصنوعی و به‌ویژه یادگیری ماشین استفاده نمودند.

میزان سیلیس در گیاهان از حدود ۰/۱ درصد وزن خشک تا حدود ۱۰ درصد وزن خشک متغیر است (Ma and Takahashi, 2002; Deshmukh *et al.*, 2013; Debona *et al.*, 2017). کاربرد سیلیس در گیاهان باعث افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش‌های مختلف از جمله شوری، گرما و خشکی می‌شود (Al-aghabary *et al.*, 2005; Zuccarini, 2008; Chen *et al.*, 2011; Debona *et al.*, 2017; Luyckx et *al.*, 2017b, a; Liu et *al.*, 2019). مطالعات حاجی‌هاشمی و همکاران (۱۴۰۱) بر روی گیاه تربچه نشان داد که تیمارسیلیس در گیاه تربچه تحت تنش شوری سبب بهبود شاخص‌های رشد، فلوئورسانس و محتوای کلروفیل‌ها، بیوسنتز کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، آنتی اکسیدان‌ها و در نتیجه حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کاهش آسیب به غشاهای سلولی و در نتیجه افزایش تحمل گیاه در غلظت بالای سدیم گردید.

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم استنتاج عصبی- فازی انطباقی (ANFIS) در زمینه‌های مختلف کشاورزی در حال افزایش است که یکی از جنبه‌های آن برآورد تغییرات عملکرد تولید است (Gupta *et al.*, 2015). همچنین پژوهشگران از مدل‌های یادگیری ماشین مثل: رگرسیون غیرپارامتری (NPR)، رگرسیون غیرخطی (NLR)، رگرسیون لگاریتمی (Log)، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)، رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) و رگرسیون مولفه‌های اصلی (PCR) برای پیش‌بینی میزان پارامتر خروجی در مطالعات متعدد استفاده نمودند (Hosseini *et al.*, 2017).

هدف از این مطالعه تخمین صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی شنبلیله در سطوح متفاوت تنش شوری و محلول‌پاشی سیلیس براساس داده‌های به‌دست آمده از صفات مذکور در آزمایشی با سطوح تنش شوری و محلول‌پاشی سیلیس مشخص با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی است. روش‌های رگرسیون غیرخطی به عنوان یک الگوریتم پرکاربرد در تحلیل داده‌هایی که رابطه بین متغیرها به صورت غیرخطی است، استفاده می‌شوند. در این مدل، روابط معنی دار میان متغیرها با استفاده از توابع غیرخطی ایجاد می‌شوند. برخلاف رگرسیون خطی که فرضیات خاصی درباره رابطه بین متغیرها دارد، روش‌های رگرسیون غیرخطی این امکان را فراهم می‌کنند که روابط پیچیده‌تری را نمایش داده و به تحلیل دقیق‌تری از داده‌ها بپردازیم. بنابراین در این پژوهش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

برای تخمین صفات سطوح بالاتر آزمایش، از روش رگرسیون غیرخطی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش اولیه با سطوح تنش شوری صفر، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و سطوح کوددهی صفر و ۳ گرم در لیتر سیلیس به صورت گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در پاییز سال ۱۴۰۱ در شهرستان بهبهان با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۴۴۶ متر از سطح دریا اجرا شد. ویژگی‌های هواشناسی مکان آزمایش در طی دوره کشت، مطابق جدول ۱ است. تیمارهای آزمایشی شامل شوری در سه سطح (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) (Haghighi, and Masoumi, 2021; Payamani *et al.*, 2021) و کود سیلیس در دو غلظت (صفر و ۳ گرم در لیتر مطابق با توصیهٔ مصرف بر روی پاکت کود تهیه شده از فروشگاه آریا شیمی) بود. بذر شنبلیله از فروشگاه معتبر فروش بذر نیز تهیه شد. بذرهای شنبلیله در گلدان‌های پلاستیکی کوچک به ارتفاع ۷ و قطر ۸ سانتی‌متری پر شده با خاک باغی، خاک‌برگ و پرلیت (به نسبت ۱:۱:۱) طوری کاشته شدند که در نهایت در هر گلدان پنج گیاه وجود داشت. برای تیمار گیاه با کود سیلیس بعد از رشد گیاهچه‌ها و در مرحله ۳ برگ حقیقی، تیمار گلدان‌ها با کود سیلیس (صفر و ۳ گرم در لیتر) در ۳ مرحله همراه با آب آبیاری در یک بازهٔ زمانی ۷ روزه انجام شد و بعد از آن طی یک دوره‌ی ۱۰ روزه، ۴ مرحله اعمال تیمار شوری برای گلدان‌های دارای تنش شوری به صورت آبیاری با آب شور ۷۵ و ۱۵۰ میلی مولار و همزمان آبیاری گلدان‌های دارای آبیاری معمولی (شوری صفر) اعمال گردید. سه روز بعد از اعمال آخرین مرحله تنش شوری و ۳۹ روز بعد از کاشت گیاه شنبلیله، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی شامل ارتفاع بوته، طول ریشه، وزن تر اندام هوایی، وزن تر ریشه، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، شاخص سبزینگی (SPAD)، کلروفیل فلوئورسانس (Fv/Fm) و شاخص کارآیی دستگاه فتوسنتز (PI) در سطوح تنش شوری و کوددهی سیلیس فوق‌الذکر اندازه‌گیری و نتایج آن در قالب یک مقاله چاپ گردیده است (فانی، ۱۴۰۲). در پژوهش حاضر، با توجه به نتایج حاصل از آزمایش اولیه با سطوح تنش شوری و کوددهی مشخص و ذکر شده، با استفاده از مدل رگرسیون و زبان برنامه‌نویسی پایتون، صفات مورد اشاره در سطوح تنش شوری و کوددهی سیلیس تعریف‌شدهٔ دیگر بدون انجام آزمایش عملی و براساس سطوح شوری و کوددهی اولیه پیش‌بینی گردید. در این پژوهش، به کمک برنامه‌نویسی به زبان پایتون و با در نظر گرفتن توابع شناخته شده در مدل رگرسیون غیرخطی(NLR)، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی مختلف گیاه شنبلیله را با سطوح شوری و کوددهی مختلف در کنار مراحل تجربی آزمایش، مدل‌سازی کردیم. همان‌گونه که ذکر شد در روش رگرسیون غیرخطی، برخلاف روش رگرسیون خطی، توانایی برآوردن ارتباطات پیچیده‌تر بین متغیرها وجود دارد که از این نظر در این کار روش رگرسیون غیرخطی برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای انجام این بخش از پژوهش با مدل رگرسیون غیر خطی مراحل زیر انجام شده است (Agrawal, 2021):

۱- انتخاب مدل رگرسیون غیرخطی متناسب با داده‌های مورد مطالعه بسیار اساسی است. لذا برای این کار ترکیبی از توابع چند جمله‌ای، لگاریتمی و توانی مورد استفاده قرار گرفته است. این انتخاب معمولاً بر اساس شیوه‌های مختلفی از جمله روش‌های آزمون مدل‌ها، دانش حوزه مسئله و تجربه پژوهشگر صورت می‌گیرید. توابع انتخابی به صورت توابع نمایی و توانی است که به کمک نتایج آزمایشی تنش شوری و همچنین کود دهی به گیاه انتخاب شده است (توابع ریاضی نهایی در مرحله ۶ ارائه شده است).

۲- داده‌های مورد نیاز برای انجام تحلیل به کمک آزمایش جمع‌آوری شده که این داده‌ها شامل متغیرهای وابسته و مستقل است.

۳- چون داده‌های جمع‌آوری شده نیازمند پیش‌پردازش است لذا با پاک‌سازی داده‌های پرت، تبدیل متغیرها به فرمت مناسب و رفع داده‌های ناقص

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

یا انتقال داده‌ها به مقیاس مناسب، این مرحله نیز انجام گرفته است.

۴- این مرحله شامل تخمین پارامترهای مدل غیرخطی از طریق روش‌های مختلفی از جمله روش‌های کمترین مربعات غیرخطی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است.

۵- پس از تخمین پارامترها، ارزیابی دقت و عملکرد مدل انجام می‌شود. این مرحله شامل استفاده از معیارهای ارزیابی مانند میانگین مربعات خطا و تحلیل رفتار مدل در پیش‌بینی داده‌های آزمایشی است.

مراحل ۳ تا ۵ به‌کمک برنامه‌نویسی با زبان پایتون انجام شده است. سپس توابع در مرحله بهبود عملکرد (مرحله ۶) جمع بندی نهایی شده است.

۶- در این مرحله جهت بهبود مدل، از روش‌های انعطاف‌پذیری مدل مانند افزودن یا حذف متغیرها و تغییر شکل تابع برای بهبود عملکرد مدل استفاده شده است. در نتیجه توابع نهایی پیش بینی پژوهش برای صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی مختلف گیاه شنبلیله را با سطوح شوری و کوددهی مختلف به صورت زیر به دست آمده است:

$$FV(Na,Si)=(1-Si/3)\times(-10^{-4}\,e^{Na/21.27}+0.77)+(Si/3)\times(-3\times10^{-4}e^{Na/32.57}+0.77) \quad (۱)$$

$$SPAD(Na,Si)=(1-Si/3)\times(8.27\,e^{-Na/53.48}+1)+(Si/3)\times(11.2e^{-Na/44}+2.7) \quad (۲)$$

$$HS(Na,Si)=(1-\frac{Si}{3})\times(0.35\,e^{Na/24.26}+2.7)+\frac{Si}{3}\times(-0.58e^{[-0.5\times(\frac{Na-75}{39.75})^2]}+2.95) \quad (۳)$$

$$LR(Na,Si)=(1-Si/3)\times(7.47\times10^{-Na/173.9}-0.52)+(Si/3)\times(10^{-3}e^{Na/31.28}+3.55) \quad (۴)$$

$$WWL(Na,Si)=(1-Si/3)\times(-7\times10^{-3}\,e^{Na/51.64}+0.25)+(Si/3)\times(\frac{186.3}{4\times(Na-75)^2+5595}+0.23) \quad (۵)$$

$$WDL(Na,Si)=(1-Si/3)\times(-10^{-2}\,e^{Na/185}+0.06)+(Si/3)\times(-7\times10^{-3}e^{(-0.5\times(\frac{Na-75}{29.9})^2)}+0.04) \quad (۶)$$

$$WWR(Na,Si)=(1-Si/3)\times(0.05\,e^{-Na/54.1}+0.04)+(Si/3)\times(\frac{0.01}{1+(Na/75)^3}+0.05) \quad (۷)$$

$$WDR(Na,Si)=(1-Si/3)\times(0.02\times e^{-Na/88.52}+0.026)+(Si/3)\times(\frac{0.01}{(1+Na/75)^2}+0.03) \quad (۸)$$

که در معادلات بالا به ترتیب توابع FV، SPAD، HS ، LR، WWL، WDL، WWR و WDR به صورت میزان کلروفیل فلوئورسانس، شاخص سبزینگی، میزان ارتفاع ساقه، میزان ارتفاع ریشه، وزن تر برگ، وزن خشک برگ، وزن تر ریشه و وزن خشک ریشه هستند. همچنین متغیرهای Na و Si میزان شوری و سیلیس برحسب گرم در رابطه‌ها هستند.

۷- در پایان، نتایج مدل رگرسیون غیرخطی تفسیر شده و استنتاجات موردنظر برای مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مرحله که شامل معادلات به‌دست آمده شماره ۱ تا ۸ است به کمک برنامه origin رسم شده و در بخش بحث و بررسی نتایج ارائه شده است.

در کل، اجرای یک مدل رگرسیون غیرخطی نیازمند مراحلی است که شامل انتخاب، آماده‌سازی داده، تخمین، ارزیابی، تطبیق و تفسیر مدل می‌شود. این مراحل بسته به خصوصیات داده و مسئله مورد بررسی ممکن است متفاوت باشند. نتایج مدل‌سازی شامل سطوح شوری بالاتر و همچنین بررسی میزان کوددهی در دو سطح دیگر بررسی روند تغییرات صفات است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

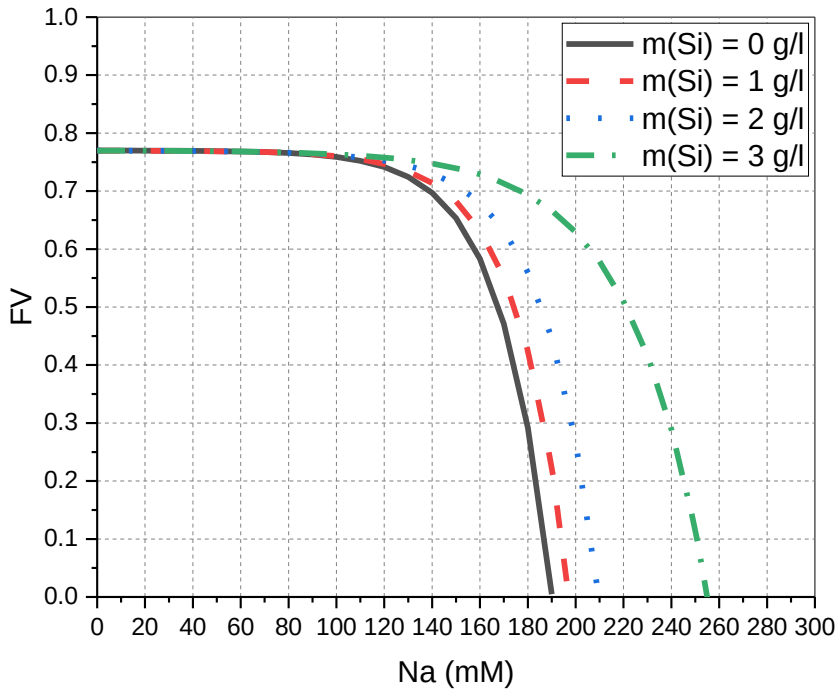
جدول ۱- ویژگی‌های آب و هوایی در طی دوره کشت این پژوهش در شهرستان بهبهان

Table 1- Climate characteristics during the cultivation period of this research in Behbahan city

ماه	حداقل دمای ماهیانه (درجه سانتی‌گراد)	حداکثر دمای ماهیانه (درجه سانتی‌گراد)	مجموع بارش ماهیانه (میلی‌متر)	میانگین دمای ماهیانه (درجه سانتی‌گراد)
آبان ۱۴۰۱	۱۲/۲	۳۸/۱	۷۵/۸	۳۰
آذر ۱۴۰۱	۵/۴	۳۰/۸	۲۷/۹	۲۴/۹
دی ۱۴۰۱	۴/۴	۲۳/۳	۲۰۰/۵	۱۸/۱

نتایج

شکل ۱ به‌کمک نتایج آزمایشگاهی در سطوح شوری ۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی مولار و اثر کوددهی ۰ و ۳ گرم در لیتر و مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی نتایج قبلی، اثر کوددهی سیلیس را در دو سطح ۱ و گرم در لیتر ۲ و همچنین تنش شوری تا سطح ۳۰۰ میلی مولار را بر میزان کلروفیل فلوئورسانس (Fv/Fm) گیاه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از کود سیلیس در شرایط شوری، باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر کاهش میزان کلروفیل فلوئورسانس (Fv/Fm) گردیده است. البته گیاه تا سطح شوری ۱۰۰ گرم در لیتر اثر کوددهی سیلیس را نشان نمی‌دهد و تاثیر آن از سطوح بالاتر از ۱۰۰ تا ۲۵۰ گرم در لیتر نمایان می‌شود.

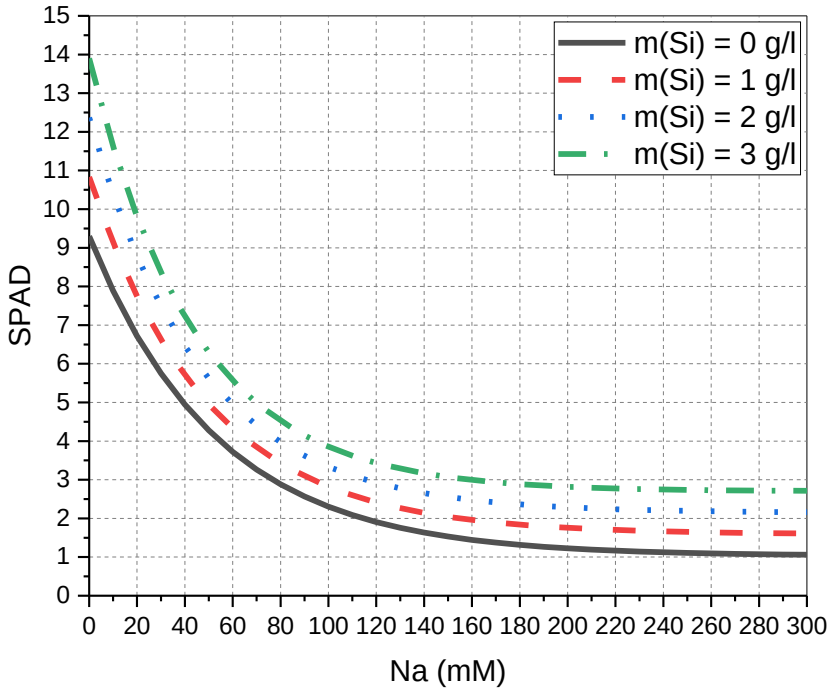


شکل ۱- بررسی اثر سطوح تنش شوری ۰ تا ۳۰۰ میلی مولار در شرایط وجود یا عدم وجود کوددهی سیلیس از ۰ تا ۳ گرم در لیتر بر میزان کلروفیل فلوئورسانس با مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی.

Figure 1- Investigating the effect of salinity stress levels from 0 to 300 mM in the presence or absence of silicon fertilization from 0 to 3 grams per liter on the amount of chlorophyll fluorescence with nonlinear regression modeling.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

در شکل ۲ میزان شاخص سبزینگی (SPAD) در مقادیر مختلف شوری و کوددهی با مدل‌سازی این پژوهش ارائه شده است. مشاهده می‌شود در شوری ۰ تا میلی مولار ۱۰۰، با افزایش کوددهی شیب کاهش میزان شاخص سبزینگی (SPAD) کندتر شده و با افزایش تنش شوری از ۱۰۰ تا میلی مولار ۳۰۰، مقاومت گیاه در برابر شوری برای هر سطح کوددهی به مقداری تقریباً ثابت، میل می‌کند که نشان‌دهنده تأثیرگذاری سیلیس در سطوح بالای شوری است.

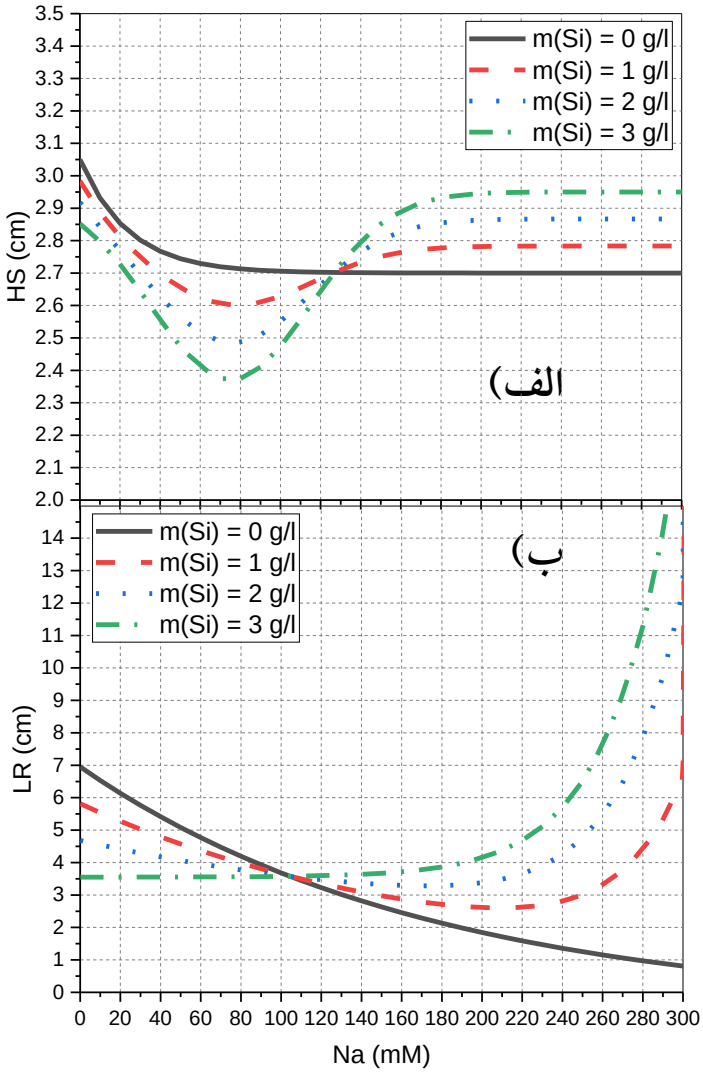


شکل ۲- بررسی میزان شاخص سبزینگی (SPAD) در سطوح تنش شوری ۰ تا میلی مولار ۳۰۰ در شرایط وجود یا عدم وجود کوددهی سیلیس از ۰ تا گرم در لیتر ۳ با مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی.

Figure 2- Investigation of greenness index (SPAD) at salinity stress levels from 0 to 300 mM in the presence or absence of silica fertilization from 0 to 3 grams per liter with nonlinear regression modeling.

در شکل ۳ دو کمیت تغییر ارتفاع ساقه و طول ریشه با اثر شوری و کوددهی مختلف بررسی شده و مقادیر طولی ریشه و ساقه را به سانتیمتر پیش‌بینی می‌کند. با توجه به شکل ۳-الف مشاهده می‌شود ارتفاع ساقه بدون کوددهی در سطوح مختلف شوری از مقدار حدود ۳/۰۵ به ۲/۷ cm کاهش یافته و تقریباً ثابت می‌ماند. اما با کوددهی در سه سطح مختلف، مقدار ارتفاع اولیه ساقه کاهش یافته و در سطح شوری ۷۵ میلی مولار بسیار کاهش یافته ولی در سطوح بالاتر پس از افزایش میزان رشد به مقداری ثابت می‌رسد. همچنین اثر مثبت کوددهی بالاتر در تنش شوری شدید بسیار بیشتر است. در شکل ۳-ب نیز مشاهده می‌شود که با افزایش تنش شوری و شرایط بدون کوددهی طول ریشه به شدت کاهش می‌یابد، اما کوددهی با سیلیس مقاومت گیاه در مقابل شوری را افزایش داده و رشد ریشه افزایش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

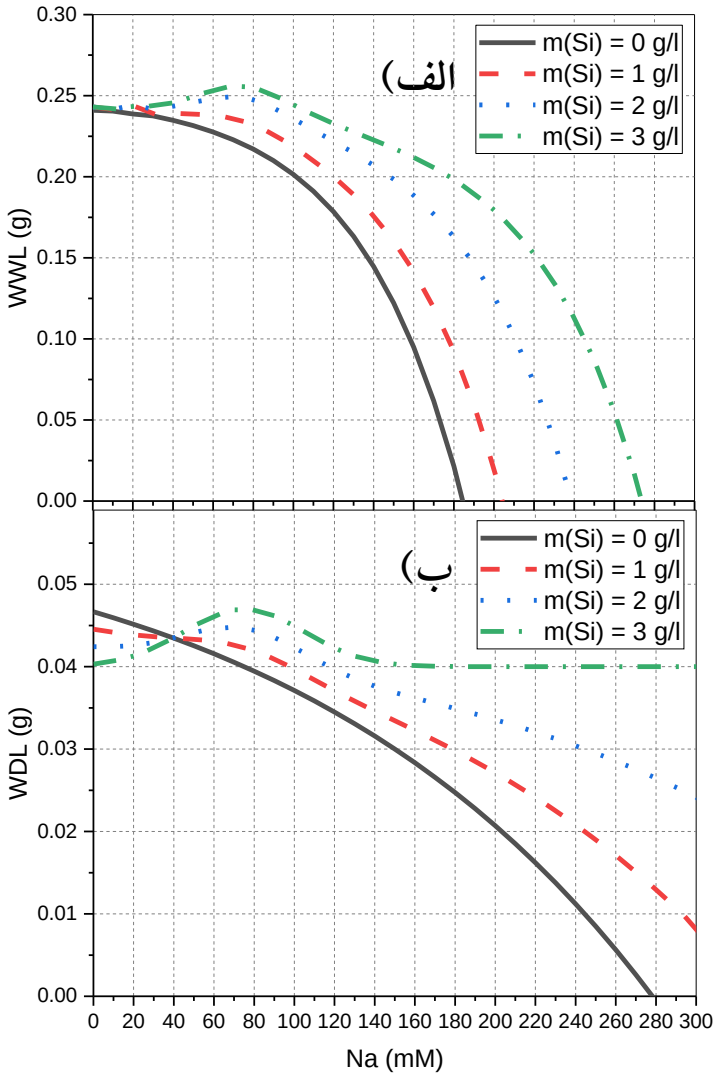


شکل ۳- بررسی اثر شوری و کوددهی سیلیس بر میزان تغییر الف) ارتفاع ساقه و ب) طول ریشه شنبلیله با مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی.

Figure 3- Investigating the effect of salinity and silica fertilization on the mount change of a) stem height and b) root length of fenugreek with nonlinear regression modeling.

به‌منظور بررسی شرایط برگ گیاه، صفات وزن تر و خشک برگ محاسبه شده و در شرایط وجود شوری و کوددهی مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، وزن تر برگ با افزایش تنش شوری کاهش یافته و در شرایط بدون کوددهی، در شوری ۱۸۵ میلی مولار به صفر میل می‌کند اما با افزایش میزان کود سیلیس در تنش شوری، گیاه تا سطوح شوری بالاتری مقاومت کرده و با کاربرد با ۳ گرم در لیتر کود سیلیس تا شوری ۲۷۵ میلی مولار وزن تر برگ در برابر شوری مقاومت می‌کند. با بررسی شکل ۴-ب نیز می‌توان دریافت که سطوح مختلف کاربرد کوددهی سیلیس بر روی وزن اولیه خشک برگ موثر بوده و وزن خشک برگ گیاه در سطوح بالای شوری تقریباً ثابت می‌ماند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

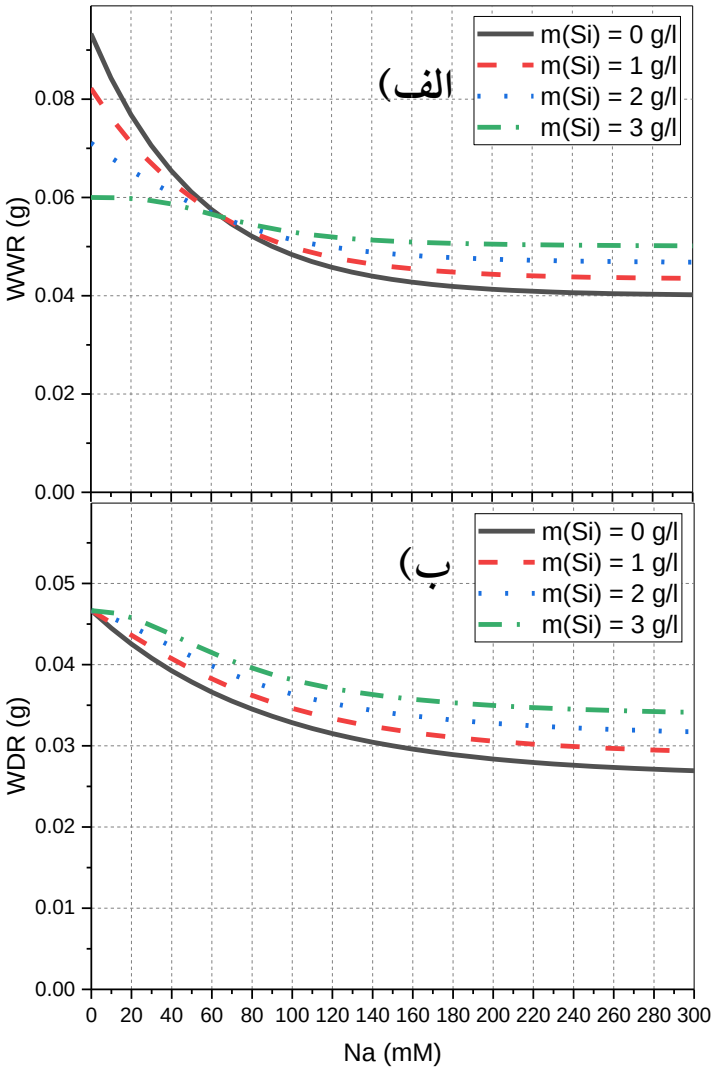


شکل ۴- بررسی اثر شوری و کوددهی سیلیس بر میزان تغییر الف) وزن تر برگ و ب) وزن خشک برگ شنبلیله با مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی.

Figure 4- Investigating the effect of salinity and silica fertilization on the mount change in a) fresh weight of leaves and b) dry weight of fenugreek leaves with nonlinear regression modeling.

شکل ۵ نیز تأثیر کاربرد یا عدم کاربرد کود سیلیس در تنش شوری بر وزن تر و خشک ریشه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در سطوح شوری تا ۱۰۰ میلیمولار وزن تر ریشه مطابق شکل ۵-الف با کاربرد کود سیلیس کاهش یافته که کاهش در کاربرد ۳ گرم در لیتر سیلیس در مقایسه با سطوح دیگر سیلیس شیب ملایمتری داشت. همچنین کاربرد کود سیلیس به‌ویژه سطح ۳ گرم در لیتر در سطوح شوری بالای ۱۰۰ میلی‌مولار، مقاومت گیاه در برابر شوری را بیشتر نمود. در خصوص وزن خشک ریشه نیز روند تغییرات مانند وزن تر ریشه بود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]



شکل ۵- بررسی اثر شوری و کوددهی سیلیس بر میزان تغییر الف) وزن تر ریشه و ب) وزن خشک ریشه شنبلیله با مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی.

Figure 5- Investigating the effect of salinity and silica fertilization on the mount rate of change of a) wet root weight and b) dry weight of fenugreek root with nonlinear regression modeling.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

بحث

در این مطالعه تنش شوری به‌ویژه در سطوح شوری ۱۰۰ به بالا از طریق کاهش صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی مانند وزن تر و خشک ساقه، وزن تر و خشک ریشه، وزن تر و خشک برگ، میزان فلوئورسانس کلروفیل (Fv/Fm) و میزان شاخص سبزینگی (SPAD)، سبب کاهش میزان رشد گیاه شنبلیله گردید. مطالعات سطوح مختلف شوری بر روی صفات رشد شنبلیله نشان داد که تمام دانه‌رست‌ها تا شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر زنده بودند، اما در شوری‌های بالاتر تعداد کمتری از دانه‌رست‌ها زنده ماندند که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت داشت (Zahir and Hussein, 2010). در مطالعه حاضر سطوح تنش شوری بالا (۱۰۰ به بالا) اثرات منفی شدیدی بر روی میزان فلوئورسانس کلروفیل (Fv/Fm) داشت که کاربرد سیلیس تا حدودی باعث کاهش این اثرات شد که با نتایج پژوهشگران دیگر که نشان دادند غلظت بالای سدیم کلرید، باعث کاهش نسبت پتاسیم به سدیم و افزایش پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای پلاسمایی گردیده، به‌علاوه نشت غشایی باعث کمبود پتاسیم و بسته‌شدن روزنه و در نتیجه کاهش فتوسنتز شده و در گیاهانی که مدت طولانی در معرض شوری قرار گرفتند، تحمل شوری معمولاً همراه با کاهش زیست‌توده بود، مطابقت داشت (Lee et al., 2013). مطالعات Chowdhury و همکاران (۲۰۱۴) بر روی گیاه شنبلیله نشان داد که شوری رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار داد، به‌طوری که در مرحله جوانه‌زنی، هنگامی که شوری خاک از ۴ دسی‌زیمنس بر متر بالاتر رفت میزان تلفات دانه-رست‌های شنبلیله به میزان زیادی تحت تأثیر قرار گرفت، اما در مراحل بعدی رشد، شنبلیله توانست شوری‌های بالاتر را تحمل کند. از جمله عناصر سازگار با محیط زیست، سیلیس است که در کاهش اثرات مضر تنش شوری در گیاهان نقش مهمی دارد (Hurtado et al., 2020). در مطالعه حاضر، براساس تیمارهای تنش شوری و سیلیس که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته (سطوح شوری ۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار و سطوح کوددهی سیلیس ۰ و ۳ گرم در لیتر)، مطابق با روش رگرسیون پیش‌بینی گردید که اگر تیمارهای سیلیس ۱ و ۲ گرم در لیتر در تنش‌های شوری تا ۳۰۰ میلی‌مولار بر روی گیاه اعمال شود، می‌تواند اثرات مضر تنش شوری در گیاه شنبلیله را کاهش دهد. پیش‌بینی گردید که در صورت کاربرد کود سیلیس ۱ و ۲ گرم در لیتر در شرایط تنش شوری، میزان فلوئورسانس کلروفیل (Fv/Fm) مانند کاربرد کود سیلیس ۳ گرم در لیتر سبب مقاومت گیاه شنبلیله به تنش شوری اما با مقاومت کمتر می‌گردد. مقدار Fv معمولاً به‌وسیله تنش‌های محیطی مانند تنش شوری که باعث صدمه به تیلاکوئیدها می‌گردند، کاهش می‌یابد (Ananymous, 2005) که در مطالعه حاضر هم همین نتیجه بدست آمد. مطالعات آرویی و همکاران (۱۳۹۳) بر روی گیاه شنبلیله در چهار سطح شوری آب آبیاری (۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌مولار و شاهد) و دو سطح سیلیس (شاهد یا عدم مصرف و کاربرد سیلیکات سدیم با غلظت ۱/۵ میلیمولار) نشان داد که تنش شوری باعث کاهش میزان فلوئورسانس کلروفیل (Fv/Fm) و کاربرد کود سیلیس در شرایط تنش شوری سبب بهبود آن می‌گردد که با نتایج این مطالعه مطابقت داشت.

بر اساس مدل‌سازی رگرسیون غیر خطی پیش‌بینی گردید که تا شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، کوددهی ۲ گرم در لیتر سیلیس نسبت به ۱ گرم در لیتر و ۱گرم در لیتر نسبت به عدم کوددهی، مقاومت گیاه شنبلیله در برابر کاهش میزان شاخص سبزینگی (SPAD) را افزایش می‌دهد و از شوری ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌مولار، اگرچه میزان شاخص سبزینگی (SPAD) در مقایسه با تنش شوری متوسط و عدم تنش شوری کاهش می‌یابد اما به یک روند ثابت با برتری کاربرد کود سیلیس در مقایسه با عدم کاربرد آن می‌رسد که نشان‌دهنده اثرات مثبت کاربرد کود سیلیس در جلوگیری از خسارت تنش شوری می‌باشد. مطالعه فانی (۱۴۰۱) بر روی گیاه ریحان در تنش شوری در دو سطح (۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و محلول‌پاشی سیلیکون در دو سطح (۰ و ۲ گرم در لیتر) نشان داد که تنش شوری در مقایسه با شرایط بدون تنش شوری میزان شاخص سبزینگی (SPAD) را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد و محلول‌پاشی سیلیس تأثیر مثبت بر میزان شاخص سبزینگی (SPAD) در شرایط تنش شوری دارد که با نتایج این مطالعه همخوانی داشت. کائو و همکاران (۲۰۰۶) طی مطالعه‌ای بر روی نوعی چمن

(*Paspalum vaginatum*) نشان دادند که تنش شوری در بیش‌تر موارد باعث کاهش میزان شاخص سبزینگی (SPAD) می‌شود. می‌توان چنین بیان کرد که تنش شوری تأثیر منفی بر جذب مواد غذایی از ریشه گیاه دارد که کاربرد سیلیس تا حدودی این اثرات منفی را کاهش می‌دهد. تأثیر شوری و سیلیس بر روی گیاه کاملینا طی پژوهش فانی و حاجی هاشمی (۱۴۰۲) نشان داد که شوری میزان کلروفیل a، b، کل و قند محلول را کاهش و محلول‌پاشی سیلیس باعث کاهش اثرات مضر شوری بر روی صفات مذکور گردید. که خود نشان‌دهنده نقش سیلیس به عنوان یک ترکیب سازگار با محیط زیست به منظور افزایش مقاومت گیاه کاملینا به تنش شوری بود و با روند مطالعات در این تحقیق همخوانی داشت.

در رابطه با صفت طول ساقه ، مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی پیش‌بینی نمود که در تنش‌شوری ۱۲۰تا ۱۸۰ میلی‌مولار، اثرات مثبت کاربرد کود سیلیس ۲ و ۱ گرم در لیتر مانند کاربرد کود سیلیس ۳ گرم در لیتر در مقایسه با عدم کاربرد آن کاملاً مشهود است و در تنش‌های شوری ۱۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌مولار به روند ثابتی می‌رسد. تنش اسمزی ناشی از تنش شوری و سمیت یونها باعث کاهش طول ساقه گیاه می‌شود. سیلیس تأثیر مثبت بر جذب یون پتاسیم در شرایط تنش شوری داشته از طرفی مانع جذب سدیم در این شرایط می‌شود، نتیجه اینکه کاربرد سیلیس در شرایط شوری، سمیت شوری در گیاه را کاهش می‌دهد و باعث بهبود رشد گیاه در شرایط شوری می‌شود (Liang et al., 2007).

مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی پیش‌بینی نمود که طول ریشه نسبت به کوددهی سیلیس در مقایسه با عدم کوددهی در تش‌های شوری کم نیز واکنش مثبت نشان می‌دهد، اما در تنش‌های شوری ۱۰۰ میلی‌مولار به بالا، اثرات کوددهی سیلیس کاملاً مشهود است و تاثیر کوددهی ۲ گرم در لیتر در مقایسه با ۱ گرم در لیتر بیشتر و ۳ گرم در لیتر از ۲ و ا گرم در لیتر بیشتر است. کاهش رشد گیاه و به تبع آن کاهش رشد و طول ریشه در شوری به دلیل کاهش جذب آب ناشی از کاهش پتانسیل اسمزی خاک و سمیت ناشی از یونهای سدیم و کلر است (Szalay, 2005). در مطالعاتی نشان داده شده که کاربرد سیلیکون در دو گیاه گندم و یونجه سبب افزایش میزان پتاسیم در گیاهان تحت تنش شوری شده که نتیجه آن بهبود رشد این گیاهان بود که با نتایج این مطالعه مطابقت داشت (Tuna et al., 2008: Wang and Han, 2007).

وزن تر و خشک اندام هوایی بر اساس مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی و پیش‌بینی مطابق با سطوح تنش شوری تا ۳۰۰ میلی‌مولار و سطوح کوددهی ۱و ۲ گرم در لیتر (سطوح شوری ۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار و سطوح کوددهی ۰ و ۳ گرم در لیتر در مقاله‌ای قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است و پیش‌بینی سطوح جدید بر اساس سطوح تعریف شده در مقاله قبلی انجام شده است) نشان داد که شوری تأثیر منفی بر وزن تر و خشک اندام هوایی دارد و کاربرد کود سیلیس در مقایسه با عدم کاربرد کود سیلیس، باعث می‌شود که آستانه مقاومت گیاه شنبلیله به شوری تا ۱۶۰ میلی‌مولار افزایش یابد (مقاومت ۳ گرم در لیتر از ۲ و ۱ گرم در لیتر بیشتر است). کاربرد شوری تا دامنه مشخصی به دلیل مکانیسم‌های تحمل به تنش مانند کاهش سطح برگ و افزایش ضخامت برگ از اثرات منفی شوری بر فتوسنتز می‌کاهد. اگر این دامنه تحمل به شوری با کاربرد کود سیلیس همراه باشد به علت اینکه سیلیس باعث استحکام بیشتر برگها شده و پیری برگ را به تأخیر انداخته و میزان کلروفیل و فتوسنتز را افزایش می‌دهد، باعث کاهش بیشتر اثرات منفی شوری بر گیاه می‌شود (Liang et al., 2007).

در پیش‌بینی کوددهی ۲و ۱ گرم در لیتر سیلیس بر مقاومت وزن تر و خشک ریشه گیاه شنبلیله در سطوح شوری مختلف، مشاهده شد که تحمل گیاه به شوری در کاربرد کود سیلیس ۲ گرم در لیتر در مقایسه با ۱ گرم در لیتر و ۱ گرم در لیتر در مقایسه با عدم کوددهی بیشتر بود. شوری باعث می‌شود که جذب آب و به دنبال آن فشار تورژسانس سلول‌ها کاهش یابد. خروج آب از سلول‌ها نیز در این شرایط مانع از رشد آنها می‌شود که در نهایت باعث کاهش رشد ریشه می‌گردد، اما کوددهی سیلیس این اثرات منفی را کاهش می‌دهد. مطابق با نتایج این مطالعه، سیلیکون می‌تواند با تغییر توزیع یون سدیم و تعدادی از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

یونهای غذایی در ریشه، ساقه و برگهای گیاهان، باعث بهبود مقاومت گیاهان به تنش شوری شود (Wang and Han, 2007).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر، صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه شنبلیله متأثر از کاربرد کود سیلیس در شرایط تنش شوری، مقاومت خوبی از خود نشان داد که در رابطه با کشت این گیاه در زمین‌های شور حائز اهمیت است. با استفاده از یادگیری ماشین و مدل‌هایی مثل رگرسیون غیرخطی، می‌توان صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی شنبلیله را در سطوح تنش شوری و کوددهی سیلیس تعریف‌شدهٔ دیگر و بدون انجام آزمایش عملی و صرف هزینه (بر اساس نتایج پژوهش قبلی) اثرات کاربرد سطوح جدید کود سیلیس در سطوح جدید تنش شوری را بر روی صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه مورد نظر مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد.

تقدیر و تشکر

از حمایت مالی و معنوی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان در انجام این پژوهش قدردانی می‌گردد.

REFERENCES

Al-aghabary, K., Zhu, Z. & Shi, Q. 2005. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyl fluorescence, and antioxidative enzym activities in tomato plants under salt stress. Journal of Plant Nutrition, 27: 2101-2115. DOI: 10.1081/PLN-200034641

Agrawal, S.C. 2021. Deep learning based non-linear regression for Stock Prediction, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1116: 012189. DOI: 10.1088/1757-899X/1116/1/012189

Amuthaselvi, G. & Ambrose, D.C.P. 2016. Fenugreek. CABI Press. India.

Arouiee, H., Nasseri, M., Neamati, H., & Kafi, M. 2014. Effects of Silicon on Salinity tolerance in fenugreek (Trigonella foenum- graecum L.). Applied Field Crops Research, 27(104), 165-172. DOI: 10.22092/aj.2014.101835 (In Persian)

Banakar, M.H., Ranjbar, G.H., & Soltani, V. 2012. Physiological response of some forage halophytes under saline conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences, 5(1), 55-65. DOI: 10.22077/escs.2012.114 (In Persian)

Chowdhury, M.M.U., Bhowal, S.K., Farhad, I.S.M., Choudhury, A.K. & Khan, A.S. 2014 Productivity of fenugreek varieties Trigonella foenum-graecum L. in the coastal saline areas of noakhali. The Agriculturists, 12: 18-23. DOI: 10.3329/agric.v12i2.21726

Chen, W., Yao, X., Cai, K. & Chen, J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research, 142, 67-76. DOI: 10.1007/s12011-010-8742-x

Deshmukh, R.K., Vivancos, J., Guerin, V., Sonah, H., Labbe, C., Belzile, F. & Belanger, R. R. 2013. Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in Arabidopsis and rice. Plant Molecular Biology, 83, 303-315. DOI: 10.1007/s11103-013-0087-3

Debona, D., Rodrigues, F.A. & Datnoff, L.E. 2017. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. Annual Review of Phytopathology, 55, 85-107. DOI: 10.1146/annurev-phyto-080516-035312

Fani E. 2022. Physiological and biochemical responses of basil (Ocimum basilicum) to silicon spraying under salinity stress. Journal of Crop Production, 15(3), 123-136. DOI: 10.22069/ejcp.2022.19571.2459 (In Persian)

Fani E. 2023. The effects of feeding by silica fertilizer on the reduction of stress caused by salinity in fenugreek plants, Journal of Soil Management and Sustainable Production, in press. (In Persian)

Fani, E. & Hajihashemi, S. 2023. Investigation of the effect of silica spraying and salinity stress on some physiological traits of Camelina sativa oil plant. Journal of Plant Environmental Physiology, 69 (1): 149- 159. DOI: 10.30495/iper.2022.1954207.1780. (In Persian)

Gupta, D.K., Prasad, R., Kumar, P., Mishra, V.N., Dikshit, P.K.S., Dwivedi, S.B. & Srivastava, P.K. 2015. Crop variables estimation by adaptive neuro-fuzzy inference system using bistatic scatterometer data. In Microwave and Photonics ICMAP. International Conference on

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

Microwave and Photonics ICMAP, pp. 1-2, DOI: 10.1109/ICMAP.2015.7408756.

Hajihashemi S., Jahantigh O. & Fani E. 2023. The effect of silicon treatment on improving the physiological response of radish (Raphanus sativus L.) to salinity stress. Plant Process and Function 11 (47): 2 .DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.3.2 (In Persian)

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

Haghighi, M. & Masoumi, Z. 2021. Effect of caffeic acid on growth and reducing the destructive effects of salinity on greenhouse cucumber Cucumis sativus var. Super daminos. Journal of Vegetables Sciences, 48, 35-51. DOI: 10.22034/iuvs.2021.131965.1114

Hosseini, M., Agereh, S.R, Khaledian, Y., Zoghalchali, H.J., Brevik, E.C. & Naeini, S.A. 2017. Comparison of multiple statistical techniques to predict soil phosphorus. Applied Soil Ecology, 114, 123-131. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.02.011

Hurtado, A.C, Chiconato, D.A., Prado, R. de M., Sousa Junior, G. da S., Gratao, P.L., Felisberto, G. & Mathias dos Santos, D.M. 2020. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. Ecotoxicology and Environmental Safety, 203, 110964-110975. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110964

Kao, W.Y., Tsai, T.T., Tsai, H.C. & Shi, C.N. 2006. Response of three Glycine species to salt stress. Environmental and Experimental Botany, 56, 120-125. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2005.01.009

Lee, M. H., Cho, E.J., Wi, S.G., Bae, H., Kim, J.E., Cho, J.Y., Lee, S., Kim, J.H. & Chung, B.Y. 2013. Divergences in morphological changes and antioxidant responses in salt-tolerant and salt-sensitive rice seedlings after salt stress. Plant Physiology and Biochemistry, 70, 325-335. DOI: 10.1016/j.plaphy.2013.05.047

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., & Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon mediated alleviation of a biotic stresses in higher plants: a review. Environmental Pollution, 147, 422–428. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.06.008

Liu, B., Soundararajan, P. & Manivannan, A. 2019. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. Plants, 8, 307. DOI: 10.3390/plants8090307

Luyckx, M., Hausman, J.F., Lutts, S. & Guerriero, G. 2017a. Impact of silicon in plant biomass production: Focus on bast fibres, hypotheses, and perspectives. Plants Basel, 6, 37. DOI: 10.3390%2Fplants6030037

Luyckx, M., Hausman, J.F., Lutts, S. & Guerriero, G. 2017b. Silicon and Plants: Current Knowledge and Technological Perspectives. Frontiers in Plant Science, 8, 411. DOI: 10.3389/fpls.2017.00411

Ma, J.F. & Takahashi, E. 2002. Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in. Elsevier Science, Amsterdam.

Payamani, R., Nosratti, I. & Amerian, M. 2021. Effect of different levels of salinity, nitrogen and Torilis arvensis competition on growth characteristics and leaf yield of Coriander Coriandrum sativum. Journal of Vegetables Sciences, 51, 51- 62. DOI: 10.22034/iuvs.2021.526940.1153

Rico-Chávez, A.K., Franco, J.A., Fernandez-Jaramillo, A.A., Contreras-Medina, L.M., Ramón Gerardo Guevara-González, R.G. & Hernandez-Escobedo, Q. 2022. Machine Learning for Plant Stress Modeling: A Perspective towards Hormesis Management. Plants, 117, 970. DOI: 10.3390%2Fplants11070970

Szalay, L., Hegedus, A. & Stefanovitis-Banyai, E. 2005. Presumable protective role of peroxidase and polyphenol oxidase enzymes against freezing stress in peach Prunus persica L. Batsch. Acta Biologica Szegediensis, 491– 2, 121-122.

Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D.E.B., Murillo–Amador, B., Aydemir, S. & Girgin, A.R. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environmental and Experimental Botany, 621, 10-16. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2007.06.006

Wang, X.S. & Han, J.G. 2007. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. Soil Science and Plant Nutrition, 53, 278-285. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2007.00135.x

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

Zargari A. 1371. Medicinal Plants. Volume 1, Tehran University Press, Tehran (In Persian)

Zuccarini, P. 2008. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of Phaseolus vulgaris under NaCl stress. Biologia Plantarum, 52, 157-160. DOI: 10.1007/s10535-008-0034-3

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]
[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]

*****

How to cite this article:

Fani, E., & Mokari, M. 2024. Using machine learning to model different levels of salinity stress and silica fertilization of fenugreek (Trigonella foenum-graecum L.). Nova Biologica Reperta 11(2): 57-70. (In Persian).

فانی، ا. و مکاری، م. ۱۴۰۳. استفاده از یادگیری ماشین برای مدل‌سازی سطوح مختلف تنش شوری و کوددهی سیلیس گیاه شنبلیله (Trigonella foenum-graecumL.). یافته‌های نوین در علوم زیستی ۱۱(۲): ۷۰-۵۷.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1403.11.2.5.7]

[DOI: 10.22034/nbr.11.2.57]