University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9253.2362

Original article

Evaluation of salt stress tolerance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) forage lines under field conditions

Masoumeh Salehi[1], Farhad Dehghani[1]*, Hossien Beyrami[1], Mahdi Khosrowshiri[2]

1. National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
2. Master Student, Department of Agrothnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashahd, Iran

Received 20 April 2025; Revised 25 May 2025; Accepted 31 May 2025

Extended abstract

Introduction

The increasing demand for high-quality forage, particularly in salt-affected regions facing water scarcity due to climate change, poses a significant challenge to sustainable agricultural production. Quinoa is well known for its tolerance to adverse environmental conditions, particularly drought and salinity. As a dual-purpose crop, quinoa is a promising candidate for forage production under such conditions. The primary objective of this study was to identify high-yielding quinoa forage lines and evaluate the salinity tolerance of 16 quinoa forage lines.

Materials and methods

Materials and methods

This study was conducted at the Sadouq Salinity Research Farm, Yazd, Iran, during the 2023–2024 growing season. The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications using a split-plot arrangement. Fifteen superior quinoa forage lines (NSRCQF1–NSRCQF15) with Termeh cultivar, were assigned to the subplots. The main plots consisted of four irrigation water salinity treatments: a non-saline control and three salinity levels with electrical conductivity (EC) values of 5, 10, and 15 dS m^{-1}. Forage was harvested from a 1-m^2 area in each plot. Agronomic traits, including fresh forage yield, dry forage yield, dry matter percentage, stem diameter, and plant height, were then measured.

Results and discussion

The results showed that the effects of salinity and line on most of the measured traits were significant at the 1% and 5% probability levels, whereas the salinity × line interaction was not significant. Mean comparison analysis revealed significant reductions in plant height, stem diameter, dry matter percentage, and dry forage yield as salinity increased. Fresh forage yield increased as salinity increased up to 10 dS m^{-1} but decreased at higher salinity levels. Significant differences were observed among quinoa forage lines in plant height, dry matter percentage, and forage yield. Among the evaluated lines, NSRCQF15 produced the highest fresh and dry forage yields, reaching 68.8 and 15.56 t ha^{-1}, respectively. The salinity tolerance threshold (CT) of the evaluated lines ranged from 5 to 18 dS m^{-1}, and the yield reduction slope (b) was less than 1% for all lines. The evaluated quinoa forage lines maintained approximately 80% of their forage yield at salinity levels ranging from 9 to 23 dS m^{-1}. Based on the evaluated indices, the NSRCQF3, NSRCQF4, and NSRCQF6 lines exhibited high stress tolerance index (STI) values, high electrical conductivity at 50% yield reduction (EC50) values, and low yield reduction slopes, indicating superior salinity tolerance. These lines can therefore be considered salinity-tolerant

* Corresponding author: Farhad Dehghani; E-Mail: dehghany47@gmail.com

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

lines. In contrast, the NSRCQF7, NSRCQF9, and NSRCQF12 lines were more sensitive to salinity because of their lower EC50 values, higher yield reduction slopes, and lower CT values. Based on average dry matter yield and the stress tolerance index (STI), the NSRCQF3, NSRCQF8, NSRCQF10, NSRCQF13, and NSRCQF14 lines exhibited higher forage yield and greater stress tolerance than the overall mean of the evaluated lines. These lines maintained favorable forage production under high salinity conditions. Conversely, the NSRCQF7, NSRCQF9, and NSRCQF12 lines were more sensitive to salinity and exhibited a significant reduction in forage yield under high salinity conditions.

Conclusion

The results of this study demonstrated that salinity stress significantly affected the growth and forage yield of quinoa by affecting morphological traits. The significant variation among the evaluated lines indicated that certain quinoa lines possessed greater salinity tolerance, suggesting that the selection of salt-tolerant lines could effectively improve forage production under saline conditions. Furthermore, quinoa has considerable potential as a new forage crop for saline environments.

Keywords: Salt tolerance threshold, Salinity of 50 percent yield reduction (EC50), Yield reduction slope

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9253.2362

مقاله پژوهشی

بررسی تحمل به تنش شوری لاین‌های علوفه‌ای کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) در شرایط مزرعه

معصومه صالحی[1]، فرهاد دهقانی[1*]، حسین بیرامی[1]، مهدی خسروشیری[2]

۱. مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، یزد
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
آستانه تحمل به تنش
شوری ۵۰ درصد کاهش عملکرد
شیب‌خط کاهش عملکرد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

چکیده

تقاضا برای تولید علوفه حجیم و باکیفیت، به‌ویژه در مناطق تحت‌تأثیر شوری و کم‌آبی، به دلیل تغییرات اقلیمی، یکی از چالش‌های اصلی بخش کشاورزی کشور است. پژوهشی در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقات شوری صدوق یزد به‌منظور ارزیابی تحمل به شوری لاین‌های علوفه‌ای کینوا اجرا شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تعداد ۱۵ لاین برتر کینوا علوفه‌ای و رقم ترمه در کرت‌های فرعی با سه سطح شوری آب آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به همراه شاهد غیر شور در کرت‌های اصلی قرار داده شدند. صفات زراعی شامل وزن تر و وزن خشک بوته، درصد ماده خشک، قطر ساقه و ارتفاع گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اثر شوری و لاین بر بیشتر صفات مورد بررسی در سطوح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود، اما اثر متقابل شوری و لاین از نظر آماری معنی‌دار نبود. همچنین، با افزایش سطح شوری، کاهش قابل توجهی در ارتفاع بوته، قطر ساقه، درصد ماده خشک و عملکرد علوفه خشک مشاهده شد. عملکرد علوفه تر با افزایش شوری تا ۱۰ دسی زیمنس برمتر افزایش و در شوری‌های بیشتر کاهش پیدا کرد. همچنین تفاوت معنی‌داری بین لاین‌های مختلف کینوا از نظر ارتفاع، درصد ماده خشک و عملکرد علوفه مشاهده شد. در بین ۱۶ لاین مورد بررسی، لاین NSRCQF15 با تولید ۶۸/۸ تن علوفه تر و ۱۵/۵۶ تن علوفه خشک برتری معنی‌داری در شرایط یزد نشان داد. لاین‌های NSRCQF3، NSRCQF4 و NSRCQF6 نیز به‌عنوان لاین‌های متحمل به شوری شناسایی شدند که دارای شاخص تحمل به شوری (STI) بالا، ۵۰ درصد کاهش عملکرد در شوری بالاتر (EC_{50}) و شیب کاهش عملکرد پایین‌تر بودند. لاین‌های NSRCQ3، NSRCQ8، NSRCQ10، NSRCQ13 و NSRCQ14 عملکرد علوفه خشک و شاخص تحمل به تنش شوری بالاتری از متوسط لاین‌ها داشتند.

مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.)، گونه‌ای یکساله از خانواده Amaranthaceae است که منشأ آن منطقه آند در آمریکای جنوبی است (Bazile et al., 2016). این گیاه در برابر تنش‌های مختلف مانند شوری، خشکی و شرایط یخبندان تحمل بالایی دارد (González et al., 2009). برخی از گونه‌های آن قادر به رشد در شرایط بسیار شور مشابه آب دریا با شوری ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر هستند (Adolf et al., 2010). در بیشتر موارد، استفاده اصلی از کینوا به دلیل ارزش تغذیه‌ای بالای دانه آن است اما می‌توان از شاخ و برگ آن به عنوان علوفه نیز استفاده نمود. در برخی مناطق توسعه‌یافته، علوفه تازه کینوا به دلیل ارزش غذایی بالا به عنوان مکمل در جیره غذایی دام‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bazile et al., 2015). علوفه کینوا دارای سطوح بالای پروتئین و مقدار پایین الیاف نامحلول است و می‌تواند به‌عنوان یک منبع مقرون به‌صرفه در خوراک دام نشخوارکننده و غیرنشخوارکننده مورد استفاده قرار گیرد (Shah et al., 2020).

* نگارنده پاسخگو: فرهاد دهقانی. پست الکترونیک: dehghany47@gmail.com

کینوا گیاهی است با کاربردهای متنوع که دانه آن قابلیت استفاده در جیره طیور را نیز دارد و همچنین بقایا و علوفه سبز یا سیلویی آن کیفیت مناسبی برای تعلیف دام دارد و هم اکنون در کشورهای آند به عنوان علوفه استفاده می‌شود (Bazile et al., 2015). مطالعه‌ای در چین نشان داده است که NDF[1]، ADF[2] و میزان پروتئین کینوا در مرحله گلدهی و پرشدن دانه بیشتر از یولاف و یونجه است و می‌تواند علوفه با کیفیت مناسبی تولید کند. ژنوتیپ‌هایی که دارای ساقه محکم، شاخه‌های فرعی بیشتر، ارتفاع متوسط و عملکرد بیوماس بالاتری باشند برای این منظور مناسب‌تر هستند (Shah et al., 2020)؛ بر همین اساس کینوا به عنوان یک گیاه دومنظوره مورد توجه قرار گرفته است. در فلسطین اشغالی میزان علوفه تولید شده در کشت زودکاشت بهاره ۱۲-۱۱ تن در هکتار و در کشت پاییزه ۸-۵ تن در هکتار ماده خشک بود (Asher et al., 2020). شاه و همکاران (Shah et al., 2020) بیان کردند که بین کیفیت و کمیت عملکرد رابطه منفی وجود ندارد. بنابراین گزینش برای بهبود عملکرد کیفیت علوفه تولیدی را کاهش نخواهد داد.

بخش عمده مساحت کشور ما، در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و نیمی از اراضی فاریاب آن شور و یا در معرض شوری خاک هستند (Kafi et al., 2010). بر اساس تخمین موسسه تحقیقات و آب کشور، حدود ۴۴/۵ درصد از اراضی کشاورزی ایران تحت تاثیر درجات مختلفی از شوری قرار دارند (Saadat et al., 2023). در حال حاضر گیاهانی که از نظر علوفه‌ای مورد توجه بوده و کشت آن‌ها در بسیاری از مناطق کشور معمول شده عمدتاً گیاهانی هستند که از پتانسیل کمّی و کیفی علوفه‌ای مطلوبی برخوردار هستند، ولی درجه تحمل پایینی نسبت به شوری دارند. با توجه به نتایج و تبعات تغییرات اقلیم، یکی از استراتژی‌ها برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، معرفی محصولات جدید و تنوع بخشیدن به سیستم های کشت است (IPCC, 2019).

کینوا تنوع ژنتیکی زیادی دارد و موجب شده است سازگاری وسیعی به شرایط اقلیمی مختلف داشته باشد (Navruz-Varli and Sanlier, 2016). یافته‌های کوی و همکاران (Cui et al., 2024) نشان می‌دهد که تفاوت قابل توجهی در تمامی صفات اندازه‌گیری شده، از جمله صفات زراعی و کیفیت تغذیه‌ای، در ژنوتیپ‌های مختلف آن وجود دارد. نتایج حاصل از پژوهش یلماز و همکاران (Yilmaz et al., 2021) بیانگر تفاوت‌های قابل توجهی در ارتفاع گیاه، قطر ساقه و عملکرد علوفه خشک ارقام مختلف کینوا است. جکوبسن و همکاران (Jacobsen et al., 1999) تفاوت‌های قابل توجهی را با توجه به شاخص برداشت و عملکرد بین دو رقم کینوا در شرایط شور گزارش کردند. گومز-پاندو و همکاران (Gómez-Pando et al., 2010) تفاوت‌هایی را در مورد تعدادی از صفات مانند وزن خشک ریشه، وزن خشک برگ، ارتفاع گیاه و عملکرد دانه در منتخبی از ژنوتیپ‌های پرو در شرایط شوری یافتند. همچنین گزارش شده است که پاسخ ارقام مختلف کینوا به خاک‌های شور متفاوت بود (Keskin and Temel, 2023).

بخش عمده مطالعات مرتبط با کینوا بر عملکرد دانه آن در سطوح مختلف شوری متمرکز بوده و پژوهش‌های محدودی در زمینه عملکرد علوفه و تنوع گونه‌ای این گیاه در شرایط شور انجام شده است و به همین علت شناسایی و توسعه ارقام بهینه و سازگار برای کاشت اهمیت بالایی دارد. این پژوهش با هدف دستیابی به برترین لاین‌های کینوا جهت تولید عملکرد علوفه در سطوح مختلف شوری و بررسی تحمل به تنش شوری لاین‌ها انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزرعه تحقیقات شوری صدوق یزد در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد. قبل از کاشت از خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌گیری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد (جدول ۱).

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تعداد ۱۵ لاین برتر کینوا حاصل از آزمایش‌های ارزیابی کینوای علوفه‌ای (Salehi, 2025) و رقم ترمه (جدول ۲)، در کرت‌های فرعی و سه سطح شوری آب آبیاری ۵، ۱۰و ۱۵ دسی زیمنس بر متر به همراه شاهد غیر شور (۲ دسی‌زیمنس بر متر) در کرت‌های اصلی قرار داده شدند. آماده‌سازی زمین در بهمن ماه سال ۱۴۰۲ (شامل شخم اولیه، دو مرحله دیسک، تسطیح زمین) انجام شد. هر لاین در ۴ خط ۴ متری با فاصله خطوط کشت ۳۰ سانتی متر و یک خط نکاشت بین لاین‌ها و با تراکم

[1]. Neutral Detergent Fiber

[2]. Acid Detergent Fibre

نسخه پیش از انتشار

۱۲۰ هزار بوته در هکتار در بهمن‌ماه (۲۵-۲۰) سال ۱۴۰۲ کشت شد. در طول فصل رشد کلیه مراقبت‌های زراعی شامل آبیاری، تغذیه و مبارزه با علف‌های هرز انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز بصورت دستی انجام شد و آفت در طول فصل رشد مشاهده نشد.

جدول ۱. ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Physico-chemical characteristics of soil in the experimental site

	شوری آب آبیاری	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity	نسبت جذب سدیم SAR	اسیدیته pH	فسفر P	پتاس K
			dS m^{-1}		---- ppm ----	
قبل از کاشت Before sowing		14.16	19.1	7.6	17.6	117.9
میانگین در طول فصل Mean during the season	2	4.5	9.77			
	5	6.16	12.58			
	10	12.13	18.19			
	15	19.53	25.96			

جدول ۱. ادامه

Table 1. Continued

	نیتروژن کل N	کربن آلی C	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil texture	مواد آلی O.M
	---------- % ----------						%
قبل از کاشت Before sowing	0.03	0.32	61.4	19.6	19	Sandy Loam	0.56

جدول ۲. فهرست ۱۵ لاین برتر علوفه ای کینوا و رقم ترمه (Salehi, 2025)

Table 2. List of the 15 top forage quinoa lines and a dual-purpose red-deeded line (Salehi, 2025)

	Line لاین		Line لاین
1	NSRCQF1	9	NSRCQF9
2	NSRCQF2	10	NSRCQF10
3	NSRCQF3	11	NSRCQF11
4	NSRCQF4	12	NSRCQF12
5	NSRCQF5	13	NSRCQF13
6	NSRCQF6	14	NSRCQF14
7	NSRCQF7	15	NSRCQF15
8	NSRCQF8	16	Termeh

بعد از کاشت در تاریخ ۲۵ بهمن تیمارهای آبیاری به‌صورت یکسان و هم‌زمان در سه سطح شوری آب آبیاری ۵، ۱۰و ۱۵ دسی زیمنس بر متر به همراه شاهد غیر شور (۲ دسی زیمنس بر متر) در تمام مراحل رشد اعمال شد به صورتی که به‌منظور کنترل شوری خاک، در هر نوبت آبیاری ۲۵ درصد آبشویی به‌منظور جلوگیری از تجمع نمک در نظر گرفته شد. به‌منظور کنترل شوری خاک در تیمارهای مختلف کیفیت آبیاری، چند نوبت نمونه‌برداری از خاک صورت گرفت که میانگین آن در طول فصل در جدول ۱ گزارش شده است. ایستگاه تحقیقات شوری صدوق دارای دو منبع آب است که هر منبع آب دارای یک استخر بوده که قابلیت اختلاط آب شیرین و شور را فراهم می‌کند. آب پس از اختلاط با شوری مشخص وارد تانکرها شده و آبیاری با سیستم تیپ بر اساس حجم تعیین شده انجام شد. جدول ۳ نتایج تجزیه آب مصرفی را نشان می‌دهد. میزان آب مصرفی در طول فصل ۴۳۹۰ متر مکعب در هکتار بود که ۳۵۱۲ متر مکعب نیاز خالص آبیاری و بقیه نیاز آبشویی بوده است. ضریب گیاهی در نظر گرفته شده در سه مرحله ابتدایی، میانی و پایانی رشد کینوا به ترتیب ۰/۵۹، ۱/۲ و ۰/۶۲ بود. طول هر مرحله به ترتیب ۲۱، ۶۸ و ۱۹ روز بوده است. تغییرات دمای هوا در طول فصل در شکل ۱ نشان داده شده است. دمای حداقل در ابتدای فصل رشد (۲۰ روز بعد از کاشت) تا ۸- درجه سلسیوس و میانگین دما در این بازه ۳/۹ درجه سلسیوس و حداکثر دما در زمان برداشت ۳۶ درجه سلسیوس بود.

عملیات تغذیه در طول فصل رشد و بر اساس نتایج تجزیه خاک صورت گرفت (جدول ۱). با توجه به میزان مواد آلی کم خاک و رشد رویشی مورد انتظار در لاین‌های علوفه‌ای، ۲۵۰ کیلو گرم اوره در هکتار در ۳ مرحله توصیه شد. بالا بودن فسفر قابل دسترس خاک و کمی نیاز کینوا به فسفر باعث شد تا کود فسفره در این آزمایش مصرف نشود. ۱۰۰ کیلوگرم در

نسخه پیش از انتشار

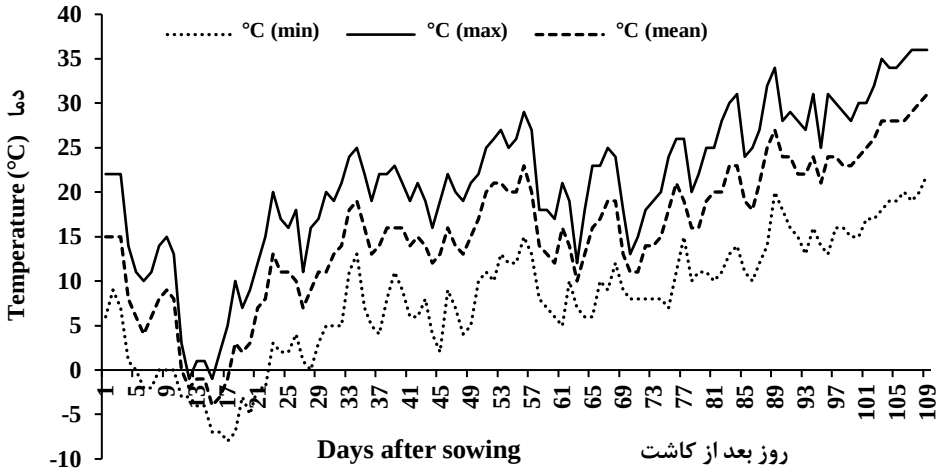
هکتار کود سولفات پتاسیم در ابتدای فصل رشد برای رفع نیاز گیاه مصرف شد.

برداشت علوفه بعد از حذف حاشیه از هر کرت در سطح یک مترمربع انجام گرفت. برداشت در خردادماه ۱۴۰۳ (۱۲ خرداد) در مرحله گلدهی به‌صورت دستی از پنج سانتی‌متری بالای یقه گیاه انجام شد و صفات زراعی شامل ارتفاع بوته، درصد ماده خشک، عملکرد علوفه تر و عملکرد علوفه خشک اندازه‌گیری شد. ارتفاع بوته در مزرعه میانگین کرت اندازه‌گیری شد. جهت محاسبه درصد ماده خشک یک نمونه تر از هر کرت گرفته شد و بعد از خشک کردن در دمای ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت وزن خشک توزین شد و درصد ماده خشک تعیین شد.

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب مزرعه آزمایشی

Table 3. Physico- chemical characteristics of water in the experimental site

هدایت الکتریکی Electrical Conductivity	اسیدیته pH	کلسیم Ca	منیزیم Mg	کربنات CO_3^{-2}	بیکربنات HCO_3^-	سدیم Na	کلر Cl^-	نسبت جذب سدیم SAR
dS m^{-1}	---------- meq l^{-1} ----------							
2	7.39	3.49	3.69	0	3.32	10	11.7	5.3
5	7.98	5.3	9.7	0	2.5	37	45	13.5
10	7.81	8.7	17.1	0	3.1	71.6	94.7	19.9
15	7.81	14.5	27.3	0	3.3	107	104.4	23.4



شکل ۱. دمای حداقل، حداکثر و میانگین در طول فصل رشد (درجه سلسیوس)

Fig. 1. Minimum, maximum and mean temperatures during the growing season (°C)

برای بررسی واکنش لاین‌های کینوا به عصاره اشباع شوری خاک با استفاده از معادلات، ابتدا عملکرد نسبی (Y_r) با معادله شماره ۱ محاسبه شد که در آن عملکرد در شرایط شور (Y) بر عملکرد در شرایط غیر شور (Y_m) تقسیم می‌شود (Maas and Hoffman, 1977; Maas, 1990):

$$Y_r = Y/Y_m \qquad [۱]$$

Y_r به‌عنوان تابع عامل کاهش اصلاح‌شده را با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد که در آن C هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک بر حسب dS m^{-1}، C_{50} سطحی از شوری که عملکرد به میزان ۵۰ درصد از عملکرد در شرایط غیر شور کاهش می‌یابد (EC_{50}) و s پارامتر شیب است (Steppuhn et al., 2005). به‌منظور محاسبه شیب‌خط و آستانه تحمل به تنش شوری از معادله دوتکه‌ای استفاده شد (معادله ۴). در آن ECe هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک برحسب دسی‌زیمنس بر متر، a_0 آستانه (CT) برحسب دسی‌زیمنس بر متر و l شیب کاهش (Slop) است (Maas and Hoffman, 1977; Maas, 1990).

$$Yr = \frac{1}{1+\left(\frac{C}{C50}\right)^{\exp(sC50)}} \qquad [۲]$$

$$STI=C_{50}+_{sC50} \quad [۳]$$

$$Yr = 100 - (l(ECe-a_0)) \quad [۴]$$

جهت محاسبه توارث‌پذیری H^2، واریانس ژنتیکی δ_g^2 و محیطی δ_e^2 با استفاده از جدول تجزیه واریانس تعیین شد [۵].

$$H^2=\frac{\delta_g^2}{\delta_g^2+\delta_e^2}\times 100 \quad [۵]$$

در معادله ۵، H^2 میزان توارث‌پذیری، δ_g^2 واریانس ژنتیکی، δ_e^2 واریانس محیطی هستند که از روابط ۵ و ۶ محاسبه شدند.

$$\delta_g^2=\frac{MSB - MSEb}{a\times block}\times 100 \quad [۶]$$

$$\delta_e^2=\frac{MSAB + MSEb}{a\times block}\times 100 \quad [۷]$$

در معادله ۶، MSB میانگین مربعات لاین، $MSEb$ میانگین مربعات خطای دوم (b)، a تعداد سطوح تیمار تنش شوری، $block$ تعداد تکرار و در معادله ۷، $MSAB$ اثر متقابل میانگین مربعات لاین در شوری بود. شاخص تحمل به تنش شوری (STI) نیز با معادله ۳ محاسبه شد (Steppuhn et al., 2005). ضرایب معادلات با استفاده از نرم افزار SigmaPlot v15 برآورد شد. مقایسه میانگین به روش LSD با استفاده از برنامه SAS v9.1 انجام شد.

نتایج و بحث

مدیریت آبیاری طرح با عنایت به بافت نسبتاً سبک خاک و سیستم آبیاری تیپ، به صورتی بود که میانگین شوری خاک در طول فصل رشد در تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری ارتباط یکنواختی داشته که نشان‌دهنده اعمال مقادیر نسبتاً یکنواخت نیاز آبشویی است. نتایج تجزیه واریانس ارائه شده نشان داد که اثر شوری و لاین در سطح احتمال یک درصد بر ارتفاع گیاه، درصد ماده خشک، عملکرد علوفه تر و خشک معنی‌دار بود، ولی برهم‌کنش شوری و لاین بر صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود (جدول ۴جدول ۴).

جدول ۴. منابع تغییرات، درجه آزادی و میانگین مربعات صفات زراعی کینوا علوفه‌ای

Table 4. Sources of variation, degrees of freedom, and mean squares of forage quinoa agronomic traits

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant Height	ماده خشک Dry Matter	قطر ساقه Stem Diameter	عملکرد علوفه تر Fresh Forage Yield	عملکرد علوفه خشک dry Forage Yield
Replication	**تکرار**	2	659.91	75.20	0.38	14.27	21.88
Salinity	**شوری**	3	14708..01**	358.15**	20.54**	1168.81*	184.05**
Error a	**خطای (a)**	6	1050.55	24.12	0.49	260.82	5.60
Line	**لاین**	15	318.12**	12.26**	0.91^{ns}	403.86**	25.10*
Salinity×line	**شوری × لاین**	45	117.97^{ns}	6.07^{ns}	0.81^{ns}	88.75^{ns}	5.44^{ns}
Error b (b)	**خطای (b)**	120	145.33	5.85	0.74	107.07	5.71
CV(%)	**ضریب تغییرات**	-	*12.04*	*10.85*	*13.60*	*17.94*	*18.63*

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح یک درصد، ۵ درصد و غیر معنی‌دار

**,* and ^{ns} significant at 1, 5% , non significant, respectively.

ارتفاع بوته

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین ارتفاع در تیمار با شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر با مقدار ۱۱۷ سانتی‌متر مشاهده شد. تیمارهای با شوری ۵ ، ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، به‌ترتیب با میانگین ارتفاع ۱۰۹، ۹۴/۶ و ۷۰ سانتی‌متر در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. تحلیل آماری نشان داد که تفاوت میانگین ارتفاع در تمامی تیمارها معنی‌دار بود (جدول ۵).

از نظر تأثیر لاین‌ها، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که لاین ده با میانگین ارتفاع ۱۰۸ سانتی‌متر بیشترین میزان ارتفاع را داشت ولاین ۵ کمترین میزان ارتفاع (۸۸/۵ سانتی‌متر) را داشت که در کلاس آماری متفاوتی قرار داشتند (جدول ۶). گزارش شده است که در شرایط تنش شوری ارتفاع ارقام کینوا کاهش می‌یابد که این کاهش در بین ارقام مختلف متفاوت بود (Kaboodkhani et al., 2024). مطالعه حسین و همکاران (Hussain et al., 2020) نشان داد که با افزایش شوری (در شرایط غیرشور، ۱۰ و ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر)، ارتفاع گیاه کینوا کاهش می‌یابد. در پژوهشی دریافتند که در شرایط شور (۱۵ دسی‌زیمنس بر متر)، ارتفاع گیاه نسبت به شرایط غیرشور کاهش می‌یابد (Rezzouk et al., 2020).

همچنین در مطالعات متعدد مشخص شد که با افزایش شوری، ارتفاع گیاه کینوا کاهش می‌یابد (Long, 2016; Hussain et al., 2018; Jamali and Sharifan, 2018; Maleki et al., 2018; Qureshi and Daba, 2020; Keskin et al., 2023). تنش شوری با ایجاد اختلال در جذب آب و عناصر غذایی و کاهش فرآیند فتوسنتز رشد رویشی را محدود کرده و در نهایت منجر به کاهش ارتفاع بوته می‌شود (Parihar et al., 2015).

جدول ۵. مقایسه میانگین صفات زراعی کینوا تحت تاثیر شوری

Table 5. Mean comparison of the quinoa agronomic traits affected by salinity

شوری Salinity	ارتفاع بوته Plant Height	ماده خشک Dry Matter	قطر ساقه Stem Diameter	عملکرد علوفه خشک Dry Weight	عملکرد علوفه تر Fresh Weight
dSm^{-1}	cm	%	cm	t/h	t/h
2	117.66 [a]	24.88 [a]	7.15 [a]	14.70[a]	59.24 [b]
5	109.89[b]	24.29 [a]	6.40 [b]	13.36[b]	55.73 [bc]
10	94.62 [c]	20.67 [b]	6.20 [b]	13.13[b]	63.61[a]
15	70.08[d]	19.28[c]	5.57 [c]	10.07[c]	52.05[c]
LSD 5%	*4.87*	*0.97*	*0.34*	*0.96*	*4.18*

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Similar letters in each column indicate no significant difference.

درصد ماده خشک

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین (جدول ۵) نشان داد که بیشترین درصد ماده‌خشک در تیمار با شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر با ۲۴/۸۸ درصد مشاهده شد که در یک کلاس آماری با تیمار شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر با ۲۴/۲۹ درصد قرار گرفت. در جایگاه بعدی تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر با مقدار ۲۰/۶۷ درصد و پس از آن تیمار با شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر با ۱۹/۲۸ درصد قرار داشتند که این تفاوت‌ها با تیمارهای دیگر معنی‌دار و قابل‌توجه بود. بیشترین درصد ماده‌خشک در لاین یک با ۲۴/۰۷ درصد و کمترین آن در لاین دو با ۲۰/۶۵ درصد مشاهده شد (جدول ۶). تفاوت معنی‌داری بین لاین‌ها از نظر میزان ماده‌خشک وجود داشت که برخی از لاین‌ها، کلاس‌های آماری مشترکی با یکدیگر داشتند. تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای شوری نشان می‌دهد که کینوا با وجود توانایی در تحمل شوری، در شوری‌های بالا کاهش معنی‌داری در تولید ماده خشک داشته است.

قطر ساقه

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین (جدول ۵) نشان داد که بیشترین قطرساقه در تیمار با شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر با ۷/۱۵ سانتی متر مشاهده شد. در جایگاه بعدی، تیمار شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر با قطر ساقه ۶/۴۰ سانتی متر که در یک کلاس آماری با تیمار شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر با ۶/۲۰ سانتی متر قرار گرفت و کمترین میزان قطر ساقه در تیمار شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر با ۵/۵۷ سانتی متر قرار گرفت که با تیمارهای دیگر تفاوت معنی‌دار داشت. این کاهش قطر ساقه با افزایش شوری نشان‌دهنده حساسیت رشد قطری ساقه به شرایط تنش شوری است. مطالعه الگوسیبی و همکاران (Algosaibi et al., 2015) نشان داد که قطر ساقه کینوا در خاک شور کاهش می‌یابد. در مطالعات دیگر نیز قطر ساقه تحت تاثیر شوری کاهش پیدا کرده است (Hatami et al., 2020; Keskin et al., 2023). شوری توانایی گیاه برای جذب آب را کاهش داده و منجر به کاهش سرعت رشد و تغییرات متابولیکی مشابه تنش خشکی می‌شود.

عملکرد علوفه خشک

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین (جدول ۵) نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه خشک در تیمار با شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر با ۱۴/۷ تن در هکتار مشاهده شد. در جایگاه بعدی، تیمار شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر با عملکرد ۱۳/۳۶ تن علوفه خشک در هکتار که در یک کلاس آماری با تیمار شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر با ۱۳/۱۳ تن در هکتار قرار گرفت و کمترین میزان عملکرد علوفه خشک در تیمار شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر قرار گرفت که با تیمار های دیگر تفاوت معنی دار داشت. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه خشک در لاین ۱۵ با عملکرد ۱۵/۵۶ تن در هکتار و کمترین آن در لاین شش با ۱۰/۵۳ تن در هکتار ثبت شد (جدول ۶). تفاوت معنی‌داری بین لاین‌ها در میزان عملکرد

نسخه پیش از انتشار

علوفه خشک مشاهده شد، به طوری که برخی از لاین‌ها در گروه‌های آماری مشابه قرار گرفتند. پاسخ ارقام مختلف کینوا به خاک‌های شور متفاوت بود. در پژوهشی با افزایش شوری به‌میزان ۴/۳، ۸، ۱۱/۸، ۱۵/۵ دسی زیمنس بر متر به‌ترتیب منجر به کاهش ۹/۹، ۱۰/۸، ۱۴/۱ و ۳۳/۷ درصدی وزن خشک اندام هوایی شده است (Jamali and sharifan, 2019). با افزایش تنش شوری فتوسنتز کاهش پیدا می‌کند که در نتیجه باعث کاهش رشد گیاه و زیست توده می‌شود (Hao et al., 2021). این نتایج با مطالعات دیگری که کاهش عملکرد ماده خشک کینوا را در اثر افزایش شوری تأیید می‌کنند، همخوانی دارد (Kaboodkhaniet al., 2024; Algosipy et al., 2015; Panuccio et al., 2014; Koyro et al., 2008).

جدول ۶. مقایسه میانگین صفات زراعی لاین‌های مورد بررسی کینوا

Table 6. Comparison of the Mean Agronomic Traits of the Quinoa Lines Under Study

لاین Line	ارتفاع بوته Plant Height	ماده خشک Dry Matter	عملکرد علوفه خشک Dry Weight	عملکرد علوفه تر Fresh Weight
	cm	%	---------- t h^{-1} ----------	
NSRCQF1	106.83^{ab}	24.07^{a}	14.02^{ab}	59.21^{bcd}
NSRCQF2	95.50^{cde}	20.65^{f}	11.57^{ef}	55.77^{c-f}
NSRCQF3	98^{b-e}	24^{ab}	13^{b-e}	55.46^{c-f}
NSRCQF4	99.83^{a-d}	21.15^{ef}	12.08^{c-f}	57.59^{b-e}
NSRCQF5	88.50^{e}	22.30^{a-f}	11.53^{ef}	51.71^{def}
NSRCQF6	94.33^{de}	22.19^{a-f}	10.53^{f}	47.68^{f}
NSRCQF7	102.83^{a-d}	23.19^{a-d}	14.36^{ab}	62.41^{abc}
NSRCQF8	98.75^{bcd}	21.39^{def}	13.63^{bcd}	63.72^{abc}
NSRCQF9	101.16^{a-d}	22.08^{b-f}	11.78^{def}	53.28^{def}
NSRCQF10	108.83^{a}	21.88^{c-f}	14^{abc}	64.33^{ab}
NSRCQF11	94de	21.83^{c-f}	13.04^{b-e}	59.85^{bcd}
NSRCQF12	101.66^{a-d}	21.11^{ef}	10.95^{f}	51.62^{def}
NSRCQF13	101.50^{a-d}	23.49^{abc}	13.68^{a-d}	58.45^{b-e}
NSRCQF14	101.66^{a-d}	22.88^{a-e}	14.00^{abc}	62.07^{bc}
NSRCQF15	103.50^{a-d}	22.23^{a-f}	15.56^{a}	68.80^{a}
Termeh	104.16^{abc}	22.01^{c-f}	11.34^{ef}	50.56^{ef}
LSD 5%	9.74	1.95	1.93	8.36

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Similar letters in each column indicate no significant difference.

عملکرد علوفه تر

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین (جدول ۵) نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه تر در تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. در جایگاه بعدی، تیمار شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر در یک کلاس آماری با تیمار شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر قرار گرفت و کمترین میزان عملکرد علوفه تر در تیمار شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر بود که با تیمارهای شوری ۲ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر تفاوت معنی‌دار داشت. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه تر در لاین ۱۵ و کمترین آن در لاین شش ثبت شد (جدول ۶). تفاوت معنی‌داری بین لاین‌ها در میزان عملکرد علوفه خشک مشاهده شد، به طوری که برخی از لاین‌ها در گروه‌های آماری مشابه قرار گرفتند. در مطالعه سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2003) مشخص شد که عملکرد علوفه تر کینوا در شرایط تنش شوری ۶ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به دلیل افزایش سرعت رشد نسبی افزایش می‌یابد. در مطالعات دیگر، مشخص شد که تا سطح شوری ۱۱ (Wilson et al., 2002) و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر (Hariadi et al., 2011) کاهش قابل توجهی در عملکرد علوفه تر مشاهده نمی‌شود، اما در سطوح شوری بالاتر، عملکرد کاهش پیدا می‌کند. در مطالعه مانا و همکاران (Manaa et al., 2019) نیز مشخص شد که کاهش معناداری در کل زیست‌توده و وزن تر کینوا در شرایط شور وجود ندارد. مشخص شده است که ارقام مختلف کینوا واکنش‌های متفاوتی به شوری خاک نشان می‌دهند، برخی

نسخه پیش از انتشار

ارقام با افزایش شوری، افزایش در تولید زیست‌توده و عملکرد علوفه تر را نشان دادند، در حالی که در برخی دیگر کاهش مشاهده شده است (Hussain et al., 2018; Qureshi and Daba, 2020). برخی از ارقام کینوا در شرایط شور عملکرد بیشتری نسبت به ارقامی که در خاک‌های غیرشور کشت شده‌اند، داشتند (Tan and Temel, 2018). صالحی و دهقانی (Salehi and Dehghani, 2024) در ارزیابی تحمل به تنش شوری ژنوتیپ‌های کینوا در سطوح مختلف شوری در شرایط مزرعه نشان دادند که در شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان تولید زیست توده بیشتر از سطح غیر شور بود. کینوا یک گیاه شورزیست اختیاری است در این گیاهان با افزایش شوری میزان تولید زیست توده تا حدی افزایش یافته و سپس با شیب کمی کاهش می‌یابد در حالی که در گیاهان شورزیست اجباری افزایش زیست توده با افزایش شوری بیشتر است و نیاز به نمک در محیط ریشه ضروری است (Adolf et al., 2012).

ارزیابی تحمل به شوری

در این مطالعه، مقادیر R^2 در محدوده ۰/۸۵۵۴ تا ۰/۹۹۶۲ قرار داشت که نشان دهنده بالا بودن دقت برازش مدل است (جدول ۷). آستانه تحمل به تنش شوری لاین‌ها بین ۵-۱۸ دسی‌زیمنس بر متر است و شیب کاهش کلیه لاین‌های کمتر از یک درصد بود. لاین‌های کینوا ۸۰ درصد تولید را در شوری ۹-۲۳ دسی‌زیمنس بر متر داشتند در حالی که ۷۵ درصد تولید گیاهان علوفه‌ای ذرت، یونجه و سورگوم به ترتیب در شوری عصاره اشباع خاک ۳/۸، ۵/۴ و ۸/۴ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شده است (Ayers and Wescott, 1985).

شاخص تحمل به تنش شوری (STI) یکی از معیارهای مهم در ارزیابی تحمل گیاه به شوری است، این شاخص معمولاً بر اساس کاهش عملکرد در شرایط شور نسبت به شرایط غیر شور محاسبه می‌شود (Steppuhn et al., 2005). بالاتر بودن مقدار STI نشان‌دهنده تحمل بیشتر به شوری است. لاین NSRCQF3، NSRCQF6 و NSRCQF4 دارای بالاترین مقادیر STI بوده که نشان‌دهنده تحمل بالای آن‌ها به شوری است. در مقابل، کمترین مقدار STI مربوط به لاین NSRCQF5 (۱۷/۹۱) است که نشان می‌دهد این لاین حساسیت بیشتری نسبت به شوری دارد. EC_{50} نشان‌دهنده مقادیری از شوری است که در آن عملکرد گیاه به ۵۰ درصد مقدار اولیه کاهش می‌یابد. هرچه مقدار EC_{50} بالاتر باشد، نشان‌دهنده تحمل بیشتر لاین به شوری است.

در این بررسی، لاین‌های NSRCQF3، NSRCQF4 و NSRCQF6 دارای بالاترین مقدار EC_{50} بوده و نشان می‌دهند که تحمل بالاتری به تنش شوری دارند و کاهش عملکرد با افزایش شوری، کمتر است. در مقابل، NSRCQF7 با EC_{50} برابر با ۱۷/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر حساسیت بیشتری به شوری نشان داد. لاین‌های NSRCQF2، NSRCQF4، NSRCQF6، NSRCQF8 و NSRCQF14 کمترین مقدار شیب را نشان داده‌اند که بیانگر کاهش تدریجی عملکرد آن‌ها در شرایط افزایش شوری است. از سوی دیگر، لاین NSRCQF9 و NSRCQF12 بیشترین مقدار شیب را نشان داده‌اند که بیانگر کاهش سریع‌تر عملکرد در مواجهه با افزایش شوری است. CT یا آستانه تحمل به شوری نشان‌دهنده میزان شوری است که تا قبل از آن، کاهش عملکرد ناچیز است و از آن به بعد، کاهش عملکرد محسوس می‌شود. لاین‌هایی مانند NSRCQF3، NSRCQF7 و NSRCQF11 دارای مقادیر بالاتر CT بوده که نشان می‌دهد قبل از رسیدن به این سطوح شوری، عملکرد آن‌ها کاهش زیادی نخواهد داشت. در مقابل، لاین‌های NSRCQF4، NSRCQF8، NSRCQF10، NSRCQF13، NSRCQF14 و NSRCQF15 دارای CT برابر ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر هستند که نشان می‌دهد حساسیت بیشتری به شوری دارند و در سطوح پایین‌تر شوری نیز کاهش عملکرد خواهند داشت. در بین گیاهان علوفه‌ای سورگوم برای مناطق خشک توصیه شده است. آستانه تحمل به تنش شوری سورگوم علوفه‌ای ۴ دسی‌زیمنس بر متر و ۵۰ درصد کاهش عملکرد در شوری ۶ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شده است (Anagholi and Tabatabaee, 2019). آستانه تحمل به تنش شوری سورگوم رقم اسپیدفید ۳/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر و شیب کاهش عملکرد بعد از آستانه سورگوم ۳ درصد گزارش شده است (Noorozi et al., 2022). شوری در غلظت ۶۰ میلی‌مولار کلرید سدیم باعث کاهش ۱۰ تا ۲۳ درصدی در عملکرد علوفه تر و کاهش ۱۱ تا ۳۳ درصدی در عملکرد علوفه خشک می‌شود، در حالی که در غلظت ۱۲۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، این کاهش به ۲۱ تا ۴۷ درصد برای عملکرد علوفه تر و ۳۰ تا ۵۸ درصد برای عملکرد علوفه خشک سورگوم می‌رسد (Rajabi Dehnavi et al., 2024).در واقع سورگوم تحمل متوسط به تنش شوری

نسخه پیش از انتشار

دارد. عملکرد یونجه زمانی شروع به کاهش می‌کند که شوری خاک تقریباً از ۲ دسی‌زیمنس بر متر تجاوز کند و به ازای هر دسی‌زیمنس بر متر شوری اضافی، عملکرد حدود ۷/۳ درصد کاهش می‌یابد (Maas and Hoffman, 1977; Maas, 1990). یونجه نیز در گروه علوفه‌های نیمه متحمل دسته بندی می‌گردد در حالی‌که در کینوا علوفه‌ای شیب کاهش عملکرد با افزایش شوری کمتر از یک درصد بود.

جدول ۷. نتایج حاصل از برازش کاهش عملکرد نسبی ۱۶ لاین کینوا در مقابل شوری

Table 7. Results of fitting relative yield reduction against salinity for 16 quinoa lines

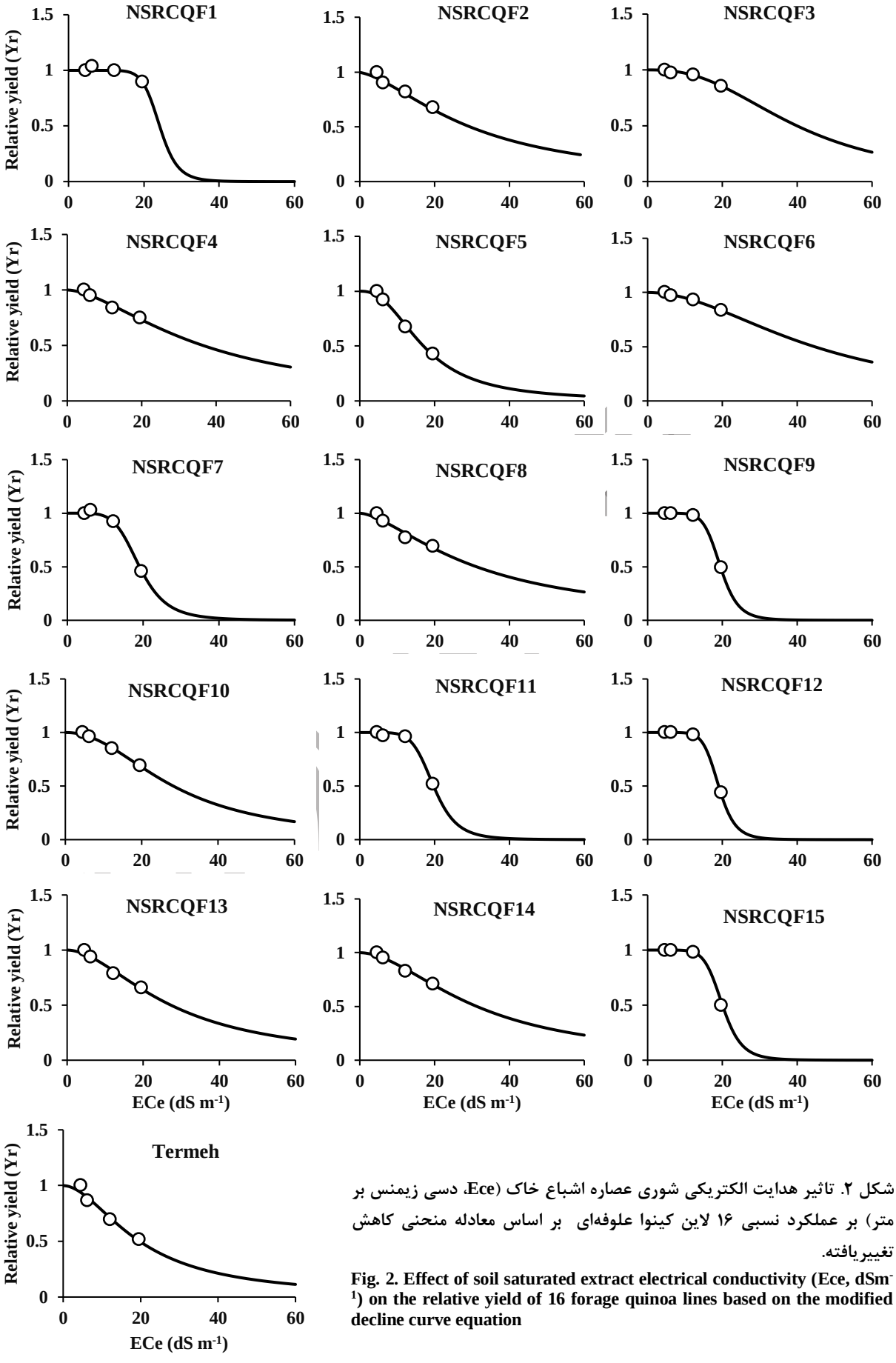
لاین	ضریب تعیین	شاخص تحمل به شوری	غلظت ۵۰ درصد تولید	غلظت ۸۰ درصد تولید	شیب	آستانه تحمل به شوری
Line	R^2	STI	EC50	EC80	Slop	CT
NSRCQF1	0.85	26.30	24.64	21.10	0.095	18
NSRCQF2	0.99	30.94	30.43	13.18	0.016	6
NSRCQF3	0.97	40.81	39.88	23.04	0.023	10
NSRCQF4	0.95	36.97	36.47	14.08	0.013	4.5
NSRCQF5	0.99	17.91	17.02	19.75	0.052	4.5
NSRCQF6	0.99	45.33	44.65	22.10	0.015	10
NSRCQF7	0.99	20.75	19.07	14.72	0.087	12
NSRCQF8	0.98	31.62	31.17	12.86	0.014	4.5
NSRCQF9	0.99	21.56	19.45	16.44	0.108	18
NSRCQF10	0.99	29.03	28.27	14.73	0.026	4.5
NSRCQF11	0.99	21.59	19.72	15.90	0.094	15
NSRCQF12	0.99	21.15	18.98	16.19	0.113	16
NSRCQF13	0.99	27.85	27.25	12.73	0.021	4.5
NSRCQF14	0.99	31.89	31.28	14.66	0.019	4.5
NSRCQF15	0.99	22.77	20.70	16.79	0.103	4.5
Termeh	0.99	20.35	19.73	9.33	0.031	4.5

بر اساس شاخص‌های اندازه‌گیری شده، لاین‌های NSRCQF3، NSRCQF4 و NSRCQF6 دارای مقادیر بالای STI، مقادیر بالای EC50 و شیب کاهش عملکرد پایین هستند. این لاین‌ها به عنوان لاین‌های متحمل به شوری قابل معرفی هستند. در مقابل، لاین‌های NSRCQF7، NSRCQF9 و NSRCQF12 به دلیل مقادیر پایین EC50، شیب بالا و مقادیر پایین CT، حساسیت بیشتری به شوری دارند. نحوه واکنش لاین های کینوا به شوری های مختلف بصورت گرافیکی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود در لاین NSRCQF1 شیب کاهش بعد از آستانه زیاد است در حالی ۸۰ درصد تولید در شوری عصاره اشباع بالاتری مشاهده شد در حالی که در لاین‌های NSRCQF3، NSRCQF4 و NSRCQF6 شیب کاهش بسیار کمتری داشتند.

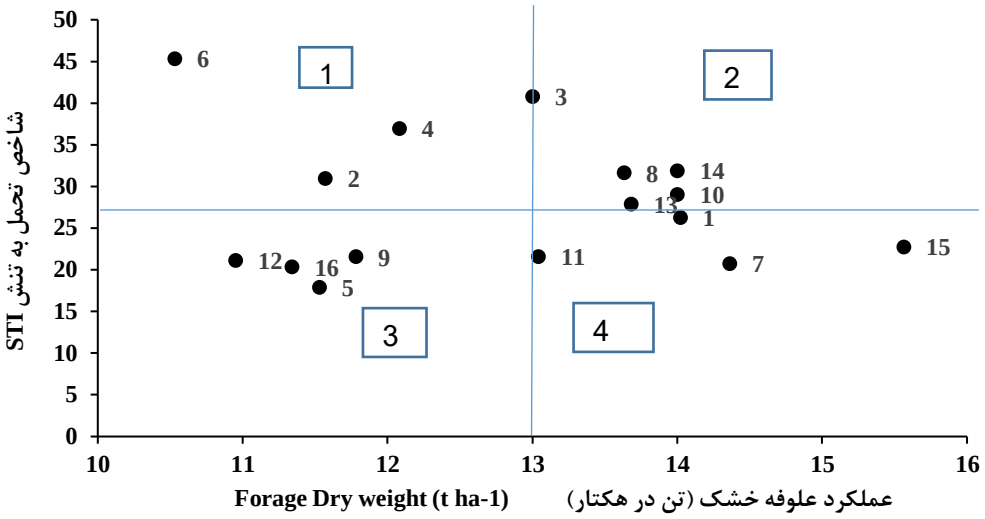
در نمودار دو طرفه عملکرد علوفه خشک کینوا علوفه‌ای در مقابل شاخص تحمل به تنش (STI) بر اساس میانگین این دو صفت به چهار قسمت تقسیم بندی شد. در محیط ۱ لاین‌هایی قرار گرفتند که دارای عملکرد پایین و تحمل بالایی هستند (۲، ۴ و ۶). در محیط ۲ لاین‌هایی قرار گرفتند که دارای تحمل بالا و عملکرد بالاتر از متوسط لاین‌ها بودند (۳، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۴). محیط سوم دارای لاین‌هایی با عملکرد و شاخص تحمل پایین بودند و لاین‌های ۵، ۹، ۱۲ و ۱۶ قرار داشتند و در محیط ۴ لاین‌ها دارای عملکرد بالا و شاخص تحمل پایین بودند در این گروه لاین‌های ۱، ۷، ۱۱ و ۱۵ قرار داشتند (شکل ۳). بررسی میزان عملکرد مطلق در شرایط اقلیمی یزد و میانگین تحمل به تنش شوری نشان داد که در شوری‌های آب آبیاری ۱۵ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، لاین‌های ۳، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۴ علاوه بر شاخص تحمل به تنش شوری بالاتر دارای میانگین مطلق عملکرد بالاتری بودند و لاین‌های ۲ و ۴ علی‌رغم بالا بودن شاخص تحمل به تنش دارای عملکرد مطلق پایین‌تر بودند (شکل ۴ و جدول ۸).

نسخه پیش از انتشار



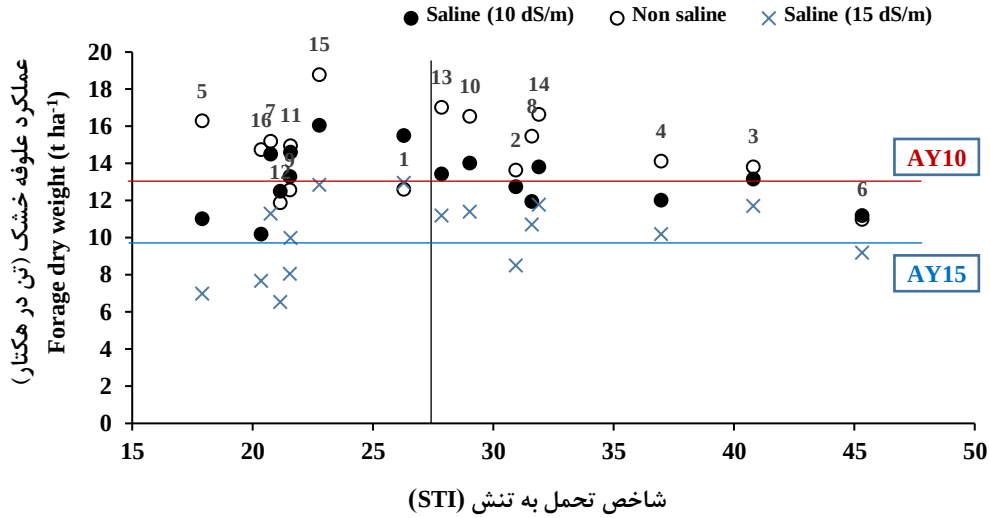
شکل ۲. تاثیر هدایت الکتریکی شوری عصاره اشباع خاک (Ece، دسی زیمنس بر متر) بر عملکرد نسبی ۱۶ لاین کینوا علوفه‌ای بر اساس معادله منحنی کاهش تغییریافته.

Fig. 2. Effect of soil saturated extract electrical conductivity (Ece, dSm^{-1}) on the relative yield of 16 forage quinoa lines based on the modified decline curve equation



شکل ۳. نمودار دو طرفه میانگین عملکرد علوفه خشک کینوا علوفه‌ای (تن در هکتار) و شاخص تحمل به تنش شوری (STI). خطوط عمودی و افقی داخل نمودار میانگین را نشان می‌دهد .

Fig. 3. Two-way plot of forage quinoa dry forage yield (tons per hectare) and salt stress tolerance index (STI). The red vertical and horizontal lines indicate the average.



شکل ۴. شاخص تحمل به تنش شوری (STI) و میانگین عملکرد علوفه خشک (تن در هکتار) لاین‌های کینوا علوفه‌ای در شرایط غیر شور، شوری ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر (خط آبی و قرمز میانگین عملکرد در شوری ۱۵ (AY15) و ۱۰ (AY10) دسی‌زیمنس بر متر را نشان می‌دهد و خط سیاه میانگین STI است).

Fig. 4. Salinity stress tolerance index (STI) and average dry matter yield (tons per hectare) of forage quinoa lines under non-saline conditions, salinity of 10 and 15 dSm^{-1} (blue and red lines show average yield at salinity of 15 (AY15) and 10 (AY10) dSm^{-1}, and black line is average STI).

میزان توارث پذیری ارتفاع بوته، عملکرد علوفه تر و خشک بالا بود و بیشترین میزان توارث پذیری در عملکرد علوفه خشک مشاهده شد (۶۳/۵ درصد). وراثت‌پذیری صفات عملکرد و کیفیت علوفه (شامل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی) سورگوم متغیر و معمولاً متوسط تا بالا است که امکان انتخاب و اصلاح مؤثر را فراهم می‌کند (Figueiredo et al., 2024). وراثت‌پذیری تولید علوفه خشک در گیاهان علوفه‌ای معمولاً بین ۰/۲۷ تا ۰/۵ است، اما در برخی گونه‌ها و صفات خاص می‌تواند تا ۰/۷۸ نیز برسد. این میزان وراثت‌پذیری امکان اصلاح ژنتیکی مؤثر برای افزایش تولید علوفه خشک را فراهم می‌کند، به شرط آنکه تنوع ژنتیکی کافی و شرایط محیطی مناسب فراهم باشد (Guidalevich et al., 2025). در کینوا علوفه‌ای نیز میزان توارث پذیری برای تولید علوفه خشک بالا بود.

جدول ۸. میزان وراثت‌پذیری صفات اندازه‌گیری شده کینوای علوفه‌ای

Table 8. Heritability of measured traits of forage quinoa

توضیحات	میزان توارث‌پذیری	صفات
Comments	**Heritability (%)**	**Traits**
توارث پذیری بالا High heritability	51.4	ارتفاع بوته Plant height
توارث پذیری متوسط Medium heritability	35.0	درصد ماده خشک Dry matter (%)
توارث پذیری پایین Low heritability	9.8	قطر ساقه Stem diameter
توارث پذیری بالا High heritability	60.2	عملکرد علوفه تر Fresh dry weight
توارث پذیری بالا High heritability	63.5	عملکرد علوفه خشک Dry weight

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان داد که شوری تأثیر معنی‌داری بر صفات زراعی کینوا دارد. با افزایش شوری، کاهش معنی‌داری در ارتفاع بوته، قطر ساقه و عملکرد علوفه خشک مشاهده شد، در حالی که عملکرد علوفه تر در برخی سطوح شوری (مانند ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) افزایش یافت. لاین‌های مختلف کینوا واکنش‌های متفاوتی به شوری نشان دادند. لاین‌های NSRCQF3، NSRCQF4 و NSRCQF6 به‌عنوان لاین‌های متحمل به شوری شناسایی شدند که دارای شاخص تحمل به شوری (STI) بالا، EC50 بالا و شیب کاهش عملکرد پایین بودند. لاین‌های NSRCQF1، NSRCQF3 و NSRCQF6 به ترتیب در شوری‌های ۲۱ ، ۲۳ و ۲۲ دسی‌زیمنس بر متر عصاره اشباع خاک ۸۰ درصد تولید علوفه در شرایط غیرشور را داشتند. در مقابل، لاین‌های NSRCQF7، NSRCQF9 و NSRCQF12 حساسیت بیشتری به شوری نشان دادند و کاهش عملکرد قابل توجهی در شرایط شوری بالا داشتند. بررسی میانگین تولید علوفه خشک و شاخص تحمل به تنش شوری نشان داد که لاین‌های NSRCQ3، NSRCQ8، NSRCQ10، NSRCQ13 و NSRCQ14 عملکرد و شاخص تحمل به تنش شوری بالاتری از متوسط لاین‌ها داشتند. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کینوا به‌عنوان یک گیاه متحمل به شوری، پتانسیل بالایی برای کشت در شرایط شور دارد. با این حال، انتخاب لاین‌های مناسب با توجه به شرایط شوری منطقه، هدف کشت (تولید علوفه یا دانه) و سازگاری در اقلیم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. لاین‌های متحمل شناسایی‌شده در این پژوهش می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه ارقام سازگار با شرایط شور و بهبود تولید علوفه در مناطق شور مورد استفاده قرار گیرند.

منابع

Adolf, V.I., Shabala, S., Andersen, M.N., Razzaghi, F., Jacobsen, S.-E., 2012. Varietal differences of quinoa's tolerance to saline conditions. Plant and Soil. 357, 117–129. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1133-7

Anagholi, A. and Tabatabaee, S. A., 2019. Salinity tolerance indices of barley, cotton, canola, and forage sorghum cultivars. Iranian Journal of Soil Research. 33, 45-59. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22092/ijsr.2019.119055

Asher, A., Galili, S., Whitney, T., Rubinovich, L., 2020. The potential of quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivation in Israel as a dual-purpose crop for grain production and livestock feed. Scientia Horticulturae. 272, 109534. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109534

Algosaibi, A.M., El-Garawany, M.M., Badran, A.E., Almadini, A.M., 2015. Effect of irrigation water salinity on the growth of quinoa plant seedlings. Journal of Agricultural Science. 7, 205. https://doi.org/10.5539/jas.v7n8p205

Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage, Paper 29, Food and Agriculture Organization, Rome. ISBN 92-5-102263-1

Bazile, D., Bertero, H. D., Nieto, C., 2015. State of the art report on quinoa around the world in 2013. FAO. http://www.fao.org/3/a-i4042e.pdf

Bazile, D., Jacobsen, S.-E., Verniau, A., 2016. The global expansion of quinoa: Trends and limits. Frontiers in Plant Science. 7, 622. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622

Cui, H., Yao, Q., Xing, B., Zhou, B., Shah, S.S., Qin, P., 2024. The performance of agronomic

نسخه پیش از انتشار

and quality traits of quinoa under different altitudes in Northwest China. Agronomy. 14, 1194. https://doi.org/10.3390/agronomy14061194

Figueiredo, J.M.M.d., Parrella, R.A.d.C., Nunes, J.A.R., 2024. Genetic parameters and selection for multiple traits in sorghum for forage purposes. Crop Breeding and Applied Biotechnology. 24, e48122429. https://doi.org/10.1590/1984-70332024v24n2a22

Guidalevich, V., Berro, I., Aparicio, A.G., Azpilicueta, M.M., López, A.S., Arias-Rios J.A., 2025. Genetic variation and heritability of agronomic traits in a native perennial forage species from drylands: breeding potential of Festuca pallescens. Scientific Reports. 15, 6896. https://doi.org/10.1038/s41598-025-90875-7

González, J.A., Gallardo, M., Hilal, M.B., Rosa, M.D., Prado, F.E., 2009. Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa*) to drought and waterlogging stresses: Dry matter partitioning. Environmental and Experimental Botany. 66, 471–477. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.03.008

Gómez-Pando, L.R., Álvarez-Castro, R., Eguiluz-De La Barra, A., 2010. Effect of salt stress on Peruvian germplasm of *Chenopodium quinoa* Willd.: A promising crop. Journal of Agronomy and Crop Science. 196, 391–396. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00429.x

Hao, S., Wang, Y., Yan, Y., Liu, Y., Wang, J., Chen, S., 2021. A review on plant responses to salt stress and their mechanisms of salt resistance. Horticulturae. 7, 132. https://doi.org/10.3390/horticulturae7060132

Hariadi, Y., Marandon, K., Tian, Y., Jacobsen, S.-E., Shabala, S., 2011. Ionic and osmotic relations in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants grown at various salinity levels. Journal of Experimental Botany. 62, 185–193. https://doi.org/10.1093/jxb/erq257

Hatami, A., Aminian, R., Mafakheri, S., Soleimani Aghdam, M., 2021. Effect of gamma aminobutyric acid on morpho-physiological traits and seed yield of quinoa under salinity stress. Plant Productions, 44, 559–572. [In Persian with English Summary] https://doi.org/10.22055/ppd.2021.35988.1960

Hussain, M. I., Al-Dakheel, A. J., Reigosa, M. J., 2018. Genotypic differences in agro-physiological, biochemical, and isotopic responses to salinity stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants: Prospects for salinity tolerance and yield stability. Plant Physiology and Biochemistry. 129, 411–420. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.023

Hussain, M. I., Muscolo, A., Ahmed, M., Asghar, M.A., AlDakheel, A.J., 2020. Agro-morphological, yield, and quality traits and interrelationship with yield stability in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes under saline marginal environments. Plants. 9, 1763. https://doi.org/10.3390/plants9121763

Intergovernmental Panel on Climate Change., 2019. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC. https://www.ipcc.ch/srccl/

Jacobsen, S.-E., Quispe, H., Mujica, A., 1999. Quinoa: An alternative crop for saline soils in the Andes. CIP Program Report, 2000, 403–408.

Jamali, S., Sharifan, H., 2018. Investigation of the effect of different salinity levels on yield and yield components of quinoa (Cv. Titicaca). Journal of Water and Soil Conservation. 25(2), 251–266. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.13721.2841

Kafi, M., Salehi, M., Eshghizadeh, H., 2010. Biosaline agriculture: Plant, Water, and Soil Management Approaches. Ferdowsi University of Mashhad Publication. [In Persian].

Kaboodkhani, M., Salek Mearaji, H., Aghaei, K., Tavakoli, A., 2024. Effects of salinity stress on some morpho-physiological traits and grain yield of quinoa cultivars under greenhouse conditions. Plant Productions. 47, 213–227. [In Persian with English Summary] https://doi.org/10.22055/ppd.2024.46220.2145

Keskin, B., Temel, S., Akbay Tohumcu, S., 2023. Determination of forage yield performance of different Chenopodium quinoa cultivars in saline conditions. Zemdirbyste-Agriculture. 110(2), 149-156. https://doi.org/10.13080/z-a.2023.110.018

Koyro, H. W., Eisa, S. S., 2007. Effect of salinity on composition, viability, and germination of seeds of *Chenopodium quinoa* Willd. Plant and Soil. 302, 79–90. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9457-4

Koyro, H.W., Lieth, H., Eisa, S.S., 2008. Salt tolerance of Chenopodium quinoa Willd., grains of the Andes: Influence of salinity on biomass production, yield, composition of reserves in the seeds, water and solute relations. In Mangroves and halophytes: Restoration and utilization (pp. 133–145). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6720-4_13

Long, N.V., 2016. Effects of salinity stress on growth and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) at flower initiation stages. Vietnam Journal of Agricultural Sciences. 14, 321–327.

Maas, E.V., Hoffman, G.J., 1977. Crop salt tolerance—current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 103, 115-134. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137

Maas, E.V. 1990 Crop Salt Tolerance. In: Tanji, K.K., Ed., Agricultural Salinity Assessment and Management, ASCE Manual Reports on Engineering Practices, Vol. 71, ASCE, New York, 262-304.

Maleki, P., Bahrami, H.A., Saadat, S., Sharifi, F., Dehghany, F., Salehi, M., 2018. Salinity threshold value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) at various growth stages and the appropriate irrigation method by saline water. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 49, 1815–1825. https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1492601

Manaa, A., Goussi, R., Derbali, W., Cantamessa, S., Abdelly, C., Barbato, R., 2019. Salinity tolerance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as assessed by chloroplast ultrastructure and photosynthetic performance. Environmental and Experimental Botany. 162, 103–114. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.012

Navruz-Varli, S., Sanlier, N., 2016. Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Journal of Cereal Science. 69, 371–376. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.05.004

Noroozi, M., Chavoshie, E., Ghajar Sepanlou, M., 2022. Effect of Irrigation Water Salinity on Relative Yield and Some Morphological and Physiological Characteristics of Sorghum. Journal of Water Research in Agriculture, 36, 55-73. In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22092/jwra.2022.352078.823

Panuccio, M.R., Jacobsen, S.-E., Akhtar, S.S., Muscolo, A., 2014. Effect of saline water on seed germination and early seedling growth of the halophyte quinoa. AoB Plants. 6, plu047. https://doi.org/10.1093/aobpla/plu047

Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V.P., Prasad, S. M., 2015. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: A review. Environmental Science and Pollution Research. 22, 4056–4075. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1

Qureshi, A. S., Daba, A. W., 2020. Evaluating growth and yield parameters of five quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes under different salt stress conditions. Journal of Agricultural Science. 12, 10–5539. https://doi.org/10.5539/jas.v12n3p128

Rajabi Dehnavi, M., Emam, Y., Afzal, I., 2024. Candidate genes for salt tolerance in forage sorghum under salt stress conditions: A review. Genes. 14, 293. https://doi.org/10.3390/genes14020293

Rezzouk, F.Z., Shahid, M.A., Elouafi, I.A., Zhou, B., Araus, J.L., Serret, M.D., 2020. Agronomic performance of irrigated quinoa in desert areas: Comparing different approaches for early assessment of salinity stress. Agricultural Water Management. 240, 106205. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106205

Saadat, S., Rezaei, H., Esmaeilinejad, L., Mirkhani, R., Bagheri, Y.R., 2023. Salinity map of agricultural soils in Iran. Soil and Water Research Institute. [In Persian].

Salehi, M. Dehghani, F., 2024. Determination of salinity stress tolerance threshold of quinoa genotypes under field conditions. Environmental Stresses in Crop Science, 16, 1123-1137. [In Persian with English summary] https://doi.org/10.22077/ESCS.2023.5309.2138

Salehi, M. 2025. Quinoa germplasm screening to identify adaptable and salt tolerance genotypes with different maturity time. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. Final Report 69017 NO. [In Persian].

Sanchez H.B., Lemeur R., Damme P.V., Jacobsen S.E., 2003. Ecophysiological analysis

of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.). Food Reviews International. 19, 111–119. https://doi.org/10.1081/FRI-120018874

Shah, S.S., Shi, L., Li, Z., Ren, G., Zhou, B., Qin, P., 2020. Yield, agronomic and forage quality traits of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes in northeast China. Agronomy. 10, 1908. https://doi.org/10.3390/agronomy10121908

Steppuhn, H., van Genuchten, M.Th., Grieve, C.M., 2005. Root-zone salinity: I. Selecting a product-yield index and response function for crop tolerance. Crop Science. 45, 209-220. https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0209.

Tan, M., Temel, S., 2018. Performance of some quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in different climate conditions. Turkish Journal of Field Crops, 23, 180–186. https://doi.org/10.17557/tjfc.485548

Wilson, C., Read, J.J., Abo-Kassem, E., 2002. Effect of mixed-salt salinity on growth and ion relations of a quinoa and a wheat variety. Journal of Plant Nutrition. 25, 2689–2704. https://doi.org/10.1081/PLN-120015532

Yılmaz, Ş., Ertekin, İ., İbrahim, A., 2021. Forage yield and quality of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes harvested at different cutting stages under Mediterranean conditions. Turkish Journal of Field Crops. 26, 202–209. https://doi.org/10.17557/tjfc.986893

نسخه پیش از انتشار