Karafan
Quarterly Scientific Journal of National University of Skill
Winter 2026, Vol. 22, No. 4, p. 501-522
Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
doi:10.48301/kssa.2026.521788.3215

The effect of seed priming technology on biochemical changes of sesame seedlings under drought stress

Mehrangiz Jowkar-Tang-Karami[1*], Javad Taei-Semiromi[1], Najmeh Soltani[2]

[1]Department of Agrotechnology, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
[2] Master's degree in Agroecology, Department of plant production and genetics, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 05.31.2025
Revised: 07.20.2025
Accepted: 09.07.2025

Keyword:
Calcium chloride
Genotype
Sesame (*Sesamum indicum*)
hydropriming
Osmopriming

***Corresponding Author:**
Mehrangiz Jowkar Tang-Karami
Email: *mjowkar@tvu.ac.ir; Jokar2006@gmail.com*

ABSTRACT

This experiment was conducted to investigate the effect of seed priming on biochemical changes in sesame seedlings at Jiroft University during 2018–2019. The experiment was arranged as a three-factor factorial in a completely randomized design with three replications. The factors included sesame genotypes (Halil and J1), seed priming treatments (osmopriming with calcium chloride at −2 bar, hydropriming, and no priming), and drought stress induced by polyethylene glycol 6000 at 0, −2, and −4 bar. The results showed that increasing drought stress significantly increased proline and soluble sugar contents in seedlings of both genotypes, with values at −2 and −4 bar being significantly higher than the control ($P < 0.05$). Under drought stress, osmopriming significantly enhanced proline accumulation compared to unprimed seeds. Soluble sugar content in seedlings from osmoprimed and hydroprimed seeds was significantly higher than that of unprimed seeds. Genotypic responses to drought stress and priming treatments differed. The Halil genotype showed higher soluble sugar content than J1. Hydropriming had no significant effect on potassium concentration, whereas osmopriming significantly increased potassium content in both genotypes ($P < 0.05$). Calcium concentration decreased significantly in unprimed seedlings under drought stress, while this reduction in primed treatments was observed only at −4 bar stress.

©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Drought stress is one of the most important factors limiting germination and plant growth and development, which, due to its many adverse physiological and biochemical effects on plants, causes a severe reduction in their growth, development, and yield. Seed priming is a physiological technology that can induce drought stress resistance in plants. Therefore, its successful use requires understanding the biochemical and physiological mechanisms through which priming affects seed quality. For this purpose, an experiment was conducted at Jiroft University to investigate the effect of seed priming on sesame (*Sesamum indicum*) biochemical changes caused by priming on improving sesame seedling growth. The findings of this research can be considered and used in the direction of industrializing seed priming technology in agriculture.

Methodology: This research was conducted as a three-factor factorial in a completely randomized design with three replications at Jiroft University. The first factor was sesame genotypes including the Halil and J1 genotypes, the second factor was seed priming with calcium chloride salt -2bar, Hydropriming and without priming, and the third factor was drought stress from polyethylene glycol 6000, which was applied at three levels of 0, 2- and 4-bar. In this experiment, were investigated some physiological changes in the seed such as proline concentration, soluble sugar, potassium and calcium that occurred in the most effective priming treatment.

Results and Discussion: The results also showed that the three factors of genotype, priming and drought stress and their interactions affected proline, soluble sugar, potassium and calcium ($P<0.05$) (Table 1). According to these results, not only was the proline content in the Halil genotype significantly higher than that of the J1 genotype, but also that under drought stress conditions, the slope of increase in this index (proline accumulation) with decreasing osmotic potential was higher than that of the J1 genotype (Figure 1). The results of priming under drought stress conditions indicated that the effect of osmopriming on increasing proline and its accumulation in seedlings was significantly greater than that of hydropriming, so that the regression analysis presented in Figure1 also showed that the slope of increase in proline under the influence of decreasing osmotic potential was greater in osmopriming than in hydropriming and in hydropriming than in non-primed seeds, respectively. In this experiment, soluble sugar level, was significantly higher in primed seeds than non-primed seeds. Investigation of the effect of drought stress on the amount of seedling potassium showed that only in the Halil genotype the plant's response to increasing drought stress intensity was statistically significant. The effect of seed priming on the potassium content of sesame seedlings under drought stress conditions showed that in the case of unprimed seeds and also in the case of hydropriming, drought stress at the 2-bar osmotic potential level had no significant effect on the potassium content of seedlings, but increasing the intensity of stress at the 4-bar level significantly increased the potassium content. The interaction effect of drought stress levels in sesame genotypes showed that in the Halil, each of the 2-bar and 4-bar drought stress levels caused a significant decrease ($P<0.05$) in the calcium concentration in the seedling, but in the J1, the decrease in calcium concentration was only significant at the 4-bar stress level. Also, the slope of the decrease in calcium concentration due to increasing drought stress intensity concentration in the Halil genotype was significantly greater than that in the J1 genotype. Analysis of the effect of priming on calcium showed that in conditions where sesame seeds were not primed, a significant decrease ($P<0.05$) in calcium concentration occurred at the 2-bar and 4-bar drought stress levels compared to the control while in conditions of hydropriming and osmopriming at the 2-bar stress level, no significant

changes were observed in seedling calcium concentration compared to the control treatment, and the decrease in calcium concentration was statistically significant only at the 4-bar drought stress level.

Conclusion: In general, the results showed that different priming treatments improved physiological indices of sesame seedling under drought stress conditions. In both genotypes, with increasing drought stress, the amount of proline and soluble sugar increased, so that for both genotypes, the difference between the drought stress levels of -2 and -4 bar was significantly ($P<0.05$) greater than the no-stress treatment. Under drought stress conditions, the effect of osmopriming on the increase of proline and its accumulation in seedlings was significantly ($P<0.05$) greater than that of the no-stress treatment. Soluble sugar in seedlings obtained from osmopriming and hydropriming was significantly higher than seedlings obtained from unprimed seeds. So, according to the results, the response of the two genotypes to stress conditions and seed priming was different. The amount of soluble sugar in the Halil cultivar (0.377) was significantly higher than that in the J1 genotype (0.264). In both genotypes, hydropriming had no significant effect on potassium concentration, but osmopriming significantly increased potassium in both genotypes ($P<0.05$). Seedling calcium concentration in the unprimed treatment was significantly ($P<0.05$) reduced compared to the control at both 2-bar and 4-bar drought stress levels, while a decrease in calcium concentration under the influence of priming treatments was observed only under 4-bar drought stress conditions.

Table 1. The mean square effect of seed priming on some biochemical traits of sesame seedlings in two genotypes, Halil and J1, under drought stress and control conditions.

Sources of changes	df	**Prolin**	**Soluble Sugar**	**Potassium**	**Calcium**
(E) Genotype	1	0.1843**	0.1717**	0.371**	4.83**
(P) priming	2	0.0283**	0.0145**	0.148**	0.8807**
(D) Drought stress	2	0.0761**	0.0561**	0.158**	0.2698**
E×P	2	0.0021**	0.0004^{ns}	0.016^{ns}	0.2992**
D×E	2	0.0042**	0.0049**	0.045**	0.0599*
P×D	4	0.0039**	0.0007^{ns}	0.0055*	0.1221**
E×P×D	4	00.328**	0.0013*	0.018*	0.1067**
Error	36	0.00012	0.00036	0.0056	0.0129
CV%	-	2.7	5.9	11.4	17.97

ns, * and **: Respectively: non-significant, significant at the 5 and 1 percent statistical levels

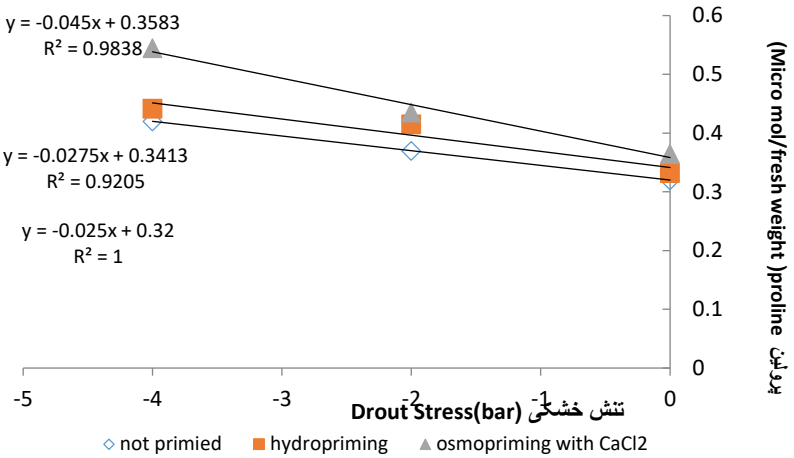


Figure 1 - Effect of drought stress under different seed priming conditions on proline content of sesame seedlings (micromoles per fresh weight)

کرافن
فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت
زمستان ۱٤۰٤، دوره ۲۲، شماره ٤، ۵۰۱-۵۲۲
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi :10.48301/kssa.2026.521788.3215

اثر فناوری پرایمینگ بذر بر تغییرات بیوشیمیایی گیاهچه کنجد (*Sesamum indicum L*) تحت تنش خشکی

مهرانگیز جوکارتنگ‌کرمی [۱*]، جواد طایی‌سمیرمی [۱]، نجمه سلطانی [۲]

۱- گروه فناوری کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱٤۰٤/۰۳/۱۰
بازنگری مقاله: ۱٤۰٤/۰۵/۱۱
پذیرش مقاله: ۱٤۰٤/۰٦/۱٦

کلید واژگان:
اسموپرایمینگ
ژنوتیپ
کلرید کلسیم
کنجد
هیدروپرایمینگ

***نویسنده مسئول:** مهرانگیز جوکارتنگ‌کرمی
پست الکترونیکی:
mjowkar@tvu.ac.ir;
Jokar2006@gmail.com

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پرایمینگ بذر بر تغییرات بیوشیمیایی گیاهچه‌های کنجد در دانشگاه جیرفت طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹ انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل سه‌عامله در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عوامل آزمایشی شامل ژنوتیپ کنجد (هلیل و J1)، تیمارهای پرایمینگ بذر (اسموپرایمینگ با کلرید کلسیم در پتانسیل اسمزی ۲- بار، هیدروپرایمینگ و عدم پرایمینگ) و تنش خشکی القا شده با پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ در سطوح صفر، ۲- و ۴- بار بود. نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش خشکی، مقدار پرولین و قندهای محلول در گیاهچه‌های هر دو ژنوتیپ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که مقادیر این صفات در سطوح ۲- و ۴- بار به‌طور معنی‌داری بیشتر از شاهد بودند ($P<0,05$). تحت شرایط تنش خشکی، اسموپرایمینگ موجب افزایش معنی‌دار تجمع پرولین نسبت به بذرهای بدون پرایم شد. همچنین مقدار قند محلول در گیاهچه‌های حاصل از بذرهای اسموپرایم و هیدروپرایم شده به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار بدون پرایم بود. واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی و پرایمینگ متفاوت بود، به‌طوری‌که ژنوتیپ هلیل مقدار قند محلول بیشتری نسبت به J1 نشان داد. هیدروپرایمینگ تأثیر معنی‌داری بر غلظت پتاسیم نداشت، در حالی که اسموپرایمینگ موجب افزایش معنی‌دار پتاسیم در هر دو ژنوتیپ شد ($P<0,05$). غلظت کلسیم در تیمار بدون پرایم تحت تنش خشکی کاهش معنی‌داری داشت، در حالی که این کاهش در تیمارهای پرایم‌شده تنها در سطح تنش ۴- بار مشاهده شد.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹٦

©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

چالش بحران آب به عنوان مهمترین عامل کاهش تولیدات کشاورزی، امنیت غذایی کشور را تهدید می کند. لذا به کاربردن راهبردها و تکنیک هایی که به مدیریت بهتر منابع آب و افزایش بهره وری استفاده از آب منجر شود اهمیت زیادی دارد. پرایمینگ بذر[۱] نوعی فن‌آوری است که باعث القاء مقاومت اولیه به تنش خشکی می‌شود(۱). همچنین پرایمینگ بذر روش فیزیولوژیک پیش از جوانه‌زنی است که عملکرد بذر را بهبود بخشیده و منجر به جوانه‌زنی سریع‌تر و یکنواخت می‌گردد(۲). در جریان پرایمینگ اجازه داده می‌شود که بذرها مقداری آب جذب کنند طوری که مراحل اولیه جوانه‌زنی انجام شود اما ریشه‌چه خارج نشود، به عبارت دیگر بذرها تا مرحله دوم آبنوشی پیش می‌روند اما وارد مرحله سوم نمی‌شوند(۳). جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه دو مرحله بحرانی و مهم در دوره زندگی گیاهان، خصوصاً در شرایط تنش خشکی به شمار می‌روند(۴). جوانه‌زنی موفق بذر، تحت شرایط تنش، شانس گیاه برای ادامه رشد و غلبه بر تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد(۵, ۶).پرایمینگ بذر نوعی فن‌آوری ساده و کم هزینه است که می تواند خطر استقرار کم در رویشگاه‌های تحت استرس خشکی و شوری را کاهش داده و اجازه رشد یکنواخت در شرایط بارندگی نامنظم و خاک‌های شور را بدهد(۷). بسیاری از مطالعات در زمینه پرایمینگ روی گیاهان زراعی متمرکز بوده (۸) این حال مطالعات اندکی بر روی گیاه کنجد انجام گرفته است. پورقاسمیان و مرادی (۲۰۲۰) در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر گیاهچه کنجد به این نتیجه رسیدند که پیش تیمار بذور کنجد باعث افزایش معنی دار شاخصهای جوانه زنی و میزان پرولین در شرایط تنش خشکی گردید. در پژوهشی دیگر، تاثیر هیدرو و اسموپرایمینگ با کلرید کلسیم و نیترات پتاسیم بر بهبود جوانه زنی گیاهچه کنجد رقم شوین (Sesamum indicum Lvar.shevin) در شرایط تنش خشکی نشان داد که اعمال تیمار هیدروپرایمینگ بهترین درصد جوانه زنی را به همراه داشت(۹).

کنجد با نام علمی (*Sesamum indicum*) گیاهی یک‌ساله متعلق به خانواده Pedaliaceae است.کنجد یکی از دانه‌های روغنی و خوراکی مهم در کشاورزی سنتی نواحی گرم و خشک و یا نیمه خشک است(۹) و بدلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد به عنوان ملکه‌ی دانه‌های روغنی شناخته شده است(۱۰).کنجد دارای کاربردهای متعدد تغذیه‌ای و صنعتی می‌باشد که از جمله می‌توان به صنایع دارویی، آرایشی و بهداشتی، رنگ‌ریزی، شیرینی‌پزی و استفاده در ترکیب حشره‌کش‌ها اشاره کرد(۱۱, ۱۲).

با توجه به حساسیت گیاه کنجد در مرحله‌ی استقرار گیاهچه به تنش خشکی، بررسی اثر پرایمینگ بذر به‌عنوان یک فناوری جدید در بهبود استقرار گیاهچه این گیاه ضروری به‌نظر می‌رسد. اولین قدم برای استفاده مناسب از تکنیک پرایمینگ، شناخت مکانیزم های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی است که پرایمینگ از طریق آنها بر کیفیت بذور تاثیر می گذارد. بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی برخی فرآیندهایی فیزیولویک موثر ناشی از اعمال پرایمینگ در گیاهچه کنجد انجام شد.

۲- مواد و روشها

[۱] Seed Priming

این آزمایش به صورت فاکتوریل سه عاملی و در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه جیرفت انجام شد. عامل اول دو ژنوتیپ کنجد هلیل و J1، عامل دوم اسموپرایمینگ بذر با نمک کلریدکلسیم ۲- بار (بهترین ترکیب تیماری انتخابی طی آزمایشی جداگانه که در اینجا آورده نشده است)، هیدروپرایمینگ و بدون پرایم، و عامل سوم تنش خشکی حاصل از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ بود که در سه سطح (بدون تنش)۰، ۲- و ۴- بار اعمال شد.

پتانسیل اسمزی مورد نظر برای محلولCaCl2 با استفاده از معادله وانت-هوف[1] (۱۳) محاسبه گردید

$$\Psi_s = iRTC$$ (رابطه ۱).

i= ضریب یونیزاسیون، R = ثابت گازها، T = درجه حرارت(کالوین)، C= غلظت (گرم در کیلوگرم آب)

۱-۲ اعمال تیمارهای اسموپرایم[2] و هیدروپرایم[3]:

پس از آماده سازی محلول‌ها، تعداد ۵۰ عدد بذر سالم از هر دو ژنوتیپ، در درون پتری دیش های شیشه ای ۹ سانتی متری حاوی ۵ میلی لیتر از محلول مورد نظر ($CaCl_2$ و آب مقطر) قرار داده شد. سپس درب پتری دیش ها جهت جلوگیری از تغییر غلظت محلول ها با پارافیلم محکم بسته شده و درون ژرمیناتور در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و پس از اتمام مدت زمان ۴ ساعت ، سه بار با آب مقطرآبشویی شدند(۱۴). بذرها پس از شسته شدن بر روی سینی‌های پلاستیکی و روی کاغذ خشک کن در اتاقک رشد به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شرایط تاریکی قرار داده شدند تا به رطوبت اولیه خود (۱۳-۱۴ درصد) برسند(۱۵).

۲-۲آماده سازی نمونه‌ها به منظور ارزیابی شاخص‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک

تنش خشکی حاصل از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ با استفاده از معادله میشل –کوفمان (رابطه ۵) محاسبه گردید(۱۶).

رابطه (۵)

$$\Psi s = -(1.18 \times 10\text{-}2)\ C - (1.18 \times 10\text{-}4)\ C2 + (2.6 \times 10\text{-}4)CT + (8.39 \times 10\text{-}7)C2T\Psi$$

T = درجه حرارت (کالوین)، Ψs = پتانسیل اسمزی (بار)، C = غلظت (گرم در کیلو گرم آب) ،

جوانه زنی در پتری دیش به صورت روی کاغذ بر اساس استانداردهای ایستا[4] انجام شد و پتری دیش ها در ژرمیناتور با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۵ درصد با ۱۶ ساعت تاریکی و ۸ ساعت روشنایی، قرار گرفتند(۱۷). پس از نمونه برداری در پایان مرحله جوانه زنی (بذرهایی جوانه زده محسوب می شدند که حداقل طول ریشه جه ۲ میلی متر باشد) یعنی زمانی که طی سه روز متوالی تعداد بذرهای جوانه زده ثابت (۱۴ روز بذور شمارش شدند) نمونه ها بلافاصله در نیتروژن مایع فریز شدند(۱۸) و سپس برای انجام آنالیزهای بیوشیمیایی به فریزر ۴۰- درجه سانتی گراد منتقل شدند.

---

[1] Van't Hoff

[2] Osmopriming

[۳] hydropriming

۴-ISTA

۳-۲ ارزیابی شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی طی مرحله جوانه زنی

استخراج پرولین از بذر یا گیاهچه تازه که بر پایه روش بیت[۱]، (۱۹۷۳۹) (۱۹) در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت و منحنی استاندارد رسم گردید. سنجش غلظت کل قندهای محلول گیاه با روش فنل- اسید سولفوریک برای اندازه گیری غلظت کل قندهای محلول، از روش AOAC، (۱۹۹۵) (۲۰)استفاده گردید. پس از ۴۵ دقیقه میزان جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۴۸۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومترUV-VISIBLE مقدار جذب مشخص و منحنی استاندارد رسم گردید. برای اندازه گیری عناصر کلسیم وپتاسیم گیاهچه های کنجد داخل آون در دمای ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند.سپس به آزمایشگاه منتقل وپس از آسیاب کردن درصد پتاسیم وکلسیم با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. بعد از جمع اوری داده ها با استفاده از نرم افزارSAS 9.4 مورد تجزیه واریانس قرار گرفت. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح معنی داری ۵ درصد انجام شد. نمودارها و اشکال با استفاده از نرم افزار Excel رسم شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ نتایج بررسی سازوکارهای بیوشیمیایی پرایمینگ

نتایج این آزمایش نشان داد که اثر ژنوتیپ، پرایمینگ و تنش خشکی شاخص‌های فیزیولوژیک مورد بررسی شامل پرولین ، قند محلول ، پتاسیم و کلسیم را در سطح آماری یک درصد تحت تاثیر قرار داده است(جدول ۱). اثرات متقابل تیمارهای مذکور نیز تمامی صفات به جز قند محلول را تحت تاثیر قرار داد. قند محلول تحت تاثیر اثر متقابل ژنوتیپ در پرایمینگ و تنش در پرایمینگ قرار نگرفت ($p<0.05$).

جدول ۱- میانگین مربعات اثر پرایمینگ بذر بر برخی صفات بیوشیمیایی گیاهچه کنجد در دو ژنوتیپ هلیل و J_1 در شرایط تنش خشکی و کنترل

منابع تغییرات	df	پرولین	قند محلول	پتاسیم	کلسیم
ژنوتیپ(E)	1	0.1843**	0.1717**	0.371**	4.83**
پرایمینگ(P)	2	0.0283**	0.0145**	0.148**	0.8807**
خشکی(D)	2	0.0761**	0.0561**	0.158**	0.2698**
E×P	2	0.0021**	0.0004ns	0.016 ns	0.2992**
D×E	2	0.0042**	0.0049**	0.045**	0.0599*
P×D	4	0.0039**	0.0007ns	0.0055*	0.1221**

۱ Bates

E×P×D	4	00.328**	0.0013*	0.018*	0.1067**
خطا	36	0.00012	0.00036	0.0056	0.0129
درصد ضریب تغییرات (CV٪)	-	2.7	5.9	11.4	17.97

ns، * و ** به ترتیب: غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح آماری ۵ و ۱ درصد

پرولین: بررسی مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد محتوای پرولین رقم هلیل نسبت به ژنوتیپ J_1 به طور معنی‌داری (بر اساس آزمون LSD در سطح آماری ۵درصد) بیشتر است، بررسی اثرات متقابل ژنوتیپ در پرایمینگ(جدول ۲) نیز حاکی از این است که پرایمینگ با کلرید کلسیم و حتی هیدروپرایمینگ محتوای پرولین گیاهچه در هر یک از ژنوتیپ ها را نسبت به بذرهایی که پرایم نشده بودند به طور معنی‌داری افزایش داده است اما نسبت این افزایش در دو ژنوتیپ یکسان نبود به طوری که میزان پرولین تحت تاثیر اسموپرایمینگ نسبت به بذر پرایم نشده در ژنوتیپ هلیل و J1 به ترتیب ۲۳/۶ و ۱۷/۷ درصد افزایش یافته است. همچنین اسموپرایمینگ نسبت به هیدروپرایمینگ از لحاظ محتوای پرولین گیاهچه برتری داشت به طوری که در هر دو ژنوتیپ افزایش معنی‌دار پرولین در اسموپرایمینگ نسبت به هیدروپرایمینگ مشاهده گردید (جدول ۲). بر اساس مشاهدات پژوهش حاضر، به نظر می رسد که پرایمینگ $CaCl_2$ به تقویت مقاومت به خشکی از طریق مکانیسم‌های اسمولیت هایی مانند پرولین می تواند کمک کند. پژوهش های دیگری در این راستا نیز نشان داده اند که پرایمینگ بذر کنجد می‌تواند باعث افزایش اسمولیت هایی مانند پرولین و قندهای محلول شده و مقاومت آن به تنش خشکی را افزایش دهد. به عنوان مثال، پرایمینگ بذر با اسید سالیسیک (هومون پرایمینگ)، سولفات روی و سولفات پتاسیم (اسموپرایمینگ) و آب مقطر (هیدروپرایم) بر روی سه ژنوتیپ کنجد (داراب ۱۴، اولتان و کرج) تحت شرایط تنش خشکی باعث افزایش قابل‌توجهی در پرولین نسبت به شاهد (بدون پرایم) و قند محلول شد.(۱۰). طویلی و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان داده اند که استفاده از پیش تیمار بذر سبب افزایش در میزان پرولین تحت شرایط تنش و عدم تنش خواهد شد که این تعییرات بیوشیمیایی منجر به تحمل گیاه در برابر تنش خواهد شد. (۲۱)

جدول۲ - اثر متقابل پرایمینگ بذر در ژنوتیپ‌های کنجد بر پرولین گیاهچه (میکرومول بر وزن تر)

	بدون پرایم	هیدروپرایمینگ	اسموپرایمینگ	میانگین اثرات ساده ژنوتیپ
ژنوتیپ هلیل	0.419 c	0.453 b	0.518 a	0.463 a
ژنوتیپJ_1	0.321 c	0.340 b	0.378 a	0.346 b
میانگین اثرات ساده پرایمینگ	0.370c	0.396 b	0.448 a	

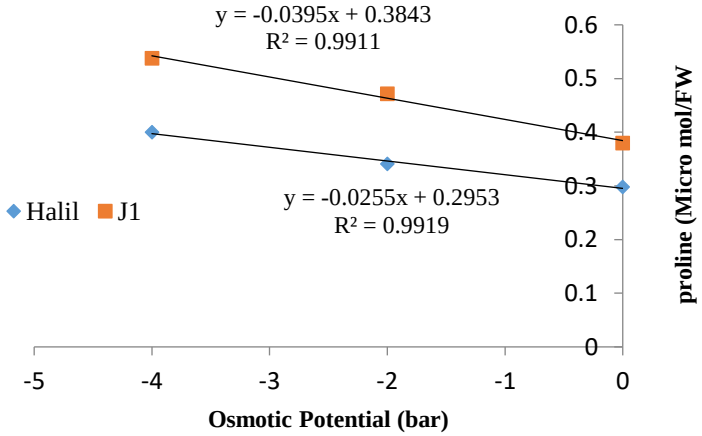
* در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

بررسی اثرات متقابل سطوح مختلف تنش خشکی در ژنوتیپ نشان داد که در ژنوتیپ هلیل میزان پرولین در سطح تنش ۴-بار نسبت ۲- بار و بدون تنش به ترتیب ۱۴ و ۴۱ درصد افزایش یافت و در حالی‌که در ژنوتیپ J1میزان پرولین در سطح تنش ۴-بار نسبت ۲- بار و بدون تنش به ترتیب ۱۷/۳ و ۳۴/۲ درصد بیشتر بود (جدول ۳). افزایش میزان پرولین تحت تاثیر تنش خشکی در تحقیقات دیگر نیز نشان شده است(۱۰, ۲۲). تغییرات تجمع پرولین در گیاهچه دو ژنوتیپ محتلف کنجد تحت تنش خشکی در شکل (۱) ارایه شده است، بر اساس این نتایج کاهش پتانسیل اسمزی باعث شده میزان پرولین به صورت خطی افزایش یابد (ضریب تباین برای هر دو ژنوتیپ > ۰/۹۹). اثر متقابل ژنوتیپ در تنش خشکی به صورت اختلاف شیب تجمع پرولین درژنوتیپ‌ها قابل مشاهده است.

جدول۳ -مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در ژنوتیپ‌های کنجد بر محتوای پرولین گیاهچه (میکرومول بر وزن تر)

ژنوتیپ	سطوح پتانسیل اسمزی (تنش خشکی)			میانگین اثرات ساده ژنوتیپ
	0 bar	-2 bar	-4bar	
هلیل	0.380 c	0.472 b	0.538 a	0.463 a
J_1	0.298c	0.341 b	0.400 a	0.346 b
میانگین اثرات ساده تنش خشکی	0.339 c	0.407 b	0.469 a	

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل۱ -اثر سطوح پتانسیل اسمزی (تنش خشکی) در ژنوتیپ‌های کنجد بر پرولین گیاهچه (میکرومول‌بر وزن تر)

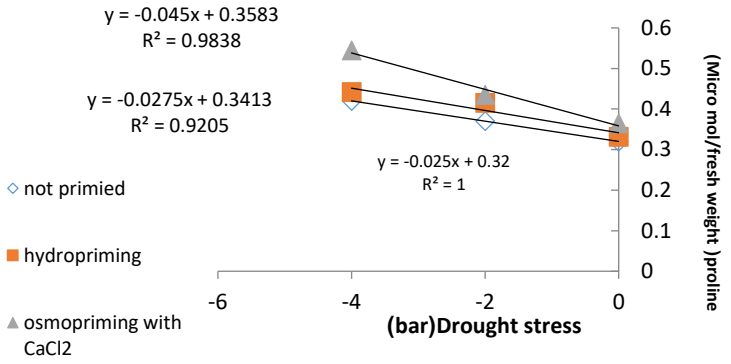
ژنوتیپ هلیل با رنگ آبی و j1 با رنگ قرمز مشخص شده است.

در این آزمایش تغییرات پرولین گیاهچه بذور پرایم شده در شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفت نتایج اثرات متقابل تنش خشکی در پرایمینگ نشان داد (جدول ۴) در گیاهچه‌های حاصل از بذور پرایم نشده نسبت پرولین در سطوح تنش ۴-بار و ۲- بار نسبت به کنترل به ترتیب ۳۱/۲ و ۱۵/۶ درصد افزایش یافته، در گیاهچه‌های حاصل از بذور هیدروپرایم شده، پرولین در سطوح تنش ۴-بار و ۲- بار نسبت به کنترل به ترتیب ۳۳/۱ و ۲۵ درصد افزایش یافته و در گیاهچه‌های حاصل از بذوری که تحت تاثیر اسموپرایمینگ با کلرید کلسیم بوده‌اند نسبت پرولین در سطوح تنش ۴-بار و ۲- بار نسبت به کنترل به ترتیب ۴۹/۳ و ۱۹/۲ درصد افزایش یافته بود. بنابراین هر چند میزان پرولین گیاهچه برای هر یک از سطوح بذر پرایم نشده، هیدروپرایمینگ و اسموپرایمینگ تحت تاثیر تنش خشکی به طور معنی‌دار (سطح ۵درصد بر اساس آزمون LSD) افزایش یافته است اما نسبت افزایش پرولین در هر یک از سطوح پرایمینگ و بدون پرایم یکسان نبود. نتایج تحلیل رگرسیونی ارایه شده در شکل۲ نیز نشان داد از یک طرف رابطه بین تغییرات پرولین گیاهچه و سطح پتانسیل اسمزی از یک رابطه خطی با شیب منفی و بسیار معنی‌دار تبعیت می‌کند که با کاهش سطح پتانسیل اسمزی (افزایش سطح تنش) مقدار پرولین افزایش می‌یابد و از طرف دیگر قدرمطلق شیب تغییرات پرولین در تیمار اسموپرایمینگ (۰/۰۴۵) بیشتر از تیمارهای هیدروپرایمینگ و بذر پرایم نشده (به ترتیب ۰/۰۲۷ و ۰/۰۲۵) بود، به عبارت دیگر اسموپرایمینگ باعث شده تا در شرایط کاهش سطح پتاسیل اسمزی (افزایش شدت تنش خشکی) میزان پرولین با شیب بیشتری نسبت به بذر پرایم نشده و حتی بذر هیدروپرایم شده در گیاهچه افزایش یابد. مصرف مواد تنظیم کننده رشد و اسید هیومیک باعث افزایش معنی دار میزان پرولین در بذر شده است به طوری که بیشترین مقدار آن در تیمار پرایمینگ بذر با اسید هیومیک وکمترین آن مربوط به تیمار شاهد (بدون پرایمینگ) بوده است(۲۳). پیش از این نیز گزارش شده است که است که استفاده از پیش تیمار بذر سبب افزایش در پرولین تحت شرایط تنش و عدم تنش خواهد شد که این تغییرات بیوشیمیایی سبب تحمل گیاه در برابر تنش خواهد شد(۲۱).

جدول۴- اثر پرایمینگ بذر در تنش خشکی بر محتوای پرولین گیاهچه (میکرومول بر وزن‌تر)

تنش خشکی	0 bar	-2 bar	-4 bar	میانگین **اثرات ساده پرایمینگ**
بدون پرایم	0.320 c	0.370 b	0.420 a	0.370 c
هیدروپرایمینگ	0.332 c	0.415 b	0.442 a	0.396 b
اسموپرایمینگ	0.365 c	0.435 b	0.545a	0.448 a
میانگین اثرات ساده تنش خشکی	0.339 c	0.407 b	0.469 a	

درهرسطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل۲ -اثر سطوح پتانسیل اسمزی (تنش خشکی) در شرایط مختلف پرایمینگ بذر بر محتوای پرولین گیاهچه کنجد (میکرومول بر وزن تر)

بذر پرایم نشده با رنگ آبی و هیدروپرایمینگ با رنگ قرمز و اسموپرایمینگ با رنگ خاکستری مشخص شده است.

قندهای محلول: تغییرات محتوای قند گیاهچه تحت تاثیر اثر متقابل پرایمینگ بذر در ژنوتیپ و پرایمینگ در تنش خشکی قرار نگرفت (جدول۱)، بنابراین نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات ساده پرایمینگ (جدول ۵) نشان داد قند محلول گیاهچه تحت تاثیر اسموپرایمینگ و هیدروپرایمینگ نسبت به گیاهچه حاصل از بذر پرایم نشده به طور معنی‌داری بیشتر بود به طوری که میزان قند محلول در تیمارهای اسموپرایمینگ و هیدروپرایمینگ به ترتیب ۷/۸ و ۱۹ درصد نسبت تیمار پرایم نشده افزایش یافته است. همچنین اثر اسموپرایمینگ بر افزایش این شاخص نسبت به هیدروپرایمینگ معنی‌دار بود. میزان قند محلول در رقم هلیل(۰/۳۷۷) به طور معنی‌داری بیشتر از ژنوتیپ J1 (۰/۲۶۴) است. در پژوهش حاضر ، به نظر می رسد، پرایمینگ با $CaCl_2$ باعث افزایش جذب یون و تثبیت غشایی شده که زمینه را برای تجمع اسمولیت‌هایی مانند پرولین و قندهای محلول فراهم می‌کند که البته در بین ژنوتیپ ها این افزایش متفاوت است. در مطالعه‌ای دیگر احمدوند و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که هیدروپرایمینگ و اوسموپرایمینگ بذر کنجد باعث افزایش قابل توجه شاخص‌های رشد گیاهچه‌ها تحت تنش خشکی شدند(۲۳). همچنین، در گزارش حیدریه و همکاران (۲۰۲۲) تفاوت قابل توجهی میان ارقام کنجد اولتان، داراب ۱۴ و کرج در پاسخ به پرایمینگ و تنش خشکی مشاهده شد که نشان دهنده اهمیت انتخاب رقم مناسب در برنامه‌های اصلاحی و مدیریتی است(۲۴).

جدول ۵ -مقایسه میانگین اثرات ساده پرایمینگ بذر بر محتوای قند محلول گیاهچه کنجد(میلی گرم بر گرم وزن تر)

اتواع پرایمینگ	بدون پرایم	هیدروپرایمینگ	اسموپرایمینگ
قند محلول	0.294 c	0.317 b	0.350 a

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

بررسی نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بر محتوای قند محلول گیاهچه کنجد نشان داد (جدول ۶) در هردو ژنوتیپ با افزایش سطح تنش خشکی، میزان این شاخص افزایش می‌یابد به طوری که برای هر دو ژنوتیپ احتلاف بین سطح تنش خشکی ۲- و ۴- بار به طور معنی‌داری (سطح ۵درصد) بیشتر از تیمار کنترل یا بدون تنش بود. اختلاف مشاهده شده در مورد نحوه تغییرات قند تحت تاثیر تنش خشکی در دو ژنوتیپ مورد مطالعه بیانگر نوع اثر متقابل و واکنش متفاوت ژنتیکی در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بود (شکل ۳). حیدریه و همکاران (۲۰۲۲) نیز در بررسی اثر پرایمینگ بر ویژگی های فیزیولوژیک کنجد نشان دادند که واکنش ارقام مختلف کنجد به تغییرات فیزیولوژیک از جمله میزان پرولین و قندهای محلول در شرایط تنش خشکی یکسان نبود (۱۰). بر اساس نتایج ایشان، بیشترین میزان پرولین در رقم کرج (۱/۲۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کم ترین مقدار آن در رقم اولتان (۱/۱۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. رقم اولتان بیشترین میزان قند محلول (۱/۰۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) در حالی که کم ترین میزان قند محلول در رقم کرج (۰/۹۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد.

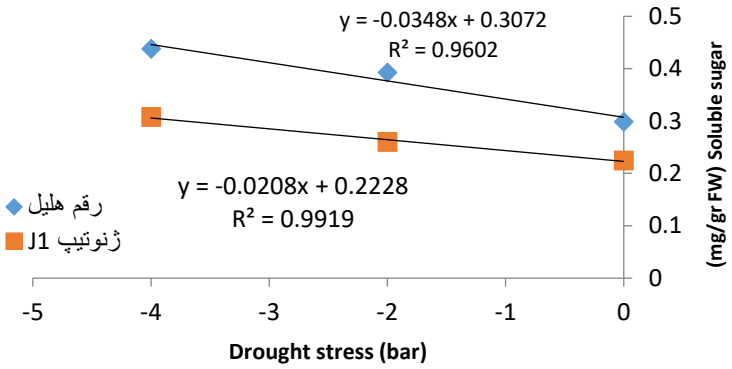
بر اساس نتایج حاصل، تغییرات قند محلول تحت تاثیر افزایش شدت تنش در دامنه مورد مطالعه (۰ تا ۴- بار) به صورت خطی با شیب منفی معنی‌دار (ضریب تباین برای ژنوتیپ های هلیل و J1 به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۹) بود و اختلاف دو ژنوتیپ مورد مطالعه در مقدار شیب تغییرات قند محلول بود به طوری که روند افزایش قند محلول تحت تاثیر افزایش شدت تنش در رقم هلیل بیشتر از ژنوتیپ J1 بود.بر اساس این نمودارافزایش قند محلول درسطح تنش ۴-بار نسبت به کنترل در ژنوتیپ های هلیل و J1 به ترتیب ۴۶/۴٪ و ۳۶/۸٪بود. در مطالعه باقری و همکاران[1] (۲۰۲۳) در ژنوتیپ مقاوم کنجد به تنش خشکی(SaSiG004)، میزان قندهای محلول تا ۱۵۲٪ در مقایسه با شرایط غیرتنش افزایش یافت. در ژنوتیپ حساس (SaSiG006) نیز افزایش مشاهده شد، اما کمتر از ژنوتیپ مقاوم بود.(۲۴).

جدول۶-مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در ژنوتیپ‌های کنجد بر محتوای قند محلول گیاهچه (mg/gr FW)

تنش خشکی	0 bar	-2 bar	-4bar	میانگین اثرات ساده ژنوتیپ
ژنوتیپ هلیل	0.299 c	0.393 b	0.438 a	0.377 a
ژنوتیپ J_1	0.225 c	0.260 b	0.308 a	0.264 b
میانگین اثرات ساده تنش خشکی	0.262 c	0.327 b	0.373 a	

[1] Bagheri *et al*.

در هر سطر میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل ۳ -منحنی تغییرات قند محلول گیاهچه گنجد تحت تاثیر تنش خشکی در شرایط آزمایشگاه (پلی اتیلن گلایکول) در هر یک از ژنوتیپ‌های مورد مطالعه

ژنوتیپ هلیل با رنگ آبی و j1 با رنگ قرمز مشخص شده است.

پتاسیم: بررسی تاثیر پرایمینگ بر تغییرات پتاسیم گیاهچه در ژنوتیپ های مختلف (جدول۷) نشان داد هیدروپرایمینگ فقط در ژنوتیپ هلیل تاثیر معنی‌داری بر این شاخص دارد اما اسموپرایمینگ پتاسیم را در گیاهچه هر دو ژنوتیپ به طور معنی‌دار (بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد) افزایش داده است. بر اساس نتایج حاصل، مقدار پتاسیم ژنوتیپ هلیل بیشتر از ژنوتیپ J1 است.

جدول۷- اثر متقابل پرایمینگ بذر در ژنوتیپ‌های کنجد بر غلظت پتاسیم گیاهچه (ppm)

	بدون پرایم	هیدروپرایمینگ	اسموپرایمینگ	**میانگین اثرات ساده ژنوتیپ**
ژنوتیپ هلیل	0.629c	0.711 b	0.866 a	0.735 a
ژنوتیپJ_1	0.518b	0.554b	0.637a	0.569 b
میانگین اثرات ساده پرایمینگ	0.573 b	0.633 b	0.752 a	

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

بررسی نتایج اثر تنش خشکی بر میزان پتاسیم گیاهچه در دو ژنوتیپ مورد مطالعه کنجد نشان داد (جدول ۸) فقط در ژنوتیپ هلیل واکنش گیاه به افزایش شدت تنش خشکی از لحاظ آماری معنی دار بوده است (۵درصد بر اساس آزمون LSD) در این ژنوتیپ نیز سطح پتانسیل اسمزی ۴-بار منجر به افزایش معنی‌دار

پتاسیم گردید. در ژنوتیپ J1 مقدار پتاسیم گیاهچه تا سطح پتانسیل اسمزی ۴-بار هیچ گونه تفاوت معنی-داری نشان نداد.

جدول۸ -مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح تنش خشکی در ژنوتیپ‌های کنجد بر غلظت پتاسیم گیاهچه (ppm)

	0 bar	-2 bar	-4bar	میانگین اثرات ساده ژنوتیپ
ژنوتیپ هلیل	0.624 b	0.688 b	0.894a	0.735 a
ژنوتیپJ_1	0.513 b	0.583ab	0.613 a	0.569 b
میانگین اثرات ساده تنش	0.568 c	0.636 b	0.753 a	

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

بررسی اثر پرایمینگ بذر بر میزان پتاسیم در گیاهچه کنجد در شرایط تنش خشکی نشان داد (جدول ۹) تنش خشکی در هر سه شرایط پرایمینگ و حتی بدون پرایم میزان پتاسیم گیاهچه را به طور معنی‌دار افزایش داده است اما نسبت این تغییرات در بین تیمارهای بذر پرایم نشده، هیدروپرایمینگ و اسمو پرایمینگ متفاوت بود. در شرایط بذر پرایم نشده و هیدروپرابمینگ تنش خشکی در سطح پتانسیل اسمزی ۲-بار تاثیر معنی‌داری بر میزان پتاسیم نداشت اما افزایش شدت تنش در سطح ۴-بار اختلاف میزان پتاسیم را افزایش داد. در شرایط اسموپرایمینگ بذر میزان پتاسیم در هر دو سطوح ۲- و ۴- بار به طور معنی‌داری نسبت به تیمار کنترل یا بدون تنش افزایش یافت، ضمنا اختلاف این دو ۲- و ۴- بار نیز معنی‌دار نبود. غلظت و مدت پرایم همراه با نوع گونه بر بهینه سازی اثر تیمار کلریدکلسیم نقش مهمی دارد. سایر پژوهش های پیشین نیز نشان داده است که پرایمینگ با کلریدکلسیم سبب افزایش غلظت K و Ca، افزایش فعالیت آنزیم-α آمیلاز و کاهش میزان مواد قندی در بذر و گیاهچه می گردد(۲۵). احمد و همکاران (۲۰۱۹) نیز در تحقیقی نشان دادند که پرایمینگ بذر باعث افزایش غلظت کلسیم و پتاسیم در گندم و موجب بهبود تنظیم اسمزی و حفظ ساختار غشایی در شرایط تنش خشکی و کم آبی شد ه است

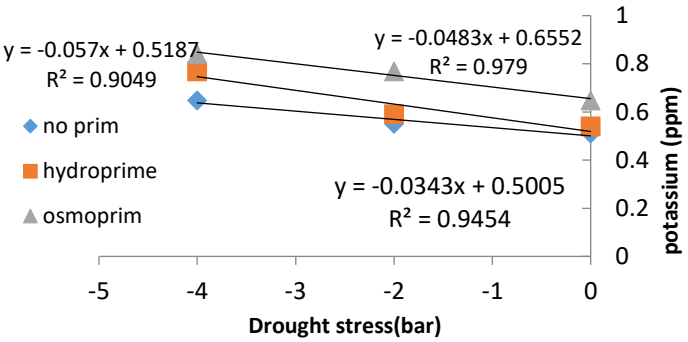
روند تغییرات پتاسیم تحت تاثیر کاهش پتانسیل اسمزی در شکل۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شیب افزایش غلظت پتاسیم در اثر کاهش پتانسیل اسمزی برای تیمارهای مختلف پرایمینگ یکسان نمی‌باشد، در واقع هرچند غلظت پتاسیم در شرایط هیدروپرایمینگ کمتر از اسموپرایمینگ است اما قدرمطلق شیب تغییرات آن بیشتر است.

جدول۹- اثر متقابل پرایمینگ بذر در سطوح تنش خشکی بر غلظت پتاسیم گیاهچه (ppm)

تنش خشکی	0 bar	-2 bar	-4 bar	میانگین اثرات ساده پرایمینگ
بدون پرایم	0.510 b	0.550 b	0.661 a	0.573 b
هیدروپرایمینگ	0.540 b	0.590 b	0.760 a	0.633 b

اسموپرایمینگ	0.647 b	0.768 a	0.840 a	0.751 a
میانگین اثرات ساده تنش خشکی	0.568 c	0.636 b	0.753 a	

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل ۴ - منحنی تغییرات پتاسیم گیاهچه کنجد تحت تاثیر تنش خشکی در شرایط آزمایشگاه (پلی اتیلن گلایکول) در هر یک از سطوح مختلف تیمارهای پرایمینگ

بذر پرایم نشده با رنگ آبی و هیدروپرایمینگ با رنگ قرمز و اسموپرایمینگ با رنگ خاکستری مشخص شده است.

کلسیم: نتایج حاصل از بررسی اثر متقابل پرایمینگ بذر در ژنوتیپ‌های کنجد در جدول ۱۰ ارایه شده است. بر اساس این نتایج، پرایمینگ تاثیر متفاوتی بر غلظت کلسیم در دو ژنوتیپ مورد مطالعه داشته است، به طوری که در ژنوتیپ هلیل اثر اسموپرایمینگ و هیدروپرایمینگ افزایش معنی‌دار (بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد) غلظت کلسیم را باعث شده است در حالیکه در ژنوتیپ J1فقط اسموپرایمینگ باعث افزایش معنی‌دار غلظت کسیم گردید و هیدروپرایمینگ تاثیر معنی‌داری بر این صفت در این ژنوتیپ نداشت. فرودل و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان دادند اسموپرایمینگ با کلرید کلسیم نسبت به هیدروپرایمینگ (۲۶)، بیشترین اثرات مثبت را در شاخصهای رشدی گیاهچه کنجد داشته است البته بر اساس نتایج اثرات ساده (جدول۱۰) میزان کلسیم گیاهچه در ژنوتیپ هلیل بیشتر از رقم J1 است. در مطالعه ایرفان[1] و همکاران (۲۰۲۴)، گیاهچه‌های پرایم شده کنجد (TS-5 و TH-6) در شرایط شوری، افزایش معنی‌داری در میزان کلسیم و پتاسیم نسبت به نمونه‌های شاهد نشان دادند. تفاوت‌های ژنتیکی نیز در این زمینه مشاهده شده است؛ رقم TH-6 توانایی بیشتری در جذب و استفاده بهینه از این عناصر را نسبت به TS-5 پس از پرایم شدن را از خود نشان داد.

[1] Irfan *et al.*

جدول۱۰ - مقایسه میانگین اثر متقابل پرایمینگ بذر در ژنوتیپ‌های کنجد بر غلظت کلسیم گیاهچه (ppm)

ژنوتیپ	بدون پرایم	هیدروپرایمینگ	اسموپرایمینگ	میانگین اثرات ساده ژنوتیپ
هلیل	0.592 c	0.913 b	1.292 a	0.932 a
J_1	0.243b	0.330 ab	0.427 a	0.334 b
میانگین اثرات ساده پرایمینگ	0.4178 c	0.621 b	0.859 a	

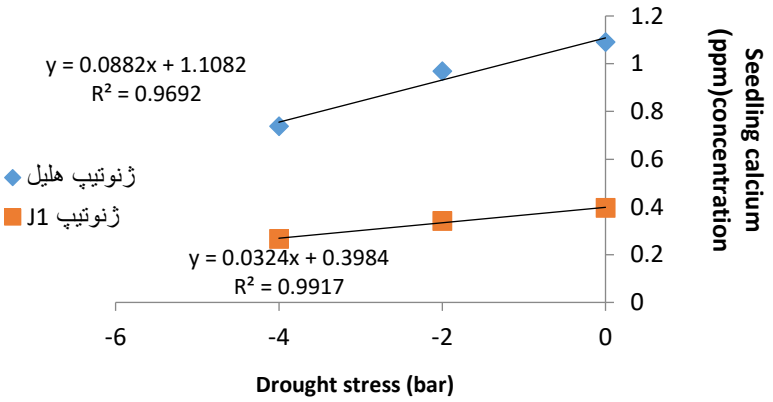
در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

بررسی تغییرات غلظت کلسیم گیاهچه تحت اثر متقابل سطوح تنش خشکی در ژنوتیپ‌های کنجد (جدول ۱۱) نشان داد واکنش گیاهچه از لحاظ غلظت کلسیم (ppm) در دو ژنوتیپ مورد مطالعه به تنش خشکی اعمال شده در محیط آزمایشگاه متفاوت بود. در ژنوتیپ هلیل هریک از سطوح تنش خشکی ۲-بار و ۴- بار باعث کاهش معنی‌دار (در سطح ۵درصد) غلظت کلسیم در گیاهچه گردید ولی در ژنوتیپ J1 کاهش غلظت کلسیم فقط در سطح تنش ۴-بار معنی‌دار بود. تحلیل رگرسیونی ارایه شده در شکل ۵ نیز بیانگر این مطلب است شیب کاهش غلظت کلسیم در اثر افزایش شدت تنش خشکی (کاهش پتانسیل اسمزی) در ژنوتیپ هلیل بیشتر ژنوتیپ J1 است اما با این حال غلظت کلسیم گیاهچه در ژنوتیپ هلیل به طور معنی‌دار بیشتر از J1 بود (مقایسه میانگین اثرات ساده در انتهای جدول ۱۱). واکنش متفاوت ارقام و ژنوتیپ های مختلف کنجد در شرایط تنش خشکی در تحقیقات دیگر نیز نشان داده شده است(۲۳) حیدریه و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی اثر پرایمینگ بذر بر ویژگیهای فیزیولوژیک ارقام مختلف کنجد بیان کردند (۱۲) که ارقام کرج، دارب و اولتان واکنشهای متفاوتی به پرایمینگ و تنش خشکی نشان دادند. در اکثر صفات فیزیولوژیک رقم کرج بالاترین میزان و رقم اولتان کمترین میزان را نشان داد. فرودل و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی تاثیر پرایمینگ بذر بر رشد گیاهچه کنجد تحت تنش شوری نشان دادند که بین ارقام تفاوت‌های ژنتیکی مشاهده شد؛ ارقام مقاوم توانایی بیشتری در جذب و استفاده بهینه از این عناصر پس از پرایم شدن را دارند(۲۶).

جدول ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح تنش خشکی در ژنوتیپ‌های کنجد بر غلظت کلسیم گیاهچه (ppm)

ژنوتیپ	0 bar	-2 bar	-4bar	میانگین اثرات ساده ژنوتیپ
هلیل	1.091 a	0.968 b	0.737 c	0.932 a
J_1	0.3950 a	0.3405 ab	0.2655 b	0.334 b
میانگین اثرات ساده تنش خشکی	0.743a	0.655 a	0.501 b	

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.



شکل۵- منحنی تغییرات کلسیم گیاهچه ارقام کنجد تحت تاثیر تنش خشکی در شرایط آزمایشگاه (پلی اتیلن گلایکول)

ژنوتیپ هلیل با رنگ آبی و j1 با رنگ قرمز مشخص شده است.

بررسی اثر پرایمینگ بذر کنجد بر تغییرات غلظت کلسیم در شرایط تنش خشکی و کنترل نشان داد (جدول ۱۲) در شرایطی که بذرکنجد پرایم نشده بود، کاهش معنی دار (سطح احتمال ۵درصد) غلظت کلسیم در سطح تنش خشکی ۲- بار نسبت به کنترل (بدون تنش) اتفاق افتاد و در سطح تنش ۴-بار نیز این کاهش به طور معنی‌دار ادامه داشت در حالیکه در شرایط هیدرو پرایمینگ و اسموپرایمینگ در سطح تنش ۲- بار تغییرات معنی‌داری درغلظت کلسیم گیاهچه نسبت به تیمار کنترل (بدون تنش) مشاهده نشده و کاهش غلظت کلسیم فقط در سطح تنش خشکی ۴-بار از لحاظ آماری معنی‌دار بود. در مطالعه‌ای بر روی کنجد رقم تیلوتاما[1]، پرایمینگ با $CaCl_2$ باعث افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی غلظت کلسیم در برگ‌ها و ریشه‌ها در شرایط تنش خشکی شد. پرایمینگ بذر ممکن است باعث افزایش فعالیت کانال‌ها و پمپ‌های یونی شود که جذب پتاسیم و کلسیم را تسهیل می‌کنند.

جدول۱۲- مقایسه میانگین اثر متقابل پرایمینگ بذر در تنش خشکی بر غلظت کلسیم گیاهچه (ppm)

تنش خشکی	0 bar	-2 bar	-4 bar	میانگین
بدون پرایم	0.6425 a	0.2808 b	0.330 b	0.4178 c
هیدروپرایمینگ	0.602 ab	0.722 a	0.540 b	0.621 b
اسموپرایمینگ	0.985 a	0.961 a	0.633 b	0.859 a
میانگین	0.743a	0.655 a	0.501 b	

در هر سطر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

مقایسه میانگین اثرات ساده نیز نشان داد غلظت کلسیم گیاهچه در شرایط اسموپرایمینگ بذر (۰/۸۵۹ ppm) نسبت به هیدروپرایمینگ به طور معنی‌داری بیشتر بود همچنین اختلاف هیدروپرایمینگ بذر (۰/۶۲۱ ppm) نیز نسبت به بذر پرایم نشده بذر (۰/۴۱۷ppm) اختلاف معنی‌داری نشان داد، در واقع در شرایط اسموپرایمینگ و هیدروپرایمینگ غلظت کلسیم گیاهچه نسبت به بذر پرایم نشده به ترتیب به میزان ۱۰۵/۶ و ۲۰/۳ درصد افزایش یافته است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پرایمینگ بذر با اسموپرایمنگ هایی مثل کلسیم کلراید ($CaCl_2$) و تیواوره (Thiourea) نسبت به بذور فاقد پرایم (شاهد)، باعث افزایش غلظت پتاسیم و کلسیم در گیاهان تحت تنش خشکی شد **(۲۷).**

بر اساس این مشاهدات پرایمینگ بذر، میزان کلسیم گیاهچه کنجد را نسبت به حالت بدون پرایم افزایش داده است و از طرف دیگر، پرایمینگ بذر سطح غلظت کلسیم در شرایط تنش خشکی را حداقل تا سطح تنش ملایم (۲-بار) حفظ نموده و از کاهش معنی‌دار آن ممانعت نموده است. در تحقیقی کومار و همکاران (۲۰۲۳) در پرایمینگ بذر کنجد با محلول‌های کلسیم کلراید ، تیواوره، و سالیسیلیک اسید نشان دادند که پرایمینگ با

[1] Thilothama

کلسیم کلراید باعث بهبود مقاومت به خشکی از طریق بهبود جذب کلسیم و تنظیم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. پرایمینگ بذر با ترکیبات شیمیایی مختلف یک استراتژی موثر برای مقابله با تنش خشکی در کنجد است. انتخاب ترکیب مناسب می‌تواند بسته به شرایط اقلیمی، نوع تنش و ژنوتیپ گیاه متفاوت باشد. تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب‌های مختلف از طریق تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، تنظیم هورمونی و تعادل یونی، باعث افزایش مقاومت و بهبود رشد گیاهان تحت تنش خشکی می‌شوند.

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد در هردو ژنوتیپ با افزایش سطح تنش خشکی، میزان پرولین و قند محلول افزایش می‌یابد به طوری که برای هر دو ژنوتیپ احتلاف بین سطح تنش خشکی ۲- و ۴- بار به طور معنی‌داری (سطح ۵درصد) بیشتر از تیمار کنترل یا بدون تنش بود. در شرایط تنش خشکی تاثیر اسموپرایمینگ نسبت به هیدروپرایمینگ بر افزایش پرولین و تجمع آن در گیاهچه به طور معنی¬داری ($P<0.05$) بیشتر بود، قند محلول در گیاهچه¬های حاصل از اسموپرایمینگ و هیدروپرایمینگ نسبت به گیاهچه¬های حاصل از بذرپرایم نشده به طور معنی¬داری بیشتر بود، از طرف دیگر اختلاف غلظت قند محلول در تیمار اسموپرایمینگ نسبت به بذر پرایم نشده در مقایسه با تیمار هیدروپرایمینگ نسبت به بذر پرایم نشده به میزان ۲/۵ برابر بیشتر بود. در هر دو ژنوتیپ هیدروپرایمینگ تاثیر معنی‌داری بر غلظت پتاسیم نداشت اما اسموپرایمینگ پتاسیم را در هر دو ژنوتیپ به طور معنی‌دار($P<0.05$) افزایش داد. اسموپرایمینگ میزان پتاسیم را در هر دو سطوح ۲- و ۴- بار به طور معنی‌داری نسبت به تیمار کنترل یا بدون تنش خشکی افزایش داد در حالی که در تیمارهای بذر پرایم نشده و هیدروپرابمینگ افزایش معنی‌دار میزان پتاسیم فقط در سطح تنش خشکی ۴-بار اتفاق افتاد. غلظت کلسیم گیاهچه در تیمار پرایم نشده در هر دو سطح تنش خشکی ۲- بار و ۴-بار نسبت به کنترل (بدون تنش) بطور معنی‌دار($P<0.05$) کاهش یافت در حالی که کاهش غلظت کلسیم تحت تاثیر تیمارهای هیدرو پرایمینگ و اسموپرایمینگ فقط در شرایط تنش خشکی ۴- بار مشاهده شد.

فهرست منابع

1. Afzal I, Rauf S, Basra S, Murtaza G. Halopriming improves vigor, metabolism of reserves and ionic contents in wheat seedlings under salt stress. Plant Soil Environ. 2008;54(9):382–8.
2. Abbasdokht H. The effect of hydropriming and halopriming on germination and early growth stage of wheat (Triticum aestivum L.). 2011.
3. McDonald MB. Seed priming. Seed technology and its biological basis Sheffield Academic Press, Sheffield. 2000:287–325.
4. Pirasteh-Anosheh H, Emam Y, Ashraf M. Impact of cycocel on seed germination and growth in some commercial crops under osmotic stress conditions. Archives of Agronomy and Soil Science. 2014;60(9):1277–89.
5. Movaghatian A, Khorsandi F. Germination of Carum copticum under salinity stress as affected by salicylic acid application. Annals of Biological Research. 2014;5(2):105–10.

6. Galhaut L, de Lespinay A, Walker DJ, Bernal MP, Correal E, Lutts S. Seed priming of Trifolium repens L. improved germination and early seedling growth on heavy metal-contaminated soil. Water, Air, & Soil Pollution. 2014;225(4):1905.
7. Ashraf M, Rauf H. Inducing salt tolerance in maize (Zea mays L.) through seed priming with chloride salts: Growth and ion transport at early growth stages. Acta physiologiae plantarum. 2001;23:407–14.
8. Pourghasemian N, Moradi R. Alleviating drought stress in sesame seedling by priming and irrigation of beeswax waste and licorice extracts. Iranian Journal of Seed Sciences and Research. 2021;8(1):45–62.
9. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and earth system sciences. 2007;11(5):1633–44.
10. Heidariyeh Z, Jafari AR, Ebrahimi HR, Haghighi BJ, Miri HR. The effect of priming on physiological and yield characteristics of different sesame varieties under drought stress. 2022.
11. Ayana NG. Status of production and marketing of Ethiopian sesame seeds (Sesamum indicum L.): a review. Agricultural and Biological Sciences Journal. 2015;1(5):217–23.
12. Heidarieh Z, Jafari A, Erahimi H, Jafarai Haghighi B, Miri HR. The effect of priming on physiological and yield characteristics of different sesame varieties under drought stress. Journal of Plant Production Research. 2022;29(3):165–87.
13. Alizadeh A. The relationship between water, soil and plants. Astan Quds Razavi Publications. 2011;484.
14. Iqbal M, Ashraf M, editors. Wheat seed priming in relation to salt tolerance: growth, yield and levels of free salicylic acid and polyamines. Annales Botanici Fennici; 2006: JSTOR.
15. Jowkar Tangkarami M. The effect of seed priming on some physiological and biochemical characteristics of milk thistle (Silybum marianum) seed under salt stress: University of zabol; 2012.
16. Michel BE, Kaufmann MR. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant physiology. 1973;51(5):914–6.
17. Anon Y. International rules for seed testing. Seed Science and Technology. 1985;13(2):299–520.
18. JOKAR TM, Ghanbari A, Moradi F. The evaluation of salt stress effect on antioxidant enzymes activity in seedling induced of Milk thistle primed seeds. 2016.
19. Bates LS, Waldren R, Teare I. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and soil. 1973;39:205–7.
20. Cunniff P. Association of official analytical chemists. Official Methods of AOAC Analysis. 1995.
21. Tavili A, Saberi M, Shahriari A, Heidari M. Salicylic acid effect on Bromus tomentellus germination and initial growth properties under cadmium stress. 2013.
22. Saljoghi A, Fattahi M, Mortazavi SR. Investigation of the Effect of Drought Stress on the Morpho-physiological Characteristics of the Lallemantia Plant (Lallemantia iberica L.) in Different Levels of Humic Acid. Karafan Journal. 2024;20(4):407–22.
23. Saljoghi A, Fattahi M, Mortazavi SR. Investigation of the effect of drought stress on the morpho-physiological characteristics of the lallemantia plant (Lallemantia iberica L.) in different levels of humic acid. 2023.

24. Baghery MA, Kazemitabar SK, Dehestani A, Mehrabanjoubani P. Sesame (Sesamum indicum L.) response to drought stress: susceptible and tolerant genotypes exhibit different physiological, biochemical, and molecular response patterns. Physiology and Molecular Biology of Plants. 2023;29(9):1353–69.
25. Kaczmarek M, Fedorowicz-Strońska O, Głowacka K, Waśkiewicz A, Sadowski J. CaCl 2 treatment improves drought stress tolerance in barley (Hordeum vulgare L.). Acta Physiologiae Plantarum. 2017;39:1–11.
26. Ferodel S, Sadrabadi Haghighi R, Nabavi Kalat S. Effect of seed priming on seedling growth of sesame (Sesamum indicum L.) under salt stress. Iranian Journal of Field Crops Research. 2011;9(3):535–42.
27. Irfan B, Shahbaz M, Mukhtiar A, Akram MZ, Bashir MA, Asghar S, et al. Seed priming with thiourea enhances the performance of sesame (Sesamum indicum L.) varieties under salinity stress. Sarhad Journal of Agriculture. 2024;40(3):740–53.