Effect of Medaxtop on grain yield, seed quality and physiological characteristics of two open-pollinated forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars

H. Alishahi[1], M. AghaAlikhani[1*], F. Golzardi[2], F. Moradi[3]

1- Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3- Agricultural Biotechnology Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

* Corresponding Author: maghaalikhani@modares.ac.ir

Introduction

Forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), a drought-tolerant C_4 crop, is increasingly vital for sustainable livestock feed production in arid and semi-arid regions like Iran, where climate change and water scarcity threaten agricultural productivity. Despite its resilience, the limited availability of high-quality seeds hampers its widespread adoption. Plant growth regulators (PGRs), such as Medax Top (containing mepiquat chloride and prohexadione calcium), offer a promising approach to enhance grain yield and seed quality by modulating plant growth and assimilate allocation. This study aimed to evaluate the effects of Medax Top foliar application on grain yield, seed quality, and physiological traits of two open-pollinated forage sorghum cultivars under water-limited conditions, providing insights into optimizing seed production for sustainable agriculture.

Materials and Methods

A two-year field experiment (2023-2024) was conducted at the Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran, using a factorial split-plot of treatment arrangement in complete randomized block design with three replications. Main plots comprised factorial combination of Medax Top doses (0, 0.5, 1, and 2 L ha^{-1}) and application timings (3-4 and 6-8 leaf stages), while subplots included two sorghum cultivars (Mansour and Behesht). The trial was established in a semi-arid climate (265 mm annual rainfall, 14°C mean temperature) with drip irrigation. Measured traits included leaf SPAD-value, leaf area index (LAI), grain yield, seed germination percentage, grain starch, total carbohydrates, soluble sugars, and forage yield. Data were analyzed using SAS 9.1, with means compared via LSD's test ($P \leq 0.05$) after confirming variance homogeneity across years.

Results and Discussion

Medax Top application significantly influenced physiological and agronomic traits. As the application rate of Medax Top increased, leaf SPAD -value, grain yield, grain starch content, carbohydrates, soluble sugars and seed germination percentage significantly increased. However, these positive changes were accompanied by a reduction in LAI and forage yield. Foliar application at the 3-4 leaf stage, compared to the 6-8 leaf stage, significantly increased starch content and grain yield while decreasing forage yield. Application at the 3-4 leaf stage yielded higher grain production

(2976 kg ha^{-1}) than the 6-8 leaf stage (2723 kg ha^{-1}), likely due to reduced competition between vegetative and reproductive sinks in early development duration. The 2 L ha^{-1} of Medax Top maximized grain yield and germination percentage, alongside enhancing SPAD-value and carbohydrate content, reflecting improved photosynthetic efficiency and assimilate storage. However, forage yield decreased by 34% at this dose, indicating a shift in resource allocation from vegetative to reproductive growth. The Mansour cultivar demonstrated significant superiority over the Behesht in terms of starch content, carbohydrates, soluble sugars, and forage yield, showcasing superior genetic potential. The maximum grain soluble sugar content (6.88%) was observed in the Mansour cultivar with a ModaxTop application rate of 2 L ha^{-1} in the first year, while the highest grain yield (4542 kg ha^{-1}) was achieved in the same cultivar with a dose of 1 L ha^{-1} in the second year. Lower doses (0.5-1 L ha^{-1}) better supported forage production, balancing vegetative biomass retention.

Conclusion

This study demonstrates that Medax Top foliar application effectively enhances grain yield and seed quality in open-pollinated forage sorghum cultivars, with the 2 L ha^{-1} dose applied at the 3-4 leaf stage being optimal for seed production, particularly in the Mansour cultivar. For forage-focused systems, lower doses are recommended to minimize biomass loss. Overall, a Medax Top foliar application at 2 L ha^{-1} is recommended for producing seeds of appropriate quantity and quality, while a 1 L ha^{-1} dose is advisable for simultaneous seed and forage production. These findings underscore the potential of plant growth regulators in tailoring sorghum cultivation to specific goals—seed or forage—in water-scarce regions, contributing to agricultural resilience and food security.

Acknowledgement

The authors express gratitude to the Seed and Plant Improvement Institute, the Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO) for providing laboratory facilities and technical support in this research [Project number 03-03-0305-024-010312]. Also, thanks to the support of the Vice Chancellor for Research and Technology of Tarbiat Modares University.

Keywords: Germination percentage, Leaf area index, Plant growth regulator, Soluble sugar, Starch

تأثیر مداکس‌تاپ بر عملکرد دانه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک دو رقم سورگوم علوفه ای آزادگرده‌افشان (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)

حسن علیشاهی[۱]، مجید آقاعلیخانی[۱*]، فرید گل‌زردی[۲]، فواد مرادی[۳]

۱- گروه زراعت دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*نویسنده مسئول : maghaalikhani@modares.ac.ir

چکیده

تأثیر تنظیم‌کننده رشد مداکس‌تاپ بر عملکرد دانه، کیفیت بذر، عملکرد علوفه و شاخص‌های فیزیولوژیک دو رقم آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای طی آزمایشی به‌صورت فاکتوریل اسپلیت‌پلات در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در کرج بررسی شد. عامل‌های آزمایش شامل دُز (صفر، نیم، یک و دو لیتر در هکتار) و زمان محلول‌پاشی مداکس‌تاپ (مراحل ۴-۳ و ۸-۶ برگی) در کرت‌های اصلی و ارقام منصور و بهشت در کرت‌های فرعی بودند. با افزایش دُز مصرف مداکس‌تاپ، شاخص سبزینگی برگ، محتوای نشاسته، کربوهیدرات‌ها، قندهای محلول، عملکرد دانه و درصد جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد، اما این تغییرات با کاهش شاخص سطح برگ و عملکرد علوفه همراه بود. محلول‌پاشی در مرحله ۳-۴ برگی نسبت به مرحله ۸-۶ برگی، محتوای نشاسته و عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری افزایش و عملکرد علوفه را کاهش داد. دُز دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ، در مرحله ۴-۳ برگی بالاترین عملکرد دانه را به همراه داشت. رقم منصور از نظر صفات کیفی و عملکرد علوفه برتری معنی‌داری نسبت به رقم بهشت داشت. افزایش محتوای قندهای محلول دانه رقم منصور با کاربرد دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ در سال اول نسبت به شاهد ۲۳/۲٪ و بیشترین عملکرد دانه (۴۵۴۲ کیلوگرم در هکتار) با دُز یک لیتر در هکتار در سال دوم (با افزایش ۶۸/۱ درصد نسبت به شاهد) به‌دست آمد. در مجموع محلول‌پاشی مداکس‌تاپ با دُز دو لیتر در هکتار برای تولید بذر با کمیت و کیفیت مناسب و دُز یک لیتر در هکتار برای تولید همزمان دانه و علوفه قابل‌توصیه است.

واژه‌های کلیدی: تنظیم‌کننده رشد، درصد جوانه‌زنی، شاخص سطح برگ، قندهای محلول، نشاسته

مقدمه

کاهش منابع آب، تغییرات اقلیمی و گسترش خشکسالی‌ها، با کاهش عملکرد و کیفیت محصولات زراعی، امنیت غذایی را به خطر انداخته است (Tavazoh *et al*., 2024)؛ بنابراین، یافتن راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف آب و انتخاب گیاهان زراعی متحمل به کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بسزایی برخوردار است (Baghdadi *et al*., 2023). سورگوم (*Sorghum bicolor* L. Moench) به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تولید پایدار علوفه و دانه، نقش مهمی در تأمین خوراک دام و طیور و حتی تغذیه انسان در مناطق کم‌آب ایفا می‌کند (Pourali *et al*., 2023). در میان انواع سورگوم، ارقام علوفه‌ای آزادگرده‌افشان به دلیل سازگاری با شرایط محلی، هزینه تولید پایین‌تر و وابستگی کمتر به نهاده‌های خارجی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند (Ghalkhani *et al*., 2023). این ارقام در مقایسه با هیبریدها که اغلب به شرایط بهینه کشت و دسترسی به بذرهای وارداتی وابسته‌اند، می‌توانند با حداقل منابع، عملکرد قابل قبولی ارائه دهند و از این رو، گزینه‌ای پایدار برای کشاورزی در مناطق کم‌آب به شمار می‌روند (Mirahki *et al*., 2023). با این حال، یکی از موانع اصلی در توسعه کشت این ارقام در ایران، کمبود بذر با کیفیت و کافی است که تولید پایدار آن را با مشکل مواجه کرده است.

تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی با تأثیر بر مسیرهای هورمونی، به‌ویژه از طریق مهار سنتز جیبرلین‌ها، می‌توانند تعادل بین رشد رویشی و زایشی را تنظیم کرده و ویژگی‌های مطلوب زراعی را تقویت کنند (Rademacher, 2015). با کاربرد دقیق و کنترل‌شده تنظیم‌کننده‌های رشد می‌توان پتانسیل عملکرد را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Priyadarshini *et al*., 2023). مداکس‌تاپ، ترکیبی حاوی مپی‌کوات کلراید و پروهگزادیون کلسیم، یکی از این تنظیم‌کننده‌هاست که در محصولات مختلف مانند گندم، جو و پنبه با موفقیت به کار گرفته شده است. مطالعات نشان داده‌اند که این ماده با کاهش رشد طولی ساقه و افزایش مقاومت به ورس (خوابیدگی)، عملکرد دانه را بهبود می‌بخشد (Bozek *et al*., 2019; Mykhalska *et al*., 2019). علاوه بر این، گزارش‌هایی از تأثیر مثبت آن بر افزایش کارایی فتوسنتز و کیفیت دانه نیز وجود دارد (Kolev & Todorov, 2023). کاربرد مپی‌کوات کلراید در گیاه پنبه باعث افزایش تولید کربوهیدرات‌ها، بهبود بهره‌وری استفاده از کربن و تأخیر در پیری برگ‌ها شده است (Luo *et al*., 2023). مپی‌کوات کلراید از طریق کاهش تولید جیبرلین، باعث کاهش ارتفاع گیاه و تمرکز بر رشد زایشی می‌شود (Murtza *et al*., 2022). این یافته‌ها اهمیت کاربرد هدفمند تنظیم‌کننده‌های رشد را در مدیریت زراعی و بهینه‌سازی عملکرد به خوبی نشان می‌دهد. با این وجود، اطلاعات موجود درباره کاربرد مداکس‌تاپ در سورگوم علوفه‌ای بسیار محدود است. به‌خصوص در مورد تأثیر کاربرد دُزهای مختلف مداکس‌تاپ در مراحل متفاوت رشد بر عملکرد دانه و علوفه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی کشور خلأ تحقیقاتی وجود دارد و نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر احساس می‌شود.

زراعت گیاهانی مانند سورگوم و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، گامی مؤثر در راستای توسعه کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تنظیم‌کننده رشد مداکس‌تاپ بر عملکرد دانه، کیفیت بذر، عملکرد علوفه و ویژگی‌های فیزیولوژیک ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک ایران طراحی و اجرا شد. امید است شناخت دُز و زمان مناسب کاربرد مداکس‌تاپ برای بهبود عملکرد وکیفیت بذر در دو رقم سورگوم علوفه‌ای آزادگرده‌افشان به ارائه توصیه‌های عملی سودمند برای تولیدکنندگان بذر بینجامد.

مواد و روش‌ها

آزمایش طی دو سال زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج انجام شد. منطقه مورد نظر دارای اقلیم نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالانه ۲۶۵ میلی‌متر و دمای میانگین سالانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. میانگین دمای هوا و مجموع بارندگی طی دوره آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. خاک مزرعه از نوع لوم رسی با pH برابر با ۷/۲، هدایت الکتریکی ۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار ماده آلی ۰/۵ درصد بود. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک‌زنی و تسطیح با استفاده از لولر بود تا سطحی یکنواخت برای کاشت فراهم شود. مصرف کود بر اساس آزمون خاک و نیازهای تغذیه‌ای سورگوم انجام شد. بدین منظور، در زمان کاشت ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم (حاوی ۱۸ درصد نیتروژن و ۴۶ درصد فسفر) و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (۴۶ درصد نیتروژن) به‌عنوان کود پایه به خاک اضافه شد. همچنین، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره به‌صورت سرک در مرحله ۶-۴ برگی اعمال گردید تا نیازهای نیتروژنی گیاه در مراحل اولیه رشد تأمین شود.

جدول ۱- میانگین دمای هوا و مجموع بارندگی ماهانه طی دوره آزمایش

Table 2. Monthly mean air temperature and total precipitation during the experimental period

Month	میانگین دما (سانتی‌گراد) Average temperature °C		بارندگی (میلی‌متر) Precipitation (mm)	
	2023	2024	2023	2024
June	25.0	22.4	13	11
July	26.6	24.9	0	0
August	26.4	25.0	0	0
September	20.2	20.0	0	28
October	13.8	12.7	27	23

چیدمان تیمارهای آزمایش به‌صورت فاکتوریل اسپلیت‌پلات بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. کرت‌های اصلی در بردارنده فاکتوریل چهار دُز مداکس‌تاپ (۰، ۰/۵، ۱ و ۲ لیتر در هکتار) و دو زمان محلول‌پاشی (مراحل ۴-۳ و ۸-۶ برگی) بود و کرت‌های فرعی دو رقم سورگوم علوفه‌ای آزادگرده‌افشان (منصور و بهشت) بودند. مداکس‌تاپ، محصول شرکت BASF آلمان، حاوی ۳۰۰ گرم در لیتر مپی‌کوات کلراید و ۵۰ گرم در لیتر پروهگزادیون کلسیم است. محلول‌پاشی با استفاده از سمپاش کوله‌ای کالیبره‌شده با فشار ثابت ۲ بار و نازل‌های تی‌جت بعد از غروب آفتاب انجام گرفت. حجم محلول مصرفی ۳۰۰ لیتر در هکتار بود و در هر کرت به‌صورت یکنواخت اعمال شد. کرت‌های شاهد با آب معمولی محلول‌پاشی شدند. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف کاشت به طول شش متر با فاصله بین ردیف‌های ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر بود که تراکم نهایی ۱۶۷۰۰۰ بوته در هکتار را ایجاد می‌کرد. عملیات کاشت در هر دو سال در تاریخ ۱۱ خرداد انجام شد. آبیاری به روش قطره‌ای نواری با استفاده از نوارهای تیپ ۱۶ میلی‌متری و فاصله قطره‌چکان‌ها ۱۰ سانتی‌متر اجرا شد. نیاز آبی گیاه بر اساس محاسبات تبخیر و تعرق مرجع با روش پنمن-مانتیث و ضریب گیاهی(Kc) سورگوم تعیین شد.

برای اندازه‌گیری شاخص سبزینگی برگ (SPAD)، از دستگاه کلروفیل‌متر استفاده شد. این اندازه‌گیری ده روز پس از هر محلول‌پاشی، برای ده بوته تصادفی از هر کرت انجام گرفت. برای تعیین شاخص سطح برگ (LAI) در مرحله ۵۰ درصد گلدهی، نمونه برداری تخریبی از پنج بوته تصادفی از هر کرت صورت گرفت و با دستگاه سطح‌سنج برگ اندازه‌گیری شد. با برداشت پانیکول‌ها از دو ردیف میانی هر کرت در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک عملکرد دانه تعیین شد. برای این منظور پانیکول‌ها با دست برداشت و سپس دانه‌ها با دستگاه کوبنده جدا و توزین شدند. برای محاسبه عملکرد علوفه، ساقه‌ها و برگ‌های بوته‌های دو ردیف میانی هر کرت جهت مشخص شدن وزن تر توزین شدند. سپس ساقه‌ها و برگ‌های پنج بوته به طور تصادفی انتخاب و پس از مشخص شدن وزن تر در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند تا به وزن ثابت برسند و سپس مجدداً توزین شدند تا درصد ماده خشک آن‌ها محاسبه شود. در نهایت بر اساس درصد ماده خشک نمونه‌ها، عملکرد علوفه خشک محاسبه شد. محتوی کل کربوهیدرات‌های دانه با روش رنگ‌سنجی فنل- سولفوریک اسید (DuBois *et al*., 1956)، محتوی نشاسته با روش آنترون (Hedge & Hofreiter, 1962) و محتوی قندهای محلول با روش دی‌نیتروسالیسیلیک اسید (Miller, 1959) اندازه‌گیری شدند. برای اطمینان از سلامت بذور تولیدی، آزمون جوانه‌زنی بذر در آزمایشگاه انجام شد. بدین منظور از هر کرت، ۵۰ عدد بذر به‌صورت تصادفی انتخاب و در پتری‌دیش‌های ۱۱ سانتی‌متری روی کاغذ صافی واتمن قرار گرفتند. به هر پتری‌دیش هشت میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و در ژرمیناتور با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در روز و ۲۰ درجه

سانتی‌گراد در شب و دوره نوری ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی قرار گرفتند. تعداد بذرهای جوانه‌زده روزانه تا روز چهاردهم ثبت شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. به منظور تجزیه واریانس مرکب، عامل سال به عنوان اثر تصادفی و تیمارها به عنوان اثر ثابت در نظر گرفته شدند.

نتایج و بحث

شاخص سبزینگی برگ (SPAD-Value)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که شاخص سبزینگی برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز مداکس‌تاپ قرار گرفت($p\leq0.01$). با افزایش دُز مصرفی مداکس‌تاپ از صفر به دو لیتر در هکتار میانگین این شاخص از ۳۸/۴۱ به ۴۲/۲۰ افزایش یافت (جدول ۳). این افزایش ۹/۸۷ درصدی احتمالاً به دلیل تأثیر مداکس‌تاپ بر تحریک سنتز کلروفیل و بهبود کارایی فتوسنتز است (Luo *et al*., 2023). گزارش شده است که مصرف پروهگزادیون کلسیم منجر به افزایش شاخص سبزینگی برگ ذرت شده است (Junior *et al*., 2021). به طور مشابه، کاربرد مپی‌کوات کلراید باعث افزایش غلظت کلروفیل در فاز میانی و پایانی رشد پنبه شد (Luo *et al*., 2023). بین سال‌های آزمایش (۱۴۰۲ و ۱۴۰۳) و دو رقم سورگوم (منصور و بهشت) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳) که بیانگر ثبات پاسخ این صفت به تیمارها در شرایط مختلف محیطی و ژنتیکی است. همچنین، اثر متقابل دُز و رقم معنی‌دار نبود (جدول ۲)، به این معنی که هر دو رقم واکنش مشابهی به دُزهای مختلف مداکس‌تاپ نشان دادند. این یافته‌ها با نتایج میخالسکا و همکاران (Mykhalska *et al*., 2019) در گندم هم‌راستاست که افزایش محتوای کلروفیل را تحت تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد گزارش کرده‌اند. ثبات این پاسخ، مداکس‌تاپ را به ابزاری قابل اعتماد برای بهبود سبزینگی برگ در سورگوم علوفه‌ای تبدیل می‌کند که می‌تواند در افزایش کارایی جذب نور و تولید ماده خشک نقش داشته باشد.

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی در سورگوم علوفه‌ای تحت تأثیر سال، دُز و زمان مصرف مداکس تاپ و رقم

Table 2- Combined analysis of variance for the studied traits in forage sorghum as affected by year, dose and time of application of Medax Top, and cultivar

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	شاخص سبزینگی SPAD	شاخص سطح برگ Leaf area index	محتوی نشاسته دانه Grain starch content	کل کربوهیدرات‌های دانه Total grain carbohydrates	محتوی قندهای محلول Soluble sugar content	درصد جوانه‌زنی بذر Seed germination percentage	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد علوفه (ساقه و برگ) Forage yield (stem and leaf)
سال Year	1	7.65 ^{ns}	0.69 ^{ns}	15.37 ^{ns}	15.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}	18.38 ^{ns}	24524838**	185375975*
بلوک(سال)Block(Year)	4	8.76	0.40	19.44	26.37	0.56	20.21	858458	12776847
دز مصرف Dosage (a)	3	63.39**	1.31**	135.20**	203.40**	6.96 *	148.49**	21762652*	144140304**
Year × a	3	0.76 ^{ns}	0.01 ^{ns}	4.56 ^{ns}	5.81 ^{ns}	0.26 ^{ns}	4.49 ^{ns}	2066468**	3649292**
زمان مصرف Timing (b)	1	0.06 ^{ns}	0.31 ^{ns}	3.77**	4.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	15.04 ^{ns}	1541280*	35555873*
Year × b	1	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.05 ^{ns}	1.04 ^{ns}	6767 ^{ns}	111112 ^{ns}
a × b	3	0.01 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.04*	0.26 ^{ns}	554794*	4621845 ^{ns}
Year × a × b	3	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1.82 ^{ns}	25980 ^{ns}	811961 ^{ns}
Block(Year × a × b)	28	4.37	0.08	21.19	22.54	0.27	6.02	68884	820485
رقم Cultivar (c)	1	14.96 ^{ns}	0.31 ^{ns}	43.69*	73.05*	3.75*	9.38 ^{ns}	9119268 ^{ns}	168275104**
Year × c	1	0.29 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.38 ^{ns}	649117**	17120 ^{ns}
a × c	3	0.46 ^{ns}	0.01 ^{ns}	3.24*	4.60**	0.14 ^{ns}	0.15 ^{ns}	1478943 ^{ns}	13794747**
Year × a × c	3	0.11 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.30 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.08*	0.49 ^{ns}	396926*	83947 ^{ns}
b × c	1	0.04 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.01*	0.04 ^{ns}	771 ^{ns}	1344267 ^{ns}
Year× b × c	1	0.01 ^{ns}	0.06*	0.26 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.38 ^{ns}	77 ^{ns}	1191267 ^{ns}
a × b × c	3	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.15 ^{ns}	16863 ^{ns}	517411 ^{ns}
Year × a × b × c	3	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.49 ^{ns}	38018 ^{ns}	1031824 ^{ns}
خطا Error	32	1.74	0.05	14.04	16.29	0.26	4.38	63001	510827
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	5.27	7.54	7.65	7.58	8.64	4.21	8.81	7.05

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: non-significant, and significant at 1% and 5% probability levels, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی سورگوم علوفه‌ای تحت تاثیر اثرات اصلی سال، دُز و زمان مصرف مداکس تاپ و رقم

Table 3- Main effects of year, dose and time of application of Medax Top, and cultivar on the studied traits in forage sorghum

عامل های آزمایشی Experimental factors		شاخص سبزینگی SPAD	شاخص سطح برگ Leaf area index	محتوی نشاسته دانه Grain starch content (%)	کل کربوهیدرات‌های دانه Total grain carbohydrates (%)	محتوی قندهای محلول Soluble sugar content (%)	درصد جوانه‌زنی بذر Seed germination percentage	عملکرد دانه Grain yield (kg ha^{-1})	عملکرد علوفه Forage yield (kg ha^{-1})
Year	2023	40.03 a	5.15 a	65.89 a	71.83 a	5.94 a	94.46 a	2344 b	15529 a
	2024	40.60 a	4.98 a	66.69 a	72.62 a	5.93 a	95.33 a	3355 a	12749 b
Dosage	Control	38.41 d	5.32 a	63.79 c	69.18 c	5.39 c	91.92 c	1661 c	17001 a
	0.5 L ha^{-1}	39.72 c	5.15 b	65.08 c	70.72 c	5.65 bc	94.08 b	2583 b	14905 b
	1.0 L ha^{-1}	40.94 b	5.03 c	67.06 b	73.13 b	6.07 b	95.83 ab	3276 a	13479 b
	2.0 L ha^{-1}	42.2 a	4.77 d	69.22 a	75.84 a	6.62 a	97.75 a	3877 a	11171 c
Timing	3-4 leaf stage	40.34 a	5.01 a	66.49 a	72.43 a	5.94 a	95.29 a	2976 a	13530 b
	6-8 leaf stage	40.29 a	5.12 a	66.09 b	72.02 a	5.93 a	94.50 a	2723 b	14748 a
Cultivar	Mansour	40.71 a	5.12 a	66.96 a	73.09 a	6.13 a	95.21 a	3158 a	15463 a
	Behesht	39.92 a	5.01 a	65.61 b	71.35 b	5.73 b	94.58 a	2541 a	12815 b

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) ندارند.

In each column and for each factor, the means followed by the same letter are not significantly different ($P<0.05$) according to the LSD test.

شاخص سطح برگ (LAI)

شاخص سطح برگ به‌طور معنی‌داری($p\leq0.01$) تحت تأثیر دُز مداکس‌تاپ قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، شاخص سطح برگ از ۵/۳۲ به ۴/۷۷ کاهش (۱۰/۴۱ درصد) یافت (جدول ۳). این کاهش احتمالاً نتیجه تغییر در الگوی تخصیص منابع از رشد رویشی به سمت اندام‌های زایشی است، گزارش Constantinescu *et al*. (2021) در گندم با این بخش از یافته‌ها همسو می‌باشد. به طور مشابه کاربرد پروهگزادیون کلسیم باعث کاهش شاخص سطح برگ فلفل (Ozbay and Metin., 2020) و بادام زمینی (Studstill *et al*., 2020) شده است. بین دو رقم و سال‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، که نشان‌دهنده تأثیر یکنواخت مداکس‌تاپ بر این صفت در شرایط مختلف است. محلول‌پاشی در مرحله ۴-۳ برگی میانگین سطح برگ بالاتری (۵/۱۲) نسبت به مرحله ۸-۶ برگی (۵/۰۱) ایجاد کرد، اما این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳). این نتایج حاکی از آن است که مداکس‌تاپ با هدایت اسیمیلات‌ها به سمت رشد زایشی می‌تواند در مدیریت تولید بذر در سورگوم مفید باشد، به‌ویژه در شرایطی که هدف اصلی به جای علوفه، تولید بذر با کیفیت است.

محتوی قندهای محلول

محتوی قندهای محلول دانه به طور معنی‌داری ($P\leq0.05$) تحت تأثیر دُز مداکس‌تاپ، رقم و اثر متقابل دُز ×زمان محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۲). به طوری که با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین قندهای محلول از ۵/۳۹ به ۶/۶۲ درصد افزایش یافت(جدول ۳). بیشترین محتوی قندهای محلول (۶/۶۴ درصد) با مصرف دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ در مرحله ۸-۶ برگی ثبت شد (جدول ۴). این افزایش با نتایج جونیور و همکاران (Junior *et al*., 2021) در ذرت هم‌راستاست. همچنین، رقم منصور با میانگین ۶/۱۳ درصد نسبت به رقم بهشت با میانگین ۵/۷۳ درصد برتری معنی‌داری از نظر محتوی قندهای محلول داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که زمان‌بندی کاربرد مداکس‌تاپ بر متابولیسم کربوهیدرات‌ها در دانه تأثیر گذار است و از اینرو باید در برنامه‌ریزی زمان کاربرد مدنظر قرار گیرد. برهمکنش سه گانه سال × دُز × رقم نیز بر مقدار قندهای محلول دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بودند (جدول ۲). بیشترین محتوای قندهای محلول (۶/۸۸ درصد) با دُز دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ از رقم منصور در سال اول مشاهده شد. اثر متقابل دُز و زمان مصرف مداکس‌تاپ نشان می‌دهد که در مرحله ۸-۶ برگی، دُزهای بالاتر مداکس‌تاپ قندهای محلول را بیشتر افزایش می‌دهند که احتمالاً به دلیل هم‌زمانی با مراحل کلیدی سنتز کربوهیدرات‌ها می‌باشد، جایی که مهار جیبرلین انتقال قندها به دانه‌ها را بدون اختلال در مراحل اولیه متابولیسم تسهیل می‌کند (Liu *et al*., 2025).

محتوی نشاسته دانه

محتوی نشاسته دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز و زمان مصرف مداکس‌تاپ ($P\leq0.01$) و رقم ($P\leq0.05$) قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین محتوی نشاسته دانه از ۶۳/۷۹ به ۶۹/۲۲ درصد افزایش یافت(جدول ۳). این افزایش در محتوی نشاسته احتمالاً نتیجه بهبود انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها تحت تأثیر مداکس‌تاپ است (Luo *et al*., 2023). رقم منصور با میانگین ۶۶/۹۶ درصد به‌طور معنی‌داری نسبت به رقم بهشت با میانگین ۶۵/۶۱ درصد برتری داشت. برهمکنش دُز × رقم نیز بر این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول

۲)، به‌طوری‌که در دُزهای بالاتر، تفاوت بین دو رقم کاهش یافت (جدول ۵). این تعامل نشان‌دهنده آن است که رقم منصور در دُزهای پایین‌تر حساسیت بیشتری به مداکس‌تاپ نشان می‌دهد و نشاسته را بیشتر ذخیره می‌کند، اما در دُزهای بالا، هر دو رقم به سطح اشباع می‌رسند، که این می‌تواند به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی در آنزیم‌های سنتز نشاسته باشد که در رقم منصور کارآمدتر عمل می‌کنند (Shallal *et al*., 2020). این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب رقم مناسب و کاربرد دُز بهینه مداکس‌تاپ می‌تواند کیفیت دانه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد، که برای تولید بذر با ارزش غذایی بالا اهمیت دارد. نتایج مشابه با کاربرد مپی‌کوات کلراید در پنبه مشاهده شده است (Luo *et al*., 2023).

جدول ٤- برهمکنش دُز × زمان مصرف مداکس تاپ بر محتوی قندهای محلول و عملکرد دانه سورگوم علوفه‌ای

Table 4- Interaction effect of dose and application time of Medax Top on the soluble sugar content and grain yield of forage sorghum

تیمار Treatment		محتوی قندهای محلول Soluble sugar content (%)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha^{-1})
دُز مصرف Dosage	زمان مصرف Timing		
Control	3-4 leaf	5.39 e	1650 e
	6-8 leaf	5.39 e	1672 e
0.5 L ha^{-1}	3-4 leaf	5.62 d	2869 c
	6-8 leaf	5.67 d	2297 d
1.0 L ha^{-1}	3-4 leaf	6.14 b	3502 b
	6-8 leaf	6.01 c	3048 c
2.0 L ha^{-1}	3-4 leaf	6.60 a	3881 a
	6-8 leaf	6.64 a	3872 a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P<0.05) according to the LSD test.

جدول ٥- اثر متقابل دُز مصرف مداکس تاپ و رقم بر محتوی نشاسته و کربوهیدرات‌های دانه و عملکرد علوفه سورگوم علوفه‌ای

Table 5- Interaction effect of Medax Top application dose and cultivar on starch and carbohydrate content of grain and forage yield of forage sorghum

تیمار Treatment		محتوی نشاسته دانه Grain starch content (%)	کل کربوهیدرات‌های دانه Total grain carbohydrates (%)	عملکرد علوفه Forage yield (kg ha^{-1})
دُز مصرف Dosage	رقم Cultivar			
Control	Mansour	64.91 de	70.55 f	18958 a
	Behesht	62.68 f	67.81 h	15043 c
0.5 L ha^{-1}	Mansour	65.60 cd	71.45 e	16626 b
	Behesht	64.55 e	70.00 g	13184 d
1.0 L ha^{-1}	Mansour	67.86 b	74.18 c	14851 c
	Behesht	66.26 c	72.08 d	12107 e
2.0 L ha^{-1}	Mansour	69.48 a	76.19 a	11417 f
	Behesht	68.96 a	75.50 b	10926 g

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P<0.05) according to the LSD test.

مجموع کربوهیدرات‌های دانه

مجموع کربوهیدرات‌های دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز مداکس‌تاپ ($P\leq0.01$) و رقم ($P\leq0.05$) قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین کربوهیدرات‌ها از ۶۹/۱۸ به ۷۵/۸۴ درصد افزایش یافت(جدول ۳). رقم منصور با محتوی کربوهیدرات‌ها ۷۳/۰۹ درصد نسبت به رقم بهشت با میانگین ۷۱/۳۵ درصد برتری معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). اثر متقابل دُز و رقم نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، به‌طوری‌که پاسخ محتوی کربوهیدرات‌های دو رقم به دُزهای مختلف، متفاوت بود (جدول ۵). این موضوع احتمالاً به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی در مسیرهای متابولیک کربن (مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های کربوکسیلاز) است که توسط مداکس‌تاپ تقویت می‌شود (Liu *et al*., 2025). این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت مداکس‌تاپ بر ذخیره‌سازی کربوهیدرات در دانه است و بر اهمیت انتخاب ژنوتیپ مناسب در کنار کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد تأکید دارد. مجموع کربوهیدرات‌های ذخیره شده در دانه رقم منصور از ۷۰/۵۵ درصد در تیمار شاهد به ۷۶/۱۹ درصد در دُز دو لیتر مداکس‌تاپ در هکتار رسید، درحالی‌که در رقم بهشت این افزایش از ۶۷/۸۱ درصد به ۷۵/۵۰ درصد بود (جدول ۵).

عملکرد دانه

عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سال (در سطح احتمال یک درصد)، دُز و زمان مصرف مداکس‌تاپ و اثر متقابل آن‌ها (در سطح احتمال پنج درصد) قرار گرفت (جدول ۲). در سال دوم، میانگین عملکرد دانه (۳۳۵۵ کیلوگرم در هکتار) ۴۳ درصد بیشتر از سال اول (۲۳۴۴ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۳). این برتری احتمالاً به دلیل شرایط آب‌وهوایی مساعدتر برای تولید بذر در سال دوم است. به‌نظر می‌رسد دمای پائین‌تر هوا در زمان مصرف مداکس‌تاپ در سال دوم (جدول ۱) به عملکرد بهتر آن کمک کرده است. در مقابل، گرمای هوا در زمان مصرف مداکس‌تاپ در سال اول (جدول ۱)، احتمالاً تجزیه مواد فعال مداکس‌تاپ را تسریع کرده و توانایی آن را در مهار تولید جیبرلین کاهش داده است (Rademacher, 2015).

با افزایش دُز مداکس‌تاپ از صفر به دو لیتر در هکتار، عملکرد دانه از ۱۶۶۱ به ۳۸۷۷ کیلوگرم در هکتار افزایش پیدا کرد، هرچند تفاوت معنی‌داری بین دُز یک و دو لیتر در هکتار مشاهده نشد. این نتایج با یافته‌های کامران و همکاران (Kamran *et al*., 2018) در ذرت هم‌راستاست، که نشان دادند مپی‌کوات کلراید با کاهش رشد رویشی، عملکرد دانه را افزایش داد. همچنین، نیکولوف و دلچف (Nikolov & Delchev, 2021) گزارش کردند که تنظیم‌کننده‌های رشد در گندم دوروم، فتوسنتز و تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه را بهبود می‌بخشند. مطالعات نشان داده‌اند که مهار جیبرلین‌ها توسط تنظیم‌کننده‌هایی مانند پروهگزادیون کلسیم، تمرکز گیاه را به سمت تولید اندام‌های زایشی هدایت می‌کند (Han *et al*., 2011). کاربرد مداکس‌تاپ در مرحله ۴-۳ برگی نسبت به مرحله ۸-۶ برگی عملکرد دانه را ۹/۳ درصد بهبود بخشید که نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاربرد زودهنگام است (جدول ۳). اثر متقابل دُز و زمان مصرف نیز نشان داد که در دُزهای نیم و یک لیتر در هکتار، کاربرد مداکس‌تاپ در مرحله ۴-۳ برگی نتیجه بهتری به دنبال دارد. به طوری‌که کاربرد نیم و یک لیتر در هکتار تنظیم‌کننده در مرحله ۴-۳ برگی باعث افزایش به‌ترتیب ۷۴ و ۱۱۲ درصدی وزن عملکرد دانه شد درحالی‌که این افزایش در مرحله ۸-۶ برگی به‌ترتیب ۳۷/۴ و ۸۲/۴ درصد بود. این بهبود احتمالاً ناشی از تأثیر زودهنگام تنظیم‌کننده‌های رشد بر مسیرهای هورمونی گیاه، به‌ویژه مهار سنتز جیبرلین‌ها در مراحل اولیه رشد است که منجر به کاهش رشد طولی ساقه و هدایت بیشتر مواد فتوسنتزی به سمت اندام‌های زایشی می‌شود (Storozhyk *et al*., 2022). بیشترین عملکرد دانه با مصرف دو لیتر در هکتار تنظیم‌کننده در مرحله ۴-۳ برگی

به‌دست آمد، هر چند تفاوت معنی‌داری با مرحله ۸-۶ برگی در همین دُز مصرفی نداشت (جدول ۴). این عدم تفاوت معنی‌دار در دُز بالا احتمالاً به دلیل اشباع اثر مهاری جیبرلین است، جایی که صرف‌نظر از زمان دقیق کاربرد، دُز کافی برای تأثیر حداکثری بر رشد زایشی فراهم می‌شود (Storozhyk *et al*., 2022). این نتیجه گیری با یافته‌های Murtza *et al*. (2022) در پنبه همخوانی دارد و نشان می‌دهد که زمان‌بندی دقیق کاربرد مداکس‌تاپ می‌تواند عملکرد دانه را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد.

جدول ٦- برهمکنش سه گانه سال× دُز × زمان مصرف مداکس تاپ بر محتوی قندهای محلول و عملکرد دانه سورگوم علوفه‌ای

Table 6- Interaction effect of year, dose and application time of Medax Top on the soluble sugar content and grain yield of forage sorghum

تیمار Treatment			محتوی قندهای محلول Soluble sugar content (%)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha^{-1})
سال Year	دُز مصرف Dosage	رقم Cultivar		
2023	Control	Mansour	5.47 f	1854 fg
		Behesht	5.12 g	1059 h
	0.5 L ha^{-1}	Mansour	5.78 e	2094 ef
		Behesht	5.45 f	1733 g
	1.0 L ha^{-1}	Mansour	6.36 d	2669 d
		Behesht	5.77 e	2223 e
	2.0 L ha^{-1}	Mansour	6.88 a	3663 c
		Behesht	6.66 b	3457 c
2024	Control	Mansour	5.82 e	2702 d
		Behesht	5.15 g	1030 h
	0.5 L ha^{-1}	Mansour	5.92 e	3623 c
		Behesht	5.45 f	2884 d
	1.0 L ha^{-1}	Mansour	6.28 d	4542 a
		Behesht	5.88 e	3670 c
	2.0 L ha^{-1}	Mansour	6.54 bc	4114 b
		Behesht	6.41 cd	4274 b

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly differentns (P<0.05) according to the LSD test.

برهمکنش سه گانه سال × دُز × رقم برای این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین عملکرد دانه رقم منصور در سال اول و دوم به‌ترتیب با مصرف دو و یک لیتر در هکتار تنظیم‌کننده به دست آمد، درحالی‌که در رقم بهشت در هر دو سال، بالاترین دُز بیشترین عملکرد را تولید کرد. بیشترین واکنش مثبت عملکرد دانه به افزایش دُز ماده تنظیم‌کننده در رقم بهشت مشاهده شد، به‌نحوی‌که با مصرف دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ، عملکرد این رقم در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲۲۶ و ۳۱۵ درصد نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد، درحالی‌که این افزایش در رقم منصور به‌ترتیب ۹۷/۶ و ۵۲/۳ درصد بود. در دُز دو لیتر در هکتار تفاوت معنی‌داری بین دو رقم مشاهده نشد، ولی در سایر دُزها عملکرد دانه رقم منصور به طور معنی‌داری بیشتر از بهشت بود. این تفاوت‌ها احتمالاً به تنوع ژنتیکی در حساسیت به تنظیم‌کننده‌ها و متابولیسم هورمونی مربوط است که می‌تواند در انتخاب ارقام مناسب برای شرایط خاص مورد توجه قرار گیرد. مطالعات مشابه در سایر محصولات، مانند گندم (Bozek *et al*., 2019)، نیز تفاوت‌های ژنوتیپی در پاسخ به تنظیم‌کننده‌های رشد را تأیید کرده‌اند. حداکثر عملکرد دانه (۴۵۴۲ کیلوگرم در هکتار) در رقم منصور و با دُز یک لیتر در هکتار در سال دوم به‌دست آمد (جدول ۶). نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد که پروهگزادیون کلسیم و مپی‌کوات کلراید – دو ترکیب مؤثر در تنظیم‌کننده رشد مداکس تاپ – با مکانیسم مهار تولید جیبرلین‌ها موجب کنترل رشد طولی ساقه، افزایش استحکام مکانیکی ساقه و در نتیجه

کاهش پدیده خوابیدگی (ورس) در گندم شده‌اند، ضمن اینکه این ترکیبات از طریق بهینه‌سازی توزیع مواد فتوسنتزی و هدایت آن‌ها به سمت اندام‌های زایشی، نقش مؤثری در افزایش کمّی و کیفی عملکرد دانه ایفا می‌کنند (Bozek *et al*., 2019; Mykhalska *et al*., 2019; Kolev & Todorov, 2023). پژوهش دیگری نشان می‌دهد، کاربرد پروهگزادیون کلسیم در بادام زمینی منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد شده است (Studstill *et al*., 2020).

عملکرد علوفه (ساقه و برگ)

عملکرد علوفه به طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز، سال × دُز، رقم و دُز × رقم در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت. همچنین اثر سال و زمان مصرف بر این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). حداقل ارتفاع بوته، در هر دو رقم با مصرف ۲ لیتر در هکتار مداکس تاپ در سال دوم به دست آمد که کاهش ۴۶/۸ و ۵۳/۱ درصدی را به ترتیب برای رقم منصور و بهشت نسبت به تیمار شاهد نشان داد، درحالی‌که این کاهش در سال اول به‌ترتیب ۳۱/۸ و ۲۹/۱ درصد بود. شاخص برداشت در سال دوم ۵۶/۳ درصد بیشتر از سال اول بود. با افزایش دُز مصرف تنظیم‌کننده، شاخص برداشت به طور معنی‌داری افزایش یافت به نحوی که کاربرد ۰/۵، ۱ و ۲ لیتر در هکتار مداکس تاپ باعث افزایش به‌ترتیب ۷۴/۷، ۱۲۸/۸ و ۱۹۷/۴ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد شد. عملکرد علوفه در سال اول (۱۵۵۲۹ کیلوگرم در هکتار) به طور معنی‌داری بیشتر از سال دوم (۱۲۷۴۹ کیلوگرم در هکتار) بود. با افزایش دُز مداکس‌تاپ از صفر به دو لیتر در هکتار، عملکرد علوفه از ۱۷۰۰۱ به ۱۱۱۷۱ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش ۳۴ درصدی به‌وضوح نشان‌دهنده تغییر الگوی توزیع مواد فتوسنتزی از اندام‌های رویشی به زایشی است. کاهش عملکرد علوفه با افزایش دُز مصرف مداکس‌تاپ، می‌تواند با کاهش ارتفاع بوته و افزایش شاخص برداشت تحت تأثیر تنظیم‌کننده رشد مرتبط باشد، به‌نحوی‌که کاربرد نیم، یک و دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ، باعث کاهش به‌ترتیب ۱۲، ۲۵ و ۴۰ درصدی ارتفاع بوته و افزایش به‌ترتیب ۷۵، ۱۲۹ و ۱۹۷ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد (با ارتفاع بوته ۲/۵۲ متر و شاخص برداشت ۸/۵۴ درصد) شد. (نتایج نشان داده نشده ا ند).

نسبت به مرحله ۴-۳ برگی، کاربرد مداکس‌تاپ در مرحله ۸-۶ برگی اثر منفی کمتری بر عملکرد علوفه داشت. رقم منصور با عملکرد علوفه ۱۵۴۶۳ کیلوگرم در هکتار نسبت به رقم بهشت با میانگین ۱۲۸۱۵ کیلوگرم در هکتار برتری معنی‌داری داشت (جدول ۳). اثر متقابل دُز × رقم نیز نشان داد که کاهش عملکرد علوفه با افزایش دُز در رقم منصور شدیدتر است، با این حال رقم منصور در تمام مقادیر مصرف مداکس‌تاپ، عملکرد علوفه بالاتری نسبت به رقم بهشت داشت (جدول ۵). این کاهش در عملکرد علوفه احتمالاً نتیجه تغییر تخصیص منابع فتوسنتزی به سمت تولید بذر است که با یافته‌های دونگ و همکاران (Duong *et al*., 2024) در ذرت هم‌راستاست. به‌طور مشابه، کاربرد مپی‌کوات کلراید در گیاه پنبه، باعث کاهش رشد برگ‌ها و ساقه‌ها شد (Gao *et al*., 2019). گولادا و همکاران (Golada *et al*., 2013) نیز مشاهده کردند که کاربرد مپی‌کوات موجب کاهش معنی‌دار عملکرد علوفه ذرت شد. کاربرد پروهگزادیون کلسیم در ذرت نیز باعث کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام‌های هوایی شده است (Duong *et al*., 2024). بر این اساس می‌توان اذعان داشت در شرایطی که هدف اصلی تولید همزمان بذر و علوفه باشد، استفاده از دُزهای پایین‌تر مداکس‌تاپ توصیه می‌شود.

درصد جوانه‌زنی بذر

درصد جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) تحت تأثیر دُز مداکس‌تاپ قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین جوانه‌زنی از ۹۱/۹۲ به ۹۷/۷۵ درصد افزایش یافت(جدول ۳). این بهبود شش درصدی نشان‌دهنده تأثیر مثبت مداکس‌تاپ بر متابولیسم بذر و ذخیره مواد غذایی و کیفیت فیزیولوژیک بذر است که می‌تواند قابلیت کشت بذور را افزایش دهد. بین دو رقم و سال‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، که بیانگر پایداری این اثر در شرایط مختلف است. این نتایج برای تولید بذر با کیفیت و قابل اعتماد در سورگوم علوفه‌ای اهمیت زیادی دارد. همان طور که از گزارش Duong *et al*. (2024) استنباط می‌شود این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که مداکس‌تاپ می‌تواند با تغییر توازن رشد رویشی و زایشی، ابزار مؤثری برای دستیابی به اهداف مختلف زراعی (از جمله تولید بذر با کیفیت) باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که کاربرد تنظیم‌کننده رشد مداکس‌تاپ می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد دانه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای را بهبود بخشد. با افزایش دُز مصرف مداکس‌تاپ از صفر تا دو لیتر در هکتار به‌ویژه در مرحله ۴-۳ برگی، عملکرد دانه و محتوی نشاسته و کربوهیدرات‌های دانه افزایش پیدا کردند. با این حال، دُز دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ با محدود کردن رشد رویشی و هدایت بیشتر منابع گیاهی به سمت اندام‌های زایشی، منجر به کاهش عملکرد علوفه شد، که نشان‌دهنده یک رابطه معکوس بین تولید دانه و علوفه است. در مقابل، دُز یک لیتر در هکتار به عنوان نقطه بهینه برای تولید همزمان دانه و علوفه شناسایی شد، زیرا افزایش عملکرد دانه را بدون کاهش شدید عملکرد علوفه فراهم می‌کند و تعادل مناسبی بین دو هدف زراعی برقرار می‌نماید، که این امر از منظر فیزیولوژیک به دلیل تأثیر متوسط بر کاهش شاخص سطح برگ و حفظ بخشی از رشد رویشی توجیه‌پذیر است. رقم منصور در مقایسه با رقم بهشت در اکثر صفات مورد بررسی عملکرد بهتری نشان داد و به‌عنوان ژنوتیپ برتر شناسایی شد، که این برتری احتمالاً ریشه در تفاوت‌های ژنتیکی در حساسیت به تنظیم‌کننده‌های رشد و کارایی متابولیسم کربوهیدرات دارد. به‌طور کلی اگر هدف فقط تولید بذر با کیفیت باشد، کاربرد دُز دو لیتر در هکتار مداکس‌تاپ در مرحله ۴-۳ برگی توصیه می‌شود تا حداکثر منابع گیاهی به رشد زایشی اختصاص یابد؛ در حالی که برای تولید همزمان بذر و علوفه، دُزهای پایین‌تر (نیم یا یک لیتر در هکتار) مناسب‌تر هستند تا از کاهش بیش از حد عملکرد علوفه جلوگیری شود. این یافته‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی مدیریت زراعی مزارع تولید بذر ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم در شرایط نیمه‌خشک کشور کمک کنند و بینش‌های جدیدی را در مورد نقش تنظیم‌کننده‌های رشد بر افزایش پایداری تولید ارائه دهند. برای تحقیقات آینده، می‌توان تأثیر مداکس‌تاپ در ترکیب با تنش‌های محیطی را مورد بررسی قرار داد. علاوه‌براین، ارزیابی اثرات بلندمدت مداکس‌تاپ بر خاک و محیط زیست، به منظور تکمیل این نتایج و توسعه توصیه‌های جامع‌تر ضروری به‌نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی در اجرای این پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۰۱۰۳۱۲-۰۲۴-۰۳۰۵-۰۳-۰۳ و همچنین از حمایت‌های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Baghdadi, A., Golzardi, F., & Hashemi, M. (2023). The use of alternative irrigation and cropping systems in forage production may alleviate the water scarcity in semi-arid regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(10), 5050-5060. https://doi.org/10.1002/jsfa.12574
2. Bozek, K. S., Winnicki, T., & Zuk-Golaszewska, K. (2019). The effects of seeding rate, mineral fertilization and a growth regulator on the economic and energy efficiency of durum wheat production. *Acta Scientiarum Polonorum Agricultura, 18*(3), 133–144. https://doi.org/10.37660/aspagr.2019.18.3.4
3. Constantinescu, E., Nițu, R., & Muscalu, A. (2021). Study regarding the behavior of some varieties of wheat, in ecopedological conditions, from the south-west area of Dolj County. *Annals of the University of Craiova - Agriculture, Montanology, Cadastre Series, 51*(1), 85–96.
4. DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, *28*(3), 350–356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017
5. Duong, M. V., Chung, J. W., Ha, V. G., Moon, H., Yu, J. K., & So, Y. S. (2024). Prohexadione-calcium mitigates the overgrowth of corn seedlings. *Agronomy*, *14*(2), 371. https://doi.org/10.3390/agronomy14020371
6. Gao, H., Ma, H., Khan, A., Xia, J., Hao, X., Wang, F., & Luo, H. (2019). Moderate drip irrigation level with low mepiquat chloride application increases cotton lint yield by improving leaf photosynthetic rate and reproductive organ biomass accumulation in arid region. *Agronomy*, *9*(12), 834. https://doi.org/10.3390/agronomy9120834
7. Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrokh, A., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S. M. N., & Széles, A. (2023). Irrigation management strategies to enhance forage yield, feed value, and water-use efficiency of sorghum cultivars. *Plants*, *12*(11), 2154. https://doi.org/10.3390/plants12112154
8. Golada, S. L., Sharma, G. L., & Jain, H. K. (2013). Performance of baby corn (*Zea mays* L.) as influenced by spacing, nitrogen fertilization and plant growth regulators under sub humid condition in Rajasthan, India. *African Journal of Agricultural Research*, *8*(12), 1100-1107. https://doi.org/10.5897/AJAR12.1920
9. Han, L. P., Guo, X., Yu, Y., Duan, L., Rao, M. S., & Xie, G. H. (2011). Effect of prohexadione-calcium, maleic hydrazide and glyphosine on lodging rate and sugar content of sweet sorghum. *Research on Crops*, *12*(1), 230–238.
10. Hedge, J. E., & Hofreiter, B. T. (1962). Methods in Carbohydrate Chemistry (Eds.,) Whistler, R. L., & BeMiller, J. N. New York: Academic Press, *17*, 420.
11. Junior, J. F., Souza, C. A., Pinheiro, M. G., Silva, E. R., & da Silva, A. L. P. (2021). Morpho-physiological responses of maize hybrids as a function prohexadione calcium doses applied in the vegetative phase. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *27*(1), 167–178.
12. Kamran, M., Ahmad, I., Wang, H., Wu, X., Xu, J., Liu, T., Ding, R., & Han, Q. (2018). Mepiquat chloride application increases lodging resistance of maize by enhancing stem physical strength and lignin biosynthesis. *Field Crops Research*, *224*, 148–159. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.011
13. Kolev, T., & Todorov, Z. (2023). Testing of retardants on durum wheat. *Scientific Papers, Series A, Agronomy*, *66*(1), 378–383.
14. Liu, M., Feng, N., Zheng, D., & Meng, F. (2025). Comparative study of the mechanisms underlying the effects of prohexadione-calcium and gibberellin on the morphogenesis and carbon metabolism of rice seedlings under NaCl stress. *Plants*, *14*(8), 1240. https://doi.org/10.3390/plants14081240

15. Luo, H., Zhang, Z., Wu, J., Wu, Z., Wen, T., & Tang, F. (2023). Effects of mepiquat chloride and plant population density on leaf photosynthesis and carbohydrate metabolism in upland cotton. *Journal of Cotton Research, 6*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s42397-023-00157-8
16. Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, *31*(3), 426-428. https://doi.org/10.1021/ac60147a030
17. Mirahki, I., Ardakani, M. R., Golzardi, F., Paknejad, F., Mahrokh, A., & Faraji, S. (2023). Yield, water use efficiency and silage feeding value of sorghum cultivars as affected by planting date and planting method. *Gesunde Pflanzen*, *75*(5), 1963-1973. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00822-z
18. Murtza, K., Ishfaq, M., Akbar, N., Hussain, S., Anjum, S. A., Bukhari, N. A., AlGarawi, A. M., & Hatamleh, A. A. (2022). Effect of mepiquat chloride on phenology, yield and quality of cotton as a function of application time using different sowing techniques. *Agronomy, 12*(5), 1200. https://doi.org/10.3390/agronomy12051200
19. Mykhalska, L. M., Makoveychuk, T. I., & Schwartau, V. V. (2019). Application of fertilizer megafol and retardants of acylcyclohexadione class on winter wheat crops. *Plant Physiology and Genetics, 51*(6), 541–548. https://doi.org/10.15407/frg2019.06.541
20. Nikolov, P., & Delchev, G. (2021). Photosynthetic activity and productivity of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) affected by certain preparations and various terms of sowing. *Agricultural Science and Technology*, *13*(3), 250–254. https://doi.org/10.15547/ast.2021.03.039
21. Ozbay, N., & Metin, R. (2020). *Effects of prohexadione-calcium application on vegetative and generative growth of pepper plants*. PP 573–585. In: Tiwari, A. K. (eds), Advances in Seed Production and Management. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4198-8_28
22. Pourali, S., Aghayari, F., Ardakani, M. R., Paknejad, F., & Golzardi, F. (2023). Benefits from intercropped forage sorghum–red clover under drought stress conditions. *Gesunde Pflanzen*, *75*(5), 1769-1780. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00833-4
23. Priyadarshini, G., Santhosh Kumar, U., Nagabhushanam, K., & Pavan Chandra Reddy. (2023). Effect of different doses and scheduling time of plant growth regulators and defoliants on growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under high density planting system. *International Journal of Environment and Climate Change, 13*(10), 2252–2260. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102888
24. Rademacher, W. (2015). Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production. *Journal of Plant Growth Regulation, 34*, 845–872. https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6
25. Shallal, I. M., Aboud, N. M., & Hamdan, M. I. (2020). Sorghum genotypic responses to some growth retardants. *International Journal of Agricultural & Statistical Sciences*, *16*, 1311-1315.
26. Storozhyk, L., Humentyk, M., Sviridov, A., & Svyrydova, L. (2022). Optimal time of plant growth regulator application to Sorghum canopy according to BBCH and Kuperman crop growth scales. *Plant and Soil Science*, *13*(4), 45. https://doi.org/10.31548/agr.13(4).2022.46-56
27. Studstill, S. P., Monfort, W. S., Tubbs, R. S., Jordan, D. L., Hare, A. T., Anco, D. J., Sarver, J. M., Ferguson, J. C., Faske, T. R., Creswell, B. L., & Tyson, W. G. (2020). Influence of prohexadione calcium rate on growth and yield of peanut (*Arachis hypogaea*). *Peanut Science*, *47*(3), 163–172. https://doi.org/10.3146/PS20-11.1
28. Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M. N., & Paknejad, F. (2024). Effect of drought stress on morpho-physiological characteristics, nutritive value, and water-use efficiency of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

varieties under various irrigation systems. *Brazilian Journal of Biology*, *84*, e286121. https://doi.org/10.1590/1519-6984.286121

نسخه پیش انتشار