

Economic Assessment of Organic Growth Stimulators on Yield, Oil Percentage, and Water Use Efficiency of Canola under Different Irrigation Levels

M. Passandideh and R. Mohammadikia* 

Assistant Prof., Department of Soil Chemistry, Fertility and Plant Nutrition, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

mpassandideh@yahoo.com

Researcher, On-Farm Water Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

rmswri@gmail.com

Received: July 2025 and Accepted: September 2025

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of humic acid, amino acid, fulvic acid, and seaweed extract on seed yield, oil content, and water use efficiency (WUE) of canola. Two irrigation treatments were considered: irrigation after 70–80 mm of cumulative evaporation (normal) and irrigation after 130–140 mm (drought stress). The experiment was conducted using a split-plot design, with three replications, in two years in Moghan area. Results showed that all bio-stimulant treatments outperformed the control in improving key agronomic traits, although their effectiveness varied depending on irrigation conditions. Under normal irrigation, humic acid led to the highest seed yield (3802 kg/ha), oil content (43.8 %), and WUE (1.17 kg m^{-3}). Under drought stress, the amino acid treatment achieved the highest WUE (1.75 kg m^{-3}) and a high seed yield (3682 kg/ha). Partial budgeting analysis showed that, under normal irrigation, humic acid was the most economically profitable treatment, while amino acid performed best under drought conditions. Multi-criteria decision analysis using the TOPSIS method revealed that the optimal treatment depended on the target criteria (yield, quality, or efficiency) and environmental conditions. Based on the farmer's agricultural priorities, under normal conditions humic acid ranked first, while under drought conditions amino acids, and sometimes seaweed extract, had the highest priority. The results suggest that using organic growth stimulants, especially under limited water availability, can improve canola (rapeseed) yield, oil quality, and WUE, offering a sustainable and economically viable management strategy for semi-arid regions of Iran.

Keywords: Amino acid, Drought stress, Humic acid, Seaweed extract, Sustainable agriculture, TOPSIS method

* - Corresponding Author's email: rmswri@gmail.com
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.370029.1087>

ارزیابی اقتصادی محرک‌های آلی رشد بر عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب

کلزا در تیمارهای مختلف آبیاری

محمد پسندیده و رضا محمدی کیا*

استادیار، بخش شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

mpassandideh@yahoo.com

محقق بخش مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

rmswri@gmail.com

دریافت: تیر ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محرک‌های آلی رشد شامل اسید هیومیک، اسید آمینه، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی بر عملکرد دانه، درصد روغن و کارایی مصرف آب (WUE) کلزا با دو تیمار آبیاری (آبیاری بعد از ۸۰-۷۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی (آبیاری نرمال یا شاهد) و آبیاری بعد از ۱۴۰-۱۳۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی (تنش خشکی) انجام شد. آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و به مدت دو فصل زراعی در منطقه مغان اجرا گردید. نتایج نشان داد که تمام تیمارهای محرک رشد نسبت به شاهد در بهبود صفات مورد مطالعه مؤثر بودند، اما اثربخشی تیمارها تحت تأثیر تعامل با تیمار آبیاری قرار داشت. در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید هیومیک با عملکرد دانه ۳۸۰۲ کیلوگرم در هکتار، روغن ۴۳/۸ درصد و کارایی مصرف آب برابر ۱/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بهترین عملکرد را داشت. در مقابل، در تیمار تنش خشکی، اسید آمینه با کارایی مصرف آب معادل ۱/۷۵ و عملکرد دانه ۳۶۸۲ کیلوگرم در هکتار برتر بود. نتایج تحلیل اقتصادی با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی نیز مؤید سودآوری تیمار اسید هیومیک در شرایط نرمال و اسید آمینه در شرایط خشکی بیشتر بود. تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با استفاده از روش تاپسیس نشان داد که انتخاب تیمار برتر باید با توجه به اولویت‌های زراعی (عملکرد، کیفیت یا بهره‌وری آب) و شرایط محیطی صورت گیرد؛ بر اساس اولویت‌های زراعی کشاورز مزبور، در شرایط عادی، اسید هیومیک در رتبه نخست قرار گرفت، در حالی که در شرایط خشکی، اسیدهای آمینه و گاهی عصاره جلبک دریایی در اولویت اول قرار داشت. نتایج پژوهش حاکی از آن است که کاربرد محرک‌های آلی رشد، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آب، موجب افزایش عملکرد، کیفیت روغن و کارایی مصرف آب کلزا می‌شود و می‌تواند به عنوان راهکار پایدار و اقتصادی در مناطق نیمه‌خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اسید آمینه، اسید هیومیک، تنش خشکی، روش تاپسیس، عصاره جلبک دریایی، کشاورزی پایدار

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: rmswri@gmail.com



مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران و اهمیت کلزا به عنوان یک منبع روغنی با کیفیت، شناسایی محرک‌های رشد مؤثر در افزایش عملکرد و بهره‌وری آب ضروری است. کلزا (*Brassica napus L.*) به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی در سطح جهان، به دلیل دارا بودن اسیدهای چرب غیراشباع، فقدان کلسترول و کیفیت تغذیه‌ای بالای روغن آن، از جایگاه ویژه‌ای در رژیم‌های غذایی سالم برخوردار است (شین و همکاران، ۲۰۲۳). در مقایسه با روغن‌هایی نظیر آفتابگردان، ذرت و سویا، روغن کلزا به دلیل ترکیب مطلوب اسیدهای چرب و پایداری اکسیداتیو، اولویت بالاتری برای مصرف انسانی دارد. در ایران نیز کلزا به عنوان محصولی استراتژیک و جایگزین مناسب برای واردات روغن خوراکی، مورد توجه برنامه‌های توسعه کشاورزی قرار گرفته است (امیری اوغان، ۱۴۰۲).

در ایران، سطح زیر کشت کلزا در سال ۲۰۲۱ به ۱۱۲/۷ هکتار رسید که نشان‌دهنده رشد قابل توجهی در تولید این محصول است. در منطقه مغان، به‌ویژه شهرستان بيله‌سوار، سطح زیر کشت کلزا در سال‌های اخیر افزایش یافته و به حدود ۳/۴ هکتار رسیده است. عملکرد متوسط برداشت کلزا در این منطقه بیش از ۲/۵ تن در هکتار گزارش شده است. درصد روغن دانه کلزا در ایران به‌طور میانگین حدود ۴۰ درصد است. این اطلاعات نشان‌دهنده پتانسیل بالای تولید کلزا در ایران و به‌ویژه در منطقه مغان است (هاشمی و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، در بسیاری از مناطق کشت کلزا، به‌ویژه در نواحی نیمه‌خشک مانند شمال غرب کشور، تنش‌هایی نظیر کم‌آبی و شوری، تولید پایدار این محصول را با چالش‌هایی مواجه کرده است (شبنانی و همکاران، ۲۰۱۲). اقلیم ایران با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر که تنها یک‌سوم میانگین جهانی است و نرخ تبخیر سالانه‌ای تا سه برابر متوسط جهانی، شرایط ناپایداری برای تأمین آب در زراعت دیم و آبی فراهم آورده است (شیروانی، ۲۰۱۷). در چنین شرایطی، افزایش تاب‌آوری

گیاهان زراعی نسبت به تنش خشکی، یکی از محورهای کلیدی کشاورزی پایدار و هوشمند اقلیمی به‌شمار می‌رود. از جمله راهکارهای مؤثر برای کاهش اثرات منفی خشکی، استفاده از محرک رشد گیاهی است که بدون افزایش مستقیم عناصر غذایی، موجب بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی، افزایش کارایی مصرف آب^۱ و ارتقای کیفیت محصول می‌شوند (دوجاردین، ۲۰۱۵). محرک‌های رشد گیاهی موادی با منشأ طبیعی شامل ترکیبات آلی و زیستی مانند اسیدهای هیومیک و فولویک، اسیدهای آمینه و عصاره‌های جلبک دریایی هستند که توانایی ارتقاء رشد و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارند (روفائل و کولا، ۲۰۲۰). اسید فولویک نیز با وزن مولکولی کمتر نسبت به هیومیک اسید، جذب و تحرک سریع‌تری در بافت‌های گیاهی دارد و در افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و کیفیت محصول نقش دارد (شهرجیان و سان، ۲۰۲۴). پژوهش‌های متعددی کارایی این مواد را در افزایش عملکرد دانه و کیفیت کلزا گزارش کرده‌اند. به‌طور مثال، میرزاپور و نورقلی‌پور (۲۰۲۲) نشان دادند که تیمار اسید هیومیک موجب افزایش ۱۵/۸ درصدی عملکرد و تیمار اسید فولویک بیشترین افزایش در درصد روغن (۹/۱ درصد) را به همراه داشت. در پژوهشی مشابه، رئیسی ساداتی و همکاران (۲۰۲۱) تأکید کردند که در شرایط نرمال، اسید آمینه و در شرایط خشکی، فولویک اسید اثربخشی بیشتری دارد. این تفاوت پاسخ‌ها به محرک‌ها، بسته به شرایط محیطی، مرحله فیزیولوژیکی، ساختار خاک و هدف تولید (عملکرد کمی یا کیفیت روغن)، تصمیم‌گیری درباره انتخاب تیمار مناسب را پیچیده می‌سازد. با توجه به این چالش، بهره‌گیری از رویکردهای تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند روش تاپسیس^۲، ابزار مناسبی برای ارزیابی هم‌زمان چند شاخص و اولویت‌بندی تیمارها در شرایط مختلف فراهم می‌آورد (هوانگ و یون، ۱۹۸۱). این رویکردها مانند فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و ترکیب آن با مدل‌هایی همچون DEA قبلاً برای تحلیل

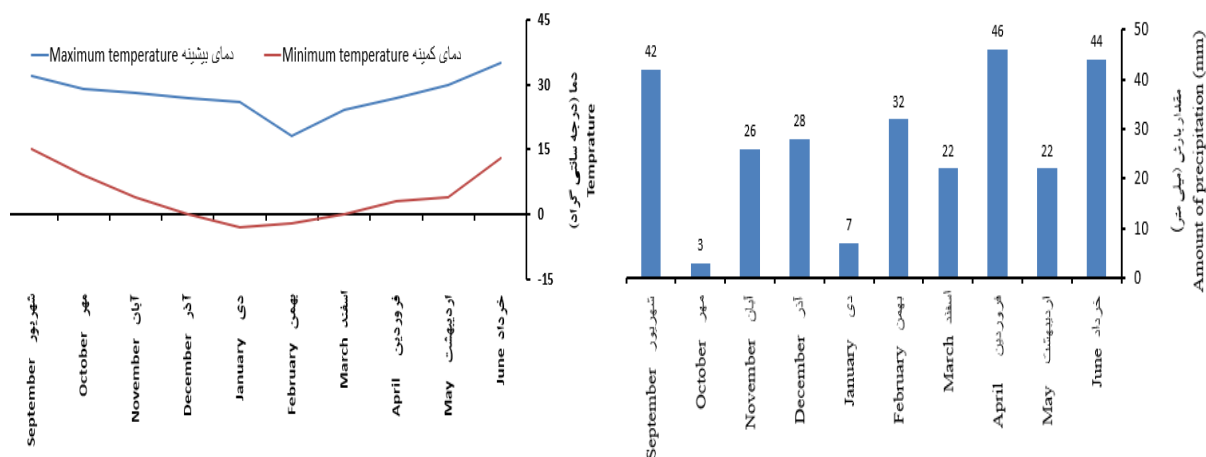
تعیین تیمار برتر از دیگر نوآوری‌های این مطالعه به‌شمار می‌رود. این پژوهش تلاش می‌کند تا با ادغام رویکردهای آلی، اقتصادی و تصمیم‌سازی مدیریتی، چارچوبی کاربردی برای ارتقای بهره‌وری کلزا در مناطق نیمه‌خشک کشور ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آزمایش طی دو فصل زراعی (۱۴۰۰ و ۱۳۹۹) در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (ایستگاه تحقیقاتی مغان) واقع در بین عرض‌های جغرافیایی ۳۹ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی انجام شد. منطقه پارس‌آباد مغان دارای اقلیم نیمه‌خشک و معتدل بوده و تابستان‌هایی گرم و مرطوب و زمستان‌هایی معتدل و مرطوب دارد. براساس داده‌های اقلیمی میان‌مدت در دشت مغان، میانگین بارندگی سالانه منطقه حدود ۲۹۱ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای سالانه تقریباً ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد است؛ دمای حداکثر تابستان‌ها گاهی تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر می‌رسد و دمای حداقل زمستان‌ها ممکن است به ۱۶- درجه سانتی-گراد نیز کاهش یابد. دامنه سالانه بارندگی نیز بین ۷۹ تا ۵۲۳ میلی‌متر نوسان دارد (شرکت آب و فاضلاب مغان، ۱۴۰۲). طی دوره رشد گیاه کلزا، دمای هوا در هیچ‌یک از روزهای سال به کمتر از ۵- درجه سانتی‌گراد نرسید، دمایی که می‌تواند برای گیاه کلزا خسارت‌زا باشد (امیری اوغان، ۱۴۰۲). باین‌حال، تعداد روزهایی با دمای زیر صفر در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند به ترتیب یک، سیزده، هشت و سه روز ثبت شد. میانگین نمودار تغییرات روزانه دما و بارش دو سال طی فصل رشد در شکل ۱ ارائه شده است.

کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی به‌کار رفته‌اند (به‌عنوان مثال، در مطالعات منطقه سین‌کیانگ چین در سال ۲۰۲۰ و همچنین در مطالعات مربوط به منابع آبی تحت تغییرات اقلیمی در سال ۲۰۲۳) (سونگ و همکاران، ۲۰۲۰). چنین روش‌هایی قادرند با وزن‌دهی مناسب، معیارهایی مانند عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب را ترکیب کرده و بسته به اهداف زراعی، تیمار بهینه را مشخص کنند. افزون بر این، ترکیب تاپسیس با روش‌های وزن‌دهی عینی مانند روش اهمیت معیارها از طریق همبستگی بین معیارها^۳ دقت تصمیم‌گیری را در شرایط تضاد میان شاخص‌ها افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، اغلب مطالعات پیشین تمرکز خود را بر یک یا دو جنبه عملکردی قرار داده و از تحلیل هم‌زمان مؤلفه‌های زیستی، کیفی و اقتصادی غافل بوده‌اند. با این حال، بیشتر پژوهش‌ها در حوزه کلزا (*Brassica napus L.*) در ایران در شرایط کنترل‌شده مانند گلخانه یا آزمایشگاه انجام شده‌اند، درحالی‌که مطالعات میدانی واقعی در مقیاس مزرعه‌ای بسیار محدود است. برای نمونه، تحقیقاتی مانند مطالعه بر ۱۳۰ مزرعه واقعی در استان گلستان با استفاده از DEA^۴ (تحلیل پوششی داده‌ها) برای بررسی بهره‌وری مصرف انرژی در تولید کلزا و ارزیابی مصرف آب و عملکرد در دشت مغان، در استان اردبیل، به‌عنوان نمونه‌هایی برجسته از پژوهش در شرایط واقعی مزرعه‌ای قابل ذکر هستند (موسوی اول و همکاران، ۲۰۱۱). این محدودیت، تعمیم نتایج و ارائه توصیه‌های فنی مؤثر را برای کشاورزان دشوار می‌سازد. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات چهار محرک آلی شامل اسید هیومیک، فولویک، آمینه و عصاره جلبک دریایی، در دو تیمار آبیاری نرمال و تنش خشکی، بر عملکرد، درصد روغن و بهره‌وری مصرف آب کلزا انجام شده است. تحلیل اقتصادی با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی و تلفیق نتایج با مدل تاپسیس به‌منظور



شکل ۱- نمودار میانگین بارش و دمای محل اجرای پژوهش در طول دوره رشد کلزا

طرح آزمایشی

این آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی به صورت کرت‌های خردشده در سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل دو تیمار آبیاری (آبیاری پس از ۷۰ تا ۸۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A (آبیاری نرمال) و آبیاری پس از ۱۳۰ تا ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی (تنش آبی) که بر اساس مطالعات پیشین تعیین شده بود. آبیاری پس از رسیدن تبخیر تجمعی حدود ۷۰-۸۰ میلی‌متر از تشت تبخیر کلاس A به عنوان آبیاری نرمال در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که اگر آبیاری پس از تبخیر تجمعی بیشتری انجام شود، شرایط تنش آبی ایجاد می‌کند و می‌تواند عملکرد محصول و کیفیت دانه‌ها را کاهش دهد (طاها و همکاران، ۲۰۱۱ و لاخاوات و همکاران، ۲۰۲۴). مقدار آب مصرفی در هر نوبت آبیاری بر اساس پایش رطوبت خاک با دستگاه TDR^۵ در عمق توسعه ریشه (حدود یک متر) و با هدف رساندن رطوبت به ظرفیت زراعی تعیین گردید. عامل فرعی شامل پنج تیمار کودی بود که در دو مرحله فنولوژیکی خروج از روزت و شروع گلدهی و با غلظت پنج در هزار به گیاه اعمال شدند. تیمارها شامل: (۱) شاهد (بدون استفاده از محرک رشد، تنها مصرف کود شیمیایی طبق آزمون خاک ۲) تیمار شاهد + محلول‌پاشی اسید آمینه؛ (۳) تیمار شاهد + مصرف اسید هیومیک از طریق کودآبیاری (پنج کیلوگرم در هکتار؛ (۴)

تیمار شاهد + محلول‌پاشی اسید فولویک؛ (۵) تیمار شاهد + محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی بودند.

اجرای آزمایش

پیش از اعمال تیمارهای آزمایشی، ترکیب شیمیایی محرک‌های رشد مورد استفاده در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب مورد آنالیز قرار گرفت. بر اساس نتایج این آنالیز، اسید هیومیک مصرفی دارای ۵۳ درصد اسید هیومیک، اسید فولویک دارای ۲۲/۱ درصد اسید فولویک، اسید آمینه حاوی ۳۶/۸ درصد اسید آمینه آزاد و عصاره جلبک دریایی دارای ۱۰ درصد اسید آلجینیک بود. گیاه مورد مطالعه، کلزا رقم آزاد گرده‌افشان دلگان بود که هر سال در اواسط مهرماه در مزرعه کشت شد. هر کرت آزمایشی دارای ابعاد پنج متر در ۲/۴ متر و شامل چهار ردیف کاشت بود. در تیمار سوم (کاربرد اسید هیومیک)، در هر کرت مقدار شش گرم اسید هیومیک به صورت کودآبیاری در دو مرحله رشدی خروج از روزت و شروع گلدهی به خاک داده شد. پیش از اجرای آزمایش، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه مرکبی تهیه گردید. نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری، برای اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله بافت خاک (جی و بایدر، ۱۹۸۶)، درصد کربن آلی (نلسون و سامرز، ۱۹۹۶)، عناصر غذایی کم‌مصرف (لیندسی

و نورویل، ۱۹۷۸)، کربنات کلسیم معادل (لوپیرت و سنوارز، ۱۹۹۶)، اسیدیته و هدایت الکتریکی (رودس، ۱۹۸۲)، پتاسیم قابل جذب (هلمک و اسپارک، ۱۹۹۶) و فسفر قابل جذب (اولسین و سامیرز، ۱۹۸۲) مورد تجزیه قرار گرفتند. نتایج این آزمون‌ها در جدول یک ارائه شده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قطعات آزمایشی

تجزیه و تحلیل خاک											هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)	
اسیدیته	کربنات کلسیم معادل	ماده آلی	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	آهن	روی	منگنز	مس	بافت خاک			
		%						mg.kg ⁻¹				
7.8	1.34	5.7	0.9	15.2	521	3.2	0.13	10.6	1.6	لوم رسی		

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه نشان داد که خاک دارای واکنش نسبتاً قلیایی (pH=7.8) است که می‌تواند بر قابلیت جذب برخی عناصر ریزمغذی به‌ویژه روی و آهن تأثیر منفی داشته باشد. هدایت الکتریکی خاک (۱/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر) در محدوده غیرشور قرار گرفته و از این منظر محدودیتی برای رشد گیاهان ایجاد نمی‌کند. میزان آهک معادل (۵/۷ درصد) و ماده آلی پایین (۰/۹ درصد) بیانگر حاصلخیزی نسبتاً ضعیف خاک و نیاز به مدیریت بهبود مواد آلی است. غلظت فسفر قابل جذب (۱۵/۲ mg/kg) در حد مناسب و پتاسیم قابل جذب (۵۲۱ mg/kg) در سطح نسبتاً بالا قرار دارد، درحالی‌که غلظت آهن (۳/۲ mg/kg) و به‌ویژه روی (۰/۱۳ mg/kg) کمتر از حد بحرانی گزارش شده و احتمال بروز کمبود این عناصر در گیاهان وجود دارد. در مقابل، منگنز (mg/kg) و مس (۱۰/۶ mg/kg) در محدوده مطلوب قرار دارند. با توجه به بافت لومی رسی خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت و مواد غذایی مطلوب است، بااین‌حال محدودیت اصلی خاک در زمینه عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه روی، قابل توجه بوده و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق تغذیه‌ای است.

پس از انجام عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح، برای کنترل علف‌های هرز از علف‌کش پیش‌رویشی ترفلان به میزان دو لیتر در هکتار استفاده شد. به‌منظور تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه، کود اوره در مجموع به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و در سه مرحله زمان آماده‌سازی بستر بذر (قبل از کاشت بصورت پایه)، مرحله روزت و مرحله ساقه رفتن (هر بار ۵۰ کیلوگرم در

هکتار) به‌کار برده شد. همچنین، به‌منظور رفع کمبود عناصر ریزمغذی، محلول‌پاشی سولفات روی و سولفات آهن با غلظت سه در هزار در دو مرحله فنولوژیکی خروج از روزت و پیش از گلدهی صورت گرفت تا از بروز کمبود این عناصر و اثرات منفی آن بر رشد و عملکرد گیاه جلوگیری شود. در پایان فصل رشد، میزان آب مصرفی و برخی شاخص‌های کلیدی رشد از جمله عملکرد دانه، درصد روغن و کارایی مصرف آب مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. عملکرد دانه با جمع‌آوری و وزن کردن کل دانه‌های برداشت‌شده از سطحی معادل ۱/۵ متر مربع تعیین شد. درصد روغن دانه با استفاده از روش سوکسله^۶ و در شرایط دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و به‌کارگیری حلال دی اتیل اتر خشک تعیین گردید (حسینی، ۱۹۹۴). همچنین، کارایی مصرف آب که نشان‌دهنده میزان محصول تولیدشده به ازای هر واحد آب مصرفی است، از تقسیم عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) بر حجم آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) محاسبه شد (یاداو و همکاران، ۲۰۲۴).

آنالیز آماری

قبل از انجام آنالیز واریانس، ابتدا وجود یا عدم وجود داده‌های پرت با استفاده از آزمون گرابز (۱۹۶۹) بررسی شد. سپس، نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک (۱۹۶۵) ارزیابی گردید. پس از تأیید فرضیات مربوطه، تحلیل واریانس (ANOVA) روی داده‌ها انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح اطمینان یک

درصد انجام گرفت. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ صورت پذیرفت.

ارزیابی اقتصادی

روش بودجه‌بندی جزئی^۷ یکی از روش‌های اقتصادی مؤثر و ساده برای ارزیابی سودآوری تغییرات مدیریتی یا تیمارهای جدید در کشاورزی است که تنها هزینه‌ها و منافع مرتبط با تغییر مورد نظر را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این روش، ابتدا منافع افزایشی شامل افزایش درآمدها یا کاهش هزینه‌ها و سپس هزینه‌های افزایشی شامل هزینه‌های اضافی اجرای تیمار جدید شناسایی می‌شود؛ همچنین منافع کاهش‌یافته و هزینه‌های کاهش‌یافته نیز مدنظر قرار می‌گیرد. در نهایت، تفاوت بین مجموع منافع و هزینه‌ها تعیین‌کننده توجیه‌پذیری اقتصادی تیمار خواهد بود؛ به‌گونه‌ای که در صورت برتری منافع نسبت به هزینه‌ها، اجرای تیمار جدید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. این روش به دلیل سادگی و تمرکز بر عوامل مؤثر در تغییر عملکرد و هزینه‌ها، به‌طور گسترده‌ای در تحلیل اقتصادی اصلاحات کشاورزی کاربرد دارد (روو و همکاران، ۲۰۲۱).

درصد روغن و کارایی مصرف آب به‌عنوان معیارهای ارزیابی تحت دو تیمار آبیاری بودند. در گام دوم، برای مقایسه‌پذیری معیارها، ماتریس تصمیم به روش برداری نرمال‌سازی گردید. سپس در مرحله سوم، اوزان معیارها با توجه به اهداف کشاورز تعیین و در ماتریس نرمال‌شده اعمال گردید. در ادامه، مقادیر ایده‌آل (بهترین حالت برای هر معیار) و ضد ایده‌آل (بدترین حالت ممکن) تعیین و فاصله هر تیمار از این دو وضعیت به کمک فاصله اقلیدسی محاسبه شد. در مرحله پنجم شاخص شباهت هر گزینه بر اساس این فاصله‌ها برآورد گردید که مقدار آن میزان نزدیکی گزینه به راه‌حل ایده‌آل را نشان می‌دهد. این شاخص با رابطه (۱) محاسبه شد:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (1)$$

d_i^+ و d_i^- به ترتیب فاصله گزینه i از ایده‌آل منفی و مثبت است.

در نهایت، تیمارها بر اساس مقدار شاخص شباهت رتبه‌بندی شدند؛ بدین معنا که تیمار مطلوب گزینه‌ای بود که بیشترین نزدیکی را به حالت ایده‌آل و بیشترین فاصله را از حالت ضد ایده‌آل داشت.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محرک‌های آلی رشد بر عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی ارائه می‌شود. از آنجاکه پاسخ گیاهان زراعی به این مواد به‌شدت تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک و نوع محرک قرار دارد، انتظار می‌رود اثر تیمارها در شرایط مختلف متفاوت باشد. از سوی دیگر، محرک‌های آلی معمولاً اثرات چندبعدی دارند و می‌توانند هم بر صفات کمی مانند عملکرد دانه و هم بر صفات کیفی نظیر درصد روغن تأثیرگذار باشند. همچنین ارزیابی کارایی مصرف آب در کنار این شاخص‌ها، دیدگاه جامع‌تری از کارایی این مواد در نظام‌های کشاورزی منابع محدود فراهم می‌آورد. بر این اساس، در ادامه ابتدا اثر

تصمیم‌گیری چند معیاره^۸ (MCDM) به روش TOPSIS

در این پژوهش به‌منظور شناسایی مناسب‌ترین تیمار، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس بهره گرفته شد (هوانگ و یون، ۱۹۸۱). این روش به دلیل قابلیت ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های متعدد با مقیاس‌ها و اوزان متفاوت، ابزاری کارآمد در مسائل مرتبط با کشاورزی محسوب می‌شود. فرایند اجرای تاپسیس شامل شش مرحله اصلی بود: در گام نخست، ماتریس تصمیم شامل گزینه‌ها به‌صورت سطر و معیارها به‌صورت ستون تشکیل شد؛ به‌گونه‌ای که هر سلول نشان‌دهنده عملکرد یک گزینه در یک معیار مشخص بود. پنج تیمار کودی محرک رشد به‌عنوان گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری و عملکرد دانه،

درصد روغن دانه و عملکرد دانه کلزا داشته است (جدول ۲)، در حالی که اثر آبیاری به تنهایی بر هیچ یک از صفات معنی دار نبود و بلوک‌ها نیز تاثیری نداشتند. همچنین، تعامل آبیاری × محرک رشد تنها بر عملکرد دانه معنی دار بود که نشان‌دهنده این است که اثر محرک رشد بر عملکرد دانه بسته به شرایط آبیاری تغییر می‌کند.

تیمارهای مختلف بر شاخص‌های اصلی ارائه‌شده و سپس با مقایسه و تحلیل نتایج بر مبنای مطالعات پیشین، جایگاه هر ترکیب در شرایط نرمال و تنش خشکی تبیین می‌گردد.

اثر تیمارهای آبیاری و محرک‌های رشد بر عملکرد دانه، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا

آنالیز واریانس نشان داد که محرک رشد تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر کارایی مصرف آب،

جدول ۲- آنالیز واریانس (میانگین مربعات) کارایی مصرف آب و برخی خصوصیات گیاه کلزا

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
عملکرد دانه	روغن دانه	کارایی مصرف آب		
27240 ^{ns}	1.2 ^{ns}	0.03 ^{ns}	2	بلوک
126736 ^{ns}	25.3 ^{ns}	0.42 ^{ns}	1	آبیاری (کرت اصلی)
48154	3.8	0.06	2	خطا (کرت اصلی)
465997 ^{**}	18.7 ^{**}	0.41 ^{**}	5	محرک رشد (کرت فرعی)
80579 ^{**}	4.2 ^{ns}	0.07 ^{ns}	5	آبیاری × محرک رشد
9942	2.1	0.04	20	خطا (کرت فرعی)
2.80	3.20	3.54	-	ضریب تغییرات (%)

ns و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری، اثر معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد

مترمکعب) را نشان داد. درصد روغن دانه و عملکرد دانه نیز تحت تأثیر محرک رشد افزایش یافته و بالاترین مقادیر به ترتیب با اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی مشاهده شد، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۳).

بررسی اثرات اصلی تیمارها نشان داد که کارایی مصرف آب با استفاده از محرک‌های رشد به طور قابل توجهی افزایش یافت؛ به طوری که بیشترین کارایی مربوط به اسید آمینه (۱/۴) کیلوگرم بر مترمکعب و اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی (۱/۳۸) کیلوگرم بر مترمکعب بود، در حالی که شاهد کمترین مقدار (۱/۲۳) کیلوگرم بر

جدول ۳- اثر اصلی تیمارهای آبیاری و محرک رشد بر کارایی مصرف آب و برخی خصوصیات گیاه کلزا

فاکتورها	تیمار	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	درصد روغن دانه	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
تیمار آبیاری	نرمال	1.11	43.2	3620
	خشکی	1.08	39.8	3502
محرک رشد	شاهد	1.23 ^c	38.5 ^c	3181 ^c
	اسید آمینه	1.40 ^a	41.7 ^{ab}	3560 ^a
	اسید هیومیک	1.38 ^a	42.3 ^a	3588 ^a
	اسید فولویک	1.35 ^b	40.2 ^b	3467 ^b
	عصاره جلبک دریایی	1.38 ^a	41.9 ^a	3528 ^{ab}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD، تفاوت آماری معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند

این اختلاف‌ها معنی دار نبودند، اما در بررسی تعامل آبیاری × محرک رشد مشخص شد که در شرایط خشکی، تیمار

اگرچه میانگین‌های مربوط به آبیاری نرمال و تنش خشکی برای کارایی مصرف آب تفاوت کمی داشتند،

اسید آمینه بیشترین کارایی مصرف آب (۱/۷۵) کیلوگرم بر متر مکعب) و عملکرد دانه بالاتر را ایجاد کرد، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به شاهد در هر دو تیمار آبیاری بود (جدول ۴). این نتایج نشان می‌دهد که محرک رشد عامل اصلی تغییرات صفات کلزا است و اعمال آن، به ویژه در شرایط تنش خشکی، می‌تواند موجب بهبود کارایی مصرف آب و افزایش عملکرد دانه و درصد روغن شود.

جدول ۴- تأثیر برهمکنش تیمارهای آبیاری و محرک رشد بر کارایی مصرف آب و برخی خصوصیات گیاه کلزا

تیمار آبیاری	معیار یا محرک‌های رشد	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	درصد روغن دانه	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
نرمال	شاهد	1.03	40.1	3326 ^c
	اسید آمینه	1.06	42.5	3438 ^b
	اسید هیومیک	1.17	43.8	3802 ^a
	اسید فولویک	1.09	41.2	3539 ^{ab}
	عصاره جلبک دریایی	1.09	42.7	3537 ^{ab}
خشکی	شاهد	1.44	36.9	3036 ^c
	اسید آمینه	1.75	40.9	3682 ^a
	اسید هیومیک	1.60	40.8	3374 ^b
	اسید فولویک	1.61	39.2	3395 ^b
	عصاره جلبک دریایی	1.67	41.1	3519 ^{ab}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD، تفاوت آماری معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند

محلول‌پاشی اسیدهای آمینه در شرایط تنش کم‌آبی آخر فصل موجب بهبود برخی فرآیندهای فیزیولوژیک کلزا می‌شود. بنابراین، نتایج حاضر با مطالعات مشابه تناقض آشکاری ندارد و تفاوت‌های جزئی مشاهده شده احتمالاً به تفاوت در شرایط خاک، اقلیم، مقدار کاربرد مواد محرک و واریته‌های کلزا بازمی‌گردد.

نتایج فیزیولوژیکی نشان داد که اسید هیومیک در شرایط آبیاری کامل با بهبود ساختار خاک، افزایش تبادل کاتیونی و تحریک فعالیت میکروبی موجب افزایش راندمان تغذیه‌ای و رشد عمومی می‌شود، در حالی که اسیدهای آمینه در شرایط تنش خشکی با تنظیم اسمزی، فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش رادیکال‌های آزاد به مقاومت گیاه کمک می‌کنند. عصاره جلبک دریایی نیز با دارا بودن اکسین، جیبرلین و بتائین موجب افزایش سنتز کلروفیل و تبادل گازی شده و رشد گیاه را حفظ می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات ما و همکاران (۲۰۲۲)، کومار و همکاران (۲۰۲۴)، فکری اجیرلو و همکاران (۱۴۰۲) و ریسی ساداتی و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد.

مطالعات پیشین نیز با این نتایج همخوانی دارند. امپونگ و همکاران (۲۰۲۲) و انجم و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که هیومیک اسید در شرایط تغذیه‌ای بهینه و اسیدهای آمینه در شرایط تنش زیستی مؤثرترند. استفاده از محرک‌های رشد شامل اسیدهای آمینه، عصاره جلبک دریایی و هیومیک اسید در شرایط تنش خشکی موجب بهبود عملکرد و کیفیت گیاهان می‌شود. برای مثال، نتایج مطالعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی مغان نشان داد که کاربرد محرک‌های رشد در شرایط کم‌آبی عملکرد کلزا را افزایش می‌دهد (پسندیده و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات مشابه بر روی گیاه کلم بروکلی نشان داد که محلول‌پاشی یا کودآبیاری با این مواد باعث بهبود صفات فیزیولوژیکی، افزایش محتوای کلروفیل، عملکرد و کیفیت محصول و پایداری عملکرد در شرایط تنش خشکی می‌شود (کالوزویچ و همکاران، ۲۰۱۷). رافائل و کولا (۲۰۲۰) نیز تأکید کردند که محرک‌های رشد با تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیک و متابولیک گیاه، نقش کلیدی در تحمل تنش‌های غیرزیستی ایفا می‌کنند. مطالعه فیاض و همکاران (۱۴۰۱) نشان داد که

بررسی الگوی بارش منطقه نشان داد که وقوع چند بارش مؤثر در حوالی فازهای حساس زایشی و پر شدن دانه کلزا، شدت واقعی تنش آبی را کاهش داده و آثار فیزیولوژیکی آن را تخفیف داده است. یافته‌های مشابهی در هند و بنگلادش گزارش شده است که بارش‌های غیرمنتظره در دوره‌های حساس رشد می‌تواند اثرات منفی تنش آبی را کاهش دهد و عملکرد محصول را بهبود بخشد (سیرینی‌دی و همکاران، ۲۰۲۳؛ احامید و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، تحلیل هم‌زمان پارامترهای اقلیمی و بیولوژیکی برای ارزیابی دقیق تنش ضروری است.

به طور کلی، استفاده از اسید هیومیک در شرایط آبیاری کافی و اسید آمینه یا عصاره جلبک دریایی در شرایط تنش خشکی، استراتژی مناسبی برای ارتقای عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا است و می‌تواند در طراحی سیستم‌های کشت پایدار برای مناطق نیمه‌خشک و تحت تأثیر تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج نشان می‌دهد که محرک‌های رشد به عنوان یک راهکار کم‌هزینه، مؤثر و سازگار با محیط‌زیست، نقش کلیدی در بهبود عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کلزا ایفا می‌کنند.

تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی تیمارهای محرک رشد با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی (جدول ۵) نشان داد که تمامی تیمارها نسبت به شاهد از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر بودند، چراکه نسبت منفعت به هزینه (Benefit-Cost Ratio (BCR)) در همه آن‌ها بزرگ‌تر از یک بود. در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید هیومیک با توجه به عملکرد بالای دانه و افزایش کیفیت روغن، بالاترین سود خالص و بالاترین نسبت منفعت به هزینه را به خود اختصاص داد. این نتایج هماهنگ با برتری آلی این تیمار در شرایط بدون تنش هستند. در مقابل، در شرایط تنش خشکی، تیمار اسید آمینه به دلیل توانایی در حفظ عملکرد و ارتقای بهره‌وری مصرف آب، بالاترین بازده اقتصادی را ایجاد کرد که نشان‌دهنده سازگاری آن با شرایط محدودیت آبی است.

قابل توجه است که تیمارهایی با عملکرد متوسط اما هزینه پایین‌تر (مانند عصاره جلبک) نیز در برخی شرایط اقتصادی‌تر از تیمارهای پرهزینه‌تر بودند. یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کنند که صرف بررسی عملکرد بیولوژیکی کافی نیست و انتخاب تیمار بهینه باید با در نظر گرفتن هزینه-فایده و هدف زراعی انجام شود؛ نتیجه‌ای که با مطالعات یوسفی و همکاران (۲۰۱۷) و امپونگ و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. از این رو، ترکیب داده‌های زراعی با تحلیل‌های اقتصادی ابزاری کلیدی در توصیه فنی و مدیریتی برای کشاورزان در مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید هیومیک بیشترین سود خالص را به همراه داشت که این امر ناشی از بهبود ساختار خاک، افزایش جذب عناصر غذایی و در نهایت افزایش عملکرد دانه و کیفیت محصول است. بهبود ساختار خاک باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود تهویه ریشه می‌شود که در نهایت منجر به رشد بهتر گیاه و افزایش عملکرد می‌گردد. این بهبودها باعث کاهش نیاز به مصرف کودهای شیمیایی و آبیاری مکرر شده و هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد.

در شرایط تنش خشکی نیز تیمار اسید آمینه به دلیل نقش مؤثر آن در افزایش مقاومت گیاه به استرس آبی و حفظ عملکرد، بیشترین بازده اقتصادی را ایجاد کرد. اسیدهای آمینه با تنظیم اسمزی سلولی، فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، به گیاه کمک می‌کنند تا در شرایط کم‌آبی عملکرد خود را حفظ کند. این موضوع باعث کاهش خسارات ناشی از تنش و حفظ درآمد کشاورزان می‌شود. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی و زیستی در انتخاب تیمار بهینه را برجسته می‌کند، به‌ویژه در نظام‌های زراعی منابع محدود که کشاورزان با محدودیت‌های مالی و محیطی مواجه‌اند. در چنین شرایطی، انتخاب تیماری که هم عملکرد را بهبود دهد و هم هزینه‌های تولید را کنترل کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعات پیشین نیز بر ضرورت

تلفیق تحلیل عملکرد و هزینه تأکید داشته‌اند. یوسفی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که ارزیابی اقتصادی همراه با تحلیل فیزیولوژیکی و عملکردی، راهنمایی دقیق‌تری برای انتخاب بهینه محرک رشد فراهم می‌آورد و می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا تصمیمات بهتری در مدیریت منابع خود اتخاذ کنند.

در کشاورزی کلزا، افزایش عملکرد دانه به‌طور مستقیم با درآمد اقتصادی کشاورز مرتبط است و عواملی مانند بهبود ساختار خاک، مدیریت بهینه آب و تغذیه گیاه نقش کلیدی در این افزایش دارند. همچنین، مصرف محرک‌های رشد می‌تواند هزینه‌های ورودی کشاورزی را کاهش داده و در عین حال عملکرد و کیفیت محصول را افزایش دهد (پسندیده و همکاران، ۲۰۲۲؛ رفیع و همکاران، ۱۴۰۰؛ خودشناس و همکاران، ۱۴۰۱). این کاهش هزینه‌ها از طریق کاهش مصرف کودهای شیمیایی، کاهش دفعات آبیاری و بهبود کارایی استفاده از منابع آبی و غذایی محقق می‌شود که در نهایت به سودآوری بیشتر منجر می‌شود.

از سوی دیگر، در شرایط تنش خشکی، استفاده از محرک‌های رشد مانند اسید آمینه، اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد دانه کلزا را افزایش دهد و مقاومت گیاه را به کم‌آبی بهبود بخشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مصرف توأم این محرک‌ها در شرایط تنش خشکی، افزایش عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد به همراه داشته است. به‌عنوان مثال، در تحقیقی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی مغان، مصرف توأم این محرک‌ها موجب افزایش ۳۱/۹ درصدی عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش خشکی نسبت به شاهد شده است (پسندیده و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، در مطالعه‌ای در استان قم، استفاده از این محرک‌ها

در خاک‌های آهکی و شور باعث بهبود عملکرد کلزا و افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی شده است (میرزاپور و نورقلی‌پور، ۱۴۰۱). این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از محرک‌های آلی رشد می‌تواند به‌عنوان استراتژی مؤثری برای افزایش عملکرد و کیفیت محصول کلزا در شرایط تنش خشکی و کاهش هزینه‌های کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک و تحت تأثیر تغییر اقلیم توصیه شود.

علاوه بر این، کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی به معنای کاهش نیاز به هزینه‌های جبرانی مانند کوددهی اضافی یا آبیاری اضطراری است که می‌تواند فشار مالی بر کشاورزان را کاهش دهد؛ بنابراین، در نظام‌های کشاورزی منابع محدود، انتخاب تیمار محرک رشد باید با در نظر گرفتن تحلیل اقتصادی دقیق همراه باشد تا ضمن افزایش عملکرد و کیفیت محصول، از نظر هزینه نیز بهینه باشد. بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای بودجه‌بندی کشاورزی می‌تواند به کشاورزان و تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا بهترین گزینه را با توجه به شرایط محیطی، هدف تولید و محدودیت‌های مالی انتخاب کنند (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۷؛ وانگ و یون، ۱۹۸۱). این رویکرد جامع، تضمین‌کننده پایداری اقتصادی و زیستی در تولید کلزا و سایر محصولات کشاورزی است و می‌تواند به بهبود امنیت غذایی و حفظ منابع طبیعی کمک کند. در نهایت، توجه به جنبه‌های اقتصادی در کنار جنبه‌های فیزیولوژیکی و محیطی، کلید موفقیت در کشاورزی پایدار و بهره‌ور است. کشاورزان و مدیران کشاورزی با استفاده از داده‌های اقتصادی و علمی می‌توانند تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند که ضمن افزایش بهره‌وری، ریسک‌های مالی و زیست‌محیطی را کاهش دهد و به توسعه پایدار بخش کشاورزی کمک کند.

جدول ۵- انتخاب سودآورترین تیمار براساس روش بودجه‌بندی جزئی

تیمار آبیاری	محرك رشد	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	هزینه محرك‌های آلی استفاده شده (هزار ریال در هکتار)	درآمد ناخالص کشاورز (هزار ریال در هر هکتار)	هزینه‌ها/ منافع (هزار ریال در هر هکتار)	منفعت خالص (هزار ریال در هر هکتار)	نسبت منفعت به هزینه
نرمال	شاهد	3326	-	1230620	-	-	-
	اسیدآمین	3438	7000	1272060	منافع 1272060	34441	1.1
	اسید هیومیک	3802	4500	1406740	منافع 1406741	171621	1.1
	اسید فولویک	3539	6000	1309430	منافع 1309431	72811	1.1
	عصاره جلبک دریایی	3537	5000	1308690	منافع 1308691	73071	1.1
	شاهد	3036	-	1123320	-	-	-
	اسیدآمین	3682	7000	1362340	منافع 1362341	232021	1.2
	اسید هیومیک	3374	4500	1248380	منافع 1248381	120561	1.1
	اسید فولویک	3395	6000	1256150	منافع 1256151	126831	1.1
	عصاره جلبک دریایی	3519	5000	1362340	منافع 1302031 1128320	173711	1.2
	شاهد	3036	-	1123320	-	-	-
	اسیدآمین	3682	7000	1362340	منافع 1362341	232021	1.2
خشکی	اسید هیومیک	3374	4500	1248380	منافع 1248381	120561	1.1
	اسید فولویک	3395	6000	1256150	منافع 1256151	126831	1.1
	عصاره جلبک دریایی	3519	5000	1362340	منافع 1302031 1128320	173711	1.2
	شاهد	3036	-	1123320	-	-	-
	اسیدآمین	3682	7000	1362340	منافع 1362341	232021	1.2
	اسید هیومیک	3374	4500	1248380	منافع 1248381	120561	1.1

تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با استفاده از

روش تاپسیس برای انتخاب تیمار برتر

تحلیل عملکرد تیمارهای محرك رشد در شرایط آبیاری نرمال (بدون تنش)

در شرایط آبیاری کامل که عامل محدودکننده‌ای مانند کم‌آبی وجود ندارد، عملکرد دانه به‌عنوان معیار اصلی برتری تیمارها خودنمایی می‌کند. طبق داده‌های جدول ۶، تیمار اسید هیومیک در تمامی سناریوهای اولویت‌دهی که در آن وزن عملکرد دانه بالا (تا ۱۰۰ درصد) بوده، بالاترین

شاخص شباهت را داشته و به‌عنوان رتبه اول انتخاب شده است. به‌عنوان مثال، در ترکیب با وزن عملکرد ۱۰۰ درصد (ردیف دوم جدول ۶)، اسید هیومیک با شاخص ۰/۵۱۱ در صدر قرار دارد. برتری اسید هیومیک به دلیل توانایی آن در بهبود جذب عناصر غذایی، توسعه ریشه، تحریک فعالیت میکروبی و افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک است. استفاده از اسید هیومیک موجب بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تسهیل جذب مواد مغذی می‌شود که در نهایت رشد گیاه و عملکرد محصول را

افزایش می‌دهد (شان و همکاران، ۲۰۲۴؛ کانیلان و اولیورز، ۲۰۱۴). همچنین، تحریک فعالیت میکروبی و بهبود سلامت خاک توسط اسید هیومیک باعث مقاومت بیشتر گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌شود (روی و همکاران، ۲۰۲۴).

تحلیل عملکرد تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری با تنش خشکی

در وضعیت تنش خشکی، الگوی برتری تیمارها تغییر یافته و به سمت تیمارهای آلی تطابق‌پذیری مانند عصاره جلبک دریایی و اسید آمینه متمایل می‌شود. این دو تیمار در سناریوهایی که وزن عملکرد دانه کاهش یافته و سهم بیشتری به کیفیت محصول (درصد روغن) و کارایی مصرف آب داده شده، در رتبه اول قرار گرفته‌اند. برای نمونه، در ردیف یک جدول ۶ که همه معیارها وزن مساوی دارند، عصاره جلبک و اسید آمینه به‌صورت مشترک با شاخص ۰/۵۳۱ در صدر قرار گرفته‌اند. مکانیسم‌های دفاعی این مواد شامل تحریک سنتز آنتی‌اکسیدان‌ها، بهبود تنظیم اسمزی و تقویت فتوسنتز تحت استرس می‌باشد (کالوو و همکاران، ۲۰۱۴). در شرایط تنش خشکی، استفاده از محرک‌های آلی رشد مانند عصاره جلبک دریایی و اسید آمینه باعث تقویت مکانیسم‌های دفاعی گیاه می‌شود. این مواد با افزایش سنتز آنتی‌اکسیدان‌ها، بهبود تنظیم اسمزی و تقویت فتوسنتز، مقاومت گیاهان را در برابر کم‌آبی افزایش می‌دهند (آدی‌بایو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کوکیرا و همکاران، ۲۰۲۰). عصاره جلبک دریایی موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو می‌شود (آدی‌بایو و همکاران، ۲۰۲۲)، درحالی‌که اسید آمینه با تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمزی، مقاومت گیاه را در برابر تنش خشکی بهبود می‌بخشد (کوکیرا و همکاران، ۲۰۲۰).

تحلیل ترکیبی چندمعیاره با رویکرد مدیریتی

در اغلب سناریوها، زمانی که وزن معیارها به‌طور متعادل میان عملکرد، روغن و کارایی مصرف آب توزیع شده است (مثلاً ردیف‌های پنج تا هفت)، فاصله شاخص شباهت تیمارها کاهش یافته و رقابت نزدیک‌تری میان تیمارهای آلی مشاهده می‌شود. در این وضعیت، برتری مطلق وجود ندارد، اما تیمار اسید آمینه و جلبک دریایی غالباً در رتبه اول یا دوم دیده می‌شوند، درحالی‌که شاهد همواره در پایین‌ترین رده قرار دارد. در پژوهش حاضر، به‌کارگیری مدل TOPSIS تصویری واقع‌گرایانه و چندبُعدی از کارایی تیمارها ارائه داد و استفاده از آن در تصمیم‌سازی زراعی برای شرایط تنش‌زا توصیه می‌شود. این مدل، با مقایسه گزینه‌ها بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، به اولویت‌بندی مؤثر گزینه‌ها کمک می‌کند (هوانگ و یون، ۱۹۸). این نتایج اهمیت رویکرد تلفیقی در انتخاب تیمارها را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که اگر کشاورز به دنبال بیشینه‌سازی عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل است، اسید هیومیک پیشنهاد می‌شود؛ ولی اگر هدف افزایش کارایی آب و پایداری تولید در شرایط تنش باشد، اسید آمینه یا عصاره جلبک انتخاب بهتری خواهد بود. این استراتژی با اصول کشاورزی هوشمند از نظر اقلیمی و پایدار هماهنگ است (فائو، ۲۰۲۱). نتایج به‌روشنی نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های آلی، بسته به شرایط آبیاری و اهداف زراعی، می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه در عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شود. انتخاب صحیح و موقع‌شناسانه این تیمارها، نه تنها افزایش عملکرد بلکه ارتقاء تاب‌آوری سیستم زراعی را تضمین می‌کند. توصیه می‌شود در برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریت مزرعه، از مدل‌های چندمعیاره مانند تاپسیس برای انتخاب تیمارهای بهینه بهره گرفته شود. این نتیجه نشان می‌دهد که هیچ تیماری در همه شرایط و اهداف، برتر مطلق نیست و باید از ابزارهای تصمیم‌سازی دقیق برای تعیین گزینه مطلوب استفاده کرد؛ همان‌گونه که وانگ و یون (۱۹۸۱) نیز تأکید کرده‌اند.

جدول ۶- رتبه‌بندی تیمارهای محرک رشد به روش تاپسیس با توجه به درصد اولویت‌بندی معیارها

ردیف	معیار موردنظر کشاورز	درصد اهمیت در تولید	رتبه‌بندی بر اساس نظر کشاورز	آبیاری بدون تنش خشکی	آبیاری با تنش خشکی
۱	عملکرد دانه	یکسان		رتبه اول: اسید هیومیک (0.533)	رتبه‌های اول: عصاره جلبک دریایی (0.531) و اسید آمینه (0.531)
	درصد روغن			رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.529)	رتبه دوم: اسید هیومیک (0.529)
	کارایی مصرف آب			رتبه سوم: اسید آمینه (0.527)	رتبه سوم: اسید فولویک (0.526)
				رتبه چهارم: اسید فولویک (0.526)	رتبه چهارم: شاهد (0.512)
۲	عملکرد دانه	100		رتبه اول: اسید هیومیک (0.511)	رتبه‌های اول: اسید آمینه (0.510) و عصاره جلبک دریایی (0.510)
	درصد روغن	0		رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.510)، اسید فولویک (0.510) و اسید آمینه (0.510)	رتبه دوم: اسید هیومیک (0.509)، اسید فولویک (0.509)
	کارایی مصرف آب	0		رتبه سوم: شاهد (0.509)	رتبه سوم: شاهد (0.508)
۳	عملکرد دانه	0		رتبه‌های اول: اسید هیومیک (0.508)، اسید آمینه (0.508)	رتبه‌های اول: اسید آمینه (0.508)، اسید هیومیک (0.508)
	درصد روغن	100		رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.508)	رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.508)
	کارایی مصرف آب	0		رتبه‌های دوم: اسید فولویک (0.507) و شاهد (0.507)	رتبه دوم: اسید فولویک (0.507)
					رتبه سوم: شاهد (0.505)
۴	عملکرد دانه	0		رتبه اول: اسید هیومیک (0.496)	رتبه اول: اسید آمینه (0.496)
	درصد روغن	0		رتبه‌های دوم: اسید آمینه (0.495)، عصاره جلبک دریایی (0.495)	رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.495)
	کارایی مصرف آب	100		رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.495) و شاهد (0.494)	رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.494) و اسید هیومیک (0.494)
				رتبه سوم: شاهد (0.494)	رتبه چهارم: شاهد (0.493)
۵	عملکرد دانه	25		رتبه اول: اسید هیومیک (0.504)	رتبه اول: اسید آمینه (0.504)
	درصد روغن	25		رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.501) و اسید فولویک (0.501)	رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.503)
	کارایی مصرف آب	50		رتبه سوم: اسید آمینه (0.500)	رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.501) و اسید هیومیک (0.501)
				رتبه چهارم: شاهد (0.498)	رتبه چهارم: شاهد (0.495)
۶	عملکرد دانه	25		رتبه اول: اسید هیومیک (0.553)	رتبه اول: اسید آمینه (0.553)
	درصد روغن	50		رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.551) و اسید فولویک (0.551)	رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.552)
	کارایی مصرف آب	25		رتبه سوم: اسید آمینه (0.549)	رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.550) و اسید هیومیک (0.550)
				رتبه چهارم: شاهد (0.545)	رتبه چهارم: شاهد (0.538)
۷	عملکرد دانه	50		رتبه اول: اسید هیومیک (0.535)	رتبه‌های اول: اسید هیومیک (0.535) و عصاره جلبک دریایی (0.535)
	درصد روغن	25		رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.534) و اسید آمینه (0.534)	رتبه دوم: اسید آمینه (0.534)
	کارایی مصرف آب	25		رتبه سوم: اسید فولویک (0.532)	رتبه سوم: اسید فولویک (0.533)
				رتبه چهارم: شاهد (0.530)	رتبه چهارم: شاهد (0.526)

استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، فارس، مرکزی و کرمان به کار رفت. نتایج نشان داد که این روش با دقت بالایی توانست اراضی مناسب را بر اساس معیارهای متعدد فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد زعفران اولویت‌بندی کند و ضریب تبیین ۰/۹۱ را در مقایسه با عملکرد واقعی محصول به دست آورد که بیانگر توانمندی بالای TOPSIS در تحلیل چندمعیاره است. همچنین، در

نتایج به دست آمده از تحلیل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس در پژوهش حاضر، با نتایج تحقیقات متعددی که در زمینه کاربرد این روش در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی انجام شده است، تطابق قابل توجهی دارد. برای مثال، در مطالعه‌ای که توسط اسکندری و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، این مدل برای اولویت‌بندی اراضی مناسب برای کشت زعفران در

تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند. این امر به‌ویژه در شرایطی که معیارهای متضاد (مانند افزایش عملکرد و کاهش مصرف منابع) وجود دارد، اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند و تضمین‌کننده پایداری و بهره‌وری در کشاورزی است.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از محرک‌های آلی رشد می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد و کیفیت دانه کلزا را تحت هر دو شرایط آبیاری افزایش دهد. در شرایط آبیاری نرمال، هیومیک اسید بیشترین اثر مثبت را بر افزایش عملکرد و درصد روغن داشت، در حالی که تحت تنش خشکی، آمینو اسیدها و عصاره جلبک دریایی عملکرد بهتری ارائه کردند. تحلیل اقتصادی نشان داد که همه تیمارها از نظر سوددهی مقرون‌به‌صرفه بودند و بالاترین نسبت سود به هزینه به ترتیب برای هیومیک اسید در شرایط آبیاری نرمال و آمینو اسید در تنش خشکی حاصل شد. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس، تفاوت اثر تیمارها را بسته به اهداف زراعی و شرایط محیطی برجسته نمود و نشان داد که انتخاب تیمار برتر نمی‌تواند صرفاً بر مبنای یک شاخص انجام گیرد. در مجموع، نتایج تحقیق بر اهمیت استفاده از رویکردهای تحلیلی ترکیبی (زیستی، اقتصادی و تصمیم‌گیری چندمعیاره) در توسعه سیستم‌های زراعی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید دارد. توصیه می‌شود که در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان کشاورزی، به‌ویژه در مناطق با منابع محدود، محرک‌های آلی رشد با توجه به شرایط اقلیمی و هدف‌گذاری تولید انتخاب و به‌کار گرفته شوند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

مطالعه‌ای دیگر توسط سرمیدان و قوامی (۱۳۹۸)، روش TOPSIS برای ارزیابی تناسب اراضی برای کشت ذرت در بخشی از اراضی قزوین به‌کار رفت. در این پژوهش، مقادیر شاخص تناسب اراضی با میزان عملکرد ذرت علوفه‌ای در واحدهای مورد مطالعه برای روش‌های استوری، ریشه دوم و TOPSIS مورد مقایسه قرار گرفت و مقدار ضریب تبیین آن‌ها به ترتیب ۰/۰۷۶، ۰/۰۷۶ و ۰/۰۷۸ به دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش ریشه دوم از اعتبار بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. سیدمحمدی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که روش‌های TOPSIS، AHP و ریشه دوم توانایی مؤثری در تعیین اولویت کشت محصولات زراعی مانند گندم، جو و ذرت در دشت مغان دارند. به همین ترتیب، محسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از تکنیک TOPSIS به رتبه‌بندی اقتصادی ارقام مختلف گندم پرداختند و کاربرد عملی این روش را در تحلیل اقتصادی محصولاتی کشاورزی تأیید کردند؛ بنابراین، این مطالعات بر اهمیت TOPSIS و سایر روش‌های چندمعیاره در تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه کشاورزی و محیط‌زیست تأکید دارند.

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌ویژه تکنیک TOPSIS، ابزاری کارآمد در اولویت‌بندی و رتبه‌بندی گزینه‌ها در حوزه‌های مختلف کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی محسوب می‌شوند. این مطالعات نشان می‌دهد که تاپسیس نه تنها در تحلیل فنی و زیستی، بلکه در ارزیابی اقتصادی و اجتماعی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد که اهمیت انتخاب هدف‌محور و شرایط‌محور را در تصمیم‌گیری‌های کشاورزی برجسته می‌کند. در نهایت، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات دیگر نشان می‌دهد که استفاده از تاپسیس به عنوان ابزاری علمی و سیستماتیک، امکان تحلیل دقیق و جامع گزینه‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند به کشاورزان و مدیران کمک کند تا با در نظر گرفتن معیارهای متنوع و وزن‌دهی مناسب،

فهرست منابع

۱. اسکندری، مهناز، زین الدینی میمند، علی، نویدی، میرناصر و سلمان پور، آناهید، ۲۰۲۲. بررسی کارایی روش TOPSIS در اولویت بندی اراضی برای کشت زعفران. *فصلنامه آب و خاک*، ۳۶(۲)، صص. ۲۳۷-۲۴۹.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74195.1125>
۲. امیری اوغان، حسن، ۲۰۲۳. دانش تولید کلزا در ایران. تهران، مرکز نشر دانشگاهی.
۳. پسندیده، محمد، رجبی، مهدی و زین العابدین تبریزی، حسن، ۲۰۲۲. اثر برخی محرک های رشدی رشد گیاهی بر افزایش تحمل کلزا (*Brassica napus L.*) به تنش خشکی. *مجله تنش های محیطی در علوم زراعی*، ۱۵(۴)، صص. ۱۰۲۳-۱۰۳۵.
<https://doi.org/10.22077/escs.2021.4209.1988>
۴. فکری اجیرلو، توکل، فرزانه، سلیم، توبه، احمد، سیدشریفی، رثوف و نوری، محسن، ۱۴۰۲. تأثیر کاربرد عصاره جلبک دریایی و اسید هیومیک بر عملکرد کمی و کیفی چغندر قند تحت شرایط تنش خشکی در مغان. *سومین کنفرانس بین المللی و هفتمین کنفرانس ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم*، اردبیل.
<https://civilica.com/doc/1775830>
۵. حسینی، زهرا، ۱۹۹۴. روش های متداول تجزیه مواد غذایی. شیراز، انتشارات دانشگاه شیراز.
۶. خودشناس، محمدعلی، قدبیکلو، جواد و نورقلی پور، فریدون، ۱۴۰۱. تأثیر مواد محرک رشد گیاهی بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا. *پژوهش های خاک*، ۳۶(۳)، صص. ۲۲۵-۲۴۱.
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2022.358562.665>
۷. رفیع، محمدرضا، صلحی، محمود و جوادزاده، مریم، ۱۴۰۰. بررسی تأثیر کاربرد اسید آمینه، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی در شرایط نرمال و تنش خشکی بر خصوصیات کمی و کیفی گندم در منطقه بهبهان. *تنش های محیطی در علوم زراعی*، ۱۴(۱)، صص. ۱۳۱-۱۴۱.
<https://doi.org/10.22077/escs.2019.2702.1707>
۸. رئیسی ساداتی، سیده یلدا، جهانبخش گده کهریز، سدابه، عبادی، علی و صدقی، محمد، ۲۰۲۱. تأثیر نانوذره اکسید روی بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و مورفولوژیکی گندم در شرایط خشکی. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱(۲)، صص. ۲۳۳-۲۵۰.
<https://doi.org/10.22034/saps.2021.13106>
۹. سرمیدیان، فریدون و قوامی، محمدسجاد، ۱۳۹۸. ارزیابی تناسب اراضی با استفاده از روش TOPSIS و مقایسه آن با روش های پارامتریک برای محصول ذرت در بخشی از اراضی قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۹)، صص. ۲۲۷۵-۲۲۸۷.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.273788.668095>
۱۰. سیدمحمدی، جواد، جعفرزاده، علی اصغر، سرمیدیان، فریدون، شهبازی، فرزین و قربانی، محمدعلی، ۱۳۹۶. مقایسه کارایی روش های TOPSIS، AHP و ریشه دوم در تعیین اولویت کشت گندم، جو و ذرت تحت آبیاری بارانی در دشت مغان. *دانش آب و خاک*، ۲۷(۲)، صص. ۴۵-۵۹.
۱۱. محسن زاده، ساسان، نمازی، نویدرضا، کاردانی اصفهانی، عارفه سادات و آهومنش، زینب. (۱۳۹۶). کاربرد فن تاپسیس در رتبه بندی اقتصادی برخی رقم های گندم کشت شده در ایران. *فصلنامه اقتصاد کشاورزی*، دوره یازدهم، شماره ۱، صص. ۱۶۳-۱۸۳.
۱۲. فیاض، اسماعیل، سروش زاده، علی و حیدرزاده، علی، ۱۴۰۳. تأثیر محلول پاشی اسیدهای آمینه در شرایط تنش کم آبی آخر فصل بر برخی از فرایندهای فیزیولوژیک گیاه کلزا (*Brassica napus L.*). *تولیدات گیاهی*، ۴۷(۱)، صص. ۶۵-۸۳.
<https://doi.org/10.22055/ppd.2024.45873.2138>

۱۳. گوشه، محی‌الدین، صارمی، منصور و وزیری، ژاله. (۱۳۸۵). تعیین دور و عمق مناسب آبیاری کلزا به روش تشت تبخیر در استان خوزستان. *مجله علوم خاک و آب*، ۲۰(۱)، صص. ۱۱۹-۱۲۸.
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2006.127193>
۱۴. میرزاپور، محمدهادی و نورقلی‌پور، فریدون، ۱۴۰۱. اثر برخی مواد محرک رشد گیاهی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا در خاک آهکی شور. *پژوهش‌های خاک*، ۳۶(۲)، صص. ۱۶۳-۱۷۶.
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2022.357414.650>
۱۵. یوسفی، عبدالله، ۲۰۱۷. ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی در سه گونه کلزا (*Brassica spp.*) تحت شرایط محدودیت آبیاری. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۰(۲)، صص. ۲۵۷-۲۶۷.
https://escs.birjand.ac.ir/article_582.html
16. Adebayo, T.S., Akadiri, S.S., Radmehr, M. et al., 2023. Re-visiting the resource curse hypothesis in the MINT economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, pp.9793–9807. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22785-4>
17. Ahammed, S.J., Homsy, R., Khan, N., Shahid, S., Shiru, M.S., Mohsenipour, M., Ahmed, K., Nawaz, N., Alias, N.E. & Yuzir, A., 2019. Assessment of changing pattern of crop water stress in Bangladesh. *Environment, Development and Sustainability*, 21(6), pp.2557–2573. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00400-w>
18. Ampong, K., Thilakarathna, M.S. & Gorim, L.Y., 2022. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health. *Frontiers in Agronomy*, 4, 848621. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.848621>
19. Anjum, N.A., Gill, S.S. & Gill, R. (Eds.), 2014. Plant adaptation to environmental change: significance of amino acids and their derivatives. Wallingford: CABI.
20. Anjum, S.A., Wang, L., Farooq, M., Xue, L. & Ali, S., 2011. Fulvic acid application improves the maize performance under well-watered and drought conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(6), pp.409–417.
21. Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J.W., 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1), pp.3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
22. Canellas, L.P. & Olivares, F.L., 2014. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), pp.1–11. <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0011-1>
23. Du Jardin, P., 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, pp.3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
24. Eldardiry, E.I., Pipars, S.K.H. & Abd El Hady, M., 2012. Improving soil properties, maize yield components grown in sandy soil under irrigation treatments and humic acid application. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(7), pp.587–593.
25. Fan, D., Hodges, D.M., Critchley, A.T. & Prithiviraj, B., 2013. A commercial extract of brown macroalga (*Ascophyllum nodosum*) affects yield and the nutritional quality of spinach in vitro. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(12), pp.1873–1884.
26. Fan, D., Hodges, D.M., Zhang, J., Kirby, C.W., Ji, X., Locke, S.J., Critchley, A.T. & Prithiviraj, B., 2011. Commercial extract of the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* enhances phenolic antioxidant content of spinach (*Spinacia oleracea* L.) which protects *Caenorhabditis elegans* against oxidative and thermal stress. *Food Chemistry*, 124(1), pp.195–202.
27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. Rome: FAO.
28. Gee, G.W. & Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, Vol.5, pp.383–411.

29. Grubbs, F.E., 1969. Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, 11(1), pp.1–21.
30. Hashemi, P.S., Mohammadi, A., Alizadeh, B., Mostafavi, K. & Amiri Oghan, H., 2024. Enhancing yield and oil content in oilseed rape hybrids: Insights from line $\times$ tester and SIIG approaches. *Food Science & Nutrition*, 12(5), pp.3628–3641.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.4033>
31. Helmke, P.A. & Sparks, D.L., 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical properties*, (pp. 551–575). Madison: Soil Science Society of America.
32. Hosseini, P., Mohsenifar, K., Rajaie, M. et al., 2023. Plant growth regulators affecting canola (*Brassica Napus* L.) biochemistry including oil yield under drought stress. *Physiol Mol Biol Plants*, 29, pp.1663–1674. **<https://doi.org/10.1007/s12298-023-01399-1>**
33. Hwang, C.L. & Yoon, K., 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State-of-the-Art Survey*. Berlin: Springer-Verlag.
34. Kałużewicz, A., Krzesiński, W., Spizewski, T. & Zaworska, A., 2017. Effect of biostimulants on several physiological characteristics and chlorophyll content in broccoli under drought stress and re-watering. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 45(1), pp.197–202. **<https://doi.org/10.15835/nbha45110529>**
35. Kocira, S., Szparaga, A., Hara, P. et al., 2020. Biochemical and economical effect of application biostimulants containing seaweed extracts and amino acids as an element of agroecological management of bean cultivation. *Scientific Reports*, 10, 17759. **<https://doi.org/10.1038/s41598-020-74959-0>**
36. Kumar, G., Nanda, S., Singh, S.K., Kumar, S., Singh, D., Singh, B.N. & Mukherjee, A., 2024. Seaweed extracts: enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1457500. **<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1457500>**
37. Lakhawat, S.S., Sharma, V., Singh, T., Patil, P., Priyadevi, S. & Gutam, S., 2024. Effects of pan evaporation-based drip irrigation levels on performance of guava grown in Udaipur and Rewa regions of India. *Journal of Agrometeorology*, 26(1), pp.69–73. **<https://doi.org/10.54386/jam.v26i1.2306>**
38. Li, G., Shan, Y., Nie, W., Sun, Y., Su, L., Mu, W., Qu, Z. & Yang, T., 2025. Humic acid improves water retention, maize growth, water use efficiency and economic benefits in coastal saline-alkali soils. *Agricultural Water Management*, 309, 109323. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109323>**
39. Lindsay, W.L. & Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, pp.421–428. **<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>**
40. Loeppert, R.H. & Suarez, D.L., 1996. Carbonate and gypsum. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*, (pp. 437–474). Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
41. Ma, Y., Freitas, H. & Dias, M.C., 2022. Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1024243. **<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024243>**
42. Moghan Water & Hydraulic Company, 2023. Introduction of the Moghan Plain climate and irrigation. **<https://mwh.moghanind.com/en/about-company/main/introduction-of-a-company>**
43. Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A. & Mohammadi, A., 2011. Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach. *Energy*, 36(5), pp.2765–2772. **<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.016>**
44. Nelson, D.W. & Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*, (pp. 961–1010). Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.

45. Olsen, S.R. & Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. In: A.L. Page, R.H. Miller & D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties*, (pp. 403–430). Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
46. Rathore, S.S., Chaudhary, D.R., Boricha, G.N., Ghosh, A., Bhatt, B.P., Zodape, S.T. & Patolia, J.S., 2009. Effect of seaweed extract on the growth, yield and nutrient uptake of soybean (*Glycine max*) under rainfed conditions. *South African Journal of Botany*, 75(2), pp.351–355.
47. Rhoades, J.D., 1982. Soluble salts. In: A.L. Page, R.H. Miller & D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties*, (pp. 167–179). Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
48. Rouphael, Y. & Colla, G., 2020. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
49. Rowe, S.M. et al., 2021. Partial budget analysis of culture-and algorithm-guided selective dry cow therapy. *Journal of Dairy Science*, 104(5), pp.5652–5664.
50. Rui, R., Hei, J., Li, Y. et al., 2024. Effects of humic acid fertilizer on the growth and microbial network stability of *Panax notoginseng* from the forest understorey. *Scientific Reports*, 14, 17816. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68949-9>
51. Shabani, A., Sepaskhah, A. & Kamgar-Haghighi, A., 2012. Responses of agronomic components of rapeseed (*Brassica napus* L.) as influenced by deficit irrigation, water salinity and planting method. *International Journal of Plant Production*, 7(2), pp.313–340. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.989>
52. Shahrajabian, M.H. & Sun, W., 2024. The importance of salicylic acid, humic acid and fulvic acid on crop production. *Letters in Drug Design & Discovery*, 21(9), pp.1465–1480.
53. Shapiro, S.S. & Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), pp.591–611.
54. Shen, J., Liu, Y., Wang, X., Bai, J., Lin, L., Luo, F. & Zhong, H., 2023. A Comprehensive Review of Health-Benefiting Components in Rapeseed Oil. *Nutrients*, 15(4), 999. <https://doi.org/10.3390/nu15040999>
55. Shirvani, A., 2017. Change in annual precipitation in the northwest of Iran. *Meteorological Applications*, 24(2), pp.211–218.
56. Song, P., Wang, X., Wang, C., Lu, M., Chen, L., Kong, L., Lei, X. & Wang, H., 2020. Analysis of Agricultural Water Use Efficiency Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation in Xinjiang, China. *Water*, 12(11), 3266. <https://doi.org/10.3390/w12113266>
57. Sparks, D.L. & Huang, P.M., 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: R.D. Munson (Ed.), *Potassium in agriculture*, (pp. 201–276). Madison: Soil Science Society of America.
58. Srinidhi, S., Shah, A. & Groot, A., 2023. Critical climate-stress moments for semi-arid farming systems in India. *Regional Environmental Change*, 23(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02281-w>
59. Taha, A.A., Ibrahim, M.A.M. & Abdelkhalek, A.A., 2011. Irrigation scheduling for pea using evaporation pan under drip irrigation at North Nile Delta region. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2(2), pp.203–212. <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55426>
60. Tarakhovskaya, E.R., Maslov, Y.I. & Shishova, M.F., 2007. Phytohormones in algae. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(2), pp.163–170.
61. Yadav, M. et al., 2024. Improving water efficiencies in rural agriculture for sustainability of water resources: A review. *Water Resources Management*, 38(10), pp.3505–3526. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03526-9>
62. Yildirim, E., 2007. Foliar and soil fertilization of humic acid affect productivity and quality of tomato. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B*, 57(2), pp.182–186.