

## تعیین بهترین تابع تولید برای برآورد عملکرد دانه کاملینا در شرایط کم‌آبیاری و استفاده از آب شور تحت کاشت گلدانی

مهدی مکاری<sup>۱\*</sup>، امیرحسین قادری<sup>۲</sup> و جواد علایی<sup>۳</sup>

### چکیده

تعیین بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد می‌تواند مدیریت مصرف آب کشاورزی را در مناطقی که با کمبود منابع آبی مواجه هستند، بهبود بخشد. به این منظور پژوهشی گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو عامل شوری و سطح آبیاری در سه تکرار در محل گلخانه تحقیقاتی مرکز آموزش عالی کاشمر انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح شوری آب آبیاری: (آب غیرشور)  $S_1 = 0/7$ ،  $S_2 = 4$ ،  $S_3 = 8$  و  $S_4 = 12$  دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح میزان آب آبیاری: آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)  $W_1$ ،  $W_2 = 0/75 W_1$  و  $W_3 = 0/5 W_1$  در یک خاک شنی لومی با جرم مخصوص ظاهری  $1/41$  گرم بر سانتی‌متر مکعب اعمال شدند. به‌منظور تعیین بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد دانه کاملینا از توابع خطی، درجه دوم، کاب داگلاس و نمایی استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین تابع تولید برای پیش‌بینی عملکرد دانه کاملینا در گلخانه و در شرایط کاشت گلدانی، تابع درجه دوم بود. همچنین بیشترین کارایی مصرف آب به‌ترتیب برای تیمار شاهد و تیمار ۷۵ درصد تأمین نیاز آب آبیاری به‌دست آمد. شاخص‌های تولید نهایی (MP) و نسبت نهایی نرخ فنی (MRTS) عملکرد دانه نسبت به دو عامل کمیت و کیفیت آب آبیاری نشان دادند که با افزایش یک سانتی‌متر عمق آب و با فرض ثابت ماندن شوری آب آبیاری، عملکرد دانه کاملینا به اندازه  $56/8$  کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شاخص تولید نهایی کاملینا نسبت به شوری آب آبیاری ( $MPEC_w$ ) مشخص می‌شود که به‌ازای یک واحد افزایش شوری آب آبیاری با فرض ثابت ماندن عمق آب آبیاری، میزان عملکرد دانه کاملینا به اندازه  $38/7$  کیلوگرم در هکتار کاهش می‌یابد. با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت که اعمال ۷۰ میلی‌متر عمق آب آبیاری در آب‌های با شوری کم‌تر از چهار دسی‌زیمنس بر متر، امکان رسیدن به عملکرد دانه مطلوب کاملینا را در گلخانه و در شرایط کاشت گلدانی در شهرستان کاشمر فراهم می‌کند؛ البته در شرایط مزرعه با توجه به مصرف آب بیشتر گیاه (حدود ۳۰۰ میلی‌متر) و طولانی‌تر بودن طول دوره رشد گیاه نسبت به شرایط کاشت گلدانی و گلخانه، ضرایب توابع تولید پیشنهادی در این مطالعه قابل‌استفاده نخواهند بود و لازم است مطالعات تکمیلی در زمینه تعیین بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد کاملینا در شرایط مزرعه نیز انجام پذیرد.

**واژه‌های کلیدی:** تنش شوری، تنش خشکی، کارایی مصرف آب، تبخیر و تعرق.

**ارجاع:** مکاری م. قادری ا. و علایی ج. ۱۴۰۲. تعیین بهترین تابع تولید برای برآورد عملکرد دانه کاملینا در شرایط کم‌آبیاری و استفاده از آب شور تحت کاشت گلدانی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۲۱-۱۱. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14388.2528>

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

\* نویسنده مسئول: [m.mokari@kashmar.ac.ir](mailto:m.mokari@kashmar.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

## مقدمه

شوری مشکل اصلی اراضی تحت آبیاری در بسیاری از مناطق دنیاست که کشاورزان را با سؤالات متعددی، از جمله عمق بهینه آب آبیاری در شرایط استفاده از آب شور، استفاده مجدد از پساب‌های کشاورزی، میزان کاهش عملکرد و در نتیجه کاهش درآمد در ازای استفاده از آب‌های شور و ... مواجه کرده است (داتا و همکاران، ۱۹۹۸). تنش‌های محیطی و زیستی عملکرد و بهره‌وری محصولات زراعی را در سراسر دنیا تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بین تنش‌های محیطی، تنش شوری به‌عنوان عامل اصلی کاهش محصولات زراعی به شمار می‌رود (خالید و همکاران، ۲۰۱۵). بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی گیاهان نظیر جوانه‌زنی بذر، رشد گیاهچه، گلدهی و میوه‌دهی با افزایش غلظت شوری در آب آبیاری و خاک کاهش می‌یابد (خالید و همکاران، ۲۰۱۵). کم آبیاری و شوری به ترتیب پتانسیل ماتریک و اسمزی آب در خاک را کاهش می‌دهند که این عوامل منجر به کاهش جذب آب توسط ریشه‌های گیاه می‌شوند (کرامر و بویر، ۱۹۹۵). کمبود آب آبیاری و شوری آن، دو عامل اصلی محدودکننده تولید محصولات زراعی در مناطق مرکزی و جنوب ایران به شمار می‌روند (شبان و همکاران، ۲۰۱۳). کاربرد مناسب توابع تولید آب-شوری-عملکرد می‌تواند مدیریت مصرف آب کشاورزی را در مناطقی که با کمبود منابع آبی مواجه هستند، بهبود بخشد (زین و همکاران، ۲۰۱۶). توابع تولید محصول نظیر شکل‌های خطی، کاب داگلاس، درجه دوم و نمایی به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی رابطه بین عملکرد محصول و تنش شوری و خشکی محصولاتی نظیر پنبه، گندم و ذرت استفاده می‌شوند (زین و همکاران، ۲۰۱۶). در مطالعات زیادی رابطه خطی بین عملکرد محصول و شوری گزارش شده است (زین و همکاران، ۲۰۱۶)؛ اما در مطالعات محدودی اثر توأمان تنش شوری و خشکی بر عملکرد محصول مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیازمند دسترسی به توابع تولید آب-شوری-عملکرد است (کیانی و عباسی، ۲۰۰۹).

کاملینا (*Camelina sativa* L. Crantz) گیاهی با دانه‌های روغنی و از خانواده *Brassicaceae* است که در سال‌های اخیر علاقه به کاشت این گونه گیاهی افزایش یافته است.

دلیل آن تحمل بالای این گیاه به شرایط نامطلوب محیطی و امکان استفاده چندمنظوره از این گیاه است (جارکی، ۲۰۲۱). ویژگی‌های منحصربه‌فرد کاملینا در مقاومت به تنش‌های محیطی مانند شوری، خشکی و سرما امکان کاشت این گیاه را در تناوب با غلات فراهم کرده است که می‌تواند در سیستم کشاورزی مناطق گرم و خشک ایران بسیار سودمند باشد (بخشی و همکاران، ۲۰۲۱).

زین و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود مدل‌های خطی، کاب داگلاس، نمایی و درجه دوم را برای تعیین بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد آفتابگردان استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه خود چهار سطح شوری ۱/۷، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و دو تیمار ۶۰ و ۸۰ درصد نیاز آبیاری را استفاده کردند. کیانی و عباسی (۲۰۰۹) در پژوهشی که به منظور تعیین بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد گیاه گندم در شمال ایران انجام شد، نشان دادند که برای شرایط اقلیمی و خاک منطقه مورد مطالعه، تابع نمایی بهترین پیش‌بینی محصول تحت شرایط تنش آبی و شوری را دارا بود. آن‌ها در مطالعه خود از چهار تابع تولید خطی، درجه دوم، کاب داگلاس و نمایی استفاده کردند. همچنین نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که کاهش محصول به‌ازای افزایش یک واحد پتانسیل ماتریک در اثر اعمال تنش آبی در مقایسه با افزایش یک واحد پتانسیل اسمزی در اثر اعمال تنش شوری، بیشتر بود.

احمد و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی نشان دادند که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک گیاه کاملینا شد. آن‌ها در پژوهش خود از چهار تیمار ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبیاری استفاده کردند. خالید و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی نشان دادند که تنش شوری ارتفاع گیاه کاملینا را به اندازه ۸۵/۴ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. سینگ و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه خود رابطه غیرخطی بین عملکرد دانه گندم و مقدار آب به‌کار گرفته شده را در سطوح مشخصی از شوری گزارش کردند. آن‌ها در پژوهش خود از سه سطح شوری ۳/۵، ۳/۷ و ۹/۴ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آب آبیاری در دامنه بین ۰/۷ تا ۳/۵ سانتی‌متر استفاده کردند.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهش خود رابطه خطی بین عملکرد دانه سویا و تبخیر و تعرق گیاه را گزارش

طبیعی شهرستان کاشمر به صورت آزمایشی کشت شد. کاشت این گیاه در مرکز تحقیقات به صورت آزمایشی بوده و تاکنون هیچ گزارشی از کاشت این گیاه توسط کشاورزان منطقه در دست نیست. با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی اثر توأمان تنش شوری و خشکی بر عملکرد دانه کاملینا انجام نشده است، در این پژوهش سعی شد تا ضمن به دست آوردن تابع تولید بهینه عملکرد دانه کاملینا در شرایط اعمال تنش خشکی و آبیاری با آب شور، شاخص‌های تولید نهایی (MP) و نسبت نهایی نرخ فنی (MRTS) عملکرد دانه نسبت به دو عامل کمیت و کیفیت آب آبیاری در گلخانه و در شرایط کاشت گلدانی، بررسی شود.

### مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی جنب ایستگاه هواشناسی مرکز آموزش عالی کاشمر در زمستان ۱۴۰۰ و بهار ۱۴۰۱ اجرا شد. محل اجرای آزمایش در ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه عرض جغرافیایی و ۵۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول جغرافیایی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۱۰۹/۷ متر است. متوسط بارندگی سالانه در منطقه ۱۹۲/۱ میلی‌متر است.

این آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و دو عامل شوری و سطح آب آبیاری انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح شوری آب آبیاری: (آب غیرشور)  $S_1 = 0/7$ ،  $S_2 = 4$ ،  $S_3 = 8$  و  $S_4 = 12$  دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح میزان آب آبیاری: آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی)  $W_1$ ،  $W_2 = 0/75$  و  $W_3 = 50\%$  بودند که در یک خاک شنی لومی (خاک غالب مناطق شهرستان کاشمر که در آن کاملینا کاشت می‌شود) با جرم مخصوص ظاهری ۱/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب اعمال شدند. ۳۶ گلدان پلاستیکی با ابعاد ۲۸×۲۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تهیه شد. به منظور جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی بین دیواره گلدان‌ها و خاک، دیواره‌ها با استفاده از چسب و ماسه پوشیده شدند. پنج سانتی‌متر بالای گلدان برای اعمال آبیاری خالی در نظر گرفته شد و بقیه حجم آن از خاک پر شد. وزن خاک مورد استفاده در همه گلدان‌ها ۸/۵ کیلوگرم بود. برای تعیین وزن گلدان‌ها در ظرفیت زراعی مزرعه (FC) و همچنین رفع شوری خاک، گلدان‌ها با آب شرب شهری

کردند. ساسیندران و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش خود برای نشان دادن رابطه بین عملکرد ذرت دانه‌ای و مقدار آب مصرف شده از تابع کاب داگلاس استفاده کردند. کیپ کوریر و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که توابع تولید آب-عملکرد برای ذرت و پیاز در خاک لوم شنی و در شرایط استفاده از آبیاری فارو غیرخطی است. جمال و همکاران (۲۰۰۰) رابطه غیرخطی بین مقدار آب استفاده شده و عملکرد را در گیاه پیاز گزارش کردند. تارکالسن و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود رابطه غیرخطی بین عملکرد دانه ذرت و تبخیر و تعرق گیاه را گزارش کردند. بهترین تابع تولید برازش داده شده بر داده‌های واقعی عملکرد و تبخیر و تعرق در مطالعه آن‌ها تابع درجه دوم بود. آمر (۲۰۱۰) در پژوهش خود رابطه خطی بین عملکرد دانه ذرت و سطوح مختلف شوری و آب آبیاری را گزارش کرد. او در مطالعه خود از سه سطح شوری ۰/۸۹، ۴/۷۳ و ۲/۸۱ دسی‌زیمنس بر متر و پنج تیمار آبیاری شامل ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ درصد نیاز آبی گیاه استفاده کرد. داتا و همکاران (۱۹۹۸) در مطالعه‌ای به تخمین بهترین تابع تولید گندم در شرایط آبیاری با آب شور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین شکل تابع تولید برای پیش‌بینی عملکرد گندم در سطوح مختلف شوری آب آبیاری، تابع درجه دوم بود. ایاز (۲۰۱۹) در مطالعه خود رابطه خطی بین عملکرد محصول گوجه‌فرنگی و تبخیر و تعرق گیاه را گزارش کرد. خدادادی و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهش خود بهترین تابع تولید آب-عملکرد ذرت در شرایط آب‌وهوایی جنوب ایران را تابع درجه دوم معرفی کردند.

از آن جایی که منطقه مورد مطالعه در این پژوهش یعنی دشت کاشمر جزو دشت‌های ممنوعه بحرانی از نظر منابع آب در استان خراسان رضوی و کشور به شمار می‌رود و اکثر چاه‌های کشاورزی در این منطقه دارای شوری بالا هستند؛ به گونه‌ای که در برخی از مناطق دشت کاشمر شوری تا ۱۸ دسی‌زیمنس بر متر نیز گزارش شده است، به منظور مدیریت مصرف بهینه آب در کشاورزی، ضرورت انجام پژوهش‌هایی در زمینه تعیین بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد محصولات زراعی از جمله گیاهان دانه روغنی نظیر کلزا، کنجد و کاملینا در آن احساس می‌شود. کاملینا برای اولین بار در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در محل اراضی زراعی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع

کم آبیاری است که به جای تأمین کامل آب مورد نیاز گیاهان، درصدی از آن در هر بار آبیاری تأمین می‌شود. از آنجا که آب مورد نیاز در این طرح شامل چهار سطح شوری ۰/۷ (آب غیرشور)، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بود، این شوری‌ها از طریق اختلاط آب شرب شهری با مقدار مشخصی سنگ نمک طبیعی که مقدار آن در هر آبیاری با دستگاه EC متر محاسبه می‌شد، تهیه شد. نقشه شماتیک طرح آزمایشی در شکل ۱ و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها و نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در آزمایش به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

(آب غیرشور) اشباع و اجازه داده شد زهکشی تا ۴۸ ساعت انجام شود.

بعد از این مدت، گلدان‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم گرم وزن شدند. نشاهای کاملینا به مدت یک ماه در گلدان‌ها و در شرایط یکسان آبیاری می‌شدند.

در ۹ دی ۱۴۰۰، تیمارها اعمال شدند. برای تعیین مقدار آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری، ابتدا گلدان‌ها وزن شدند و سپس از طریق اختلاف وزن اندازه‌گیری شده با وزن گلدان در ظرفیت زراعی مزرعه و در نظر گرفتن ضریب تیمارهای آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد)، میزان آب لازم برای هر گلدان به دست آمد. این کار در واقع نوعی

تکرار اول	S <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>1</sub>
تکرار دوم	S <sub>1</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>2</sub>
تکرار سوم	S <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>0</sub>	S <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>0</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> W <sub>1</sub>

شکل ۱- نقشه شماتیک طرح آزمایشی

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها قبل از اعمال تیمارها

شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	کل آهک خاک (%)	سدیم (meq l <sup>-1</sup> )	پتاسیم (mg Kg <sup>-1</sup> )	فسفر (mg Kg <sup>-1</sup> )	نیترژن (%)	O.C (%)	SAR	EC (dSm <sup>-1</sup> )	pH
۷۱	۱۷	۱۲	۱۴/۶	۸/۵۴	۱۷۳/۵۲	۲/۹	۰/۰۳	۰/۴۲	۵/۸۹	۱/۳۴	۷/۴۹

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در آزمایش

SAR	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	pH	EC (dSm <sup>-1</sup> )
(meq l <sup>-1</sup> )									
۰/۶۹	۲/۸	۰/۸۵	۰/۱۵	۲/۶۸	۰/۶۲	۰/۸۹	۰/۰۲	۷/۷۵	۰/۷

تولید ثابت نگه داشته شوند، به صورت معادله زیر نشان داد.

$$Y = f(I, EC_w, X) \quad (1)$$

که در این معادله، Y مقدار عملکرد (kg ha<sup>-1</sup>)، I مقدار آب آبیاری (cm)، EC<sub>w</sub> هدایت الکتریکی آب آبیاری (dS m<sup>-2</sup>)<sup>۱</sup> و X بردار ثابت سایر عوامل تأثیرگذار در تولید است.

برآورد توابع تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی

با استفاده از داده‌های آماری حاصل از اجرای طرح و به‌کارگیری روش تخمین تابع تولید آب-شوری می‌توان عملکرد محصول را تحت تأثیر مقادیر مختلف آب کاربردی و شوری آب آبیاری به‌طوری که سایر عوامل

نسبت نهایی نرخ جایگزین فنی برای شوری و عمق آب آبیاری (MRTS<sub>I,ECW</sub>)، ارزش تولید نهایی نسبت به عمق آب آبیاری (VMP<sub>I</sub>) و ارزش تولید نهایی نسبت به شوری آب آبیاری (VMP<sub>ECW</sub>) استفاده شد (کیانی و عباسی، ۲۰۱۲).

این شاخص‌ها با استفاده از معادلات زیر تعیین شدند.

$$MP_I = \frac{dY}{dI} \quad (11)$$

$$MP_{ECW} = \frac{dY}{dECW} \quad (12)$$

$$MRTS_{I,ECW} = \frac{MP_{ECW}}{MP_I} \quad (13)$$

$$VMP_I = P_Y \times MP_I \quad (14)$$

$$VMP_{ECW} = P_Y \times MP_{ECW} \quad (15)$$

$P_Y$ : قیمت واحد وزن محصول (۱۶۵۰۰۰ ریال به ازای هر کیلوگرم دانۀ کاملینا در بهار ۱۴۰۱) و  $Y$ : تابع تولید بهینه است.

### تعیین کارایی مصرف آب

برای محاسبه کارایی مصرف آب، از معادله پیشنهادی فائو استفاده شد:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (16)$$

در این معادله WUE کارایی مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب آب،  $Y$  عملکرد بر حسب کیلوگرم در هکتار و  $ET$  تبخیر و تعرق گیاه بر حسب مترمکعب در هکتار است.

### تعیین ضریب تنش شوری و خشکی ( $K_s$ ) و ضریب حساسیت عملکرد محصول ( $K_y$ )

برای محاسبه ضرایب تنش خشکی، شوری و توأمان خشکی و شوری از معادله زیر استفاده شد (الن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_c = K_s \cdot ET_{cp} \quad (17)$$

در این معادله  $ET_c$  تبخیر و تعرق گیاه در شرایط تنش (mm)،  $ET_{cp}$  تبخیر و تعرق گیاه در شرایط بدون تنش (mm) و  $K_s$  ضریب تنش خشکی و شوری است.

به منظور محاسبه ضریب واکنش عملکرد به آبیاری از معادله ارائه شده توسط فائو استفاده شد (دورنبوس و کسام، ۱۹۷۹):

$$1 - \frac{Y}{Y_{max}} = K_y \left( 1 - \frac{ET}{ET_{max}} \right) \quad (18)$$

که در این معادله  $Y$  مقدار عملکرد واقعی،  $Y_{max}$  حداکثر مقدار عملکرد،  $K_y$  ضریب واکنش عملکرد نسبت به آب و

تابع مذکور با شکل‌های مختلف: خطی ساده، خطی لگاریتمی (کاب داگلاس)، درجه دوم و نمایی که در زیر آورده شده است، برآورد شد (زین و همکاران، ۲۰۱۶).  
فرم خطی:

$$Y = a_0 + a_1 I + a_2 ECW \quad (2)$$

فرم لگاریتمی:

$$Y = a_0 I^{a_1} ECW^{a_2} \quad (3)$$

فرم درجه دوم:

$$Y = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 ECW + a_4 ECW^2 + a_5 I \cdot ECW \quad (4)$$

فرم نمایی:

$$Y = a_0 I^{a_1} ECW^{a_2} e^{(a_3 I + a_4 ECW)} \quad (5)$$

پس از برازش داده‌های آماری عملکرد حاصل از اجرای طرح توسط نرم‌افزار SPSS و تعیین شکل‌های مختلف توابع تولید، برای مشخص کردن تابع بهینه تولید، آنالیز حساسیت آماری انجام شد و با تعیین آماره‌های مربوط نقش هر یک از نهاده‌ها بر توابع تولید به صورت کمی تعیین شد. برای ارزیابی اعتبار توابع به دست آمده، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی استفاده شد. آماره‌های لازم برای این منظور، حداکثر خطا (ME)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، کارایی مدل‌سازی (EF) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) هستند (همایی و همکاران، ۲۰۰۲). شکل ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

که در این معادلات  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری (مشاهده) شده،  $n$  تعداد نمونه‌های به کاررفته و  $\bar{O}$  مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است.

پس از تعیین تابع تولید بهینه، برای بررسی اثرات جداگانه و توأم شوری و سطوح آبیاری بر عملکرد کاملینا از شاخص‌های تولید نهایی نسبت به عمق آب آبیاری ( $MP_I$ )، تولید نهایی نسبت به شوری آب آبیاری ( $MP_{ECW}$ )،

شوری و خشکی بر تمام صفات اندازه‌گیری شده به جز ارتفاع بوته غیرمعنی‌دار بود.

### بهبینه‌سازی

برای بهینه‌سازی مصرف آب، ابتدا تابع تولید آب-شوری-عملکرد کاملینا با استفاده از شکل‌های مختلف (یعنی خطی ساده، خطی لگاریتمی، درجه دوم و نمایی) براساس تغییرات شوری ( $\text{dS m}^{-1}$ )، عمق آب آبیاری (cm) و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها به دست آمد که نتایج برآورد توابع تولید و همچنین تحلیل هریک از توابع انتخابی در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر آماره  $t$  در این جدول بیانگر تأثیر معنی‌دار دو عامل عمق آب آبیاری و شوری بر تغییرات عملکرد محصول بوده و آماره  $F$  بیانگر معنی‌دار بودن کلی تابع است.

شوری، ET مقدار واقعی تبخیر و تعرق و  $ET_{\max}$  حداکثر تبخیر و تعرق هستند. همچنین مطابق با توصیه فائو، برای محاسبه افت نسبی عملکرد و راندمان تولید از معادلات زیر استفاده شد:

$$(19) \quad \text{افت نسبی عملکرد} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right) \times 100$$

$$(20) \quad \text{راندمان تولید} = [1 - K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right)] \times 100$$

### نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مطالعه‌شده گیاه کاملینا در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که اثر تنش شوری بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد و بر تبخیر و تعرق در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. اثر تنش خشکی بر تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل تنش

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس صفات مطالعه‌شده گیاه کاملینا

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد دانه $\text{Kg ha}^{-1}$	عملکرد بیولوژیک $\text{Kg ha}^{-1}$	تبخیر و تعرق cm	کارایی مصرف آب $\text{Kg m}^{-3}$	شاخص برداشت درصد	ارتفاع بوته cm
شوری	۳	۲۸۴۲۹/۴۸۸ **	۳۵۶۴۶۵۷/۱۵۷ **	۵/۲۳۶ *	۰/۰۰۷ **	۵/۲۹۶ **	۱۱۵۹/۱۲۵ **
خشکی	۲	۱۱۰/۱۱۰ **	۳۶۲۷۵/۳۲۱ **	۱۱/۹۴۰ **	۰/۰۷۲ **	۲/۳۷۵ **	۷/۳۷۳ **
خشکی*شوری	۶	۵۰۸۱/۷۳۱ **	۶۷۷۸۱۴/۹۶۶ **	۰/۶۸۴ **	۰/۰۰۷ **	۳/۶۷۰ **	۴۹/۳۰۸ *
خطا	۲۴	۳۶۵۹/۲۴۲	۳۱۸۹۹۱/۳۶۳	۱/۶۴۵	۰/۰۰۸	۶/۶۵۴	۱۹/۴۵۸
ضریب تغییرات (درصد)		۱۲/۹۱	۱۰/۷۴	۹/۷	۱۳/۰۳	۸/۶۲	۵/۵۲

\*، \*\* و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی‌داری است.

### تعیین توابع بهینه تولید

در این قسمت با استفاده از توابع تولید تعیین شده، مقادیر عملکرد محصول تخمین زده شد. برای ارزیابی توابع تولید، مقادیر تخمینی و واقعی عملکرد محصول از طریق پنج شاخص آماری (معادلات (۶) تا (۱۰)) مقایسه شدند (جدول ۵) و براساس شاخص‌های آماری محاسبه شده، هریک از توابع درجه‌بندی شدند.

همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود برای همه پارامترهای آماری که مبنای مقایسه توابع تولید قرار گرفتند، بهترین نتایج برای تابع درجه دوم به دست آمد. توابع متعالی، خطی ساده و لگاریتمی به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. ارزیابی راندمان تابع (EF) نشان می‌دهد که تابع درجه دوم نسبت به سایر توابع عملکرد بهتری دارد. با توجه به اینکه هرچه مقدار ME

بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر تابع تولید در برآورد مقدار عملکرد محصول است، از جدول ۵ می‌توان دریافت که تابع درجه دوم با داشتن کم‌ترین ME بهترین برآورد را از عملکرد محصول داشته است. همچنین مقادیر ME نشان می‌دهند که بیشترین خطا مربوط به توابع خطی لگاریتمی و خطی ساده است. کم‌ترین مقدار RMSE نیز متعلق به تابع درجه دوم است که نشان می‌دهد تابع درجه دوم نسبت به سایر توابع عملکرد محصول را بهتر پیش‌بینی کرده است. همچنین مقدار بالای ضریب تبیین ( $R^2$ ) در تابع درجه دوم بیانگر کارایی بهتر این تابع نسبت به سایر توابع است. مقادیر CRM توابع، دلالت بر آن دارد که توابع لگاریتمی، نمایی و خطی ساده در اکثر موارد عملکرد را بیشتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی کرده‌اند؛ بنابراین با توجه به شرایط مذکور و

برای گیاه شلغم در شرایط کاشت گلدانی پیشنهاد کردند. پیری و همکاران (۱۳۹۷) بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد ذرت خوشه‌ای، محمدی و همکاران (۱۳۸۹) بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد گوجه‌فرنگی و علی‌حوری (۱۳۹۶) تابع تولید برتر آب-شوری-عملکرد ماده خشک در دوره رشد رویشی خرما را تابع درجه دوم گزارش کردند.

در نظر گرفتن رتبه نهایی می‌توان گفت که تابع درجه دوم می‌تواند به‌عنوان تابع بهینه تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی برای کاملینا در گلخانه و در شرایط کاشت گلدانی معرفی شود. در همین رابطه، دهقان و همکاران (۱۳۹۹) بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد اسفناج در گلخانه و در شرایط کاشت گلدانی را تابع درجه دوم پیشنهاد کردند. مکاری و همکاران (۱۳۹۹) نیز در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی در گلخانه تابع درجه دوم را

جدول ۴- ضرایب شکل‌های مختلف توابع تولید آب-شوری-عملکرد کاملینا

متغیر	خطی ساده	لگاریتمی	درجه دوم	نمایی
ثابت	۲۰۸/۰۸۵** (۴/۵۲۷)	۴/۹۲۸** (۱۶/۲۱)	-۵۸۰/۲۶۴** (-۳/۱۶۱)	۴/۳۸۴** (۴/۴۳۲)
I (cm)	۱۸/۳۲** (۲/۷۴۳)	-	۲۲۹** (۴/۳۹۳)	-۰/۱۳** (-۰/۶۹۱)
EC (ds/m)	-۷/۸۹۹** (-۳/۴۸)	-	۴۱/۷۶۷** (۳/۶۲۴)	-۰/۰۳۵** (-۱/۳۴۶)
Ln (I)	-	۰/۴۴۷** (۲/۷۴۳)	-	۱/۲۱** (۱/۰۲۵)
Ln (EC)	-	-۰/۱۰۹** (-۲/۹۴۵)	-	۰/۰۳۲** (-۰/۳۰۴)
I <sup>2</sup>	-	-	-۱۳/۱۳۳** (-۳/۶۱۷)	-
EC <sup>2</sup>	-	-	-۰/۷۴۱** (-۱/۵۶۹)	-
IEC	-	-	-۶/۷۷۸** (-۴/۸۷۶)	-
آماره F	۱۶/۴۱۴	۷۵۱۴/۸۳۶	۲۴۴/۰۲	۴۶۰۳/۳۵

ns \* و \*\* به ترتیب بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t هستند.

جدول ۵- پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید کاملینا

نوع تابع	ME (%)	RMSE (kg)	R <sup>2</sup>	EF	CRM
خطی ساده	(۳) ۳۷/۲۱	(۳) ۵۳	(۳) ۰/۴۹	(۳) ۰/۵۰	(۱) ۰/۰۱
لگاریتمی	(۴) ۳۹/۵۴	(۴) ۵۴	(۴) ۰/۴۹	(۴) ۰/۴۸	(۴) ۰/۰۲
درجه دوم	(۱) ۲۸/۱۴	(۱) ۳۹	(۱) ۰/۷۳	(۱) ۰/۷۳	(۲) ۰/۰۱
نمایی	(۲) ۳۸/۶۴	(۲) ۵۱	(۲) ۰/۵۵	(۲) ۰/۵۳	(۳) ۰/۰۲

اعداد داخل پرانتز درجه‌بندی مدل در شاخص آماری مربوط است.

### منحنی‌های هم‌تولید

یکی دیگر از کاربردهای مطالعات توأمان شوری و خشکی در راستای بهینه‌سازی مصرف آب برای سازگاری با کم‌آبی، تهیه منحنی‌های هم‌تولید است. این منحنی‌ها نشان‌دهنده مکان هندسی ترکیب‌های مختلف عمق و شوری آب آبیاری است که عملکرد یکسانی را در فرایند تولید کاملینا ایجاد می‌کنند. شکل ۲ منحنی‌های هم‌تولید (کیلوگرم در هکتار) کاملینا را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مشخص می‌شود که در یک عمق آب مشخص (I)، هرچه شوری افزایش یابد، عملکرد (Y) کاهش و برای یک EC<sub>w</sub> معین، هرچه مقدار آبیاری بیشتر شود، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات محمدی و همکاران (۱۳۸۹) درباره گوجه‌فرنگی و سیاسخواه و

همکاران (۲۰۰۶) درباره گندم نیز مؤید این مطلب است، اما هرگاه دو عامل بالا را با هم بررسی کنیم، ملاحظه می‌شود که برای دستیابی به عملکرد مشخص، مقادیر متفاوتی از I و EC<sub>w</sub> را می‌توان جایگزین کرد. برای مثال با میزان آبیاری ۵۰ میلی‌متر و شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر، عملکرد معادل ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار است که با افزایش میزان آبیاری به مقدار ۷۰ میلی‌متر می‌توان به همان عملکرد، اما با شوری ۷ دسی‌زیمنس بر متر دست یافت؛ بنابراین مشاهده می‌شود که عملکرد، تابع دو متغیر عمق و شوری آب آبیاری است و نگاه تک‌بعدی اثر هر یک بر عملکرد، با واقعیت سازگار نیست که داتا و همکاران (۱۹۹۸) نیز بر این موضوع تأکید کرده‌اند.

بیشتر از این مقدار تأثیر چندانی در افزایش عملکرد دانه این محصول ندارد.

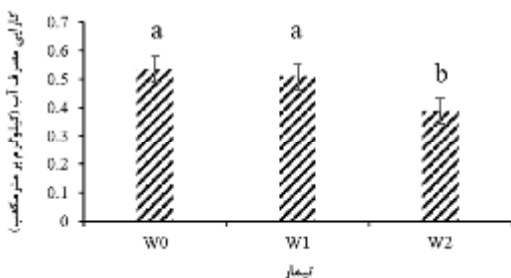
شاخص‌های تولید نهایی (MP) و نسبت نهایی نرخ فنی (MRTS) عملکرد دانه نسبت به دو عامل کمیّت و کیفیت آب آبیاری، همچنین ارزش تولید نهایی (VMP) در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های ارزیابی با استفاده از میانگین‌های آزمایشی عمق و شوری آب آبیاری

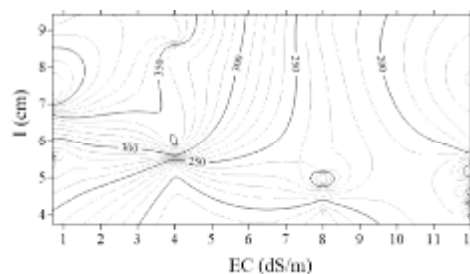
نوع شاخص	عملکرد دانه
MP <sub>1</sub> (kg/cm)	۵۶/۸
MP <sub>E<sub>ew</sub></sub> (kg/dS/m)	-۳۸/۶۸
MRTS <sub>E<sub>ew</sub>+1</sub> (cm/dS/m)	۰/۶۸
VMP <sub>1</sub>	۹۳۷۲۰۰۰
VMP <sub>E<sub>ew</sub></sub>	-۶۳۸۲۲۰۰

### کارایی مصرف آب

نتایج جدول تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده کاملینا (جدول ۳) نشان داد که اثر تنش شوری و اثر توأمان تنش شوری و خشکی بر کارایی مصرف آب معنی‌دار نبود و تنها اعمال تنش خشکی شدید باعث کاهش معنی‌دار کارایی مصرف در سطح احتمال یک درصد شد. در شکل ۴ کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف آبیاری نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ مشخص می‌شود که کم‌ترین کارایی مصرف آب مربوط به تیمار تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی (W<sub>2</sub>) و به اندازه ۰/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود. از طرفی نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان داد که بین کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری شاهد و تیمار تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. مقدار کارایی مصرف آب برای تیمارهای آبیاری W<sub>0</sub> و W<sub>1</sub> به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود.



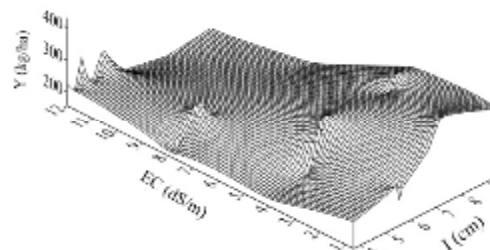
شکل ۴- کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف آبیاری



شکل ۲- منحنی‌های هم‌تولید (کیلوگرم در هکتار) در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی

### تغییرات عملکرد کاملینا نسبت به شوری و سطوح مختلف آب آبیاری

شکل ۳ تغییرات عملکرد دانه کاملینا را نسبت به شوری و سطوح مختلف آب آبیاری نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ مشخص می‌شود که با افزایش شوری آب آبیاری و کاهش عمق آب آبیاری، مقدار عملکرد کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۳ مشخص می‌شود که در عمق‌های آب آبیاری کم‌تر از ۷ سانتی‌متر و تا شوری نزدیک به ۴ دسی‌زیمنس بر متر، با افزایش شوری آب آبیاری، کاهش عملکرد دانه کاملینا با شیب تندتری اتفاق می‌افتد، اما از شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر به بعد، کاهش عمق آب آبیاری اثر کم‌تری بر کاهش عملکرد دانه دارد (شیب ملایم‌تر منحنی).

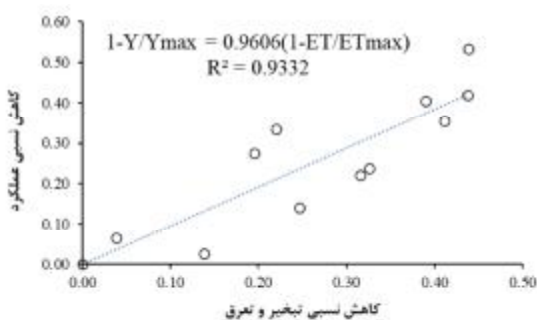


شکل ۳- تغییرات عملکرد دانه کاملینا نسبت به شوری در سطوح مختلف آبیاری با استفاده از داده‌های واقعی به‌دست آمده در گلخانه و شرایط کاشت گلدانی

در همه سطوح شوری، با افزایش عمق آب آبیاری به بیش از ۷ سانتی‌متر، شیب منحنی در افزایش عملکرد دانه بسیار ملایم است که این نشان‌دهنده تأثیر کم‌تر عمق‌های آبیاری بیشتر از ۷ سانتی‌متر بر افزایش عملکرد دانه کاملینا در همه سطوح شوری است. با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه گرفت که حد بهینه عمق آب آبیاری برای کاملینا در شرایط گلخانه و کاشت در گلدان، ۷۰ میلی‌متر است و افزایش عمق آب آبیاری به



شرایط تنش خشکی کاهش تبخیر و تعرق به دلیل کمبود آب و در شرایط تنش شوری به دلیل کاهش جذب آب در اثر پایین رفتن پتانسیل اسمزی محیط ریشه است. به طور کلی اگر پتانسیل خاک یا محلولی که گیاه در آن می‌روید کاهش یابد، اختلاف پتانسیل که نیرو محرکه جذب است نیز کاهش یافته و در نتیجه میزان آب تقلیل پیدا می‌کند. در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی از برآزش منحنی بر مقادیر  $1 - (Y/Y_{max})$  در مقابل مقادیر  $(ET/ET_{max}) - 1$ ، مقدار  $K_y$  متوسط  $(0/96)$  به دست آمد (شکل ۵).



شکل ۵- کاهش نسبی عملکرد در مقابل کاهش نسبی تبخیر و تعرق

### ضریب تنش شوری و خشکی ( $K_s$ ) و حساسیت عملکرد محصول ( $K_y$ )

مقادیر  $K_y$  و  $K_s$  برای شرایط مختلف تنش شوری و خشکی در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به مقادیر  $K_y$  و افت نسبی محصول (ستون چهارم) می‌توان دریافت که تنش شوری نسبت به تنش خشکی تأثیر بیشتری بر کاهش عملکرد داشته است. به عبارت دیگر می‌توان گفت کاملینا نسبت به تنش شوری حساس‌تر است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در یک سطح شوری مشخص با افزایش تنش خشکی از تیمار شاهد به تنش خشکی ۷۵ درصد نیاز آبی مقدار  $K_y$  کاهش و با افزایش تنش از ۷۵ درصد به ۵۰ درصد نیاز آبی  $K_y$  افزایش یافته است. نتایج تحقیقات میلا و علی (۲۰۱۶) نیز نشان داد که با افزایش تنش خشکی مقدار  $K_y$  افزایش یافت. این موضوع مؤید این مطلب است که حساسیت کاملینا به کم‌آبی در تنش خشکی شدید نسبت به تنش خشکی ملایم، بیشتر است. به طور کلی با افزایش تنش شوری و خشکی عملکرد محصول کاهش یافته است. با توجه به مقادیر  $K_s$  با افزایش تنش شوری و خشکی تبخیر و تعرق کاهش یافته است و کم‌ترین مقدار آن  $(0/56)$  مربوط به تیمار  $S_3W_2$  است. می‌توان گفت در

جدول ۷- مقادیر ضرایب حساسیت گیاه، تغییرات افت نسبی عملکرد و راندمان تولید در تیمارهای مختلف

تیمار	$K_s$	$1 - (ET/ET_{max})$ (%)	$1 - (Y/Y_{max})$ (%)	$K_y$	راندمان تولید (%)
$S_0W_1$	۰/۸۶	۱۳/۸۵	۲/۶۰	۰/۱۹	۹۷/۴۰
$S_0W_2$	۰/۶۷	۳۲/۶۰	۲۳/۷۰	۰/۷۳	۷۶/۲۹
$S_1W_0$	۰/۹۶	۳/۸۵	۶/۵۵	۱/۷۰	۹۳/۴۵
$S_1W_1$	۰/۷۵	۲۴/۶۵	۱۴/۱۴	۰/۵۷	۸۵/۸۶
$S_1W_2$	۰/۶۸	۳۱/۵۴	۲۲/۱۴	۰/۷۰	۷۷/۸۵
$S_2W_0$	۰/۸۰	۱۹/۵۷	۲۷/۴۴	۱/۴۰	۷۲/۵۵
$S_2W_1$	۰/۶۱	۳۸/۹۸	۴۰/۴۴	۱/۰۴	۵۹/۵۶
$S_2W_2$	۰/۵۶	۴۳/۷۳	۴۲/۰۰	۰/۹۶	۵۸/۰۰
$S_3W_0$	۰/۷۷	۲۲/۰۵	۳۳/۴۷	۱/۵۲	۶۶/۵۲
$S_3W_1$	۰/۵۸	۴۱/۱۴	۳۵/۵۵	۰/۸۶	۶۴/۴۴
$S_3W_2$	۰/۵۶	۴۳/۸۴	۵۳/۲۲	۱/۲۱	۴۶/۷۷

کرد؛ بنابراین می‌توان تابع درجه دوم را به عنوان تابع تولید بهینه کاملینا در شرایط تنش توأمان شوری و خشکی در گلخانه و کاشت در گلدان معرفی کرد. با افزایش تنش شوری و خشکی مقدار  $K_y$  افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با تغییر تنش خشکی از

### نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تابع درجه دوم با کم‌ترین RMSE و بیشترین ضریب تبیین، عملکرد کاملینا در شرایط تنش شوری و خشکی را در گلخانه و کاشت در گلدان نسبت به سایر توابع تولید بهتر پیش‌بینی

گوجه‌فرنگی در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی در منطقه کرج، نشریه آب و خاک. ۲۴(۳): ۵۸۳-۵۹۲.

۵. مکاری م.، عابدین‌پور م. و دهقان ه. ۱۳۹۹. تعیین ضرایب حساسیت و بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد شلغم در منطقه کاشمر. مجله پژوهش آب ایران. ۱۴(۲): ۱۱۱-۱۱۹.

6. Ahmed Z. Waraich E. A. Ahmad R. and Shahbaz M. 2017. Morpho-physiological and biochemical responses of camelina genotypes under drought stress. International Journal of Agriculture and Biology. 19(1): 1-7.
7. Allen R. G. Pereira L. S. Raes D. and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). FAO irrigation and drainage Paper No. 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 300 p.
8. Al-Jamal M. S. Sammis T. W. Ball S. and Smeal D. 2000. Computing the crop water production function for onion. Agricultural Water Management. 46(1): 29-41.
9. Amer H. A. 2010. Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels. Agricultural Water Management. 97(10): 1553-1563.
10. Ayas S. 2019. Water-yield relationships of deficit irrigated tomato (*Lycopersicon Lycopersicum* L. var. Hazar F1). Applied Ecology and Environmental Research. 17(4): 7765-7781.
11. Bakhshi B. Rostami Ahmadvand H. and Fanaei H. R. 2021. Camelina and adaptable oilseed crop for the warm and dried regions of Iran. Central Asian Journal of Plant Science Innovation. 1(1): 39-45.
12. Datta K. K. Sharma V. P. and Sharma D. P. 1998. Estimation of a production function for wheat under saline conditions. Agricultural Water Management. 36(1): 85-94.
13. Doorenbos J. and Kassam A. H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper. No. 33.
14. Homaei M. Driksen C. and Feddes R. A. 2002. Simulation of root water uptake, I: Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agricultural Water Management. 57: 89-109.
15. Jarecki W. 2021. Reaction of camelina (*camelina sativa* L. crantz) to different foliar fertilization. Agronomy. 11(1): 2-14.
16. Khalid H. Kumari M. Grover A. and Nasim M. 2015. Salinity stress tolerance of

حالت ملایم (تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه) به تنش خشکی شدید (تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) کارایی مصرف آب با شیب بیشتری کاهش یافت. نتایج بررسی منحنی‌های هم‌محصول نشان داد که با افزایش میزان آبیاری، می‌توان از آب آبیاری با شوری بالاتری استفاده کرد؛ به طوری که میزان عملکرد محصول تغییر نکند. بررسی تغییرات عملکرد نسبت به شوری و میزان آب آبیاری نشان داد که در همه سطوح شوری، با افزایش عمق آب آبیاری به بیشتر از ۷ سانتی‌متر، شیب منحنی در افزایش عملکرد دانه بسیار ملایم است که این نشان‌دهنده تأثیر کم‌تر عمق‌های آبیاری بیشتر از ۷ سانتی‌متر بر افزایش عملکرد دانه کاملینا در همه سطوح شوری است؛ بنابراین با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه گرفت که حد بهینه عمق آب آبیاری برای کاملینا در شرایط گلخانه و کاشت در گلدان، ۷۰ میلی‌متر است و افزایش عمق آب آبیاری به بیشتر از این مقدار تأثیر چندانی در افزایش عملکرد دانه این محصول ندارد. با توجه به اینکه نتایج به دست آمده در این پژوهش برای محصول کاملینا در شرایط گلخانه و کاشت در گلدان بود و استفاده از ضرایب توابع تولید پیشنهادی در این مطالعه برای شرایط مزرعه امکان‌پذیر نیست، پیشنهاد می‌شود که تابع تولید آب-شوری-عملکرد کاملینا در شرایط مزرعه نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

## منابع

۱. پیری ح.، انصاری ح. و پارسا م. ۱۳۹۷. تعیین تابع تولید آب-شوری-عملکرد با در نظر گرفتن زمان برداشت علوفه و ارزیابی شاخص‌های تولید در ذرت خوشه‌ای. مجله مهندسی منابع آب. ۱۱(۳۸): ۱۵-۲۶.
۲. دهقان ه.، مکاری م. و عابدین‌پور م. ۱۳۹۹. تعیین تابع تولید آب-شوری-عملکرد برای گیاه اسفناج. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۴(۱): ۷۹-۹۱.
۳. علی‌حوری م. ۱۳۹۶. تعیین تابع تولید برتر آب-شوری-عملکرد ماده خشک در دوره رشد رویشی خرما. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۳): ۲۵۱-۲۶۶.
۴. محمدی م.، لیاقت ع. م. و مولوی ح. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین ضرایب حساسیت

27. Tarkalson D. D. King B. A. and Bjorneberg D. L. 2022. Maize grain yield and crop water productivity functions in the arid Northwest U.S. *Agricultural Water Management*. 264: 107513.
28. Xin H. Peiling Y. Shumei R. Yunkai L. Guangyu J. and Lianhao L. 2016. Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 9(2): 63-73.
29. Zhang B. Feng G. Ahuja L. R. Kong X. Ouyang Y. Adeli A. and Jenkins J. N. 2018. Soybean crop-water production functions in a humid region across years and soils determined with APEX model. *Agricultural Water Management*. 204: 180-191.
- camelina investigated in Vitro. *Scientia Agriculture Bohemica*. 46(4): 137-144.
17. Khodadadi Dehkordi D. Kashkuli H. A. and Naderi A. 2013. Estimation of optimum water-yield production function of corn under deficit irrigation and different ratios of superabsorbent in Khouzestan province of Iran. *Advances in Environmental Biology*. 7(9): 2279-2282.
18. Kiani A. R. and Abbasi F. 2009. Assessment of the water-salinity crop production function of wheat using experimental data of the Golestan Province, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage*. 58: 445-455.
19. Kiani A. R. and Abbasi F. 2012. Optimizing Water Consumption Using Crop Water Production Functions, *Crop Production Technologies*, Dr. Peeyush Sharma (Ed.), ISBN: 978-953-307-77, InTech.
20. Kipkorir E. C. Raes D. and Massawe B. 2002. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. *Agricultural Water Management*. 56(3): 229-240.
21. Kramer P. J. and Boyer J. S. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, San Diego.
22. Mila A. J. and Ali M. H. 2016. Yield response factor of sunflower under deficit irrigation at different growth phases. *American Journal of Experimental Agriculture*. 11(2): 1-12.
23. Saseendran S. A. Ahuja L. R. Ma L. Trout T. J. McMaster G. S. Nielsen D. C. Ham J. M. Andales A. A. Halvorson A. D. Chaves J.L. and Fang X.Q. 2015. Developing and normalizing average corn crop water production functions across years and locations using a system model. *Agricultural Water Management*. 157: 65-77.
24. Sepaskhah A. R. Bazrafshan-Jahromi A. R. and Shirmohammadi-Aliakbarkhani Z. 2006. Development and evaluation of a model for yield production of wheat, maize and sugarbeet under water and salt stresses. *Biosystems Engineering*. 93(2): 139-152.
25. Shabani A. Sepaskhah A. R. and Kamgar-Haghighi A. A. 2013. 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): 313-340.
26. Singh R. B. Chauhan C. and Minhas P. S. 2009. Water production functions of wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with saline and alkali waters using double-line source sprinkler system. *Agricultural Water Management*. 96: 736-744.

