

تعیین ضرایب حساسیت و بهترین تابع تولید آب - شوری - عملکرد شلغم در منطقه کاشمر

مهدی مکاری^{۱*}، میثم عابدین پور^۲ و هادی دهقان^۳

چکیده

در زمینه سازگاری با کم‌آبی، راهکارهای مختلفی قابل پیشنهاد و اجرا است که از آن جمله می‌توان به اتخاذ سیاست‌های مناسب، برای بهینه‌سازی مصرف آب، از طریق تعیین توابع بهینه تولید اشاره کرد. کم‌آبی و کاهش کیفیت منابع آب و خاک در کشور، از عوامل اصلی کاهش تولید است؛ از این رو، این تحقیق برای تعیین ضرایب حساسیت گیاه و تابع بهینه تولید آب-شوری - عملکرد برای شلغم، در کاشمر اجرا شد. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار شامل دو فاکتور شوری و آب آبیاری اعمال شد. چهار سطح شوری آب آبیاری شامل (آب شرب) $S_1 = 0/7$ ، $S_2 = 4$ ، $S_3 = 8$ و $S_4 = 12$ دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح آب آبیاری شامل آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی) W_1 ، $W_2 = 75\%$ و $W_3 = 50\%$ بود که در یک خاک با بافت لومی شنی اعمال شدند. داده‌های عملکرد بر فرم‌های مختلف توابع تولید (خطی ساده، خطی لگاریتمی، درجه دوم و نمایی) برازش داده و پس از آنالیز حساسیت، تابع بهینه تولید شلغم تعیین شد. سپس مقادیر کارآیی مصرف آب و ضرایب حساسیت گیاه تعیین شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که تابع تولید درجه دوم برای شلغم به‌عنوان تابع بهینه تولید، قابل توصیه است. بررسی مقادیر حداکثر خطا (ME) نشان داد که بیشترین خطا مربوط به توابع لگاریتمی و خطی ساده می‌باشد. تیمار شاهد (W_1S_1) و تیمار W_2S_1 (۷۵٪ نیاز آبی) به ترتیب با $6/66$ و $7/42$ کیلوگرم بر مترمکعب پربازده‌ترین سطوح آبیاری هستند؛ اما با افزایش تنش خشکی و شوری بهره‌وری آب کاهش یافت. مقدار متوسط ضریب K_y در وضعیت تنش توأمان شوری و خشکی برابر با $1/73$ محاسبه شد. همچنین ضریب حساسیت گیاه (K_s) با افزایش تنش شوری و خشکی کاهش یافت که کمترین مقدار آن ($0/5$) مربوط به تیمار W_3S_4 است. منحنی‌های هم محصول نشان می‌دهند که با افزایش میزان آبیاری، می‌توان از آب آبیاری با شوری بالاتری در آبیاری شلغم استفاده کرد؛ به گونه‌ای که عملکرد نیز تغییر نکند.

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

ارجاع: مکاری م.، عابدین پور م. و دهقان ه. ۱۳۹۹. تعیین ضرایب حساسیت و بهترین تابع تولید آب- شوری- عملکرد شلغم در منطقه کاشمر. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۱۱۱-۱۱۹.

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

۲- استادیار گروه مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر.

* نویسنده مسئول: mehdimokari@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۷

مقدمه

کمبرود آب و تنش خشکی، پدیده‌هایی هستند که در شرایط زراعی اجتناب‌ناپذیرند؛ زیرا رطوبت خاک در طی فصل رشد دارای تغییرات زمانی و مکانی فراوانی است. اینکه گیاه چگونه به مجموع تنش‌های شوری و خشکی پاسخ می‌دهد، هنوز به خوبی روشن نشده است. بدیهی است که گیاه از هر دو تنش بیشتر آسیب می‌بیند تا یکی از آن‌ها. این که آیا اثر آن‌ها جمع‌پذیر است یا نه، موضوعی است که توسط همایی (۱۹۹۹) به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. بیان کمی این موضوع با توجه به اینکه هر کدام از این تنش‌ها، در وضعیت متغیر مکان و زمان چه نقشی را ایفا می‌کنند، بسیار دشوار است. به‌طور کلی، عمق بهینه آب آبیاری در شرایط مختلف (کمبرود زمین، تنش خشکی، تنش شوری یا ترکیبی از این حالات) متفاوت است و زمانی حاصل خواهد شد که بر اثر آبیاری با این عمق، بتوان به درآمد خالص حداکثر دست یافت. برای تعیین عمق بهینه، به ابزار مختلفی از جمله تابع تولید محصول نسبت به آب آبیاری یا مشتقات آن، هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت محصول و اطلاعات مربوط به محدودیت‌های آب و زمین نیاز است. تعیین تابع تولید، راه را برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری تولیدات کشاورزی هموار می‌کند. توابع تولید بر اثر مقادیر مختلف کمی و کیفی آب بر عملکرد گیاهان، ناشی از مشاهدات مزرعه‌ای و با استفاده از تحلیل آماری برآورد می‌شوند. برآورد توابع تولید بر اساس روش‌های آماری به دلیل رابطه مستقیم آب- عملکرد بر روش‌های نظری و تجربی که بر پایه فرضیات استوار هستند، ترجیح داده می‌شوند (شیرمحمدی و همکاران، ۱۳۹۲). این توابع می‌توانند در ارزیابی امکان استفاده از آب‌های شور مورد استفاده قرار گیرند (وکس و پرویت، ۱۹۸۳). با برآورد تابع تولید می‌توان به‌طور کمی تأثیر نسبی هر یک از متغیرهای یاد شده را برای تغییرات تولید و درآمد محصول، محاسبه و تعیین کرد (کیانی و همکاران، ۱۳۸۵). پیری و همکاران (۱۳۹۷) تحقیقی را برای تعیین تابع تولید برتر آب- شوری- عملکرد ذرت خوشه‌ای انجام دادند. نتایج نشان دادند که تابع درجه دوم عملکرد ذرت خوشه‌ای را بهتر ارائه می‌کند. جورونی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که مناسب‌ترین تابع تولید آب با عملکرد کل ماده خشک، دانه و ساقه گیاه ذرت، تابع خطی است. کیانی و همکاران

(۱۳۸۴) در پیش‌بینی عملکرد گندم، به واسطه تغییرات رطوبت و شوری خاک دریافتند که توابع تولید نمایی و درجه دوم نسبت به توابع خطی قابلیت بهتری دارند. علی‌حوری (۱۳۹۶) مطالعه‌ای را برای تعیین تابع تولید برتر آب- شوری- عملکرد ماده خشک در دوره رشد رویشی خرما انجام داد. نتایج نشان داد که در دوره رشد رویشی خرما رقم برحی، معادله درجه دوم دارای دقت بیشتری در برآورد عملکرد ماده خشک بود. تمام معادلات به جز معادله درجه دوم، میزان ماده خشک اندام هوایی را کمتر از میزان واقعی برآورد کردند. کیانی و عباسی (۲۰۰۹) در وضعیت توأم تنش شوری و کم‌آبی در استان گلستان تابع متعالی را به‌عنوان تابع برتر تولید گندم انتخاب کردند.

شلغم با نام علمی *Brassica rapa L.* به‌عنوان منبع غذایی سلامتی‌بخش قوی، حاوی انواع آنتی‌اکسیدان‌ها مانند ویتامین‌ها و گلوکوزینولات‌ها است (نورین و همکاران، ۲۰۱۰). شلغم به‌صورت تازه و خشک شده به‌عنوان تغذیه انسان استفاده می‌شود. بذر و ریشه و برگ آن مصرف دارویی دارد و گونه‌هایی از آن جهت علوفه و خوراک دام مورد استفاده قرار می‌گیرند (زرگری، ۱۳۷۶). این گیاه در دامنه وسیعی از وضعیت آب و هوایی نیمه‌گرمسیری، معتدل و سرد کشت می‌شود (دیکسون، ۲۰۰۷). کاشت و پرورش شلغم بیشتر در مناطق حاشیه مدیترانه، جنوب غربی و مرکز آسیا از جمله ایران است (روبانزکی و یاماگوچی، ۱۹۹۷). توده‌های بومی طی سال‌های متمادی به خوبی به وضعیت سخت محیطی سازگار شده و دارای مجموعه‌ای از صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و فنولوژیک هستند که در نتیجه آن از ساز و کارهایی برخوردارند که موجب افزایش بازده استفاده از آب موجود در خاک در محیط‌های شور و خشک می‌شود (اشرف، ۱۹۹۹).

از آن جایی که تاکنون پژوهشی در زمینه تعیین تابع تولید برتر آب- شوری- عملکرد شلغم در کشور انجام نشده است، هدف این پژوهش تعیین بهترین تابع تولید شلغم در وضعیت توأم شوری و خشکی بود تا بتوان ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب با استفاده از منابع آب شور، به کمترین کاهش محصول دست یافت.

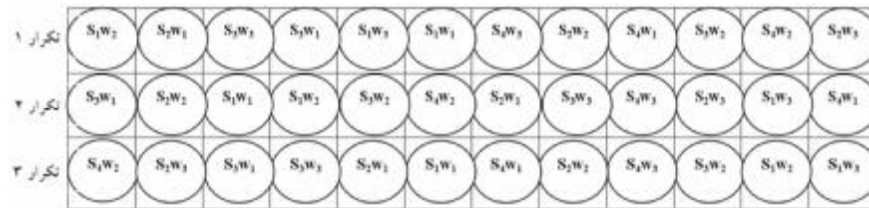
مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۷ در گلخانه تحقیقاتی

شود. بعد از این مدت، گلدان‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم گرم وزن شدند. نشاهای شلغم (رقم پرپل تاپ وایت گلاب) به مدت یک ماه در گلدان‌ها و در وضعیت یکسان، آبیاری می‌شدند. در تاریخ ۱۳۹۷/۰۷/۲۹، تیمارها اعمال شدند. دور آبیاری برای تمام تیمارها شش روز در نظر گرفته شد. برای تعیین مقدار آب مورد نیاز در هر 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 کم‌آبیاری است که به جای تأمین کامل آب مورد نیاز گیاهان، درصدی از آن در هر بار آبیاری تأمین می‌شود (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۷). از آن‌جا که آب مورد نیاز در این طرح شامل چهار سطح شوری ۰/۷ (آب شرب)، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بود؛ بنابراین این کیفیت‌ها 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 گردید. نقشه شماتیک طرح آزمایشی در شکل ۱ و ویژگی‌های شیمیایی خاک گلدان‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جنب ایستگاه هواشناسی مرکز آموزش عالی کاشمر 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 در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار شامل دو فاکتور شوری و آب آبیاری اعمال شد. چهار سطح شوری آب آبیاری شامل (آب شرب) $S_1 = 0/7$ ، $S_2 = 4$ ، $S_3 = 8$ و $S_4 = 12$ دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح آبیاری شامل آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی) $W_1 = 0/75$ ، $W_2 = 0/75$ و $W_3 = 50\%$ بود که در یک خاک لومی شنی با وزن مخصوص ظاهری ۱/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب اعمال شد. تعداد ۳۶ گلدان پلاستیکی با ابعاد ۲۸×۲۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تهیه شد. برای 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 و بقیه حجم آن از خاک پر شد. برای تعیین وزن گلدان‌ها در ظرفیت زراعی مزرعه (FC) و همچنین رفع شوری خاک، گلدان‌ها با آب شرب شهری اشباع و اجازه داده شد زهکشی تا ۴۸ ساعت انجام



شکل ۱- نقشه شماتیک طرح آزمایشی

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها

کربن آلی (درصد)	SAR	هدایت الکتریکی ($ds\ m^{-1}$)	PH	نقطه پژمردگی دائم (%)	ظرفیت زراعی (%)	بافت	چگالی ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)
۰/۸۷	۱/۲۳	۱/۱۸	۸/۲	۵	۲۲/۵	لومی شنی	۱/۴۱	۱۴	۹	۷۷

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

که در این معادله، Y مقدار عملکرد (kg/ha)، I مقدار آب آبیاری (cm)، EC_w هدایت الکتریکی آب آبیاری (ds/m) و X بردار ثابت سایر عوامل تأثیرگذار در تولید است. تابع مذکور با فرم‌های مختلف خطی ساده، خطی لگاریتمی (کاب داگلاس)، درجه دوم و نمایی که در زیر آورده شده است، برآورد شد.

برآورد توابع تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی با استفاده از داده‌های آماری حاصله از اجرای طرح و به کارگیری روش تخمین تابع تولید آب- شوری، می‌توان عملکرد محصول را تحت تأثیر مقادیر مختلف آب کاربردی و شوری آب آبیاری به‌طوری‌که سایر عوامل تولید ثابت نگه داشته شوند، به صورت معادله زیر نشان داد:

فرم خطی:

$$Y = a_0 + a_1I + a_2EC_w \quad (2)$$

فرم لگاریتمی:

$$Y = a_0I^{a_1}EC_w^{a_2} \quad (3)$$

فرم درجه دوم:

$$Y = a_0 + a_1I + a_2I^2 + a_3EC_w + a_4EC_w^2 + a_5I \cdot EC_w \quad (4)$$

فرم نمایی:

$$Y = a_0I^{a_1}EC_w^{a_2}e^{(a_3I+a_4EC_w)} \quad (5)$$

پس از اینکه داده‌های آماری عملکرد حاصل از اجرای طرح، با نرم‌افزار SPSS برازش داده و فرم‌های مختلف توابع تولید تعیین شد برای تعیین تابع بهینه تولید، اقدام به آنالیز حساسیت آماری و با تعیین آماره‌های مربوطه 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)، میانگین ریشه دوم خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، کارایی مدل‌سازی (EF) و ضریب باقیمانده (CRM) هستند (همایی و همکاران، ۲۰۰۲؛ لیگ و گرین، ۱۹۹۹). 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 کار رفته و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است.

تعیین کارایی مصرف آب

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

$$WUE = \frac{Y}{ET} \times 100 \quad (11)$$

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

تعیین ضرایب حساسیت گیاه (K_s) و واکنش عملکرد به آبیاری (K_y)

برای محاسبه ضرایب تنش خشکی، شوری و توأمان خشکی و شوری از معادله زیر استفاده شد (فائو ۵۶):

$$ET_c = K_s \cdot ET_{cp} \quad (12)$$

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

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

$$1 - \frac{Y}{Y_{max}} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{max}} \right) \quad (13)$$

که در این معادله، Y مقدار عملکرد واقعی، Y_{max} حداکثر مقدار عملکرد، K_y ضریب واکنش عملکرد نسبت به آب و شوری، ET مقدار واقعی تبخیر و تعرق و ET_{max} حداکثر تبخیر و تعرق است.

همچنین طبق توصیه فائو، برای محاسبه افت نسبی عملکرد و بازدهی تولید، از معادلات زیر استفاده شد:

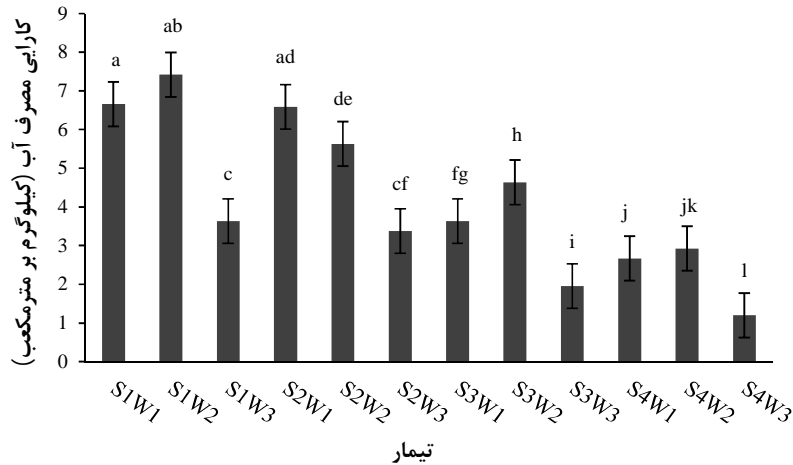
$$K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{max}} \right) = \text{کاهش عملکرد نسبی (درصد)} \times 100 \quad (14)$$

$$1 - K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{max}} \right) = \text{بازدهی تولید (درصد)} \times 100 \quad (15)$$

نتایج و بحث

کارایی مصرف آب

پس از محاسبه مقادیر کارایی مصرف آب (شکل ۲)، نتایج نشان داد که تیمار شاهد (W_1S_1) و تیمار W_2S_1 (۷۵٪ نیاز آبی) به ترتیب با ۶/۶۶ و ۷/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب پربازده‌ترین سطوح آبیاری هستند. اما با افزایش تنش خشکی و شوری کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۲ مشخص می‌شود که کمترین کارایی مصرف آب در تیمار S_4W_3 و به مقدار ۱/۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده شد.



شکل ۲- مقادیر کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف اعمال شده (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن و در سطح احتمال یک درصد است).

بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی مصرف آب، ابتدا تابع تولید آب- شوری- عملکرد با استفاده از فرم‌های مختلف (یعنی خطی ساده، خطی لگاریتمی، درجه دوم و نمایی) بر اساس تغییرات شوری (dS/m)، عمق آب آبیاری (cm) و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها به دست آمد که نتایج برآورد توابع تولید و همچنین تحلیل هر یک از توابع انتخابی در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر آماره t در این جدول بیانگر تأثیر معنی‌دار تعیین‌کننده دو عامل عمق آب آبیاری و شوری بر

تغییرات عملکرد محصول و آماره F ، بیانگر معنی‌داری کلی توابع است. در این خصوص داتا و همکاران (۱۹۹۸) اعلام کردند که برآورد توابع تولید بر اساس روش‌های آماری، به دلیل تعیین رابطه مستقیم آب- عملکرد، بر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی استوار است، ترجیح داده می‌شود. اما روسو و باکر (۱۹۸۶) محدودیت عمده این روش‌ها را وابستگی شدید آن‌ها به مکان و سال خاص می‌دانند.

جدول ۲- ضرایب فرم‌های مختلف توابع تولید آب- شوری- عملکرد

متغیر	خطی ساده	خطی لگاریتمی	درجه دوم	نمایی
ثابت	-۱۳۰۷/۹۰ ^{ns} (-۱/۰۲۰)	۵۸/۸۵۰ ^{**} (۳/۶۴۶)	-۱۶۵۹۰ ^{**} (-۲/۹۵۰)	-۰/۴۹۳ ^{ns} (-۰/۱۷۶)
I (cm)	۸۲۴/۶۹ ^{**} (۴/۸۴۷)	-	۴۸۸۱ ^{**} (۳/۰۸۸)	-۰/۹۰۳ ^{ns} (-۱/۲۶۶)
EC (ds/m)	-۱۸۳/۵۰ ^{**} (-۲/۳۲۷)	-	۷۴۲/۰۵۹ [*] (۲/۰۷۴)	-۰/۱۳۳ ^{**} (-۲/۳۲۲)
Ln (I)	-	۲/۱۶۷ ^{**} (۳/۸۲۱)	-	۸/۰۲۵ ^{ns} (۱/۷۲۵)
Ln (EC)	-	-۰/۲۲۱ ^{ns} (-۲/۰۲۳)	-	-۰/۲۵۳ ^{ns} (۱/۰۹۵)
I^2	-	-	-۲۵۹/۸۶۰ ^{**} (-۲/۳۷۶)	-
EC^2	-	-	-۱۶/۱۱۶ ^{ns} (-۱/۲۳۱)	-
LEC	-	-	-۱۱۶/۶۶۳ ^{**} (-۲/۸۹۵)	-
آماره F	۲۷/۰۲۵	۱۴/۳۸۱	۶۷/۶۱	۱۵۳۱/۳۳

ns و ** به ترتیب بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t هستند.

تعیین توابع بهینه تولید

نتایج نشان داد که عملکرد تحت تأثیر کمیت و کیفیت آب آبیاری و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت. بر این اساس توابعی که بتوانند نوع رابطه بین عملکرد، مقدار آب و شوری آب آبیاری را نشان دهند، استخراج شدند. 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 ۳). بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده، هر

یک از توابع درجه‌بندی شدند. اساس درجه‌بندی به این صورت بود که تابعی که RMSE آن حداقل باشد، درجه یک و یا تابعی که R^2 و EF آن نزدیک‌تر به یک باشد،

درجه یک نسبت داده شده است (همایی و همکاران، ۲۰۰۲؛ لیگ و گرین، ۱۹۹۹).

جدول ۳- پارامترهای آماری محاسبه شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید

نوع تابع	ME (%)	RMSE(kg)	R^2	EF	CRM
خطی ساده	(۳) ۳۹/۲۳	(۳) ۶۵۱	(۳) ۰/۸۶	(۳) ۰/۸۶	(۱) ۰/۰۰۰۱
خطی لگاریتمی	(۴) ۵۸/۱۸	(۴) ۸۸۰	(۴) ۱/۱۵	(۴) ۰/۷۴	(۴) ۰/۰۲۴۵
درجه دوم	(۱) ۲۳/۳۹	(۱) ۴۰۵	(۱) ۰/۹۴	(۱) ۰/۹۴	(۲) ۰/۰۰۱۳
نمایی	(۲) ۳۰/۴۵	(۲) ۵۲۱	(۲) ۰/۸۹	(۲) ۰/۹۱	(۳) ۰/۰۱۸۸

اعداد داخل پرانتز درجه‌بندی مدل در شاخص آماری مربوطه است.

همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود برای همه پارامترهای آماری که مبنای مقایسه توابع قرار گرفته‌اند، بهترین نتایج به ترتیب برای تابع درجه دوم و نمایی به دست آمد. ارزیابی بازدهی تابع (EF) نشان می‌دهد که تابع درجه دوم و نمایی عملکرد خوبی دارند. مقادیر ME نشان می‌دهند که بیشترین خطا مربوط به توابع خطی لگاریتمی و خطی ساده است. مقادیر CRM توابع، دلالت بر آن دارند که تابع خطی لگاریتمی و خطی ساده در اکثر موارد عملکرد را بیشتر از مقادیر واقعی و سایر توابع کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند. بنابراین تابع درجه دوم به‌عنوان تابع بهینه تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی برای شلغم در منطقه کاشمر معرفی می‌شود. در همین رابطه، لی و همکاران (۲۰۰۵)، سپاسخواه و اکبری (۲۰۰۵) و کالرا و همکاران (۲۰۰۷) تابع درجه دوم را برای گندم گزارش کردند. محمدی و همکاران (۱۳۸۹) نیز تابع تولید درجه دوم را برای گوجه فرنگی در منطقه کرج پیشنهاد دادند. شوک و همکاران (۲۰۰۷) نیز در آزمایشی که روی تولید کمی و کیفی بذر یونجه انجام دادند، تابع درجه دوم را به‌عنوان تابع بهینه تولید و سطح آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی را به‌عنوان سطح آبیاری بهینه (در آبیاری قطره‌ای) اعلام کردند. شانگ و مائو (۲۰۰۶) نیز تابع درجه دوم را برای گندم زمستانه پیشنهاد دادند.

منحنی‌های هم محصول

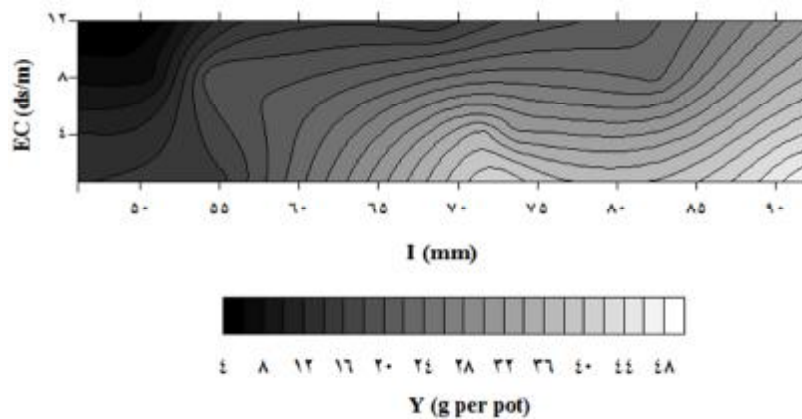
از دیگر کاربردهای مطالعات توأمان شوری و خشکی در راستای بهینه‌سازی مصرف آب برای سازگاری با کم‌آبی، تهیه منحنی‌های هم محصول است. این منحنی‌ها نشان‌دهنده مکان هندسی ترکیب‌های مختلف عمق و

شوری آب آبیاری است که عملکرد یکسانی را در فرآیند تولید شلغم ایجاد می‌کنند. شکل ۳ منحنی‌های هم محصول شلغم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ مشخص می‌شود که در یک عمق آب مشخص (I)، هرچه شوری افزایش یابد، عملکرد (Y) کاهش و برای یک ECw معین، هرچه مقدار آبیاری بیشتر شود، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات محمدی و همکاران (۱۳۸۹) در مورد گوجه فرنگی و سپاسخواه و همکاران (۲۰۰۶) در مورد گندم نیز مؤید این مطلب است؛ ولی هرگاه دو عامل فوق با هم بررسی شود، ملاحظه می‌شود که برای دست‌یابی به عملکرد مشخص، مقادیر متفاوتی از I و ECw را می‌توان جایگزین کرد. برای مثال با میزان آبیاری ۶۰ میلی‌متر و شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر عملکرد (یعنی وزن غده) معادل ۲۰ گرم در گلدان است که با افزایش میزان آبیاری به مقدار ۷۰ میلی‌متر می‌توان به همان عملکرد ولی با شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر دست یافت. بنابراین مشاهده می‌شود که عملکرد، تابع دو متغیر عمق و شوری آب آبیاری است و نگاه تک بعدی اثر هر یک بر عملکرد، با واقعیت سازگار نیست که داتا و همکاران (۱۹۹۸) نیز بر این موضوع تأکید کرده‌اند.

مقادیر K_s و K_y برای وضعیت مختلف تنش شوری و خشکی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به مقادیر K_y و افت نسبی محصول (ستون چهارم) می‌توان دریافت که تنش شوری بر کاهش عملکرد تأثیر بیشتری نسبت به تنش خشکی داشته است. به عبارتی می‌توان گفت شلغم نسبت به تنش شوری حساس‌تر است. همان‌گونه که دیده می‌شود در یک سطح آبیاری مشخص با افزایش تنش شوری، مقدار K_y نیز افزایش یافته و به‌طور کلی، با افزایش تنش شوری و خشکی عملکرد محصول کاهش

کمترین مقدار آن (۰/۵۰) مربوط به تیمار W_3S_4 است. می‌توان گفت در 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 می‌باشد. به‌طور کلی اگر ظرفیت خاک یا محلولی که گیاه در آن می‌روید، کاهش یابد، اختلاف پتانسیل که نیروی محرکه جذب است نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان آب تقلیل پیدا می‌کند. در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی از برازش منحنی بر مقادیر $1 - (Y/Y_{max})$ در مقابل مقادیر $1 - (ET/ET_{max})$ ، مقدار K_y متوسط (۱/۷۳) به دست آمد (شکل ۴).

یافته است. در جدول ۴ مقادیر K_y در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی (یعنی ۱/۸۷ و ۱/۸۴ به ترتیب برای تیمارهای S_3W_3 و S_4W_2)، بیشتر از مقادیر K_y در شرایط تنش خشکی (یعنی ۰/۵۷ و ۱/۷) به ترتیب برای تیمارهای S_1W_3 و S_1W_2 و کمتر از مقادیر K_y در شرایط تنش شوری (یعنی ۴/۹۹ و ۲/۷۷ به ترتیب برای تیمارهای S_3W_1 و S_4W_1) است، در نتیجه تأثیر تنش شوری بر کاهش عملکرد محصول بیشتر از تنش خشکی است. در حالت توأمان تنش شوری و خشکی اثر این دو تنش جمع‌پذیر نیست. با توجه به مقادیر K_s با افزایش تنش شوری و خشکی تبخیر و تعرق کاهش یافته است که

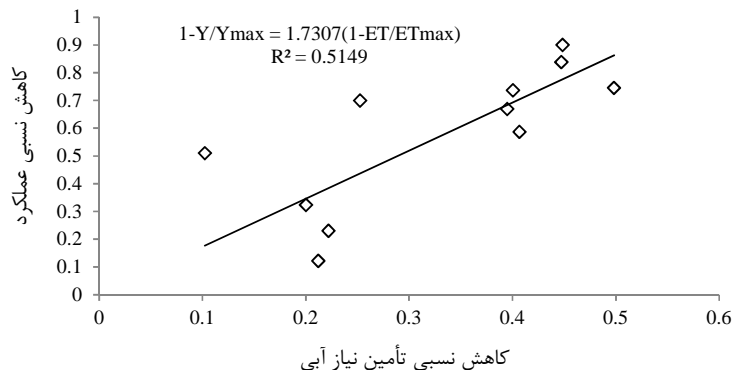


شکل ۳- منحنی‌های هم محصول گیاه شلغم در وضعیت تنش همزمان شوری و خشکی ضرایب حساسیت گیاه (K_s) و واکنش عملکرد به آبیاری (K_y)

جدول ۴- مقادیر ضرایب حساسیت گیاه، تغییرات کاهش نسبی عملکرد (نسبت به تیمار شاهد با آبیاری کامل)، کاهش نسبی تأمین نیاز آبی (نسبت به تیمار شاهد با آبیاری کامل) و بازدهی تولید در تیمارهای مختلف

تیمار	K_s	$1 - (ET/ET_{max})$ (%) کاهش نسبی تأمین نیاز آبی	$1 - (Y/Y_{max})$ (%) کاهش نسبی عملکرد	K_y	بازدهی تولید (%)
S_1W_2 (تیمار شاهد)	۱	۰	۰	-	۱۰۰
S_1W_2	۰/۷۹	۲۱/۲۲	۱۲/۱۸	۰/۵۷	۸۷/۸۲
S_1W_3	۰/۶۱	۳۹/۵۰	۶۶/۹۵	۱/۷۰	۳۳/۰۵
S_2W_1	۰/۷۸	۲۲/۲۰	۲۳/۰۰	۱/۰۴	۷۷/۰۰
S_2W_2	۰/۸۰	۲۰/۰۲	۳۲/۳۸	۱/۶۲	۶۷/۶۲
S_2W_3	۰/۵۵	۴۹/۸۴	۷۴/۵۶	۱/۵۰	۲۵/۴۴
S_3W_1	۰/۹۰	۱۰/۲۳	۵۱/۰۰	۴/۹۹	۴۹/۰۰
S_3W_2	۰/۵۹	۴۰/۷۰	۵۸/۷۲	۱/۴۴	۴۱/۲۸
S_3W_3	۰/۵۵	۴۴/۷۲	۸۳/۸۰	۱/۸۷	۱۶/۲۰
S_4W_1	۰/۷۵	۲۵/۲۴	۷۰/۰۰	۲/۷۷	۳۰/۰۰
S_4W_2	۰/۶۰	۴۰/۰۴	۷۳/۶۴	۱/۸۴	۲۶/۳۶
S_4W_3	۰/۵۰	۴۴/۸۳	۹۰/۰۸	۲/۰۱	۹/۹۲

ET_{max} نیاز آبی گیاه در شرایط بدون تنش شوری و خشکی (یعنی نیاز آبی تیمار شاهد یا S_1W_1)، ET نیاز آبی گیاه در شرایط تنش شوری و خشکی (یعنی نیاز آبی سایر تیمارها)



شکل ۴- همبستگی بین کاهش نسبی عملکرد و کاهش نسبی تأمین نیاز آبی شلغم (نسبت به شرایط آبیاری کامل)

نتیجه گیری

بالاتری استفاده کرد؛ به گونه‌ای که عملکرد تغییر نکند؛ اما جایگزینی کمیت با کیفیت آب آبیاری دارای محدوده خاصی است. به عبارتی تا محدوده خاصی (حد مجاز) از شوری، امکان جبران کاهش نسبی عملکرد ناشی از شوری آب آبیاری با افزایش مقدار آب آبیاری وجود دارد و بعد از آن، افزایش مقدار آبیاری تأثیری در افزایش عملکرد نخواهد داشت. در منحنی‌های هم محصول این محدوده نقطه‌ای است که خط مماس بر منحنی موازی محور I شود، از این نقطه به بعد، هرچه میزان آبیاری افزایش یابد (یا شوری ثابت) نه تنها باعث افزایش عملکرد نمی‌شود، بلکه سبب هدر رفتن سرمایه نیز خواهد شد.

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. جورونی ا.، عالی‌نژادیان بیدآبادی ا. و ملکی ع. ۱۳۹۶. تعیین تابع تولید و پاسخ عملکرد کل ماده خشک و دانه به کم‌آبیاری در گیاه ذرت. مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲): ۲۴۱-۲۵۶.
۳. زرگری ع. ۱۳۷۶. گیاهان دارویی. انتشارات دانشگاه تهران. ۴۸۹ ص.
۴. سپاسخواه ع.، توکلی ع. و موسوی س. ف. ۱۳۸۷. اصول و کاربرد کم‌آبیاری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۲۹۴ ص.
۵. شیرمحمدی ز.، انصاری ح.، علیزاده ا. و کافی م.

نتایج نشان داد که تیمار شاهد (W_1S_1) و تیمار W_2S_1 (۷۵٪ نیاز آبی) به ترتیب با ۶/۶۶ و ۷/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب پربازده‌ترین سطوح آبیاری بودند؛ اما با افزایش تنش خشکی و شوری، بازدهی مصرف آب کاهش یافت. مقادیر K_y در وضعیت همزمان تنش شوری و خشکی، بیشتر از مقادیر K_y در وضعیت تنش خشکی و کمتر از مقادیر K_y در وضعیت تنش شوری بود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر تنش شوری بر کاهش عملکرد محصول بیشتر از تنش خشکی است. همچنین مقادیر K_s نشان داد با افزایش تنش شوری و خشکی تبخیر و ترقق گیاه کاهش یافت. می‌توان گفت در وضعیت تنش خشکی کاهش تبخیر و ترقق به دلیل کمبود آب و در وضعیت تنش خشکی به دلیل کاهش جذب آب در اثر پایین رفتن ظرفیت اسمزی محیط ریشه بود.

نتایج آنالیز حساسیت توابع نشان داد که میزان تغییرات عملکرد شلغم نسبت به تغییرات دو عامل کمیت و کیفیت آب آبیاری (تابع تولید آب- شوری- عملکرد) از فرم درجه دوم تبعیت می‌کنند. لذا تابع تولید درجه دوم برای شلغم به عنوان تابع بهینه تولید در منطقه کاشمر معرفی می‌شود؛ بنابراین توصیه می‌شود اولاً در زمینه سازگاری با کم‌آبی برای تولید شلغم، از تابع تولید درجه دوم به دست آمده در منطقه استفاده شود. ثانیاً تحقیقات تکمیلی مشابه برای سایر محصولات استراتژیک منطقه (از قبیل گندم، جو، یونجه و ذرت) انجام شود تا بتوان راهبرد بهینه‌سازی مصرف آب را در یک تناوب کامل زراعی به کار گرفت. نتایج بررسی منحنی‌های هم محصول نشان داد که با افزایش میزان آبیاری، می‌توان از آب آبیاری با شوری

- trials and farmers' field data. *Agricultural Water Management*. 93(1-2): 54-64.
17. Kiani A. R. and Abbasi F. 2009. Assessment of the water-salinity crop production function of wheat using experimental data of the Golestan province. *Irrigation and Drainage*. 58: 445-455.
 18. League K. and Green R. E. 1999. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport delts: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*. 7: 51-73.
 19. Li J. Inanaga S. Li Z. and Eneji E. 2005. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 76(1): 8-23.
 20. Noreen Z. Ashraf M. and Akram N. 2010. Salt induced regulation of some key antioxidant enzymes and physio biochemical phenomena in five divers cultivars of turnip (*Brassica rapa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 196(4): 273-285.
 21. Rubatzky V. E. and Yamaguchi M. 1997. Cole crops, other brassica and crucifer vegetables. *World Vegetables: Principles, Production and Nutritive Values*. Springer Press. pp. 371-417.
 22. Russo D. and Bakker D. 1986. Crop water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline waters. *Soil Science Society American Journal*. 51: 1554-1562.
 23. Sepaskhah A. R. and Akbari D. 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. *Biosystems Engineering*. 92(1): 97-106.
 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*. 92(1): 97-106.
 25. Shang S. and Mao X. 2006. Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in North China. *Agricultural Water Management*. 85(3): 314-322.
 26. Shock C. C. Feibert E. B. G. Saunders L. D. and Klauzer J. 2007. Deficit irrigation for optimum alfalfa seed yield and quality. *Agronomy Journal*. 99: 992-998.
 27. Vaux H. J. and Pruitt W. O. 1983. Crop water production functions. *Advances in Irrigation*. 2: 61-97.
 ۱۳۹۲. ارزیابی توابع تولید آب- شوری- عملکرد در ذرت علوفه‌ای در استان خراسان رضوی. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*. ۴(۷): ۵۳۵-۵۴۳.
 ۶. 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.
 ۷. کیانی ع. میرلطیفی م. همایی م. و چراغی ع. م. ۱۳۸۴. تعیین بهترین تابع تولید آب- شوری گندم در منطقه شمال گرگان. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. ۶(۲۵): ۱-۱۴.
 ۸. کیانی ع. همایی م. و میرلطیفی م. ۱۳۸۵. ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم‌آبی. *مجله علوم آب و خاک*. ۲۰(۱): ۷۳-۸۳.
 ۹. محمدی م. لیاقت ع. م. و مولوی ح. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین ضرایب حساسیت گوجه‌فرنگی در شرایط توأم شوری و خشکی در منطقه کرخ. *نشریه آب و خاک*. ۲۴(۳): ۵۸۳-۵۹۲.
 10. Ashraf M. 1999. Interactive effect of salt (NaCl) and nitrogen form on growth, water relations and photosynthetic capacity of sunflower (*Helianthus annuum* L.). *Annals of Applied Biology*. 135(2): 509-513.
 11. 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: 85-94.
 12. Dixon G. R. 2007. *Vegetable Brassicas and Related Crucifers*. CABI publishing. Oxfordshire. UK. 326 p.
 13. Doorenbos J. and Kassam A. H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage paper*. No. 33. 505 p.
 14. Homae M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University. 173 p.
 15. Homae M. Driksen C. and Feddes R. A. 2002. Simulation of root water uptake, I: Non-uniform ransient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*. 57: 89-109.
 16. Kalra N. Chakraborty D. Ramesh Kumar P. Jolly M. and Sharma P. K. 2007. An approach to bridging yield gaps, combining response to water and other resource inputs for wheat in northern India, using research

