مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۷/ شماره ۱/ پیاپی ۴۸/ بهار ۱۴۰۲ (۱-۱۰)
https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13964.2428

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین توابع تولید آب-شوری-عملکرد در گیاه نعناع فلفلی در حضور سلنیوم

وحید شمس‌آبادی[۱]، حسین بانژاد[۲*]، حسین انصاری[۳] و سید حسین نعمتی[۴]

چکیده

با توجه به افت کمی و کیفی منابع آب، طبعاً بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی ضروری است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی، به‌خصوص در مناطق خشک، استفاده از توابع تولید آب-شوری-عملکرد است. همچنین سلنیوم به‌عنوان یکی از عناصر مفید در برابر اثرات مخرب تنش‌های شوری و خشکی شناخته شده و به‌عنوان یک پایین‌آورندهٔ استرس عمل می‌کند؛ ازاین‌رو این مطالعه به‌منظور پیش‌بینی عملکرد گیاه نعناع فلفلی و تعیین توابع تولید بهینه در شرایط تنش شوری و خشکی در حضور سلنیوم، در گلخانهٔ تحقیقاتی در تربت جام اجرا شد. آزمایش به‌صورت اسپلیت در زمان، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار شامل دو سطح چین (چین اول، چین دوم)، ۳ سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی)، ۳ سطح شوری (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) و دو سطح سلنیوم (۰ و ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم) اجرا شد. داده‌های عملکرد (عملکرد دو چین درجهت برآورد بهتر، با هم تجمیع شد) یکبار در حضور سلنیم به میزان ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم و یکبار در شرایط عدم‌حضور سلنیوم، بر فرم‌های مختلف توابع تولید (خطی ساده، خطی لگاریتمی، درجه‌دوم و نمایی) برازش داده شد و پس از آنالیز حساسیت، تابع بهینهٔ تولید نعناع فلفلی تعیین شد. نتایج نشان داد که ضریب تعیین (R^2) برای عملکرد در حضور سلنیوم توسط توابع درجه‌دوم، نمایی، خطی ساده و لگاریتمی به‌ترتیب ۰/۹۸۶، ۰/۹۸۱، ۰/۹۴۶ و ۰/۸۹۷ و در شرایط عدم‌حضور سلنیوم توسط توابع فوق به‌ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۹۹۵، ۰/۹۵۹ و ۰/۸۷۱ بود. براساس نتایج این تحقیق، تابع تولید درجه‌دوم به‌عنوان تابع تولید بهینه برای عملکرد گیاه نعناع فلفلی، هم در حضور سلنیوم و هم عدم‌حضور سلنیوم، در منطقهٔ تربت جام، قابل‌توصیه است. همچنین نتایج اثر سادهٔ سلنیوم بر بهره‌وری آب نشان داد که بهره‌وری آب در حضور سلنیوم ۱۷/۸۱ درصد بیشتر از مقدار آن در عدم‌حضور سلنیوم است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تنش خشکی، تنش شوری، تابع تولید، سلنیوم.

ارجاع: شمس‌آبادی و، بانژاد ح، انصاری ح، و نعمتی س، ح. ۱۴۰۲. بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین توابع تولید آب-شوری-عملکرد در گیاه نعناع فلفلی در حضور سلنیوم. مجله پژوهش آب ایران. ۴۸: ۱-۱۰. https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13964.2428

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۴- استادیار گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
*** نویسنده مسئول**: **banejad@um.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲

مقدمه

کمبود شدید آب باعث توسعه و بهره‌برداری از منابع شور و همچنین استفاده از کم‌آبیاری به‌عنوان روشی برای رفع کمبود آب کشاورزی شده است. با این حال تنش آبی ناشی از کم‌آبیاری یا کاربرد آب شور، برداشت آب توسط گیاه را محدود می‌کند؛ بنابراین پیش‌بینی دقیق عملکرد محصول در این شرایط بسیار مهم است (شین و همکاران، ۲۰۱۶). پاسخ گیاه به مجموع تنش‌های شوری و خشکی هنوز به‌خوبی مشخص نشده است؛ اما آنچه بدیهی است، آن است که گیاه از هر دو تنش به‌صورت همزمان بیشتر آسیب خواهد دید تا یکی از آن‌ها؛ اما اینکه آیا اثر آن‌ها جمع‌پذیر است یا خیر، موضوعی است که توسط محققانی ازجمله همایی و همکاران (۲۰۰۲) به‌صورت مفصل مورد بحث قرار گرفته است. بیان کمّی این موضوع با توجه به اینکه‌هرکدام از این تنش‌ها در شرایط متغیر مکان و زمان چه نقشی را ایفا می‌کنند، بسیار دشوار است. تعیین تابع تولید راه را برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری تولی‌دات کشاورزی هموار می‌کند (پیری و همکاران، ۱۳۹۷). مطالعات متعددی واکنش گیاهان به تنش شوری و خشکی و وابستگی خطی عملکرد، تبخیر و تعرق و شوری در شرایط مختلف آبیاری و شوری مورد بررسی قرار گرفته است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ آنلی و همکاران، ۲۰۱۱؛ لاتی و همکاران، ۱۹۸۵؛ بنتانا و لازاروویچ ۲۰۱۰). با وجود تعداد زیادی از تحقیقات، اثرات همزمان تنش آبی و شوری بر عملکرد محصول به‌دلیل پیچیدگی، کمتر بررسی شده است (شین و همکاران، ۲۰۱۶). کیانی و میرلطیفی (۲۰۱۲) رابطهٔ بین عملکرد دانه و آب کاربردی در یک سطح شوری مشخص را به‌صورت تابع نمایی به‌دست آوردند. نجفی مود و همکاران (۱۳۹۳) تابع برتر آب-شوری-اجزای کمّی عملکرد ارقام پنبهٔ ورامین و خرداد را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده در مورد هر دو رقم نشان داد که برای پارامتر وزن قوزه، تابع درجه‌دوم و برای پارامترهای تعداد قوزه در مترمربع و ارتفاع بوته، تابع نمایی توانستند به‌عنوان تابع برتر نسبت به سایر توابع در منطقهٔ اقلیمی بیرجند معرفی شوند. نقش سلنیوم در کاهش اثرات تنش‌های محیطی در انسان و حیوانات به‌طور گسترده و در گیاهان به میزان کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. عنصر سلنیوم به‌عنوان یک پایین‌آورندهٔ استرس عمل می‌کند (لین و همکاران، ۲۰۱۲؛ سعیدی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین براساس گزارش پدررو و همکاران (۲۰۰۸) محتوای کلروفیل برگ‌های گیاه کلم تحت تنش کادمیم، با کاربرد سلنیوم افزایش یافت. سلنیوم در شرایط تنش کادمیم موجب بهبود رشد ریشهٔ گیاه گندم زمستانی می‌شود (کین و همکاران، ۲۰۱۸). مرور منابع نشان می‌دهد تاکنون توابع تولید برای گیاهان مختلف ارزیابی و توسعه داده شده‌اند؛ اما مطالعات در خصوص سبزیجات و به‌خصوص نعناع فلفلی بسیار محدود است. نعناع فلفلی با نام علمی *Mentha piperita* از خانوادهٔ *Lamiaceae* ازجمله گیاهان دارویی و معطری است که اسانس آن مصارف دارویی، غذایی، آرایشی و بهداشتی فراوانی دارد (ویلدانگ و کراتیو، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه تنش شوری و تنش خشکی از مسائل و مشکلات جدی در مناطق خشک هستند، در چنین شرایطی پیش‌بین‌ی عملکرد محصول تحت شرایط خشکی و شوری بسیار مهم است؛ بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارزیابی توابع تولید آب-شوری-عملکرد در گیاه نعناع فلفلی به‌عنوان یک گیاه دارویی پرخاصیت و تجاری در حضور سلنیوم در شرایط هیدروپونیک انجام شد. از نوآوری‌های دیگر این پژوهش بررسی تأثیر سلنیوم بر این توابع تولید و نیز بر بهره‌وری آب با فرض افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های شوری و خشکی است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین توابع تولید آب-شوری-عملکرد و نیز بهره‌وری آب در گیاه نعناع فلفلی در حضور سلنیوم، پژوهش فوق در سال ۱۳۹۹ در گلخانهٔ تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی تربت جام واقع در استان خراسان رضوی شهرستان تربت جام انجام شد. شهرستان تربت جام با طول و عرض جغرافیایی ۶۰/۶۴ و ۳۵/۲۳ و ارتفاع ۹۸۲ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی ۱۷۰ میلی‌متر در سال، دارای اقلیم خشک است. در این پژوهش، آزمایش اسپلیت در زمان، در قالب ۱۸ تیمار شامل سطوح و غلظت‌های مختلف شوری، خشکی و سلنیوم و در دو چین اعمال شد. فاکتور شوری در ۳ سطح (S_1=۰، S_2=۵۰ و S_3=۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم)، فاکتور تنش آبی در ۳ سطح (I_1=۱۰۰، I_2= ۷۵ و I_3= ۵۰ درصد نیاز آبی) و فاکتور سلنیوم در ۲ سطح (صفر و پنج میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم) و ۳ تکرار انجام شد. در

شکل ۱ نمونه‌ای از گیاه نعناع فلفلی تیمار شده در گلخانهٔ تحقیقاتی ارائه شده است. در هر گلدان ۳ عدد ریزوم ۴ برگی با طول مساوی کشت شد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۷). به‌منظور استقرار مناسب گیاهچه‌ها، آبیاری گیاهان تا دو هفته پس از انتقال ریزوم‌هایک روز در میان انجام شد (وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۶)، سپس به محض ظهور برگ‌های جدید، ابتدا گلدان‌ها تحت تیمار سلنات سدیم (Na_2SeO_4) به‌صورت محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های صفر و ۵ میلی‌گرم در لیتر قرار گرفتند (دریایی و همکاران، ۱۳۹۳) (حاجی‌بلند و همکاران، ۱۳۹۳)، عمل محلول‌پاشی سه بار به‌صورت یک روز در میان انجام شد و ۲۴ ساعت پس از آخرین محلول‌پاشی، گیاهان تحت سایر تیمارها (تنش‌های شوری و خشکی) قرار گرفتند. تیمارهای شوری از کمترین میزان آغاز و غلظت‌های بیشتر به‌تدریج در طی چند روز به گلدان‌ها افزوده شد. در جهت تعیین مقدار آب مورد نیاز از تشت تبخیر کلاس A استفاده شد و تیمارهای آبی براساس آن اِعمال شدند. نیاز آبی براساس مقدار تجمعی آب تبخیرشده از تشت تبخیر، پس از اِعمال ضریب تشت محاسبه شده از روش پیشنهادشده در نشریهٔ فائو ۵۶ با توجه به موقعیت استقرار آن در محل (به‌طور میانگین ۰/۷) تعیین شد (یوآن و همکاران، ۲۰۰۱).

دور آبیاری در این طرح با توجه به نیاز آبی گیاه دو روز در میان در نظر گرفته شد. همچنین براساس بررسی‌های انجام‌شده ضریب گیاهی برای نعناع فلفلی تعیین و در محاسبهٔ نیاز آبی مدنظر قرار گرفت. مقدار نیاز آبی از معادلهٔ ذیل به‌دست می‌آید:

$$ETa = Kc \times Kp \times Epan \quad (۱)$$

ET_a: میلی‌متر بر روز (تبخیر تعرق روزانه)، K_p:ضریب تشت، E_{pan}: تبخیر از سطح تشت (میلی‌متر در روز)، K_c:ضریب گیاهی. به‌منظور محاسبهٔ نیاز آبی، ضرایب گیاهی منفرد نعناع فلفلی از نتایج شهریاری (1390) استفاده گردید. ضرایب گیاهی نعناع فلفلی برای مراحل رشد ابتدایی، توسعه و میانی به ترتیب 0/3، 0/8 و 0/5 در نظر گرفته شدند. سطوح ثابت تغذیه‌ای برای همهٔ تیمارهای آبیاری اِعمال شد.

به عبارت ساده‌تر، مقدار عناصر دریافتی، مشابه است. ۳۰ روز پس از شروع اِعمال تنش شوری و تنش خشکی اولین برداشت (چین اول) انجام شد، درجهت بررسی دقیق‌تر، برداشت دوم (چین دوم) ۴۵ روز پس از برداشت اول صورت گرفت و سپس از تجمیع دو چین برای تعیین توابع تولید آب-شوری-عملکرد استفاده شد. نقشهٔ شماتیک طرح آزمایشی به‌صورت مجزا برای عدم‌حضور سلنیوم در شکل ۲ آورده شده است. همچنین برای تیمارهای مربوط به محلول‌پاشی سلنیوم به میزان ۵ میلی‌گرم در لیتر، از همین نقشه به‌صورت مجزا استفاده شد.

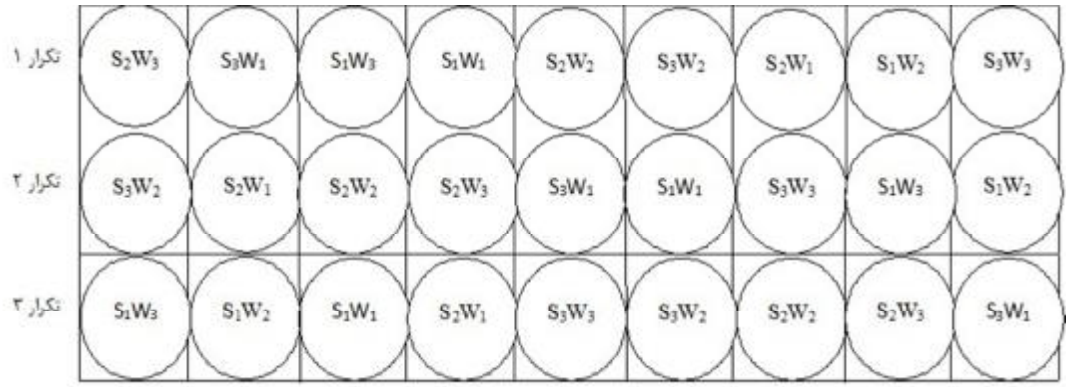
تعیین بهره‌وری آب

برای محاسبهٔ بهره‌وری آب از معادلهٔ پیشنهادی فائو (۲) استفاده شد:

$$WP = \frac{Y}{ET} \times 100 \quad (۲)$$

که WP بهره‌وری آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب آب، Y عملکرد بر حسب تُن بر هکتار و ET تبخیر و تعرق گیاه بر حسب میلی‌متر است.

شکل ۱- نمونه‌ای از گیاه نعناع فلفلی تیمارشده در گلخانهٔ تحقیقاتی



شکل ۲- نقشهٔ شماتیک طرح آزمایشی در حضور و عدم‌حضور سلنیوم به‌صورت مجزا

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 تحت‌تأثیر مقادیر مختلف آب کاربردی و شوری آب آبیاری به‌طوری‌که سایر عوامل تولید ثابت نگه داشته شوند، به‌صورت معادلهٔ (۳) نشان داد (کیانی و عباسی، ۲۰۰۹).

$$Y = f(I, EC_W, X) \qquad (۳)$$

که در آن Y مقدار عملکرد (گرم در هر گلدان یا گیاه)، I مقدار آب آبیاری (سانتی‌متر) و EC_w هدایت الکتریکی آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر) و X بردار ثابت سایر عوامل تأثیرگذار در تولید است (کیانی و عباسی، ۲۰۰۹). تابع مذکور با فرم‌های مختلف: خطی ساده، خطی لگاریتمی (کاب داگلاس)، درجه‌دوم و نمایی که در معادلات (۴) تا (۷) آورده شده است، برآورد شد (کیانی و عباسی، ۲۰۰۹).

فرم خطی:

$$Y = a_0 + a_1 I + a_2 EC_w \qquad (۴)$$

فرم لگاریتمی:

$$Y = a_0 I^{a_1} EC_w{}^{a_2} \qquad (۵)$$

فرم درجه‌دوم:

$$Y = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 EC_w + a_4 EC_w{}^2 + a_5 I.EC_w \qquad (۶)$$

فرم نمایی:

$$Y = a_0 I^{a_1} EC_w{}^{a_2} e^{(a_3 I + a_4 EC_w)} \qquad (۷)$$

پس از اینکه داده‌های آماری عملکرد حاصل از اجرای طرح، توسط نرم‌افزار SPSS برازش داده شد و فرم‌های مختلف توابع تولید تعیین شد، درجهت تعیین تابع بهینه تولید اقدام به آنالیز حساسیت آماری شد و با تعیین آماره‌های مربوط، نقش هریک از نهاده‌ها بر توابع تولید به‌صورت کمّی تعیین شد. برای ارزیابی اعتبار توابع به‌دست‌آمده، از تحلیل خطاهای باقی‌مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده استفاده شد. آماره‌های لازم برای این منظور، حداکثر خطا (ME)، میانگین ریشهٔ دوم خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، کارایی مدل‌سازی (EF) و ضریب باقیمانده (CRM) هستند (لیگ و گرین، ۱۹۹۹؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲). شکل ریاضی این آماره‌ها به‌صورت معادلات (۸) تا (۱۲) هستند:

$$ME = max|P_i - O_i|_{i=1}^{n} \qquad (۸)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{O})^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \qquad (۱۰)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \qquad (۱۱)$$

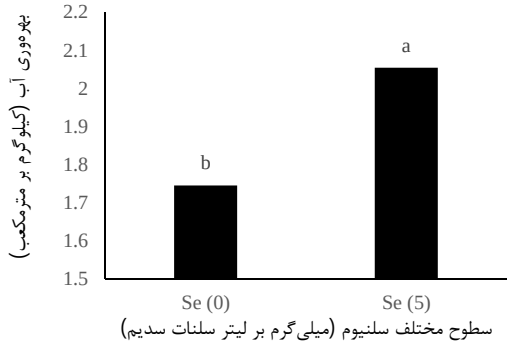
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \qquad (۱۲)$$

که در آن‌ها Pi مقادیر پیش‌بینی‌شده، Oi مقادیر اندازه‌گیری (مشاهده) شده، n تعداد نمونه‌های به‌کار رفته و $\bar{O}$ مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار اکسل، SAS و SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

بهره‌وری آب

پس از محاسبهٔ مقادیر WP (شکل ۳)، نتایج اثر سادهٔ سلنیوم بر بهره‌وری آب نشان داد که بهره‌وری آب در حضور سلنیوم ۱۷/۸۱ درصد بیشتر از مقدار آن در عدم‌حضور سلنیوم است.



شکل ۳- مقادیر بهره‌وری آب در حضور و عدم‌حضور سلنیوم (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنادار براساس آزمون LSD و در سطح احتمال یک درصد است)

تعیین ضرایب توابع تولید عملکرد

در این مطالعه ابتدا ضرایب توابع مختلف آب-شوری-عملکرد (خطی ساده، لگاریتمی، درجه‌دوم و نمایی) گیاه نعناع فلفلی یکبار بدون حضور سلنیوم و یکبار با حضور سلنیوم به مقدار ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم با استفاده از مقادیر مختلف آب و شوری و با استفاده از نرم‌افزار SPSS برآورد شد. در محاسبات انجام‌شده، واحد مقدار آب آبیاری سانتی‌متر، عملکرد بر حسب گرم در بوته و شوری دسی‌زیمنس بر متر هستند. نتایج در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

در این جداول مقادیر آمارهٔ t بیانگر تأثیر معنی‌دار و تعیین‌کنندهٔ دو عامل عمق و شوری آب آبیاری بر عملکرد محصول بوده و آمارهٔ F بیانگر معنی‌داری کلی توابع است. در این خصوص داتا و همکاران (۱۹۹۸) اعلام کردند که برآورد توابع تولید براساس روش‌های آماری، به‌دلیل تعیین رابطهٔ مستقیم آب-عملکرد، بر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایهٔ فرضیات متعددی استوار است، ترجیح داده می‌شود. با توجه به آمارهٔ t در جداول ۱ و ۲، نتایج نشان داد که همهٔ توابع توانسته‌اند برآورد تعیین‌کننده و معنی‌داری از پارامتر عملکرد ارائه کنند.

تعیین توابع تولید بهینهٔ آب-شوری-عملکرد

درجهت بررسی دقیق‌تر ارزیابی توابع تولید، مقادیر تخمینی و واقعی عملکرد محصول از طریق پنج شاخص آماری (معادلات (۸) تا (۱۲)) مقایسه شدند (جداول ۳ و ۴). براساس شاخص‌های آماری محاسبه‌شده، هریک از توابع درجه‌بندی شدند. اساس درجه‌بندی به این صورت بود که تابعی که RMSE آن حداقل باشد، درجه یک یا تابعی که R^2 و EF آن نزدیک‌تر به یک باشد، درجه یک نسبت داده شده است (لیگ و گرین، ۱۹۹۹؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲). در شکل‌های ۴ و ۵، نمودار خط رگرسیون مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شدهٔ عملکرد یک‌بار بدون حضور سلنیوم و یک‌بار با حضور سلنیوم به مقدار ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم با استفاده از توابع مختلف، ارائه شده است. بررسی ضرایب تعیین، شیب و عرض از مبدأ معادلات خطوط رگرسیون رسم شده نشان می‌دهند که در حضور و نیز عدم حضور سلنیوم ، تابع درجه‌دوم توانسته است نسبت‌به سایر معادلات، پیش‌بینی مناسبی از عملکرد داشته باشد. در شرایط عدم‌حضور سلنیوم، ضریب تعیین (۰/۹۹۸)، شیب (۱/۰۰۴) و عرض از مبدأ (۰/۰۲۸) و در حضور سلنیوم به میزان ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم، ضریب تعیین (۰/۹۸۶)، شیب (۰/۹۹۵) و عرض از مبدأ (۰/۰۵۲) تعیین شد. نتایج پارامترهای آماری نشان‌دهندهٔ دقت بالاتر تابع برازش داده شده در شرایط عدم‌حضور سلنیوم نسبت‌به حضور سلنیوم است؛ بنابراین تابع درجه‌دوم به‌عنوان تابع بهینهٔ تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی برای گیاه نعناع فلفلی در هر دو حالت حضور و عدم‌حضور سلنیوم معرفی می‌شود. بعد از تابع درجه‌دوم، تابع نمایی در هر دو حالت، بالاترین دقت را نسبت‌به سایر توابع تولید داشت. در همین رابطه سپاسخواه و اکبری (۲۰۰۵) تابع درجه‌دوم را برای گندم گزارش کردند. نتایج مطالعهٔ نجفی مود و همکاران (۱۳۹۳) نیز نشان داد برای پارامتر وزن قوزه پنبه، توابع درجه‌دوم و نمایی توانسته‌اند برآورد قابل‌قبولی نسبت‌به سایر توابع داشته باشند.

به نظر می‌رسد یکی از دلایل برتری تابع درجه‌دوم نسبت‌به سایر توابع، وجود ضرایب بیشتر در این معادله باشد، به‌طوری‌که تابع درجه‌دوم دارای شش ضریب، تابع نمایی داری پنج ضریب و توابع لگاریتمی و خطی ساده دارای سه ضریب هستند.

جدول ۱- ضرایب فرم‌های مختلف توابع تولید آب-شوری-عملکرد برای سطح سلنیوم صفر ($mgrl^{-1}$ Na_2SeO_4)

متغیر	خطی ساده	خطی لگاریتمی	درجه‌دوم	نمایی
ثابت	۵/۰۵۷ ** (۶/۸)	۰/۴۷۱ ns (۰/۹۴۱)	۴/۷۲۳** (۴/۶۰۷)	۱/۵۸۰ ns (۲/۷۸۹)
I (cm)	۰/۳۶۹ ** (۵/۲۲۶)	-	۰/۲۶۴ ns (۱/۲۰۵)	۰/۰۸۰ ns (۱/۳۳۱)
EC (dS/m)	-۰/۵۳۳ ** (-۱۰/۶۷۳)	-	-۰/۳۳۲ ** (-۴/۳۸۲)	-۰/۰۸۹ ** (-۹/۷۹۳)
Ln (I)	-	۰/۵۲۹ ** (۲/۳۷۸)	-	-۰/۲۰۴ ns (-۰/۳۶۸)
Ln (EC)	-	-۰/۰۵۳ ** (-۴/۵۹۵)	-	-۰/۰۰۱ ns (۰/۱۰۹)
I^2	-	-	-۰/ ۰۱۵ ns (۱/۳۲۶)	-
EC^2	-	-	۰/۰۲۰ ** (۳/۶۳۴)	-
I.EC	-	-	-۰/۰۴۰ ** (-۷/۱۳۳)	-
آمارهF	۷۰/۶۱۷	۱۳/۳۸۷	۳۳۷/۲۶۱	۱۳۷/۸۳۷

n.s و* و** بیانگر عدم‌تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار به‌ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و مقادیر داخل پرانتز آمارهٔ t هستند.

جدول ۲- ضرایب فرم‌های مختلف توابع تولید آب-شوری-عملکرد برای سطح سلنیوم ۵ درصد ($mgrl^{-1}$ Na_2SeO_4)

متغیر	خطی ساده	خطی لگاریتمی	درجه دوم	نمایی
ثابت	۵/۸۶۵ ** (۶/۴۹۱)	-۰/۶۳۸ ns (۱/۶۵۶)	۳/۶۱۰ ns(۱/۲۱۴)	۰/۸۴۰ ns (۰/۷۱۰)
I (cm)	۰/۴۰۴ ** (۴/۷۰۴)	-	۰/۷۹۱ ns (۱/۲۴۵)	-۰/۰۱۵ ns (-۰/۱۳۷)
EC (dS/m)	-۰/۵۵۷ ** (-۹/۱۸۹)	-	-۰/۵۷۱ * (-۲/۵۹۵)	-۰/۰۶۲ ** (-۲/۹۹۰)
Ln (I)	-	۰/۵۳۲ ** (۳/۱۰۶)	-	۰/۶۶۷ ns (۰/۶۷۶)
Ln (EC)	-	-۰/۰۴۹ ** (-۵/۵۳۵)	-	-۰/۰۱۱ ns (-۱/۰۳۷)
I^2	-	-	-۰/۰۱۲ ns (-۰/۳۸۰)	-
EC^2	-	-	۰/۰۳۶ ns(۲/۲۱۷)	-
I.EC	-	-	-۰/۰۳۳ ns(-۲/۰۰۷)	-
آماره F	۵۳/۲۸۸	۲۰/۱۴۱	۴۴/۷۵۶	۳۵/۵۲۱

n.s و* و** بیانگر عدم‌تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار به‌ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و مقادیر داخل پرانتز آمارهٔ t هستند.

جدول ۳- پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید، سلنیوم صفر ($mgrl^{-1}$ Na_2SeO_4)

نوع تابع	ME	NRMSE	R^2	EF	CRM	میانگین رتبه
خطی ساده	۰/۸۴ (۳) *	۷/۳۵ (۳)	۰/۹۵۹ (۳)	۰/۹۶ (۳)	۰/۰۰۰۵ (۲)	۲/۸
خطی لگاریتمی	۱/۶۲ (۴)	۱۳/۱۰ (۴)	۰/۸۷۱ (۴)	۰/۸۷ (۴)	۰/۰۰۹۶ (۴)	۴
درجه دوم	۰/۱۷ (۱)	۱/۵۶ (۱)	۰/۹۹۸ (۱)	۰/۹۹۸ (۱)	-۰/۰۰۰۲ (۱)	۱
نمایی	۰/۲۷ (۲)	۲/۶۲ (۲)	۰/۹۹۵ (۲)	۰/۹۹۵ (۲)	-۰/۰۰۱۱ (۳)	۲/۲

* اعداد داخل پرانتز رتبه‌بندی مدل در شاخص آماری مربوط است.

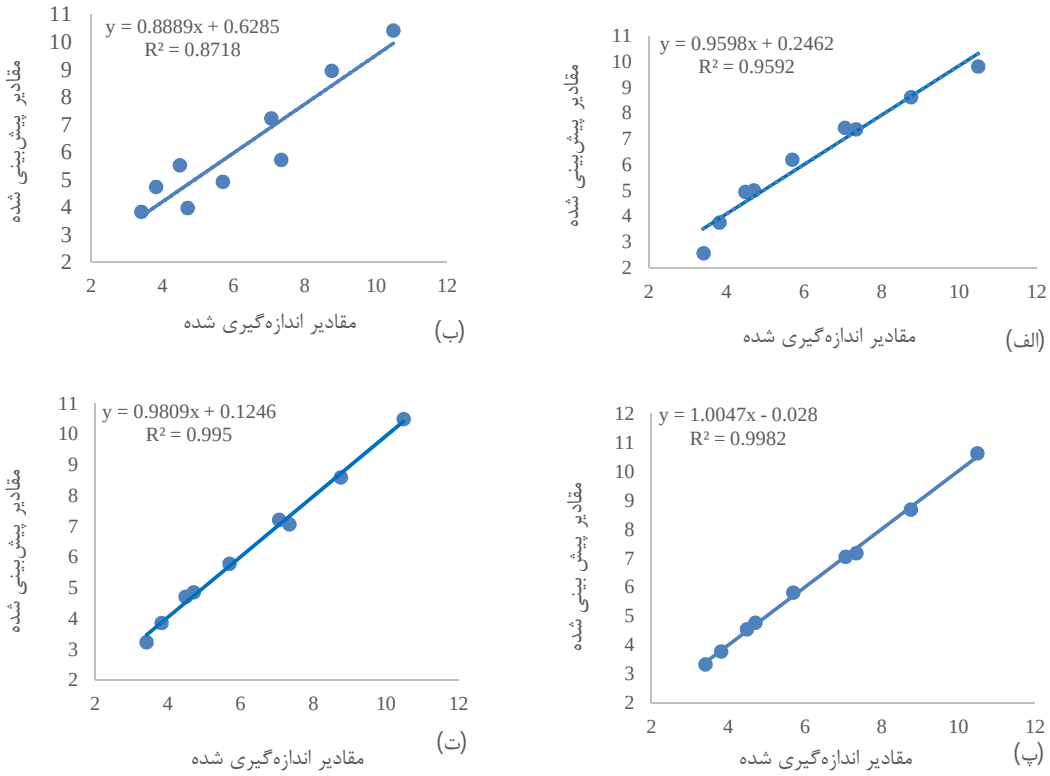
جدول ۴- پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید، سلنیوم ۵ درصد ($mgrl^{-1}$ Na_2SeO_4)

نوع تابع	ME	NRMSE	R^2	EF	CRM	میانگین رتبه
خطی ساده	۱/۰۸ (۳) *	۷/۶۶ (۳)	۰/۹۴۶ (۳)	۰/۹۵ (۳)	-۰/۰۰۰۵۲ (۱)	۲/۶
خطی لگاریتمی	۱/۳۱ (۴)	۱۰/۷۳ (۴)	۰/۸۹۷ (۴)	۰/۹۰ (۴)	-۰/۰۰۴۴۵ (۴)	۴
درجه‌دوم	۰/۵۴ (۱)	۳/۸۳ (۱)	۰/۹۸۶ (۱)	۰/۹۹ (۱)	-۰/۰۰۲۱۵ (۲)	۱/۲
نمایی	۰/۵۵ (۲)	۴/۵۹ (۲)	۰/۹۸۱ (۲)	۰/۹۸ (۲)	-۰/۰۰۳۶۳ (۳)	۲/۲

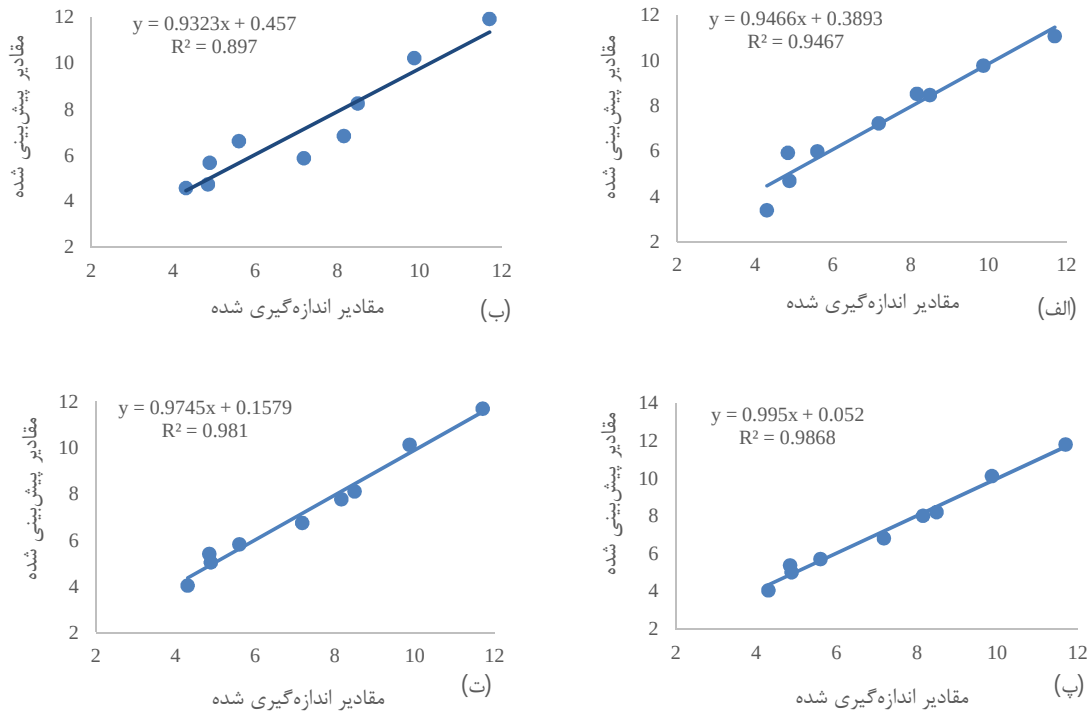
* اعداد داخل پرانتز رتبه‌بندی مدل در شاخص آماری مربوط است.

در شکل‌های ۴ و ۵، نمودار خط رگرسیون مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شدهٔ عملکرد یک‌بار بدون حضور سلنیوم و یک‌بار با حضور سلنیوم به مقدار ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم با استفاده از توابع مختلف، ارائه شده است. بررسی ضرایب تعیین، شیب و عرض از مبدأ معادلات خطوط رگرسیون رسم شده نشان می‌دهند که در حضور و نیز عدم حضور سلنیوم ، تابع درجه‌دوم توانسته است نسبت‌به سایر معادلات، پیش‌بینی مناسبی از عملکرد داشته باشد. در شرایط عدم‌حضور سلنیوم، ضریب تعیین (۰/۹۹۸)، شیب (۱/۰۰۴) و عرض از مبدأ (۰/۰۲۸) و در حضور سلنیوم به میزان ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم، ضریب تعیین (۰/۹۸۶)، شیب (۰/۹۹۵) و عرض از مبدأ (۰/۰۵۲) تعیین شد. نتایج پارامترهای آماری نشان‌دهندهٔ دقت بالاتر تابع برازش داده شده در شرایط عدم‌حضور سلنیوم نسبت‌به حضور سلنیوم است؛ بنابراین تابع درجه‌دوم به‌عنوان تابع بهینهٔ تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی برای گیاه نعناع فلفلی در هر دو حالت حضور و عدم‌حضور سلنیوم معرفی می‌شود. بعد از تابع درجه‌دوم، تابع نمایی در هر دو حالت، بالاترین دقت را نسبت‌به سایر توابع تولید داشت. در همین رابطه سپاسخواه و اکبری (۲۰۰۵) تابع درجه‌دوم را برای گندم گزارش کردند. نتایج مطالعهٔ نجفی مود و همکاران (۱۳۹۳) نیز نشان داد برای پارامتر وزن قوزه پنبه، توابع درجه‌دوم و نمایی توانسته‌اند برآورد قابل‌قبولی نسبت‌به سایر توابع داشته باشند.

به نظر می‌رسد یکی از دلایل برتری تابع درجه‌دوم نسبت‌به سایر توابع، وجود ضرایب بیشتر در این معادله باشد، به‌طوری‌که تابع درجه‌دوم دارای شش ضریب، تابع نمایی دارای پنج ضریب و توابع لگاریتمی و خطی ساده دارای سه ضریب هستند.



شکل ۴- مقایسهٔ مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شدهٔ مقدار محصول (گرم در بوته) در حضور سلنیوم صفر میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم، با توابع مختلف خطی ساده (الف)، لگاریتمی (ب)، درجه‌دوم (پ) و نمایی (ت)



شکل ۵- مقایسهٔ مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شدهٔ مقدار محصول (گرم در بوته) در حضور سلنیوم پنج میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم، با توابع مختلف خطی ساده (الف)، لگاریتمی (ب)، درجه‌دوم (پ) و نمایی (ت)

منحنی تغییرات عملکرد در شرایط مختلف شوری و کم‌آبیاری

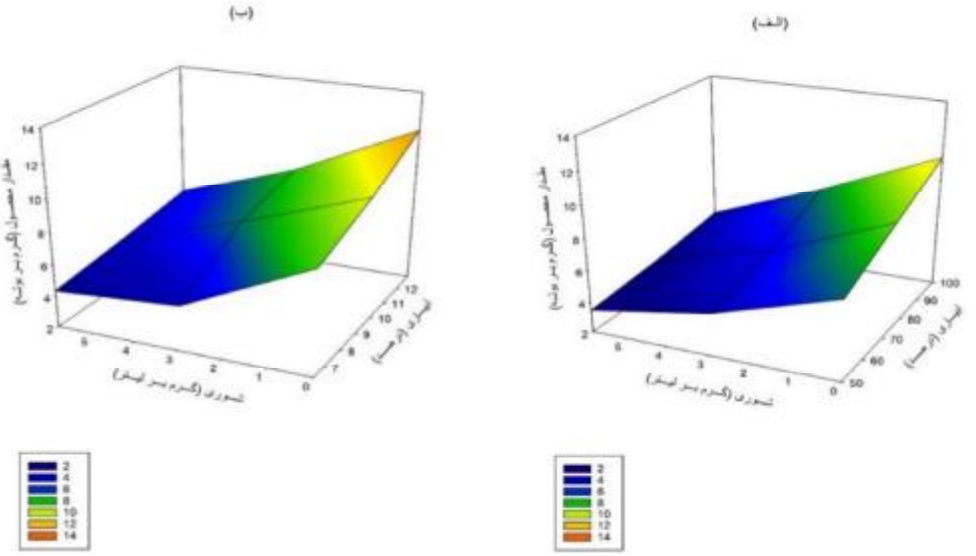
در شکل ۶ تغییرات عملکرد نعناع فلفلی نسبت‌به شوری و مقدار آب آبیاری با استفاده از داده‌های واقعی در عدم‌حضور سلنیوم و در حضور سلنیوم با استفاده از نرم‌افزار سیگما پلات (۱۴) ترسیم شد. ملاحظه می‌شود که در یک مقدار مشخص آبیاری (I)، هرچه شوری افزایش یابد، عملکرد (Y) کاهش و برای یک شوری معین، هرچه مقدار آبیاری بیشتر شود، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات سپاسخواه و همکاران (۲۰۰۶) دربارهٔ گندم نیز مؤید این مطلب است، اما هرگاه دو عامل فوق با هم بررسی شوند، ملاحظه می‌شود که برای دستیابی به عملکرد مشخص، مقادیر متفاوتی از آبیاری و شوری را می‌توان جایگزین کرد.

نتایج مطالعهٔ حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینهٔ بهترین تابع تولید در شرایط خشکی و کاربرد آب شور مطابقت دارد. نتایج مطالعهٔ محمدی و همکاران (۱۳۸۹) نشان داد که با آنالیز حساسیت توابع مختلف دریافتند که تغییرات عملکرد گوجه‌فرنگی نسبت‌به دو عامل کمّیت و کیفیت آب آبیاری، از فرم درجه‌دوم تبعیت می‌کند. همچنین پیری و همکاران (۱۳۹۷) تابع درجه‌دوم را به‌عنوان بهترین تابع تولید آب-شوری-عملکرد با درنظرگرفتن زمان برداشت علوفه در گیاه ذرت خوشه‌ای در منطقهٔ سیستان معرفی کردند.

نتیجه‌گیری

تنش‌های خشکی و شوری دو عامل اصلی محدودکنندهٔ محصولات کشاورزی به‌خصوص در مناطق خشک (اکثر مناطق ایران) هستند؛ بنابراین در این مطالعه از توابع تولید مختلف برای بررسی نرخ تغییرات عملکرد گیاه نعناع فلفلی در حضور و عدم‌حضور سلنیوم به‌عنوان یک عامل پایین‌آوردهٔ تنش، بهره گرفته شد. نتایج نشان داد در شرایط اقلیمی شهرستان تربت جام در شرایط خشکی و کاربرد آب شور، تابع تولید آب-شوری-عملکرد از شکل درجه‌دوم تبعیت می‌کند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در راستای بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی برای گیاه نعناع فلفلی، از تابع تولید درجه‌دوم به‌دست‌آمده در این منطقه استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود مطالعات تکمیلی

دیگری برای سایر گیاهان اصلی منطقه ازجمله، خربزه، زعفران، گندم و جو انجام شود تا بتوان راهنمای مناسبی درجهت برآورد عملکرد محصولات مختلف را در یک تناوب زراعی تهیه کرد. از توابع تولید به‌دست‌آمده در این مطالعه می‌توان به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی و راهنمای مدیریت آبیاری در گیاه نعناع فلفلی برای شرایط مختلف شوری و کم‌آبیاری استفاده کرد. همچنین سلنیوم موجب بالارفتن بهره‌وری آب می‌شود.



شکل ۶- تغییرات عملکرد نعناع فلفلی نسبت‌به شوری و مقدار آب آبیاری با استفاده از داده‌های واقعی در عدم‌حضور سلنیوم (الف) و در حضور سلنیوم (ب)

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه فردوسی مشهد و آزمایشگاه مرکزی مجتمع آموزش عالی تربت جام برای تأمین هزینه‌های این پروژه قدردانی می‌شود.

منابع

۱. پیری ح، انصاری ح، و پارسا م، ۱۳۹۷. تعیین تابع تولید آب-شوری-عملکرد با درنظرگرفتن زمان برداشت علوفه و ارزیابی شاخص‌های تولید در ذرت خوشه‌ای. مجلهٔ مهندسی منابع آب، ۱۱: ۱۵-۲۶.

۲. دریایی ف، کرامت ب، و آروین م.ج، ۱۳۹۳. اثر محلول‌پاشی سلنیوم بر برخی صفات فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی دو رقم گندم (کویر-روشن) تحت تنش کادمیوم، ۱۰(۳): ۱۰۱-۱۱۴.

۳. حاجی‌بلند ر، کیوان‌فر ن، جودمند ا، رضائی ح، و نژادمحمد ی، ۱۳۹۳. تأثیر تیمار سلنیم روی تحمل تنش خشکی در گیاه کلزا. نشریهٔ پژوهش‌های گیاهی، ۲۷(۴): ۵۵۷-۵۶۸.

۴. شهریاری س، ۱۳۹۰. بررسی اثر رژیم‌های مختلف آبیاری و انواع خاکپوش بر خصوصیات رویشی، میزان، عملکرد و اجزاء اسانس نعناع فلفلی، پایانامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۵. قربانی م، موحدی ز، خیری ا، و رستمی م، ۱۳۹۷. تأثیر تنش شوری بر برخی از صفات مورفوفیزیولوژیک و کمّیت و کیفیت اسانس نعناع فلفلی، مجلهٔ تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۱(۲): ۴۱۳-۴۲۰.

۶. محمدی م، لیاقت ع، و مولوی ح، ۱۳۸۹. بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین ضرایب حساسیت گوجه‌فرنگی در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی در منطقهٔ کرج، نشریهٔ آب و خاک، ۲۴(۳): ۵۸۳-۵۹۲.

۷. نجفی مود م.ح، و خاشعی سیوکی ع، ۱۳۹۳. تعیین تابع برتر آب-شوری-اجزای کمّی عملکرد ارقام پنبهٔ ورامین و خرداد، مجلهٔ تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۷(۲): ۱۲۳-۱۳۶.

۸. وطن‌خواه ا. کلانتری ب. و عندلیبی ب. ۱۳۹۶. اثر متیل جاسمونات و تنش شوری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی گیاه نعناع فلفلی. نشریهٔ تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۳(۳): ۴۴۹-۴۶۵.

9. Bhantana P. and Lazarovitch N. 2010. Evapotranspiration, crop coefficient and growth of two young pomegranate (Punica granatum L.) varieties under salt stress. Agricultural water management. 97(5): 715-72.
10. Datta K. K. Sharma V. P. and Sharma D. P. 1998. Estimation of a production function for wheat under saline conditi' Water Management. 36(1): 85-94.
11. Homaee M. Dirksen C. and Feddes R. A. 2002. Simulation of root water uptake, non-uniform ransient salinity using different macroscopic reduction functions. Agriculture Water Management 57: 89-109.
12. 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. Irrigation and Drainage. 58: 445-455.
13. Kiani A. R. and Mirlatifi S. M. 2012. Effect of different quantities of supplemental irrigation and its salinity on yield and water use of winter wheat (Triticum Aestivum). Irrigation and Drainage. 61(1): 89-98.
14. League K. and Green R. E. 1999. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport dels: Overview and application. J. Contaminant Hydrology. 7: 51-73.
15. Letey J. Dinar A. and Knapp K. C. 1985. Crop-Water Production Function Model for Saline Irrigation Waters. Soil Science Society of America Journal 49(4): 1005-1009.
16. Lin L. Zhou W. Dai H. Cao F. Zhang G. and Wu F. 2012. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. Journal of Hazardous Materials. 235: 343-351.
17. Pedrero Z. Madrid Y. Hartikainen H. Camara C. 2008. Protective effect of selenium in broccoli (Brassica oleracea) plants subjected to cadmium exposure. Journal of Agricultural Food Chemistry. 56: 266-271.
18. Qin X. Nie ZH. Liu H. Zhao P. Qin Sh. and Shi Zh. 2018. Influence of selenium on root morphology and photosynthetic characteristics of winter wheat under cadmium stress. Environmental and Experimental Botany. 150: 232-239.
19. Saedi I. Chtourou Y. Djebali W. 2014. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (Helianthus annuus) seedlings. Journal of Plant Physiology. 171: 85-91.
20. Sepaskhah A. R. and Akbari D. 2005. Deficit Irrigation Planning under Variable Seasonal Rainfall, ublished by Elsevier Ltd. Biosystems Engineering. 92(1): 97–106.
21. 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. Published by Elsevier Ltd. Biosystems Engineering. 93(2): 139-152.
22. Singh Y. Rao S. S. and Regar P. L. 2010. Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment. Agricultural Water Management. 97(7): 965-970.
23. Ünlü M. Kanber R. Koç D. L. Tekin S. and Kapur B. 2011. Effects of deficit irrigation on the yield and yield components of drip irrigated cotton in a mediterranean environment. Agricultural Water Management. 98(4): 597-605.
24. Wildung M. R. and Croteau R. B. 2005. Genetic engineering of peppermint for improved essential oil composition and yield. Transgenic Research. 14(4): 365-372.
25. 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.
26. Yuan B. Z. Kang Y and Nishiyama S. 2001. Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouse. Irrigation Science. 20: 149-154.