

تأثیر آبیاری بارانی متعادل تحت شرایط کم آبی و شوری‌های متفاوت بر تولید گندم (دانه و کاه) و برازش مناسب‌ترین تابع تولید بر آن

اردلان ذوالفقاران^{۱*}، بیژن قهرمان^۲، ابوالقاسم حقایقی^۱، محمد جلینی^۱

۱. عضو هیئت علمی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۲۹

چکیده

آب در مناطق خشک و نیمه-خشک بعضاً شور بوده و از کیفیت پائینی برخوردار است، بنابراین گیاهان ممکن است تحت تأثیر توأمان شوری و خشکی قرار گیرند. این پژوهش جهت بررسی واکنش عملکرد گندم و کاه تحت شرایط توأم دو عامل آب و شوری در آبیاری بارانی بر روی گندم رقم بکراس روشن ۶۶۱۱، با استفاده از دو خط آبیاری بارانی عمود بر هم، در قطعه زمینی به ابعاد ۳۲×۳۲ متر در غرب شهرستان بیرجند در خاکی با بافت شنی لومی انجام شد. زمین آزمایش، محل تلاقی دو خط لاین سورس (تک شاخه‌ای) عمود بر هم بود که از آبیاری‌های یک خط، آب شیرین ($EC=1/5 \text{ dS/m}$) و از آبیاری خط دیگر آب شور ($EC=5/5 \text{ dS/m}$) پخش می‌شد. پنج نوع تابع تولید شامل خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم، لیتی و دینار و متعالی بر اساس تحلیل تابع تولید آب-شوری و با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی عملکرد گندم و کاه تحت تأثیر شرایط توأم خشکی و شوری با تابع کاب داگلاس از توابع دیگر بهتر است. نتایج مقایسه نسبت نرخ جایگزینی نشان داد که امکان جایگزینی دو عامل شوری و مقدار آب برای حصول به وزن دانه و کاه یکسان وجود دارد. همچنین نتایج حاصل از آن نشان داد که در عملکردهای پایین‌تر، اثر مقدار آب بر کاهش محصول بیش از اثر شوری است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری بارانی، شوری، تنش خشکی، گندم، نرخ جایگزینی

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات مهم و استراتژیک در ایران و جهان است. سطح زیر کشت گندم در جهان بیش از ۲۱۸ میلیون هکتار است که تولید آن بیش از ۷۱۳ میلیون تن در سال گزارش شده است. متوسط عملکرد گندم در جهان بیشتر از ۳۰۰۰ کیلوگرم در هر هکتار گزارش شده است. سطح زیر کشت این گیاه در ایران ۶/۵ میلیون هکتار است که ۴/۲ میلیون هکتار آن کشت دیم و ۲/۳ میلیون هکتار آن کشت آبی است و متوسط عملکرد آن در ایران بیش از ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (FAO, 2013).

علاوه بر محدودیت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و اعمال کم آبیاری، آب در این مناطق بعضاً شور بوده و از کیفیت پائینی برخوردار است؛ بنابراین تولید محصولات کشاورزان تحت تأثیر تنش شوری و کم آبی قرار می‌گیرد لذا بررسی واکنش گیاهان در این شرایط برای مدیریت آب در کشاورزی بسیار ضروری است. در مطالعات گوناگونی واکنش گیاهان زراعی و مرتعی نسبت به آب برای آب‌های غیر شور و همچنین واکنش این گیاهان به شوری در آبیاری بررسی شده است. از مجموعه چنین مطالعاتی می‌توان روابط آب-عملکرد یا شوری-عملکرد را تعیین کرد. ولی تحقیقات کمی در زمینه بررسی اثرات توأم تنش شوری و خشکی انجام شده است.

است. معادلاتی هم در زمینه اثر مقدار و شوری آب آبیاری بر عملکرد گندم انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات آگنی‌هوتری و همکاران (Agnihotri et al., 1992)، میری و شالیهوت (Meiri and Shalhevet, 1973)، سپاس خواه و بورسما (Sepaskhah and Boersma, 1979)، پارا و رومرو (Parra and Romero, 1980)، جنسن (Jensen, 1982)، داتا و همکاران (Datta et al., 1998) و روسو و بیکر (Russo and Bakker, 1986) اشاره نمود. روند توابع تولید آب_شوری از توابع خطی به سمت توابع غیرخطی گرایش دارند.

روش‌های مختلف جهت ایجاد گرادیان آب، شوری آب آبیاری و کود در آبیاری بارانی استفاده شده است، مثلاً سیستم آبیاری بارانی خطی (Hanks et al., 1976) به‌عنوان وسیله‌ای مفید در مطالعات آبیاری موردپذیرش افراد بی‌شماری بوده است. فرنکل و همکاران (Frenkel et al., 1990) از سیستم خطی دوتایی (لاین سورس‌های موازی) برای تعیین هم‌زمان توابع واکنش به دو عامل شوری و آب و تقابل آن‌ها بر روی ذرت علوفه‌ای استفاده کردند. آرگوئز و همکاران (Aragues et al., 1992) از سیستم آبیاری خطی سه‌تایی (دو خط لاین سورس موازی و یک خط عمود بر آن‌ها) در مطالعات مقاومت به شوری جو و سورگوم استفاده کردند. تأثیر متقابل مقدار آب و کود ازت در مطالعه لائر (Lauer, 1983) با استفاده از سیستم آبیاری خطی سه‌تایی صورت پذیرفته است.

رابطه آب مصرفی با میزان محصول به‌دست‌آمده و نقطه بیشینه آن، تابع نوع واریته، خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه، نوع خاک، کیفیت آب و شرایط اقلیمی و محیطی است. لذا با کوچک‌ترین تغییری در این عوامل تأثیرگذار، توابع آب - عملکرد تغییر خواهد کرد (Zolfagharan, 2005). در این تحقیق، تابع تولید گندم در شوری‌های متفاوت با استفاده از آبیاری بارانی متعامد مطالعه شده است تا تأثیر کیفیت آب به‌عنوان حداقل یکی از عوامل محدودکننده توابع تولید، موردبررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی گندم رقم بک‌کراس روشن ۶۶۱۱ رایج در مزرعه ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی بیرجند، در قطعه زمینی به ابعاد ۳۲×۳۲ متر واقع در ۱۸ کیلومتری غرب شهرستان بیرجند با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا به

تنش‌های محیطی به‌عنوان محدودیت اصلی در تولید محصولات زراعی در سراسر جهان می‌باشند و به‌طور متوسط کاهش عملکرد بیش از ۵۰ درصد برای محصولات عمده کشاورزی را به وجود می‌آورند (Rivest et al., 2013) تولید گندم در جهان هرساله تحت تأثیر تنش‌های محیطی نظیر آلودگی‌های هوا، حرارت، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، رطوبت خاک (غرقابی و خشکی)، باد و شوری قرار می‌گیرد (Gupta and Gupta, 2005).

شوری در ایران و بسیاری از مناطق جهان به‌عنوان یک مشکل اساسی و عامل محدودکننده رشد، کیفیت و عملکرد گیاهان زراعی محسوب می‌شود (Munns and James, 2003). به‌طوری‌که بر طبق آخرین آمار فائو ۲۵/۵ میلیون هکتار از اراضی ایران شور و ۸/۵ میلیون هکتار بسیار شور هستند (FAO, 2010). گندم به‌عنوان گیاهی نسبتاً متحمل به شوری، با آستانه تحمل به شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر است (Colmer et al., 2006). باوجوداین، متأسفانه رشد و تولید این گیاه در شرایط تنش شوری بسیار محدود می‌گردد. تحت شرایط تنش شوری و کم‌آبی، نفوذ ریشه گندم به اعماق خاک کاهش‌یافته و در نتیجه وزن خشک گیاه نیز کم می‌شود (Yildirim et al., 2006). در مطالعات اشنايدر و هاول (Schneider and Howell, 1999)، فاریا و اولیتا (Faria and Olitta, 1987)، کجل و رث (Kachel and Roth, 1984) و هنگ و میلر (Hang and Miller, 1983) اثر مقدار آب آبیاری بدون در نظر گرفتن کیفیت آن بر روی عملکرد و کیفیت گندم در آبیاری بارانی بررسی شده است. همچنین در بعضی از مطالعات، رابطه آب - عملکرد بدون در نظر گرفتن شوری برای گندم به‌دست‌آمده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات سامی و اسمیل (Sammi and Smeal, 1983)، راثو (Rao, 1991)، دورنباس و کسام (Doorenbos and Kassam, 1979)، دورنباس و پروت (Doorenbos and Pruitt, 1977)، واکس و پروت (Vaux and Pruitt, 1983)، استیوارت و همکاران (Stewart et al., 1977) و هکسم و هدی (Hexem and Heady, 1978) اشاره کرد. مطالعات ماس (Maas, 1986)، ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977)، ون‌گنوختن (Van Genuchten, 1983)، دینار و همکاران (Dinar et al., 1985)، لتی و دینار (Letey and Dinar, 1986) و لتی و همکاران (Letey et al., 1985) در زمینه ارائه معادله‌های شوری-عملکرد بدون در نظر گرفتن تنش آبی انجام شده

وقتی که دو آبخوان شور و شیرین کنار هم باشند این مسئله دیده می‌شود) برای آبیاری استفاده شد. مشخصات آب‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش، در جدول ۲ آورده شده است.

اجرا درآمد. متوسط بارندگی سالانه (از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ میلادی) ایستگاه هواشناسی بیرجند (قابل تعمیم به منطقه طرح) ۱۷۶ میلی‌متر، حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق به ترتیب ۴۰ و ۱۴- درجه سانتی‌گراد و متوسط درجه حرارت روزانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. از دو چاه آب با شوری‌های متفاوت و بافاصله نسبتاً نزدیک (مسئله بسیار طبیعی است و

جدول ۱. مشخصات شیمیایی آب‌های مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Chemical characteristics of waters used in the study

منبع تأمین آب Source of water	pH	EC (dS/m)	آنیون‌ها Anions (meq/l)				کاتیون‌ها Cations (meq/l)		
			کربنات CO ₃ ²⁻	بیکربنات HCO ₃ ⁻	کلر Cl ⁻	سولفات SO ₄ ²⁻	کلسیم Ca ²⁺	منیزیم Mg ²⁺	سدیم Na ⁺
چاه شماره ۲؛ ایستگاه تحقیقات کشاورزی Well number 2; Agricultural research station	7.5	5.5	-	2.5	32	36.1	13	28.6	30
چاه شماره ۴؛ ایستگاه تحقیقات کشاورزی Well number 4; Agricultural research station	7.9	1.5	-	3.5	7.5	8.3	2	4.4	13.25

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2. Physical and chemical characteristics of soil used in the study

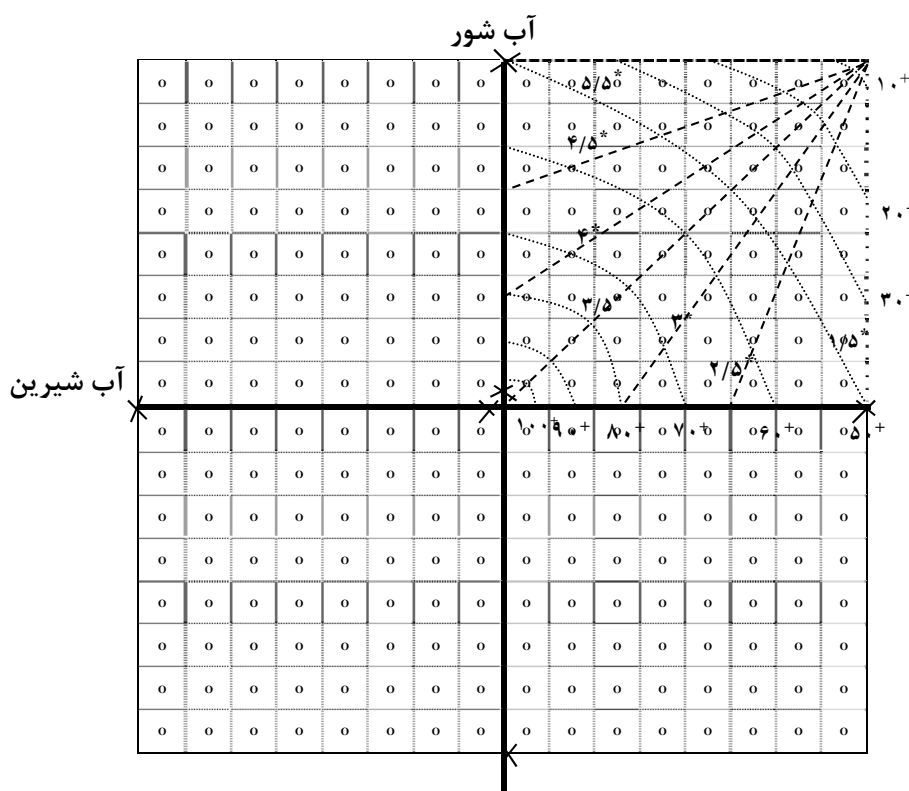
عمق خاک Soil depth (cm)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت خاک Soil texture	چگالی ظاهری Bulk density (g/cm ³)	درصد رطوبت حجمی		pH	EC (dS/m)
						در FC Volumetric soil moisture at FC	در PWP Volumetric soil moisture at PWP		
0-30	54	34	12	لوم شنی Sandy loam	1.41	24.6	11.5	7.9	7.1
30-60	58	31	11	لوم شنی Sandy loam	1.41	24.6	11.5	8.2	7.0

آزمایش پخش می‌شد. با توجه به اینکه الگوی پاشش آب در خطوط آبیاری‌های تک شاخه‌ای (لاین سورس) به صورت سهمی است، بنابراین اگر دو خط آبیاری تک شاخه‌ای به صورت عمود بر هم قرار بگیرد، در سطحی مربع شکل واقع در محل برخورد آن‌ها، الگوی پاشش به شکل یک مخروط خواهد بود. تصویر این مخروط بر روی زمین تقریباً به صورت دوایر متحدالمرکزی است که مرکز آن‌ها محل تلاقی این دو خط است. در هر نوبت آبیاری، به گندم‌های که در مرکز زمین کاشته شده بودند، آب به صورت کامل و بدون تنش داده می‌شد. آب رسیده به سایر نقاطی که دورتر از مرکز زمین

خطوط لوله‌های آبیاری بارانی (پلی‌اتیلن به قطر ۴۰ میلی‌متر) متصل به آب‌شور (کیفیت پایین‌تر) و آب شیرین به صورت متعادل روی زمین پهن شدند. زمین آزمایش، محل تلاقی دو خط آبیاری بارانی تک شاخه‌ای (لاین سورس) عمود بر هم بود. بر روی هر یک از لوله‌ها سه عدد آبپاش (مدل ویر (VYR)) به فاصله ۱۶ متر از یکدیگر بر روی رایزرهای ۷۵ سانتی‌متری، قرار داده شدند. آبپاش‌ها با علامت ضربدر بر روی لوله‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. به طور هم‌زمان، از سه آبپاش یک خط، آب شیرین (EC = ۱/۵ dS/m) و از سه آبپاش خط دیگر، آب‌شور (EC = ۵/۵ dS/m) در سطح زمین

آزمایش انجام شد. برای اندازه‌گیری شوری متوسط و حجم آب پخش‌شده در سطح زمین از قوطی‌های اندازه‌گیری استفاده شد. برای این منظور قوطی‌ها در مرکز شبکه‌های ۲×۲ مترمربعی قرار داده شدند و پس از هر نوبت آبیاری جم و شوری آب جمع شده قوطی‌ها به ترتیب با استفاده از مزور و یک دستگاه EC متر دستی، اندازه‌گیری شدند. در انتهای فصل رشد، گندم‌های اطراف قوطی‌ها در سطح یک مترمربع جهت اندازه‌گیری عملکرد و اجزاء عملکرد برداشت شدند.

بودند به تدریج کاهش می‌یافت. میزان آب پخش‌شده از صفر درصد تا ۱۰۰ درصد نیاز آبی و شوری آب از ۱/۵ تا ۵/۵ دسی زیمنس بر متر متغیر بود. با توجه به رطوبت خاک در مرکز زمین و با توجه به عمق توسعه ریشه، نیاز آبی در هر نوبت آبیاری محاسبه شد. فاصله ردیف‌های کاشت بذرها گندم ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر بود که با تراکم ۴۰۰ تا ۴۵۰ بوته در مترمربع در اواسط آبان ماه کشت انجام شد. فواصل بین آبیاری‌ها به دلیل محدودیت‌های موجود طبق عرف محل



شکل ۱. نحوه توزیع آب و شوری از دو خط آبیاری بارانی شور و شیرین که به صورت عمود بر هم قرار داده شده‌اند
 Fig. 1. Distrubution of water amount and salinity from 2 perpendicular saline and non-saline line souces

که در آن EC_i شوری آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، I_i عمق آب آبیاری در هر نوبت آبیاری و n تعداد دفعات آبیاری در طول دوره رشد است. پس از جمع‌آوری داده‌ها، توابع تولید با استفاده از روابط ۲ تا ۵ برآورد شدند. بهترین نوع تابع از نظر معیار خوبی برازش و معنی‌دار شدن ضرایب انتخاب شده و سپس محاسبات و تحلیل نتایج بر اساس این تابع انجام شد. از ۴ تابع تولید آب_شوری (خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم، لتی و دینار، متعالی) در این تحقیق استفاده شد:

$$Y = (a_0 + a_1 AW + a_2 EC) \quad [2] \text{ خطی ساده}$$

شکل کلی تابع عملکرد به ازای شوری‌های مختلف و مقادیر متفاوت آب آبیاری به صورت $Y=f(AW, EC)$ است؛ که در آن Y مقدار عملکرد گندم برحسب کیلوگرم در هکتار، AW مجموع عمق آب آبیاری در طول دوره رشد برحسب سانتی‌متر و EC متوسط وزنی شوری آب آبیاری برحسب ds/m است. متوسط وزنی شوری در طول دوره رشد به‌عنوان شوری آب رسیده به هر شبکه در نظر گرفته شد و به‌صورت رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\overline{EC} = \sum_{i=1}^n (EC_i \cdot I_i) \left[\sum_{i=1}^n (I_i) \right]^{-1} \quad [1]$$

می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، به‌طور کلی افزایش آب آبیاری باعث افزایش عملکرد دانه و کاهش افزایش شوری آب آبیاری باعث کاهش عملکرد دانه و کاهش شده است. جهش‌هایی که در بعضی از نقاط ملاحظه می‌شود ناشی از خطای اندازه‌گیری است.

تعیین بهترین تابع تولید گندم (دانه و کاه)

نتایج تخمین توابع تولید آب-شوری دانه و کاه به صورت خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی در جدول (۴) نشان داده شده است.

مقادیر آماره t مؤید تأثیر معنی‌دار و تعیین‌کننده رطوبت و شوری خاک بر تغییرات عملکرد محصول بوده و آماره F بیانگر معنی‌داری کلی توابع است. مقایسه ضرایب R^2 و آماره F متناظر هم برای وزن دانه و هم برای وزن کاه نشان می‌دهد که قدرت برازش تابع خطی ساده و تابع کاب داگلاس نسبت به سه تابع دیگر بیشتر است، اما مقادیر معنی‌داری کاب داگلاس بهتر از خطی ساده بوده، بنابراین در این پژوهش از تابع کاب داگلاس برای تحلیل نتایج استفاده گردید. در این زمینه داتا و همکاران (Datta et al., 1998) از بین سه تابع خطی، توانی و درجه دوم مدل غیرخطی درجه دوم را بهتر از بقیه تشخیص دادند. روسو و بیکر (Russo and Bakker, 1986) نیز نتیجه گرفتند تابع درجه دوم، رابطه بین عملکرد، شوری و مقدار آب خاک را بهتر از تابع دوقسمتی ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977) برآورد می‌کند. کیانی و همکاران (Kiani et al., 2004) تابع متعالی را برای تحلیل نتایج استفاده نمود.

به کمک شاخص‌های آماری نیز تابع انتخاب شده با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج رتبه‌بندی توابع بر اساس رتبه شش شاخص آماری، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (CD)، بازده مدل (EF)، خطای بیشینه (ME)، ضریب باقیمانده (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE) در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداقل RMSE مربوط به کاب داگلاس است و نشان‌دهنده این است که این تابع در مجموع با کمترین اختلاف، عملکرد را نسبت به مقدار واقعی برآورد کرده است. حداکثر خطا (ME) نشان می‌دهند که تابع درجه دوم نسبت به سایر توابع در مرتبه اول قرار دارد. کارایی مدل (EF)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تعیین (CD) و ضریب باقیمانده (CRM) در تابع کاب داگلاس در رتبه ۱ قرار گرفته است. تمام شاخص‌های آماری

$$Y = a_0 AW^{a_1} EC^{a_2} \quad [۳] \text{ کاب داگلاس}$$

[۴] درجه دوم

$$Y = a_0 + a_1 AW + a_2 AW^2 + a_3 EC + a_4 EC^2 + a_5 AW \cdot EC$$

[۵] متعالی

$$Y = a_0 AW^{a_1} EC^{a_2} EXP(a_3 AW + a_4 EC)$$

پس از تعیین ضرایب توابع، آماره F و t ، به کمک نرم‌افزار اسلاید رایت، خط رگرسیون مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد رسم شد و از شش شاخص آماری، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (CD)، بازده مدل (EF)، خطای بیشینه (EM)، ضریب باقیمانده (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE) به شکل معادلات ۶ تا ۱۱، برای مقایسه و ارزیابی استفاده شد.

در این توابع O ، P و \bar{O} به ترتیب مقدار عملکرد مشاهده شده، پیش‌بینی شده و متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهده است. RMSE برآورد کم یا زیاد از حد مدل در مقایسه با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده را مشخص می‌کند.

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad [۶]$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad [۷]$$

$$EF = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [۸]$$

$$ME = \text{Max} |O_i - P_i| \quad [۹]$$

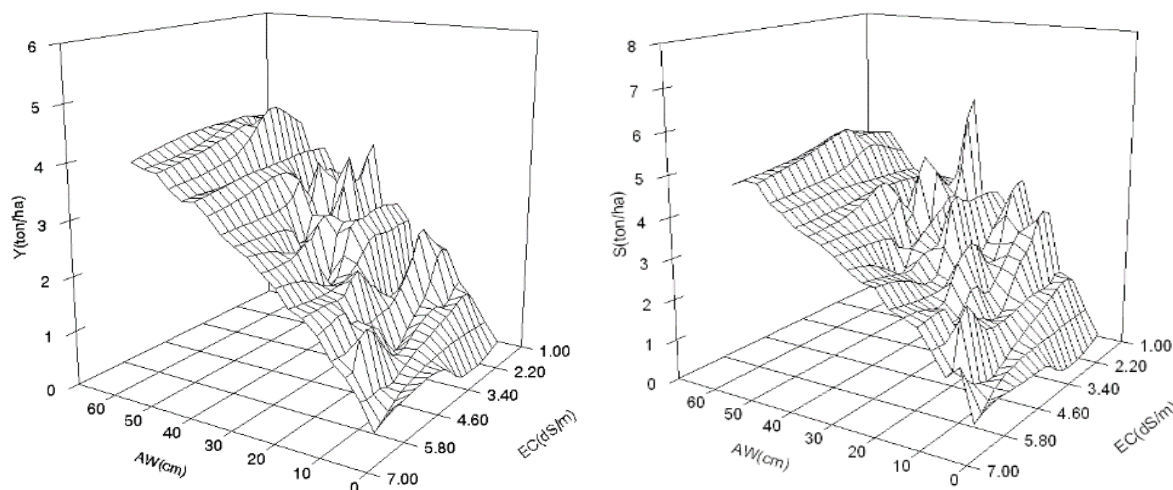
$$CRM = \frac{(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [۱۰]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad [۱۱]$$

نتایج و بحث

مقادیر آب آبیاری، متوسط وزنی شوری آب، وزن دانه و وزن کاه به دست آمده در نقاط برداشت شده، نسبت به یکدیگر در یک منحنی سه‌بعدی رسم شدند (شکل ۲). این شکل منحنی واقعی وزن دانه و کاه را نسبت به دو عامل عمق آب آبیاری و شوری با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای برای گندم نشان

در تابع متعالی در رتبه ۳ و در تابع درجه دوم در رتبه ۴ قرار گرفتند. در مجموع تابع کاب داگلاس در رتبه اول و پس‌از آن چهارم قرار گرفتند. توابع خطی ساده، متعالی و درجه دوم در رتبه‌های دوم تا



شکل ۲. وزن دانه (سمت چپ) و وزن کاه (سمت راست) به ازای عمق آب‌داده شده (AW) و متوسط وزنی شوری (EC) در هر یک از نقاط برداشت‌شده

Fig. 2. Weight of grain (left) and straw (right) corresponding to depth of applied water (AW) and salinity weighted average (EC) at each point.

جدول ۴. ضرایب توابع تولید آب-شوری با استفاده از توابع مختلف

Table 4. Coefficients of water-salinity using different production functions

متغیر Variable	تابع خطی ساده		تابع کاب داگلاس		تابع درجه دوم		تابع متعالی	
	Simple linear function		Cob-Doglass function		Second polynomial function		Transducer function	
	دانه Grain	کاه Straw	دانه Grain	کاه Straw	دانه Grain	کاه Straw	دانه Grain	کاه Straw
a0	0.871** (4.12)	2.801** 8.75	0.264** (5.12)	1.25** (5.52)	0.28 ^{ns} (0.31)	2.87* (0.31)	2.9×10 ⁻¹⁷ (7.2×10 ⁻⁶)	2.7×10 ⁻¹⁹ (1.8×10 ⁻¹⁵)
a1	0.063** (21.16)	0.057** (12.80)	0.736** (17.72)	0.511** (12.60)	0.107** (4.92)	0.158** (4.90)	-4.042 ^{ns} (-9×10 ⁻⁵)	-12.28 ^{ns} (6.4×10 ⁻¹³)
a2	-0.097* (-2.26)	-0.38** (-5.91)	-0.225** (-2.70)	-0.64** (-7.46)	- 0.0003* (-1.99)	-0.0008** (-2.88)	1.18 ^{ns} 3×10 ⁻⁵	-59.18 ^{ns} (-8.4×10 ⁻¹⁴)
a3					-0.033 ^{ns} (-0.07)	-1.06 ^{ns} (-1.59)	0.943 ^{ns} (0.0013)	0.42 ^{ns} (1.2×10 ⁻¹³)
a4					0.120 ^{ns} (1.58)	-0.0068 ^{ns} (0.13)	-1.082 ^{ns} (-9×10 ⁻⁵)	24.05 ^{ns} (2.1×10 ⁻¹³)
a5					- 0.0063 ^{ns} (-1.31)	-0.0137 ^{ns} (-1.94)		
F	293.6	155.3	303.2	181.6	119.4	68.89	52	52.43
Adj R ²	0.69	0.54	0.70	0.58	0.70	0.57	0.44	0.44

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۱ و ۵ درصد، ns = بدون اثر معنی‌دار و مقادیر داخل پرانتز آماره t می‌باشند.

* and ** are denoting significance at 1% and 5%, respectively, ns stands for non-significance, and values in parenthesis show t-value.

جدول ۵. رتبه‌بندی توابع بر اساس رتبه شاخص‌های آماری

Table 5. Ranking of functions based on the order of statistical indicators

نوع تابع Type of function	RMSE	CD	EF	ME	CRM	MAE	انتخاب نهایی The final choice
تابع خطی ساده Simple linear function	0.70 (2)	0.75 (2)	0.54 (2)	1.88 (1)	0.17 (2)	0.59 (2)	2
تابع کاب داگلاس Cob-Doglass function	0.68 (1)	0.78 (1)	0.56 (1)	1.92 (2)	0.16 (1)	0.57 (1)	1
تابع درجه دوم Second polynomial function	0.72 (4)	0.72 (4)	0.50 (4)	1.93 (4)	0.19 (4)	0.61 (4)	4
تابع متعالی Transducer function	0.71 (3)	0.73 (3)	0.51 (3)	1.92 (3)	0.18 (3)	0.61 (3)	3

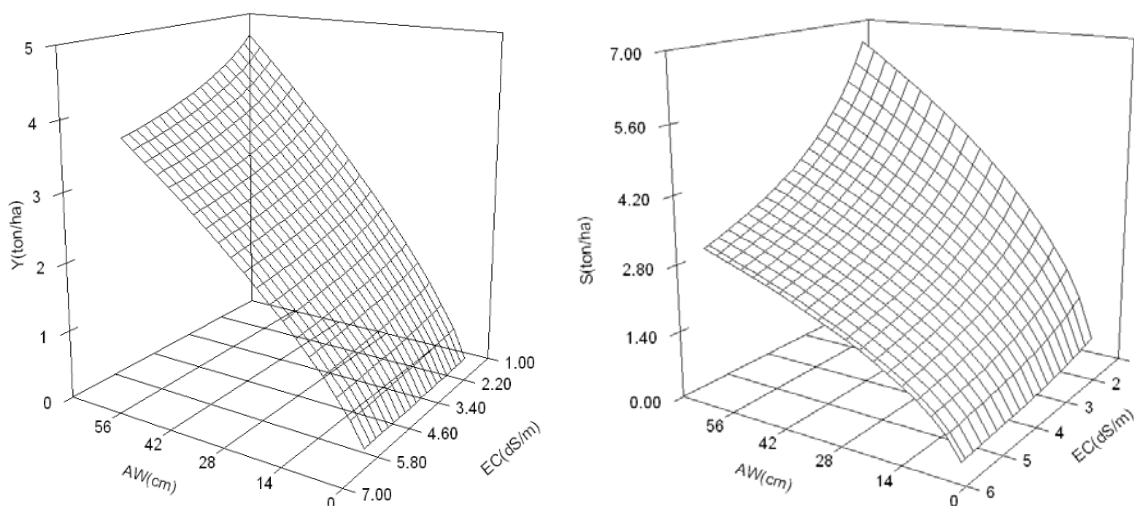
نتیجه‌گیری

آبیاری بارانی متعامد روشی مناسب برای تأمین مقدار آب و شوری‌های مختلف است. با این شیوه نیازی به اعمال تیمار بندی‌های کلاسیک نیست. با توجه به این تحقیق کاهش وزن دانه و کاه بر اثر کاهش آب آبیاری و افزایش شوری آب از تابع کاب داگلاس پیروی کرد و در پیش‌بینی تغییرات وزن دانه و کاه در اثر تغییر دو عامل فوق نسبت به سایر توابع قابلیت بهتری داشت. نتایج نشان داد که تغییرات وزن دانه و کاه نسبت به تغییرات مقدار آب آبیاری حساس‌تر از تغییرات شوری آب است. با استفاده از منحنی نرخ جایگزینی امکان جایگزینی دو عامل شوری و مقدار آب برای حصول به عملکرد یکسان وجود دارد.

تغییرات عملکرد دانه و کاه با استفاده از بهترین تابع

برآزش داده‌شده

عملکرد دانه و کاه به ازای کلیه داده‌های عمق آب آبیاری و شوری آب، با استفاده از تابع برآورد شده (تابع کاب داگلاس) محاسبه و در این حالت منحنی عمق آب، شوری و عملکرد نسبت به یکدیگر رسم شد که منحنی‌های تعدیل‌شده و یکنواختی به‌دست آمد (شکل ۳). این شکل‌ها نشان می‌دهند با افزایش مقدار آب آبیاری میزان عملکرد افزایش ولی با افزایش شوری مقدار عملکرد کاهش می‌یابد.



شکل ۳. تغییرات وزن دانه (سمت چپ) و وزن کاه (سمت راست) به ازای عمق آب داده‌شده (AW) و شوری آب (EC)، با استفاده از معادله کاب داگلاس

Figure 3. Weight of grain (left) and straw (right) corresponding to depth of applied water (AW) and water salinity (EC) using Cob-Doglass equation

منابع

- Agnihotri, A.K., Kumghare, P.S., Rao, K.V.G.K., Sharm, D.P., 1992. Econometric consideration for reuse of drainage in wheat production. *Agricultural Water Management*. 22, 249-270.
- Aragues, S.R., Royo, A., Faci, J., 1992. Evaluation of triple line source sprinkler system for salinity crop production studies. *Soil Science Society of America Journal*. 56, 377-383.
- Colmer, T.D., Flowers, T.J., Munns, R., 2006. Use of wild relative to improve salt tolerance in wheat. *Experimental Botany*. 57, 1059-1078.
- Datta, K.K., Sharma, V.P., Sharm, D.P., 1998. Estimation of a production function for wheat under saline conditions. *Agricultural Water Management*. 36, 85-94.
- Dinar, R., Letey J., Vaux, H.J.Jr., 1985. Optimal rates of saline and non-saline irrigation waters for crop production. *Soil Science Society of America Journal*. 50, 440-443.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper 33*. FAO, ROME.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for prediction of field water use and crop yield. *Pudoc. Wagenengen*. 189p.
- FAO. 2010. Extent and causes of salt-affected soils in participating countries. Available on URL: <http://www.fao.org/ag/AGL/agll/spuch/topic4.htm>.
- FAO. 2013. <http://www.fao.org>
- Faria, R.D., Olitta, A., 1987. Irrigation depth for wheat crops using a line source sprinkler system. *Pesquisa-Agropecuaria-Brasileira*. 22(9-10), 999-1008.
- Frenkel, H., Mantell, A., Vinten, A., Meiri, A., 1990. Double line-source sprinkler system for determining the separate and interactive effects of water and salinity on forage corn. *Irrigation Science*. 11, 227-231.
- Gupta, N.K., Gupta, S., 2005. *Plant Physiology*. Oxford and IBH Publishing Co. 256p.
- Hang, A., Miller, D., 1983. Wheat development as affected by deficit, high frequency sprinkler irrigation. *Agronomy Journal*. 75(2), 234-239.
- Hanks, R.J., Keller, J. Rasmussen, V.P., and Wilson, G.D., 1976. line source sprinkler for continuous variable irrigation- crop - production studies. *Soil Science Society of America Journal*. 40, 426-429.
- Hexem, R.Q., Heady, E.O., 1978. *Water production function and irrigated agriculture*. Iowa State University Press, Amesterdam.
- Jensen, C.R., 1982. Effect of soil water osmotic potential on growth and water relationship of barely during soil water depletion. *Irrigation Science*. 3, 11-121.
- Kachel, K., Roth, D., 1984. Results of trials over many years of the effect of sprinkler irrigation on winter wheat and spring barley yield on a shalliw clay-chernoxem soil. *Archiv - fur - Acker- und - Pflanzenbau - und-Bodenkunde*. 28, 1, 35-45.
- Kiani, A.R., Mirlatifi, M., Homae, M., Cheraghi, A.M., 2004. Effects of different regimes of irrigation and salinity on wheat in Gorgan region. *Agricultural Science and Natural Resources*. 11(1), 79-89 [In Persian with English Summary]
- Komatsua, S., Shirasakab, N., Sakatab, K., 2013. 'Omics' techniques for identifying flooding-response mechanisms in soybean. *Journal of Proteomics*. 93, 169-178.
- Lauer, D.A., 1983. Line-source sprinkler systems for experimentation with sprinkler-applied nitrogen fertilizers. *Soil Science Society of America Journal*. 47: 124-128.
- Letey, J., Dinar, A., 1986. Simulated crop productions for several crops when irrigated with saline waters. *Hilgardia*. 54, 1-32.
- Letey, J., Dinar, A., Knapp, K.C., 1985. Crop-water production model for saline irrigation waters. *Soil Science Society American Journal*. 49, 1005-1009.
- Maas, E.V., 1986. Salt tolerance of plants. *Application Agricultural Research*. 1, 12-26.
- Maas, E.V., 1990. *Crop Salt Tolerance*. ASAE. Monograph. 71. pp 262-304.
- Maas, E.V., Hoffman, G.J., 1977. *Crop Salt Tolerance: Current Ssessment*. Irrigation and Drainage Divitsion, ASCE, 103(IR2), 115-134.
- Meiri, A., Shalhevet, J., 1973. Pepper plant response to irrigation water quality and timing and leaching. *Ecological Studies*. Vol IV. Springer-Verlag. Berlin. Pp. 421-429.
- Munns, R. James, R.A., 2003. Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat, *Plant and Soil*. 253, 201-218.

- Parra, M.A., Romero, G.C., 1980. On the dependence of salt tolerance of beans on soil water matric potential. *Plant and Soil*. 56, 3-16.
- Rao, G.D., 1991. Line source vs. Irrigated - Nonirrigated treatments for Evaluation of Genotype Drought Response. *Agronomy Journal*. 82 (4), 841-844.
- Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A., Messier, Ch., 2013. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of the Total Environment*. 463-464, 51-60.
- Russo, D., Bakker, D., 1986. Crop water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline waters. *Soil Science Society of America Journal*. 51, 1554-1562.
- Sammis, T.W., Smeal, D., 1983. The Effects of Decreased Watering on Wheat and Barley Yields, WRRR Report. No.179 January 1983. 72 p.
- Schneider, A.D., Howell, T.A., 1999. LEPA and spray irrigation for Grain crops. *Irrigation and Drainage Engineering*. 125(4), 167-172.
- Sepaskhah, A.R., Boersma, L., 1979. Shoot and root growth exposed to several levels of matric potential and NaCl induced osmotic potential of soil water. *Agronomy Journal*. 71, 746-752.
- Stewart, J.I., Danielson, R.E., Hank, R.J., Jackson, E.B., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Frankland, W.T., Riley, J.P., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Utah water Lab. PRWG 151-1. Logan. Utah.
- Van Genuchten, M.Th., 1983. Analyzing crop salt tolerance data: model description and user manual. Research report No. 120, U. S. Salinity Lab. Reerside. C.A.
- Vaux, H.J.Jr., and Pruitt, W.V., 1983. Crop-water production functions. In: Hillel, D. (ed.), *Advances in Irrigation*, Vol. 2, Academic Press, Inc., Mew, NY.
- Yildirim, E., Taylor, A.G., Spittler, T.D., 2006. Ameliorative effects of biological treatments on growth of squash plants under salt stress. *Scientia Horticulture*. 111, 1-6.
- Zolfagharan, A., 2005. Investigation the effects of applied water at different salinities on grain yield in sprinkler irrigation. Final Report of a Research Project in Agricultural Research and Education Division, Agricultural Engineering Research Institute. 84.1. [In Persian].