نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۶، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۳۹۱، ص. ۱۳۹۴-۱۳۸۴

Journal of Water and Soil
Vol. 26, No. 6, Jan.-Feb. 2013, p. 1384-1394

# کاربرد مرحله یکم روش رویه پاسخ در مطالعات کشاورزی: بهینه سازی تنش‌های کم آبی و شوری برای گندم بهاره

امیر حق وردی[1*]- بیژن قهرمان[2]- کامران داوری[3]- محمد کافی[4]

تاریخ دریافت:۱۳۹۰/۵/۱۲
تاریخ پذیرش:۱۳۹۱/۸/۲۸

## چکیده

در سال های اخیر مطالعات بسیاری در ارتباط با مدل سازی تنش‌های کم آبی و شوری و بررسی اثرات آن‌ها بر خصوصیات مختلف گیاهان زراعی انجام شده است. هدف از پژوهش حاضر بررسی کاربرد مرحله یک روش رویه پاسخ در مطالعات شوری و کم آبی به منظور تعیین سطوح بهینه متغیرهای مستقل (سطوح کم آبی و شوری در مراحل مختلف رشد) برای دستیابی به بیشترین میزان محصول برای گندم بهاره در منطقه مشهد می‌باشد. آزمایش در سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش فاکتوریل با پنج متغیر میزان شوری آب آبیاری با دو سطح ۰/۵ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر و میزان آب آبیاری در چهار مرحله مختلف رشد، بدون تکرار و در دو سطح از هر متغیر، ۲۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی، انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که میزان آب آبیاری در مراحل مختلف رشد و شوری آبی آبیاری تاثیری متفاوت و بالا بر میزان محصول دارد. اثر متقابل شوری و میزان آب آبیاری بر محصول ناچیز بود. راندمان مصرف آب در سناریوهای مختلف بهینه سازی بین ۵/۸۴ تا ۷/۳۱ ($kg.h^{-1}.m^{-1}$) بود. نتایج بهینه سازی لزوم در نظر گرفتن مدل های غیر خطی و طرح ریزی آزمایشات آتی در فضای داخلی سطوح تحقیق حاضر (۱۰۰ درصد و ۲۰ درصد نیاز آبی) و متمایل به نیمه بالایی (تنش های کمتر از ۵۰ درصد) را اثبات نمود. همچنین اثر مهم و غیر خطی شوری نشان داد که این تنش با جزئیات بیشتری بایستی بررسی شود.

**واژه های کلیدی:** تابع مطلوبیت، تابع تولید، کم آبیاری، نمودار پارتو، نمودار باکس-کاکس

## مقدمه

اهمیت توجه به مصرف آب در بخش کشاورزی به عنوان شیوه‌ای کلیدی برای حل مشکلات منابع آب در سطح دنیا امری اثبات شده است. نیمی از غلات در دنیا در اراضی فاریاب در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته تولید می شود. مستندات علمی بسیاری وجود دارد که نشان می‌دهد کم آبیاری در بسیاری از گیاهان زراعی، بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد (۵). همچنین کمبود منابع آب با کیفیت مناسب موجب شده است که استفاده از منابع آب شور در بخش کشاورزی توجه ویژه‌ای را به خود جلب کند.

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در ارتباط با مدل‌سازی تنش‌های کم آبی و شوری و بررسی اثرات آن‌ها بر خصوصیات مختلف گندم به عنوان یکی از مهم ترین محصولات زراعی انجام شده است. داتا و همکاران (۸) در پژوهشی توابع تولید گندم را در شرایط شوری محاسبه نمودند. کیانی و عباسی (۱۱) توابع تولید آب-شوری را برای گندم در استان گلستان ارائه نمودند. حق وردی و همکاران (۱) نیز توابع تولید را بر حسب میزان آب آبیاری و شوری آب آبیاری برای گندم بهاره در منطقه مشهد به‌دست آوردند. یانگ-رن و همکاران (۱۷) در پژوهشی توانایی توابع تولید آب-شوری را در برنامه ریزی آبیاری با آب شور برای گیاه گندم متذکر شدند. نحوی نیا و همکاران (۳) در پژوهشی بر روی گندم در منطقه بیرجند نشان دادند که بیشترین کارایی مصرف آب در منبع با کمترین شوری و میزان آب آبیاری برابر با ۷۵ درصد نیاز آبی حاصل شد. سینگ و همکاران (۱۶) توابع تولید آب را برای آب‌های شور و قلیا با استفاده از سامانه‌های آبیاری بارانی برای گیاه گندم به‌دست آوردند.

تقریباً در تمامی مطالعات مرتبط با کم آبیاری و شوری اصلی‌ترین

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی سابق دکتری، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: amirhaghverdii@gmail.com)
۴- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

هدف (یا حداقل یکی از اهداف اصلی) پاسخ به این پرسش است که چه سطوحی از کم آبی و شوری منجر به محصول بهینه می‌شوند؟ مدل‌سازی و بهینه‌سازی ریاضی کم آبی و شوری پاسخ این پرسش را فراهم می‌کند. مدل‌ها و روش‌های گوناگونی برای تعیین چگونگی تاثیر تنش‌های گوناگون بر رشد محصولات زراعی در منابع، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مثال‌هایی از این روش‌ها استفاده از مدل‌های شبیه ساز رشد گیاهی و تولید محصول همانند SWAP (۳)، CROPSYST (۶)، AquaCrop (۲) و روش‌های رگرسیونی مبتنی بر نتایج حاصله از طرح‌های آزمایشی (۱۰) می‌باشد.

روش رویه پاسخ از چندین شیوه‌ی آماری سودمند برای بهینه‌سازی محصول در فرآیندهای پیچیده‌ای که در آن‌ها چندین متغیر بر میزان محصول تاثیر می‌گذارند تشکیل شده است (۱۳). کاهش دادن تعداد آزمایش‌های لازم برای دستیابی به اطلاعات مفید آماری و نتایج قابل قبول، برتری اصلی روش رویه پاسخ بوده و از این رو این روش سریعتر و ارزانتر از طرح‌های آزمایشی کلاسیک است که در علوم کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشترین کاربرد این روش در سالیان اخیر در صنعت بوده است. با این وجود آصف و همکاران (۴) در سال ۲۰۱۱ بر پتانسیل روش رویه پاسخ برای کاربردهای کشاورزی تاکید نمودند. مرور منابع نشان می‌دهد که تحقیقات انگشت شماری به‌وسیله روش رویه پاسخ در طراحی نمونه برداری بهینه به منظور پیش‌بینی خصوصیات خاک (۱۲ و ۱۵) و مدل‌سازی تولید محصول (۱، ۷، ۹ و ۱۴) صورت پذیرفته است. حق وردی و همکاران (۱) پژوهشی را بر روی گیاه گندم بهاره در منطقه مشهد با استفاده از روش رویه پاسخ انجام دادند. هدف از پژوهش آن‌ها معرفی آزمایش‌های گزینش، یا همان مرحله صفر روش رویه پاسخ، بود. آنان نشان دادند که آزمایش‌های گزینش روشی مناسب جهت تحلیل تنش‌های کم آبی و شوری می‌باشد. این مقاله در ادامه پژوهش حق وردی و همکاران (۱) با هدف بررسی کاربرد مرحله یکم روش رویه پاسخ در مطالعات شوری و کم آبی به منظور تعیین سطوح بهینه متغیرهای مستقل (سطوح کم آبی و شوری در مراحل مختلف رشد) برای دستیابی به بیشترین میزان محصول برای گندم بهاره در منطقه مشهد می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مبانی نظری مرحله ۱روش رویه پاسخ

در ابتدای مطالعات رویه پاسخ لازم است که آزمایشی با هدف حذف متغیرهای با اهمیت ناچیز طراحی شود. این مرحله از مطالعات رویه پاسخ مرحله صفر یا آزمایشات گزینش نامیده می‌شوند (۱). هنگامی که متغیرهای مستقل مهم مشخص شدند مرحله یک مطالعه رویه پاسخ آغاز می‌شود. در این مرحله هدف آزمایشگر این است که آیا سطوح یا مقادیر موجود متغیرهای مستقل منجر به مقداری از پاسخ در نزدیکی مقدار بهینه خواهد شد یا این که فرآیند (احتمالاً) در ناحیه‌ای دور از مقدار بهینه به وقوع خواهد پیوست. اگر تنظیمات یا سطوح فعلی متغیرهای مستقل منجر به عملکرد بهینه نشوند آزمایشگر بایستی مجموعه تصحیحاتی را بر روی متغیرهای فرآیند تعیین و اعمال کند تا فرآیند را به طرف پاسخ بهینه حرکت دهد. این مرحله از روش رویه پاسخ عموماً با استفاده از مدل‌های مرتبه اول و روش بهینه‌سازی موسوم به روش بزرگترین شیب صعودی انجام می‌پذیرد.

برای استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی غیرخطی جهت فرمول‌بندی و حل مسائل بهینه‌سازی پاسخ چندگانه، روش‌های بسیاری وجود دارد. در این پژوهش از بهینه‌سازی چندگانه مبتنی بر تابع مطلوبیت استفاده شد (۱۳). روش کلی آن است که ابتدا هر پاسخ $y$ را به یک تابع مطلوبیت جداگانه $d$ که در بازه‌ی زیر تغییر می‌کند نسبت می‌دهیم:

$$0 \le d \le 1 \qquad (۱)$$

که در آن اگر پاسخ $y$ متناظر با مقدار بهینه‌ی آن باشد $d=1$، اگر پاسخ در ناحیه تعیین شده باشد به نسبت میزان نزدیکی به مقدار بهینه $0 < d < 1$ و اگر خارج از ناحیه مورد نظر باشد، $d=0$ خواهد بود. در بهینه‌سازی چندگانه چندین بهینه سازی توام وجود دارد. برای حل آن از بیشینه کردن مطلوبیت کلّی متغیرهای پاسخ استفاده می‌شود:

$$D = \left(d_1 \times d_2 \times \cdots \times d_m\right)^{1/m} \qquad (۲)$$

که در آن $m$ تعداد متغیرهایی است که می‌خواهد بهینه شود. اگر هدف‌ها دارای درجات متفاوتی از اهمیت باشند رابطه به شکل زیر تغییر پیدا می‌کند.

$$D = \left(d_1^{i_1} \times d_2^{i_2} \times \cdots \times d_n^{i_n}\right)^{1/\sum i} \qquad (۳)$$

که در آن $i_1$، $i_2$، ...، $i_n$ مشخص کننده درجات متفاوت اهمیت هدف‌ها و $\sum i$ جمع آن‌ها می‌باشند.

نقطه آغاز برای دستیابی به هدف (بیشینه کردن تابع مطلوبیت)، به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و سپس بزرگترین شیب صعودی برای رسیدن به مقدار بیشینه تعیین می‌شود. به دلیل امکان منحنی بودن رویه‌های پاسخ و ترکیب آن با تابع مطلوبیت امکان دستیابی به چندین نقطه بهینه محلی وجود دارد. برای دستیابی به بهترین بیشینه محلی این فرآیند تکرار شده و در هر بار به صورت تصادفی نقطه‌ی متفاوتی برای شروع انتخاب می شود. به‌دلیل اینکه تابع مطلوبیت تکی مشتق پذیر نیست، روش‌های بهینه‌سازی عددی به طور مستقیم برای آن‌ها قابل استفاده نمی‌باشد و بنابراین تابع مطلوبیت $D$ با استفاده از روش‌های جستجوی مستقیم بهینه می‌شود. بر اساس تعریف کلاسیک موجود، "جستجوی مستقیم" به آزمایش متوالی راه

حل‌ها اطلاق می‌شود که در آن مقایسه هر راه حل با بهترین راه حل پیشین، نحوه انتخاب راه حل آزمایشی بعدی را معین می‌کند. هدف (بیشینه‌سازی، کمینه‌سازی، رسیدن به مقداری خاص و قرار گرفتن در بازه از پیش تعیین شده) را می‌توان برای هر متغیر مستقل یا پاسخ تعیین کرد. اگر هدف ($T$) رسیدن به مقدار بیشینه برای پاسخ $y$ باشد:

$$d=\begin{cases}0 & y<L\\ \left(\dfrac{y-L}{T-L}\right)^{r} & L\le y\le T\\ 1, & y>T\end{cases} \qquad (۴)$$

چنانچه وزن $r=1$ باشد، تابع مطلوبیت خطی خواهد بود. با انتخاب $r>1$، تأکید بیش‌تری بر قرارگرفتن در مجاورت مقدار هدف می‌شود و با انتخاب $0<r<1$ این مطلب کم اهمیت‌تر خواهد شد. اگر هدف یافتن مقدار کمینه پاسخ باشد داریم:

$$d=\begin{cases}1 & y<T\\ \left(\dfrac{U-y}{U-T}\right)^{r} & T\le y\le U\\ 0 & y>U\end{cases} \qquad (۵)$$

در مطلوبیت دو طرفه فرض می‌شود که هدف بین دو حد پایینی ($L$) و بالایی ($U$) قرار دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d=\begin{cases}0 & y<L\\ \left(\dfrac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L\le y\le T\\ \left(\dfrac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T\le y\le U\\ 0 & y>U\end{cases} \qquad (۶)$$

## طرح آزمایشی انجام شده

طرح پیاده شده از نوع فاکتوریل بدون تکرار بود. جزئیات طرح‌های بدون تکرار در حق وردی و همکاران (۱) شرح داده شده است. آن‌ها نشان دادند که در این گونه طرح‌ها بر اساس اصل کمی (پراکندگی) اثرات می‌توان میانگین مربعات اثرات متقابل مرتبه بالا را برای برآورد خطا ترکیب کرد. عموماً در مطالعات رویه پاسخ برای انجام مرحله صفر (آزمایشات گزینش) و یک (بهینه سازی با روش بزرگترین شیب صعودی) از مدل‌های مرتبه اول استفاده می شود. فرض بر این است که مدل‌های مرتبه اول برای بررسی کلی فضای آزمایش سودمند بوده و استفاده از مدل‌های مرتبه بالاتر صرفاً در مراحل بعدی مطالعات رویه پاسخ پیشنهاد می‌شود. برای این که فرض خطی بودن تاثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ به طور نسبی بررسی و همچنین میزان انحنای رویه پاسخ برآورد شود، اضافه نمودن آزمایش‌هایی در مرکز فضای مورد مطالعه (نقاط مرکزی) یا همان آزمایشات مرکزی مفید می‌باشد. آزمایش مرکزی بایستی در فاصله‌ای مساوی از دو کران قبلی انتخاب شده برای هر متغیر مستقل و در میان آن‌ها قرار بگیرد.

آزمایشی در سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام پذیرفت. تمامی واحدهای آزمایشی در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۲۳ به زیر کشت رفت و محصول به صورت دستی در تاریخ ۱۳۸۹/۴/۲ برداشت شد. گندم بهاره مورد نظر، گندم نان و از رقم مقاوم به شوری (*Triticum-aestivun*) انتخاب شد. طرح مذکور در ۳۶ کرت آزمایشی، هر یک با ابعاد ۴ متر مربع اجرا شد. تمامی تیمارها پس از سه برگی شدن گیاهان (تقریباً ۲۵ روز پس از کاشت) اعمال شدند. پیش از آن میزان آب آبیاری برای تمامی ۳۶ واحد آزمایشی برابر با نیاز آبی به صورت یکسان داده شد. میله‌های دستگاه TDR (مدل 6050x1) در هر کرت در اعماق ۲۰، ۴۰ و ۷۰ سانتی‌متری نصب و میزان قرائت TDR از کرت شاهد پیش از آبیاری ملاک تعیین نیاز آبی تمامی کرت‌ها بود. میزان آب آبیاری بر اساس کمبود رطوبت تا ظرفیت زراعی و در عمق توسعه ریشه تعیین گردید. دور آبیاری به صورت ثابت ۱۰ روزه و با توجه به دور آبیاری مرسوم در منطقه انتخاب شد. در مجموع ۷ بار آبیاری در طول مدت رشد پس از سه برگی شدن انجام شد (جدول ۱). به علت اینکه تیمارهای آزمایش پس از سه برگی شدن اعمال شدند دو بار آبیاری اولیه (معادل ۱۲۰ لیتر در متر مربع) در جدول آورده نشده است. در جدول شماره ۲ ترکیبات تیماری به کار رفته در کرت‌های مختلف نشان داده شده است. متغیرهای مستقل در این پژوهش میزان آب آبیاری در مراحل مختلف رشد بودند. دوره رشد بر اساس طبقه بندی زادوک (۱۸) به چهار مرحله مختلف تقسیم بندی و میزان آب آبیاری به عنوان متغیر مستقل ($A$، $B$، $C$ و $D$) انتخاب شد. برای هر متغیر مستقل دو سطح ۲۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی کرت شاهد (عمق آب بهینه منطقاً از این بازه فراتر نخواهد رفت) درنظر گرفته شد و آزمایشات مرکزی با دو تکرار برابر ۶۰ درصد نیاز آبی در هر مرحله رشد نیز اضافه شد. مجموع میزان آب آبیاری نوبت اول و دوم متغیر $A$ (میزان آب آبیاری در دوره‌های رشد گیاهچه‌ای و پنجه زنی)، مجموع آب آبیاری در نوبت سوم و چهارم متغیر $B$ (میزان آب آبیاری در دوره‌های ساقه‌دهی و ظهور برگ پرچمی)، مجموع آب آبیاری در نوبت پنجم و ششم متغیر $C$ (میزان آب آبیاری در دوره‌های سنبله‌دهی و گل‌دهی) و آب آبیاری در نوبت هفتم متغیر $D$ (میزان آب آبیاری در مرحله خمیری شدن و رسیدگی) نام گرفتند و متغیرهای مستقل در این پژوهش بودند. این آزمایش‌ها برای دو شوری مختلف آب آبیاری (۱۰ و ۰/۵ دسی زیمنس بر متر) تکرار شد. در برخی محاسبات شوری نیز به عنوان متغیری مستقل درنظر گرفته شد که آن را با حرف $E$ نشان دادیم. برای جلوگیری از تاثیر باران روی

تمامی کرت‌ها با شروع دوره بارندگی (۱۳۸۹/۱/۱۶) پلاستیک کشیده شد و در اتمام بارندگی (۱۳۸۹/۲/۲۵) پلاستیک‌ها جمع شدند. سم‌پاشی، کوددهی و آماده‌سازی بستر قبل از کشت برای تمامی تیمارها به صورت یکسان انجام پذیرفت. برداشت محصول پس از اتمام فصل کشت با دست و از مربعی به مساحت یک متر مربع از وسط هر کرت انجام پذیرفت تا اثرات حاشیه‌ای حذف شوند.

## سناریوهای بهینه سازی

مراحل شرح داده شده در بخش مباحث نظری عموماً برای آزمایشات صنعتی و شیمیایی که امکان انجام آزمایشات متعدد در زمان‌هایی اندک میسر می‌باشد ارائه شده است. مسلم است که با توجه به محدودیت‌های موجود در بخش کشاورزی این مراحل نیاز به تغییر و بهبود دارد. به عنوان مثال انجام هر آزمایش در تحقیقات کشاورزی عمدتاً نیاز به یک فصل زراعی دارد و بنابراین انجام آزمایشات متوالی جهت مرحله یک رویه پاسخ امکان پذیر نمی‌باشد و بنابراین بایستی آزمایشات در یک فصل زراعی به گونه‌ای طراحی شوند که هدف مورد نظر قابل دسترسی باشد. لذا در این پژوهش گونه‌ای از طرح‌های رویه پاسخ به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت که امکان انجام مرحله یک رویه پاسخ و تعیین حدود نسبی تنش‌های کم آبی و شوری که به بیشینه کردن محصول منجر می‌شوند را فراهم بسازد و به شناخت کلی فضای آزمایشی و پی ریزی آزمایشات آتی کمک نماید.

**جدول ۱- تاریخ و میزان آب آبیاری (لیتر) بر اساس مراحل مختلف رشد بر اساس طبقه‌بندی زادوک (حق وردی و همکاران، ۱)**

| نوبت آبیاری | تاریخ آبیاری | مراحل رشد | آب آبیاری کرت شاهد (لیتر) | متغیر |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۳۸۹/۱/۲۴ | رشد گیاهچه‌ای | ۳۶ | A |
| ۲ | ۱۳۸۹/۲/۳ | پنجه زنی | ۵۲ | |
| ۳ | ۱۳۸۹/۲/۱۳ | ساقه‌دهی | ۴۴ | B |
| ۴ | ۱۳۸۹/۲/۲۳ | ظهور و تورم برگ پرچمی | ۸۴ | |
| ۵ | ۱۳۸۹/۳/۲ | سنبله‌دهی | ۶۱/۵ | C |
| ۶ | ۱۳۸۹/۳/۱۲ | گلدهی | ۱۱۲ | |
| ۷ | ۱۳۸۹/۳/۲۲ | مرحله خمیری و رسیدگی | ۱۴۸ | D |

**جدول ۲- تیمارهای آبیاری در کرت‌های مختلف در سال اول زراعی**

| کرت* | A** | B | C | D | کرت | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | f | ۰/۲f | f | ۰/۲f | ۱۹ | ۰/۲f | f | f | f |
| ۲ | ۰/۲f | f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۲۰ | f | f | f | f |
| ۳ | f | f | ۰/۲f | f | ۲۱ | ۰/۲f | ۰/۲f | f | ۰/۲f |
| ۴ | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f | ۲۲ | ۰/۲f | f | f | ۰/۲f |
| ۵ | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f | f | ۲۳ | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f |
| ۶ | f | f | f | ۰/۲f | ۲۴ | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f | f |
| ۷ | f | ۰/۲f | f | f | ۲۵ | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f |
| ۸ | ۰/۲f | f | f | f | ۲۶ | f | ۰/۲f | f | ۰/۲f |
| ۹ | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f | ۲۷ | ۰/۲f | f | ۰/۲f | f |
| ۱۰ | ۰/۲f | f | f | ۰/۲f | ۲۸ | f | f | ۰/۲f | f |
| ۱۱ | ۰/۲f | f | ۰/۲f | f | ۲۹ | f | f | ۰/۲f | ۰/۲f |
| ۱۲ | f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۳۰ | f | f | f | ۰/۲f |
| ۱۳ | ۰/۲f | ۰/۲f | f | ۰/۲f | ۳۱ | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f | ۰/۶f |
| ۱۴ | f | f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۳۲ | ۰/۲f | f | ۰/۲f | ۰/۲f |
| ۱۵ | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۳۳ | ۰/۲f | ۰/۲f | f | f |
| ۱۶ | f | f | f | f | ۳۴ | f | ۰/۲f | f | f |
| ۱۷ | f | ۰/۲f | ۰/۲f | f | ۳۵ | f | ۰/۲f | ۰/۲f | f |
| ۱۸ | ۰/۲f | ۰/۲f | f | f | ۳۶ | f | ۰/۲f | ۰/۲f | ۰/۲f |

*: کرت‌های شماره ۱ تا ۱۸با آب شور (۱۰ dS/m) و کرت‌های شماره ۱۹ تا ۳۶ با آب شیرین (۰/۵ dS/m) آبیاری شدند. حرف f نشان دهنده آبیاری کامل در کرت شاهد و ضریب آن کسری از میزان آبیاری در حالات کم آبیاری را نشان می‌دهد. به عنوان مثال 0.2f بیانگر میزان آب آبیاری برابر با ۲۰ درصد نیاز آبی کرت شاهد می‌باشد.

**: منظور از A، B، C و D متغیرهای مستقل در سال اول مطابق با جدول ۱ است که همان میزان آب آبیاری در مراحل مختلف رشد می‌باشند.

برای انجام مرحله یک رویه پاسخ و به منظور تعیین دقیق‌تر تاثیر شوری، تمامی آزمایشات (استفاده از آب شور و شیرین) ترکیب شدند و به همین خاطر امکان درنظر گرفتن متغیر جدیدی به نام میزان شوری آب آبیاری (متغیر $E$) نیز فراهم شد و طرح تبدیل به فاکتوریل دو سطحی ۵ عاملی ($A$ تا $E$) شد. در طرح جدید اما امکان استفاده از آزمایشات مرکزی نبود. زیرا آزمایشاتی که در مرکز طرح‌های چهار متغیره واقع شده بودند حال در مرکز طرح جدید قرار نداشتند. برای بررسی و تعیین نسبی اهمیت متغیرها و اندرکنش آن‌ها از نمودار پارتو استفاده شد.

جدول ۳ سناریوهای مختلف بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. در این پژوهش تابع مطلوبیت از نوع خطی انتخاب شد. در بهینه‌سازی انجام شده تابع مطلوبیت (رابطه ۳) به گونه‌ای تعریف شد که بیشینه کردن محصول، بالاترین میزان اهمیت (برابر با ۵) و کمینه کردن میزان آب آبیاری و شوری کمترین میزان اهمیت (برابر با ۱) را دارا باشند تا تاثیر تعداد بالای متغیرهایی مستقل (پنج متغیر) در مقابل تنها یک متغیر وابسته (یک متغیر) تعدیل شود. همچنین سه میزان مختلف کاهش محصول (۸۰، ۷۰ و ۶۰ درصد کرت شاهد) به عنوان حد پایینی در بهینه‌سازی در سناریوهای ۳ تا ۴ لحاظ شد به دلیل اینکه در واقعیت کاهش محصول بیش‌تر از این مقادیر حتی با صرفه جویی آب بسیار، نیز منطقی به نظر نمی‌رسد. در سناریوهای ۵ و ۶ نیز ۲ مقدار حداقل کاهش آب آبیاری (۸۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی کرت شاهد) به عنوان حد پایینی انتخاب شدند زیرا عموماً بیشترین میزان راندمان آب مصرفی در این ناحیه واقع می شود. به منظور بررسی بهتر تنش شوری، هر سناریو به دو زیر سناریو (الف و ب) تفکیک شد که در یکی بیشینه کردن شوری یکی از اهداف بهینه سازی بود و در دیگری شوری هر مقداری را بین ۰/۵ تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر می‌توانست اختیار کند.

## نتایج و بحث

### اهمیت نسبی متغیرها

شکل ۱ نمودارهای پارتو را به صورت جداگانه برای کرت‌های با منبع آب شیرین، شور و تمامی کرت‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر $t$- مقدار اثرات، دو حد $t$ بونفرونی و $t$ استاندارد نیز به ترتیب با خط چین-ها و خطوط ممتد افقی نشان داده شده‌اند. از لحاظ آماری اثراتی که بیش‌تر از این دو حد باشند دارای اهمیت هستند. بالا بودن اثرات اصلی (متناظر با متغیرهای مستقل) و ناچیز بودن اثرات متقابل به وضوح در شکل برای تمامی تیمارهای آب شور و شیرین پیداست (به جز متغیر $D$ در کرت‌های آبیاری شده با آب شور). برای هر دو سطح شوری تاثیرگذارترین متغیر بر میزان محصول، میزان آب آبیاری سنبله‌دهی و گل‌دهی (متغیر $C$) و پس از آن میزان آب آبیاری در مرحله ساقه‌دهی و ظهور برگ پرچمی (متغیر $B$) می‌باشد. این نتیجه با استفاده از رسم اثرات در کاغذ احتمالات نیمه لگاریتمی، حذف اثرات کم اهمیت و تحلیل پراش نیز به دست می‌آید.

**جدول ۳- سناریوهای مختلف بهینه سازی بررسی شده برای کاوش فضای پاسخ**

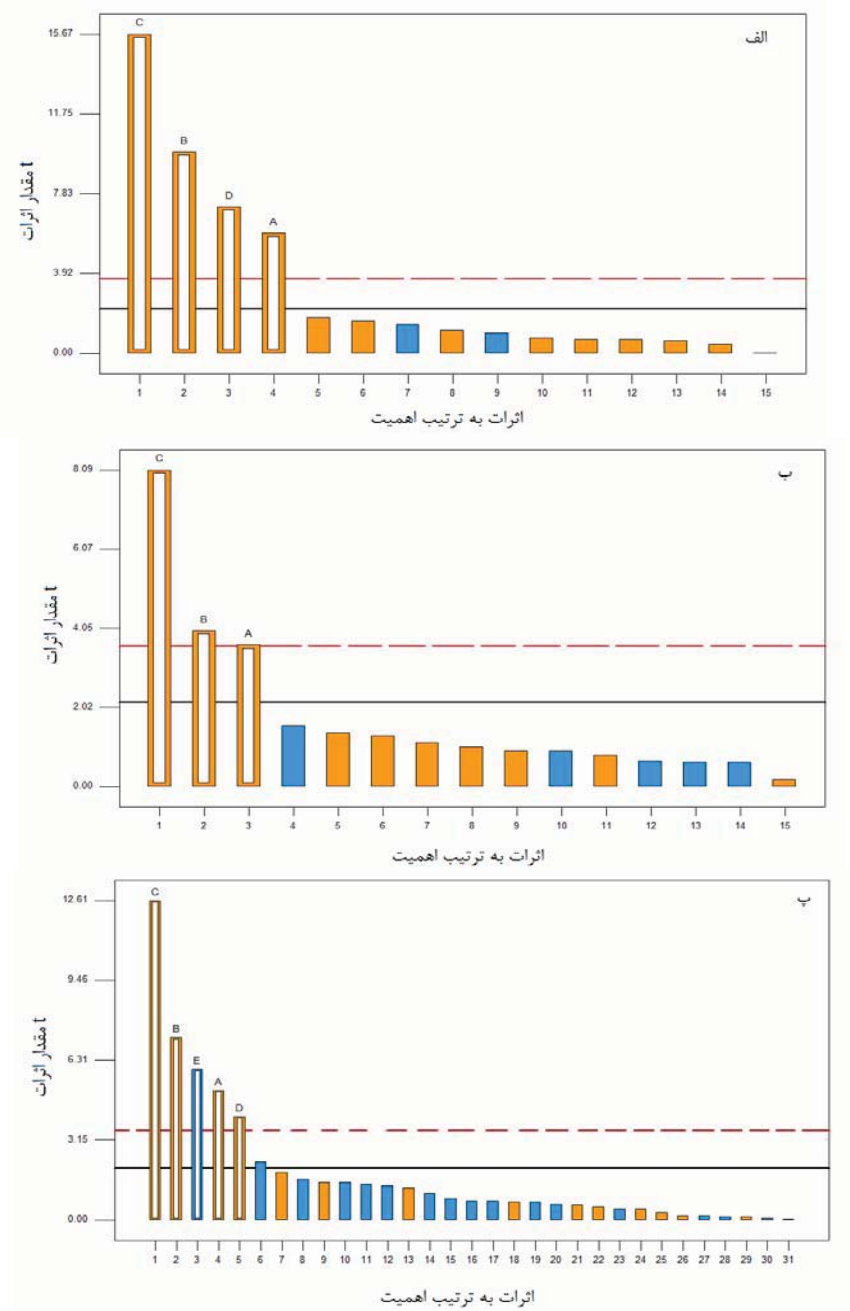
| | عامل | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A* | | B | | C | | D | | E | | Y | |
| سناریو | هدف | $I$ | هدف | $I$ | هدف | $I$ | هدف | $I$ | هدف | $I$ | هدف | I |
| ۱ الف | min** | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | max | ۱ | max | ۵ |
| ۱ ب | | | | | | | | | – | – | | |
| ۲الف | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | max | ۱ | max (۰/۸) | ۵ |
| ۲ب | | | | | | | | | – | – | | |
| ۳ الف | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | max | ۱ | max (۰/۷) | ۵ |
| ۳ ب | | | | | | | | | – | – | | |
| ۴ الف | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | min | ۱ | max | ۱ | max (۰/۶) | ۵ |
| ۴ ب | | | | | | | | | – | – | | |
| ۵ الف | | ۱ | | ۱ | | ۱ | | ۱ | max | ۱ | max | ۵ |
| ۵ ب | min (۰/۷) | | min (۰/۷) | | min (۰/۷) | | min (۰/۷) | | – | – | | |
| ۶ الف | | ۱ | | ۱ | | ۱ | | ۱ | max | ۱ | max | ۵ |
| ۶ ب | min (۰/۸) | | min (۰/۸) | | min (۰/۸) | | min (۰/۸) | | – | – | | |

* A، B، C و D: میزان آب آبیاری در دوره های مختلف رشد مطابق جدول ۱، E: میزان شوری، Y: میزان محصول، I: درجه اهمیت در تابع مطلوبیت

** min و max : به ترتیب نشان دهنده کمینه و بیشینه می باشد و اعداد نشان داده شده در داخل پرانتز حد پایینی مشخص شده برای متغیر مورد نظر را نشان می دهد به عنوان مثال در سناریوی ۲ هدف بیشینه کردن میزان محصول می باشد به شرطی که میزان محصول از ۰/۸ مقدار بیشینه محصول در کرت شاهد کمتر نشود.

حق وردی و همکاران (۱) نشان دادند که اثرات درجه دو و بالاتر در مقایسه با اثرات اصلی، از درجه اهمیت کمتری برخوردارند. از لحاظ فیزیکی این امر نشان می‌دهد که میزان آب آبیاری داده شده به زمین در مراحل مختلف رشد تقریباً مستقل از یکدیگر عمل می‌نمایند و اثر هر یک از آن‌ها بر میزان محصول بسیار بیشتر از اثرات متقابل آن‌ها می‌باشد. یانگ–رن و همکاران (۱۷) بیش‌ترین ضریب حساسیت شوری و کم آبی را برای گندم زمستانه به ترتیب به دوره‌های رشد ظهور برگ پرچمی– سنبله دهی و سنبله دهی– شیری شدن تخصیص دادند که تا حد بسیاری با یافته‌های این پژوهش همخوانی دارد.

در حالتی که کلیه کرت‌هایی که با شوری‌های مختلف آبیاری شدند تلفیق گشتند، امکان برآورد اهمیت شوری به عنوان یک متغیر مستقل فراهم آمد.




**شکل ۱- نمودار پارتو برای تعیین اهمیت اثرات در مقابل t مقدار برای کرت‌های آبیاری شده با آب شیرین (الف)، شور (ب) و تمامی کرت‌ها (پ).**

خط چین‌ها و خطوط ممتد افقی، t بونفرونی و t استاندارد را نشان می‌دهند

شکل ۱ پ به خوبی نشان می‌دهد که سومین متغیر مستقل پر اهمیت در این حالت، میزان شوری آب آبیاری (متغیر $E$) می‌باشد. با این وجود اثر متقابل میزان آب آبیاری در هیچ یک از مراحل رشد (یعنی $A$ تا $D$) با میزان شوری جزو اثرات پر اهمیت قرار نگرفت. این مطلب یافته‌های کیانی و همکاران (۱۱) را تایید می‌کند. آن‌ها در پژوهشی بر روی گندم در منطقه گلستان اثر چهار سطح شوری (۱/۵ dS/m، ۸/۵، ۱۱/۵ و ۱۴/۲) و چهار سطح آبیاری (۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی کرت شاهد) را بر میزان محصول بررسی نمودند و نشان دادند تنش شوری و کم آبی بر میزان محصول تاثیر معنی‌داری دارد اما اثر متقابل آن‌ها از لحاظ آماری بر میزان محصول معنی‌دار نمی‌باشد.

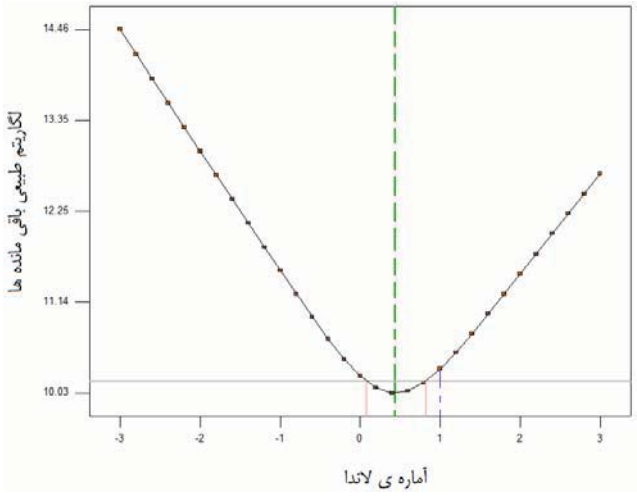
## تابع تولید

رابطه ۷ تابع تولید محصول بدست آمده از تلفیق کرت‌ها در این پژوهش را نشان می‌دهد. دقت شود که تابع رابطه‌ای خطی میان متغیرهای مستقل (میزان آب آبیاری و شوری) و میزان محصول می‌باشد که تبدیل ریشه دوم بر آن اعمال شده است. برای تعیین نوع تبدیل مناسب بر پاسخ (در اینجا میزان محصول) از نمودار باکس-کاکس استفاده شد (شکل ۲). شکل ۲ آماره $\gamma$ را برای تابع تولید برازش داده شده قبل از اعمال تبدیل ریشه دوم بر پاسخ نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل پیداست نقطه کمینه منحنی که بیانگر کمترین میزان مجموع مربعات باقی مانده‌هاست دارای آماره‌ی $\gamma$ برابر با ۰/۴۴ است و نزدیک‌ترین تبدیل به این مقدار تبدیل ریشه دوم می‌باشد که آماره ی $\gamma$ در آن برابر با ۰/۵ است. ضرایب متغیرهای $A$ تا $D$ همخوانی خوبی با اهمیت اثرات متناظر با آن‌ها دارد که در نمودار پارتو نشان داده شد. دلیل منفی بدون ضریب متغیر $E$ اثر کاهشی آن بر میزان محصول می‌باشد و بیش‌تر بودن آن در مقایسه با دیگر ضرایب به دلیل کمی میزان واقعی عددی شوری (بر حسب دسی زیمنس بر متر) نسبت به میزان آب آبیاری (بر حسب لیتر) است. شکل ۳ پراکنش میزان محصول برآورد شده در مقابل میزان واقعی محصول را حول خط ۱:۱ نشان می‌دهد. در شکل ۳ علاوه بر تابع تولید بدست آمده از تلفیق آزمایشات شور و شیرین (رابطه ۷)، توابع تولید مجزای ارائه شده توسط حق وردی و همکارن (۱) برای دو شوری متفاوت آب آبیاری نیز استفاده شد. به طور کلی پراکنش در هر سه حالت بسیار نزدیک به خط ۱:۱ است که دقت قابل قبول توابع استحصالی را نشان می‌دهد. احتمالاً کاهش نقاط آزمایشی به خاطر حذف آزمایشات مرکزی در تابع تولید پژوهش حاضر (رابطه ۷) سبب شده است که توابع مجزای ارائه شده توسط حق وردی و همکاران (۱) پراکنشی نزدیک تر نسبت به خط ۱:۱ داشته باشند. در مقادیر بالای محصول در هر دو تابع تلفیقی و آب شیرین تمایل به کم برآورد دیده می‌شود که به علت تعداد اندک نقاط آزمایشی در مقادیر بالای آب آبیاری گرفتن نتیجه‌ای کلی و قطعی امکان پذیر نمی‌باشد.

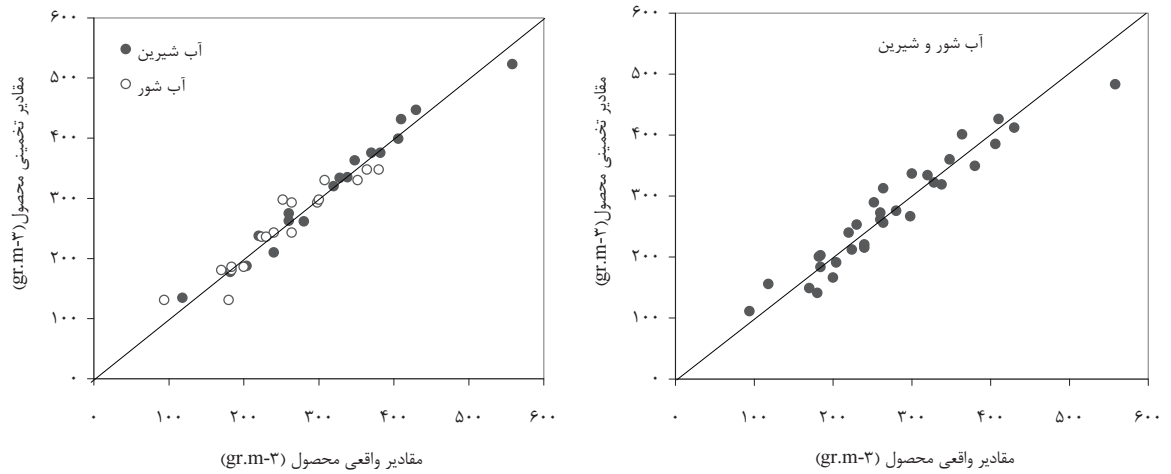
$$\sqrt{Y} = 10.183 + 0.024A + 0.023B + 0.029C + 0.011D - 0.205E \quad (۷)$$

## بهینه‌سازی سناریوها

نتایج بهینه‌سازی برای تمامی سناریوهای موجود (جدول ۳) در جدول ۴ نشان داده شده است. تفاوت در راندمان مصرف آب در در سناریوی ۱ الف و ۱ب اندک و اختلاف در میزان آب آبیاری (۵ درصد) و میزان محصول (۴ درصد) تقریباً یکسان است. با این تفاوت که در سناریوی ۱ الف میزان شوری آب آبیاری ۶/۵ و در سناریوی ۱ب، ۰/۵ دسی زیمنس بر متر (برابر با شوری کرت شاهد) می‌باشد.




**شکل ۲- نمودار باکس-کاکس تبدیل‌های توانی برای تابع تولید اولیه بدون اعمال تبدیل ریشه دوم.** خط چین بزرگ و کوچک عمودی به ترتیب بهترین میزان آماره‌ی $\gamma$ و میزان فعلی آماره‌ی $\gamma$ و خطوط ممتد عمودی کوچک حدود اطمینان ۰/۹۵ برای بهترین آماره‌ی $\gamma$ می‌باشد.




**شکل ۳- پراکنش مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده محصول توسط توابع تولید برای هر دو منبع آب شور و بدون محدودیت شوری**

با وجود اینکه در تابع مطلوبیت بیشینه کردن محصول بالاترین اهمیت و کمینه کردن آب آبیاری و بیشینه کردن شوری کمترین اهمیت را به خود اختصاص داده بودند (جدول ۴ را ببینید) بهینه‌سازی در سناریوی ۱ بیش‌تر در جهت کاهش میزان آب آبیاری عمل نموده است. تعداد بالای متغیرهایی که تمایل به کمینه کردن محصول دارند (۵ عامل) در مقابل تنها یک عامل میزان محصول می‌تواند مهمترین دلیل این مطلب باشد. به نظر می‌رسد بیش‌تر بودن میزان آب آبیاری (هر چند اندک) در قسمت الف (سناریوهایی که شوری آن‌ها بیش‌تر است) نسبت به قسمت ب (سناریوهای ۱، ۲ و ۳) در جهت عکس اثر شوری را کاهش می‌دهد و موجب می‌شود که میزان محصول تفاوت اندکی داشته باشد. سینگ و همکاران (۱۶) در پژوهشی مستقل با یافته‌هایی مشابه عنوان نمودند که افزایش میزان آب آبیاری هنگامی که آب شوری و سدیمی باشد موجب افزایش بهره وری گندم می‌شود. روند تغییرات از سناریوی ۱ تا ۴ مشابه و خطی است به طوری که همگام با کاهش محصول میزان آب آبیاری کاهش و میزان شوری افزایش می‌یابد. مشابه با سناریوی ۱ در سناریوهای ۲ تا ۴ نیز دو به دو زیر سناریوهای مشابه دارای میزان محصول مشابه و آب آبیاری مشابه نیز هستند. تفاوت شوری در قسمت‌های الف و ب در سناریو ۱ در مقایسه با سناریوهای ۲، ۳ و ۴ بالاست. همچنین در کل در زیر سناریوها با کاهش میزان محصول تفاوت شوری‌ها زیاد می‌شود. در پژوهش کیانی و عباسی (۱۱) نیز تاثیر یکسان شوری آب آبیاری (۱/۵ با ۸/۵ دسی زیمنس بر متر) در تیمارهایی که میزان آب آبیاری متفاوتی را دریافت می‌کردند متفاوت بود و به طور کلی با افزایش آب آبیاری از ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به ۱۲۵ درصد نیاز آبی این اختلاف شوری موجب اختلاف‌های بیش‌تری در میزان محصول تولیدی می‌شد و گاهی این افزایش از لحاظ آماری نیز معنی‌دار بود. با این وجود این روند در برخی از تیمارهای در پژوهش آن‌ها متفاوت بود. به نظر می‌رسد افزایش شوری در مقادیر بالای آبیاری در مقایسه با مقادیر پایین منجر به کاهش شدیدتر محصول می‌شود و به همین خاطر به عنوان مثال در فرآیند بهینه‌سازی در سناریوی ۲ الف، پاسخ بهینه‌سازی بسیار نزدیک به قسمت ب است (۰/۹۲) اما در سناریوی ۱ الف شوری آب آبیاری (۶/۵) بالا می‌باشد. این مطلب با توجه به سناریوهای ۵ و ۶ نیز قابل مشاهده است یعنی در جایی که اختلاف شوری بالا در حالتی که تنش آبی خیلی شدید نمی‌باشد موجب کاهش ۱۰ درصدی محصول و ۰/۱۲ اختلاف در راندمان مصرف آب می‌شود. یافته‌های یانگ رن و همکاران (۱۷) به طرزی مشابه تاثیر شوری را بر کاهش عملکرد بر گیاه گندم نشان می‌دهد. تفاوت شوری برابر با ۷ دسی زیمنس در متر (۵ با ۱۲) موجب کاهش ۲۱ درصدی محصول نسبی می‌شود. در پژوهش ما تفاوت شوری ۸ دسی زیمنس (سناریوی ۶) کاهش ۱۱ درصدی محصول نسبی را رقم زد. کاهش بیش‌تر میزان محصول در پژوهش یانگ-رن (۱۷) نسبت به پژوهش حاضر احتمالاً به تفاوت شوری در تیمارهای اعمال شده و واریته گندم مرتبط می‌باشد. با این وجود از منظر دیگر این تفاوت نشان می‌دهد که رابطه کاهش محصول با تغییرات شوری به شدت غیرخطی است و در آزمایشات آتی برای مدل سازی و شناخت فضای آزمایشی بایستی سطوح متنوع تری از شوری آب آبیاری بررسی شود.

نحوی نیا و همکاران (۱۳) در تحقیقی بر روی گندم در منطقه بیرجند نشان دادند که کاهش آب به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی بیش‌ترین راندمان کاربرد آب را موجب می‌شود. این مطلب در پژوهش حاضر مشاهده نشد. این تفاوت به این دلیل است که در پژوهش حاضر بهینه‌سازی بر مبنای محصول پیش‌بینی شده با استفاده از توابع تولید مرتبه اول خطی انجام پذیرفته است. غیرخطی بودن فضای آزمایش و وجود نداشتن تیمارهای آزمایشی در فضای میانی تحقیق (در بهینه سازی در پژوهش حاضر تنها از کرت‌هایی استفاده شد که مقدار آب آبیاری در آن‌ها ۱۰۰ درصد یا ۲۰ درصد نیاز آبی بود) از جمله دلایلی است که این تفاوت را توجیه می‌کند. داتا و همکاران (۸) در پژوهش خود بر پیچیدگی رابطه شوری و میزان آب آبیاری با میزان محصول تاکید نمودند.

جدول ٤- نتایج بهینه سازی میزان آب آبیاری، شوری و محصول

| سناریو | A | B | C | D | E | *کاهش آب آبیاری (٪) | میزان محصول ($gr.m^{-2}$) | کاهش محصول (٪) | WUE ($kg.ha^{-1}.mm^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ الف | ۳۶/۵۴ | ۷۴/۷۸ | ۱۳۲/۳۱ | ۳۹/۶۵ | ۶/۵۰ | ۴۷ | ۲۵۰/۸۸ | ۵۵ | ۶/۲۲ |
| ۱ ب | ۳۰/۶۱ | ۶۹/۰۶ | ۱۲۷/۳۳ | ۳۰/۰۰ | ۰/۵۰ | ۵۲ | ۲۷۳/۵۲ | ۵۱ | ۷/۲۵ |
| ۲الف | ۸۴/۴۳ | ۱۲۴/۳۰ | ۱۷۰/۶۴ | ۱۴۰/۴۹ | ۰/۹۲ | ۳ | ۴۶۴/۵۸ | ۱۷ | ۷/۲۶ |
| ۲ب | ۸۳/۹۹ | ۱۲۳/۸۹ | ۱۷۰/۳۶ | ۱۳۹/۷۶ | ۰/۵۰ | ۴ | ۴۶۶/۶۹ | ۱۶ | ۷/۳۱ |
| ۳ الف | ۷۸/۶۴ | ۱۱۸/۳۱ | ۱۶۶/۰۱ | ۱۲۸/۳۴ | ۱/۵۹ | ۹ | ۴۳۵/۳۲ | ۲۲ | ۷/۱۲ |
| ۳ ب | ۷۷/۵۸ | ۱۱۷/۲۳ | ۱۶۵/۱۹ | ۱۲۶/۱۳ | ۰/۵۰ | ۱۰ | ۴۴۰/۴۹ | ۲۱ | ۷/۲۶ |
| ۴ الف | ۷۲/۴۷ | ۱۱۱/۹۵ | ۱۶۱/۰۴ | ۱۱۵/۳۶ | ۲/۳۱ | ۱۴ | ۴۰۵/۱۱ | ۲۷ | ۶/۹۷ |
| ۴ ب | ۷۰/۷۶ | ۱۱۰/۱۶ | ۱۵۹/۶۸ | ۱۱۱/۶۰ | ۰/۵۰ | ۱۶ | ۴۱۳/۴۳ | ۲۶ | ۷/۲۲ |
| ۵ الف | ۶۱/۶ | ۸۹/۶۰ | ۱۲۲/۹۱ | ۱۰۳/۶۰ | ۷/۸۳ | ۳۰ | ۲۸۷/۳۵ | ۴۹ | ۵/۷۷ |
| ۵ ب | ۶۱/۶ | ۸۹/۶۰ | ۱۲۱/۴۵ | ۱۰۳/۶۱ | ۰/۵۲ | ۳۰ | ۳۳۸/۸۳ | ۳۹ | ۶/۸۲ |
| ۶ الف | ۷۰/۴ | ۱۰۲/۴ | ۱۳۸/۹۵ | ۱۱۸/۴۰ | ۸/۶۷ | ۲۰ | ۳۲۱/۴۷ | ۴۲ | ۵/۸۴ |
| ۶ ب | ۷۰/۴۳ | ۱۰۲/۴ | ۱۳۸/۸۰ | ۱۱۹/۰۹ | ۰/۶۲ | ۲۰ | ۳۸۵/۵۱ | ۳۱ | ۶/۹۶ |

*: کاهش میزان آب آبیاری و میزان محصول نسبت به کرت شاهد محاسبه شده است.

دقت شود که هدف از مرحله یک روش رویه پاسخ نه دستیابی به مدل‌هایی کاملاً دقیق و نه به دست دادن تحلیلی کاملاً صحیح از بهترین گزینه‌های مدیریتی تنش آبی و شوری به منظور دستیابی به حداکثر محصول بلکه کاوش نسبی فضای آزمایشی به منظور طرح ریزی آزمایشات بعدی در منطقه‌ای مناسب از فضای پاسخ می‌باشد. با این وجود با توجه به تغییرات WUE در سناریوهای مختلف و تغییرات میزان آب آبیاری و محصول می توان چنین عنوان نمود که بررسی نقاط بیش‌تر آزمایشی بویژه در مناطقی که WUE بالاتری داشتند ضروری می باشد. پایین‌تر بودن میزان راندمان مصرف آب در مقادیر بالای کاهش میزان آب آبیاری (مقادیر نزدیک به تیمار ۰/۲) نشان داد که فضای آزمایشاتی که منجر به مقادیر بهینه آبیاری و میزان محصول خواهند شد در نیمه بالایی (آب آبیاری بیش‌تر از ۵۰ درصد آبیاری کامل) قرار دارد و بایستی تاکید آزمایشات آتی بر این قسمت باشد.

## نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مرحله یک مطالعات رویه پاسخ روشی مناسب جهت تحلیل تنش‌های کم آبی و شوری به منظور پی‌ریزی آزمایشات آتی می‌باشد. همچنین مجموع اطلاعات مفید دریافتی، ارائه تابع تولید مناسب و انجام موفق بهینه‌سازی نشان داد که مدل‌های مرتبه اول برای کاوش کلی فضای آزمایش مناسب می‌باشد. با این وجود پیچیدگی زیاد رابطه تنش‌های توامان شوری و کم آبی در میزان محصول اثبات کرد که برای برآورد دقیق نحوه تاثیر این تنش‌ها و مدل‌سازی فضای پاسخ نیاز به مدل‌هایی پیچیده‌تر و غیرخطی می‌باشد. ذکر این نکته ضروریست که مدل‌سازی رفتار غیر خطی فرایند مورد مطالعه، هدف مرحله ۲ یا همان مرحله نهایی در روش رویه پاسخ می‌باشد که طرح ریزی آزمایشات برای انجام آن با استفاده از نتایج به‌دست آمده در مراحل صفر و ۱ صورت می‌پذیرد. نمودار پارتو نشان داد که اندرکنش شوری و کم آبی در مقابل با تاثیر جداگانه هر یک بر میزان محصول دارای اهمیت نمی‌باشد. همچنین در این نمودار نشان داده شده است که اثرات متقابل چند عاملی در مقابل اثرات اصلی بی‌اهمیت می‌باشند و لذا در آزمایشات آتی بایستی بر اثرات مرتبه اول تاکید شود. اهمیت اثرات اصلی و در عین حال متفاوت بودن میزان تاثیر هر یک بر محصول به خوبی اهمیت بررسی و مدل‌سازی تنش‌های آبی متغیر بر اساس مراحل مختلف رشد گیاه را نشان می‌دهد و در عین حال اثبات می‌کند که فرض تاثیر یکنواخت تنش آبی در تمامی طول دوره رشد فرضی غیرمنطقی و بسیار ساده انگارانه است. بنابراین امکان مدل‌سازی دقیق فضای آزمایشی با اعمال تنها تنش‌های یکنواخت در کل فصل رشد وجود ندارد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نیز نشان داد که بایستی آزمایشات آتی با تکیه بیش‌تر بر فضای درونی آزمایش (مقادیر آب آبیاری بین تیمارهای موجود یعنی منطبق بر نیاز آبی و ۰/۲ نیاز آبی) طرح ریزی شود. اثر غیرخطی و مهم شوری که در بهینه‌سازی به اثبات رسید نیز لزوم درنظر گرفتن منابع با شوری‌های متنوع‌تر را برای مدل‌سازی دقیق آشکار می‌نماید.

## منابع


۱- حق وردی ا.، قهرمان ب.، کافی م. و داوری ک. ۱۳۹۰ تحلیل آزمایش‌های گزینش شوری- کم آبیاری برای گندم بهاره در منطقه مشهد. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، آب و خاک ۵۸ (۴): ۱-۱۰.

۲- علیزاده ح.ع.، نظری ب.، پارسی نژاد م.، رمضانی اعتدالی ه. و جانباز ح.ر. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ۲ (۴): ۲۸۳-۲۷۳.

۳- نحوی نیا م.ج.، شهیدی ع.، پارسی نژاد م. و کریمی ب. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل SWAP در تخمین محصول گندم در شرایط کم آبیاری و شوری در منطقه بیرجند. مجله پژوهش آب ایران. ۴ (۶): ۵۸-۳۴.

4- Assef Y., Du J., and Staggenborg S. 2011. Application of Response Surface Designs in Agricultural Research. ASA, CSSA, SSSA international annual meetings 16-19 Oct, Sa Antonio, TX available in : http://a-c-s.confex.com/crops/2011am/ webprogram/ Paper 64871.html.

5- Bastiaanssen W.G.M., Allen R.G., Droogers P., D'Urso G., and Steduto P. 2007. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. Agricultural Water Management 92: 111 – 125.

6- Confalonieri R., Acutis M., Bellocchi G. 2009 Donatelli M., Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. Ecological Modelling 220(11): 1395-1410.

7- Dalvia V.B., Tiwarib K.N., Pawadea M.N., and Phirke P.S. 1999. Response surface analysis of tomato production under microirrigation. Agricultural Water Management 41: 11-19.

8- 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.

9- Dhungana P., Eskridge K.M., Weiss A., and Baenziger P.S. 2006. Designing crop technology for a future climate: An example using response surface methodology and the CERES-Wheat model. Agricultural Systems. 87: 63–79

10- Du T., Kang S., Sun J., Zhang X., and Zhang J. 2010. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China. Agricultural Water Management 97:66–74.

11- Kiani 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.

12- Lesch S.M. 2005 Sensor-directed response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties. Computers and Electronics in Agriculture 46: 153–179.

13- Myers R.H., Montgomery D.C., and Anderson-Cook C.M. 2009. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 3rd Edition. John Wiley & Sons, NewYork. pp: 704.

14- Neumann A., Werner J., and Rauber R. 2009. Evaluation of yield–density relationships and optimization of intercrop compositions of field-grown pea–oat intercrops using the replacement series and the response surface design. Field Crops Research 114: 286–294.

15- Rubinstein D., and Upadhyaya S.K. 2001. In situ determination of engineering properties of soil. Journal of Agriculture Engineering Research. 78(2): 199-207.

16- Singh R.B., Chauhan C.P.S., 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.

17- Yang-Ren W., Shao-Zhong K., Fu-sheng L., Lu Z., and Jian-Hua Z. 2007. Saline water irrigation scheduling through a crop-water-aalinity production function and a soil-water-salinity dynamic model. Pedosphere. 17(3): 303-317.

18- Zadoks J.C., Chang T.T., and Konzak C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research. 14:415-421.

Journal of Water and Soil
Vol. 26, No. 6, Jan.-Feb. 2013, p. 1384-1394

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۶، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۳۹۱، ص. ۱۳۹۴-۱۳۸۴

# Application of Phase I Response Surface Methodology in Agricultural Studies: Optimization of Water and Salinity Stresses for Spring Wheat

**A. Haghverdi[1*]- B. Ghahraman[2]- K. Davari[3]- M. Kafi[4]**

Received: 3-8-2011
Accepted: 18-11-2012

## Abstract

In recent years lots of studies have been done about modeling water scarcity and salinity stresses and analysis of their effects on different characteristics of agricultural crops. The aims of this study is to use phase I of response surface methodology for analysis of water scarcity and salinity stresses in different growth stages of spring wheat in Mashhad region for achieving the highest amount of yield. The experiment was carried out in the Research Field of Agricultural Faculty of Ferdowsi University of Mashhad in 2009-2010. The experiment was factorial $2^5$: four variables consist to irrigation water requirement in different growth stages, which two levels were 20 and 100 % of water requirement, and one variable to water salinity, which two levels were 0.5 and 10 dS/m. The result showed that all of the variables have great, but different, effect on yield. The interaction effect of irrigation water and salinity on grain yield was negligible. The water use efficiency (WUE) in different optimization scenarios varied between 5.84 - 7.31 $kg.h^{-1}.m^{-1}$. The results of optimization revealed the necessity of considering non linear models and planning the further experiments in internal levels of variables in current study, 20 and 100% of water requirement, and inclines towards to upper half, the tensions less that 50 %. Also the non linear and important effect of salinity demonstrates more details of this tension should be considered in further studies.

**Keywords:** Box-Cox chart, Desirability function, Deficit irrigation, Pareto chart, Production function

1,2,3- Former PhD Student, Professor and Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(*- Correspondence Author Email: amirhaghverdii@gmail.com)
4- Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad