بهینه سازی مصرف آب و عملکرد گندم زمستانه در شرایط تنش شوری و خشکی با استفاده از مدل SWAP (مطالعه موردی: شهرستان برخوار)

مسعود محمدی[۱]*، بیژن قهرمان، کامران داوری، مجید وظیفه دوست و حمیده نوری

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ **Mmohammadi_64@yahoo.com**

استاد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ **bijangh@um.ac.ir**

دانشیار آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ **k.davary@gmail.com**

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان؛ **majidvazifedoust@asmerc.ac.ir**

استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران؛ **hnoory@alumni.ut.ac.ir**

چکیده

انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور تعیین مقدار بهینه آب مصرفی برای تولید حداکثر محصول، وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. به همین منظور در این تحقیق مدل اگرو هیدرولوژیکی SWAP 3.03 در برآورد عملکرد گندم زمستانه تحت شرایط کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت و تابع بهینه تولید آب- شوری- عملکرد برای گندم تعیین شد. در این تحقیق سه سطح آبیاری با عمق‌های W_1=۸۰، W_2=۱۰۰ و W_3=۱۲۰ میلیمتر و چهار سطح شوری S_1=۰/۸، S_2=۲، S_3=۴ و S_4=۶ دسی‌زیمنس بر متر برای شش مقدار تخلیه مجاز رطوبت خاک (M_1=۰/۳، M_2=۰/۴، M_3=۰/۵، M_4=۰/۶، M_5=۰/۷ و M_6=۰/۸) در نظر گرفته شد. مقادیر عملکرد و کارآیی مصرف آب در حالت‌های مختلف محاسبه گردید و بهترین مقدار برای تخلیه مجاز رطوبت خاک برابر با ۵/۰ بدست آمد. سپس داده-های عملکرد بر شکل‌های مختلف توابع تولید (خطی ساده، خطی لگاریتمی، درجه دوم و نمایی) برازش داده شد و تابع بهینه تولید گندم تعیین گردید. بیشترین و کمترین محصول بترتیب با ۶۶۱۹ و ۲۰۴۸ کیلوگرم در هکتار مربوط به تیمار آبیاری $W_1S_1M_2$ و تیمار آبیاری $W_1S_4M_6$ بود. نتایج نشان داد که تابع تولید درجه دوم برای گندم به عنوان تابع بهینه تولید، قابل توصیه می‌باشد. بررسی مقادیر حداکثر خطا (ME) نشان می‌دهند که بیشترین خطا مربوط به توابع خطی لگاریتمی و خطی ساده می‌باشد. تیمارهای آبیاری $W_1S_1M_3$ و $W_1S_1M_4$ با ۰/۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب پر بازده-ترین سطوح آبیاری بودند، اما با افزایش تنش خشکی و شوری بهره‌وری آب کاهش می‌یابد. منحنی‌های هم محصول نشان می‌دهند که با افزایش میزان آبیاری، می‌توان از آب آبیاری با شوری بالاتری در آبیاری گندم استفاده نمود، به نحوی که عملکرد نیز تغییر نکند.

واژه های کلیدی: تابع تولید، تخلیه مجاز رطوبت، کارایی مصرف آب، منحنی هم- محصول

مقدمه

در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب با کاهش کیفیت آب از نظر شوری همراه می‌باشد. با توجه به محدودیت کمی و کیفی منابع آب و نیاز روزافزون به تولید بیشتر مواد غذایی، اهمیت بهره‌برداری

---

[۱] آدرس نویسنده مسؤول: مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب

* دریافت: اسفند، ۱۳۹۰ و پذیرش: اردیبهشت، ۱۳۹۲

بهینه از این منابع نمایان خواهد شد. شوری و کمبود آب از محدودیت‌های عمده تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند.

کمی و کیفی منابع آب و نیاز روزافزون به تولید بیشتر مواد غذایی، اهمیت بهره‌برداری بهینه از این منابع نمایان خواهد شد. شوری و کمبود آب از محدودیت‌های عمده تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه-خشک هستند. در این مناطق گیاهان بر حسب کمیت و کیفیت آب، ممکن است تحت تأثیر همزمان تنش های شوری و خشکی قرار گیرند. با توجه به محدودیت‌های تولید در این مناطق، بهینه‌سازی عمق آب آبیاری محصولات از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بهینه‌سازی عمق آب آبیاری در شرایط مختلف کمبود آب، کمبود زمین، شوری آب و یا ترکیبی از این حالات، متفاوت بوده، اما هدف اصلی حداکثر کردن سود خالص می‌باشد. توابع تولید محصول یکی از مهمترین عوامل مورد نیاز در بهینه-سازی عمق آب آبیاری می‌باشد. علاوه بر تابع تولید، هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت فروش محصول و مقدار آب و زمین، از دیگر عوامل مؤثر در بهینه‌سازی عمق آب آبیاری می‌باشد (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵).

توابع تولید محصول، رابطه کمی ریاضی بین عملکرد محصول و عوامل تولید بوده که در واقع نرخ تبدیل عوامل تولید به عملکرد را مشخص می‌کند. این توابع عموماً برحسب حداقل عوامل که متغیر و در عین حال تحت کنترل هستند، برآورد می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقدار آب آبیاری و شوری آن از تأثیرگذارترین عوامل بر تولید می‌باشد. در همین زمینه لی و همکاران (۲۰۰۵) جهت بهینه سازی مصرف آب برای گندم، توابع درجه دوم را بین عملکرد دانه و تبخیروتعرق و همچنین بین عملکرد دانه و بازده مصرف آب معرفی نمودند. محمدی و همکاران (۱۳۸۹) تابع درجه دوم را برای گوجه فرنگی به عنوان نابع تولید بهینه آب–شوری–عملکرد معرفی کردند. سپاسخواه و اکبری (۲۰۰۵) توابع درجه دوم را برای رابطه بین عملکرد و آب کاربردی پنبه و گندم معرفی نمودند.

کم‌آبی و شوری آب آبیاری در کشور همواره مشکلاتی را برای کشاورزان و حتی کارشناسان ایجاد نموده است. مطالعات مزرعه‌ای و صحرایی معمولاً اثرات بلندمدت مدیریت‌های مختلف آبیاری بر عملکرد محصول و شوری خاک را در نظر نمی‌گیرند. گزینه‌های مدیریتی که به وسیله مطالعات صحرایی بررسی می‌شوند به دلیل زمان‌بر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌گردند (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۷) استفاده از مدل‌های شبیه-سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و این مدل‌ها ابزار توانایی در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب به خصوص در شرایط کمبود منابع آب هستند (وندام و همکاران، ۲۰۰۸).دقت نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی به دقت داده‌های مورد نیاز بستگی دارد و در صورت دسترسی به این داده‌ها، این مدل‌ها می-توانند بدون محدودیت‌های مکانی و زمانی موجود در تحقیقات صحرایی و صرف هزینه و زمان کمتر جهت ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات درازمدت این مدیریت‌ها به کار گرفته شوند (منصوری و مصطفی زاده، ۱۳۸۵ و سینگ، ۲۰۰٤). در چند دهه گذشته مدل‌های آگروهیدرولوژیکی متعددی از جمله مدل SWAP به منظور شبیه‌سازی رشد گیاه و حرکت آب و نمک در خاک تدوین شده است (کرس و وندام، ۲۰۰۳). مدل SWAP در مناطق مختلف جهان از جمله ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج مطلوبی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های صحرایی داشته است. خانی و همکاران (۱۳۸٦) به منظور ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندر قند تحت شرایط کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری آزمایشی در استان خراسان رضوی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که روند کلی تغییرات عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل در مقادیر مختلف آب آبیاری بر روند تغییرات عملکرد به دست آمده در مزرعه کاملاً مطابقت دارد. ضریب همبستگی R^2 بین عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل و عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه ۰/۸۳ به دست

آمد که از لحاظ آماری معنی‌دار بود. کیانی (۱۳۸٦) با استفاده از مدل SWAP انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم را برای دو سال شبیه‌سازی و بیان کرد که مدل فوق در شرایط مزرعه‌ای، مقدار رطوبت، شوری خاک و عملکرد نسبی گندم را با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند. سینگ (۲۰۰٤) مدل SWAP را برای منطقه‌ای نیمه‌خشک در شمال غرب هند، برای مدیریت آبیاری با آب شور در کشت متناوب گندم و پنبه بکار برد. نتایج او نشان داد که مدل قابلیت پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط توأم شوری، رژیم‌های مختلف آبیاری و کشت متناوب را دارد. نوری و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل SWAP، عملکرد گندم و ذرت علوفه‌ای را در شرایط توام آبیاری و شوری در منطقه وشمگیر برآورد نمودند. آنها گزارش کردند که تطابق مناسبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل SWAP و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.

وظیفه دوست و همکاران (۲۰۰۷) مدل SWAP را برای شبیه‌سازی مقادیر بیلان آبی مانند تعرق، تبخیر از خاک، نفوذ عمقی و پیش‌بینی عملکرد چهار محصول چغندرقند، گندم، آفتابگردان و ذرت علوفه‌ای مورد ارزیابی و واسنجی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که شبیه‌سازی عملکرد تولید محصول به پارامترهای شاخص سطح برگ ویژه، راندمان مصرف نور و سرعت بیشینه جذب دی اکسید کربن نسبتاً حساس است و مدل با دقت قابل ملاحظه‌ای می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد محصول و رطوبت خاک استفاده شود. وظیفه دوست و همکاران (۱۳۸۷) مدیریت‌های مختلف آبیاری (کم‌آبیاری و دور آبیاری مختلف) را بدون در نظر گرفتن اثر شوری آب آبیاری در منطقه برخوار با استفاده از مدل SWAPانجام دادند. آنها گزارش کردند که کاهش دور آبیاری و کم‌آبیاری به میزان چشمگیری کارایی مصرف آب آبیاری را افزایش داد.

بررسی سابقه بکارگیری مدل SWAP نشان داده است که مدل برای شبیه‌سازی عملکرد تولید محصول در شرایط مختلف از قابلیت مطلوبی برخوردار است. ارزیابی توانایی مدل در برآورد عملکرد تولید محصول در شرایط توام محدودیت آب و شوری به عنوان یکی از شرایط معمول و متداول در بسیاری از اراضی فاریاب ایران از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از طرفی آبهای مورد استفاده در بسیاری از اراضی زراعی ایران شور و لب‌شور هستند و انجام آبیاری و کم‌آبیاری با اینگونه آبها می‌تواند باعث کاهش محصول گردد. بنابراین بهینه‌سازی مصرف آب در این شرایط برای برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری، ضروری است. با توجه با این که وظیفه دوست و همکاران (۱۳۸۷) مدل SWAP را تحت مدیریت کم-آبیاری و بدون در نظر گرفتن شوری آب آبیاری در منطقه برخوار ارزیابی کردند، این تحقیق با هدف مدیریت‌های مختلف آبیاری در شرایط همزمان شوری و خشکی بر عملکرد گندم زمستانه و بهینه‌سازی مصرف آب تحت این شرایط با استفاده از مدل SWAP در منطقه برخوار اصفهان انجام شده است.

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان برخوار در موقعیت جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ٤۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۷۱ متر می‌باشد. شبکه آبیاری برخوار در شمال شهر اصفهان و در حوضه آبریز زاینده رود واقع است. منطقه برخوار اصفهان دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک می‌باشد و در مساحتی بالغ بر ۸۳۳۰۰ هکتار قرارگرفته که ۲٤ درصد این منطقه تحت کشت است. مساحت تحت کانال‌های آبیاری در حدود ۳٦۰۰۰ هکتار است که به دلیل کمبود آب در حدود ۱۸۰۰۰ هکتار به صورت دیم رها می‌شود (وظیفه دوست و همکاران، ۱۳۸۷).

مدل اگروهیدرولوژیکی SWAP

مدل SWAP یک مدل اگروهیدرولوژیکی بر پایه ارتباط فیزیکی بین پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه می‌باشد. SWAP مدل یک بعدی شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک است. این مدل برای شبیه‌سازی تولید

محصول بسیار انعطاف‌پذیر بوده و شامل گزینه‌های مختلف است. در این مدل حرکت آب براساس معادله ریچاردز شبیه‌سازی می‌شود و مدل قادر به پیش‌بینی رژیم شوری خاک در شرایط مدیریتی مختلف می‌باشد. با استفاده از معادله ریچاردز و محاسبه آب جذب شده توسط ریشه گیاه، مقدار محصول تحت تنش‌های آبی و شوری برآورد می‌شود. شرایط مرزی در سطح خاک توسط مولفه‌های تبخیر و تعرق پتانسیل، آبیاری و باران تعیین می‌گردد. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه و براساس روش استاندارد فائو پنمن مانتیث محاسبه می‌شود. همچنین مدل به طور مستقیم قابلیت پذیرش مقادیر تیخیر و تعرق گیاه مرجع را دارد. گزینه‌های مختلفی در مدل برای در نظر گرفتن شرایط مرزی پایین وجود دارد که مهمترین آنها شامل عمق سطح ایستابی، زهکشی آزاد، جریان عمودی صفر، رابطه جریان عمودی و سطح ایستابی است. محاسبات کنترل سطح ایستابی و جریان زهکشی در مدل براساس روش‌های زهکشی پایه[1] شامل زوج داده‌های سطح ایستابی و جریان زهکشی، فرمول‌های زهکشی(هوخهات و ارنست)، زهکشی چند عمقی[2] براساس مفهوم مقاومت زهکشی است. توصیف و تشریح کامل اجزای مختلف مدل SWAP در راهنمای مدل آمده است (کرس و وندام، ۲۰۰۳). در این مقاله همه داده-های مورد نیاز برای مدل SWAP از وظیفه دوست (۲۰۰۷) گرفته شده است. وظیفه دوست (۲۰۰۷) این مدل را برای منطقه برخوار اصفهان واسنجی کرده است.

جمع‌آوری داده از مزارع منطقه آبیاری برخوار

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای برای گندم در طول فصل زمستان در منطقه برخوار اصفهان انجام شده است. در طول سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ پارامترهای آب، خاک و گیاه از مزرعه گندم واقع در امتداد کانال اصلی بل در شمال برخوار، جمع‌آوری گردیده است. مدیریت سنتی و کمبود آب از جمله عوامل محدودیت در فراهم آوردن بستر مناسب توسعه در این بخش از برخوار می‌باشد. بافت خاک اغلب رس سیلتی بوده و دارای یک لایه سخت در پایین منطقه توسعه ریشه می‌باشد. چگالی ظاهری خاک‌ها از ۱/۳۵ تا ۱/٤٦ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک‌های با بافت سنگین و از ۱/٤۸ تا ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک‌های سبک متغیر است. آب زیرزمینی بسیار عمیق و سطح شوری آن در مزارع نسبتا کم می‌باشد ($<۲ dSm^{-1}$).

داده‌های ورودی در مدل SWAP

مرز بالایی

داده‌های آب و هوایی شامل حداقل و حداکثر دمای هوا، رطوبت نسبی و فشار بخار هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد و میزان بارندگی از سه ایستگاه سینوپتیک در اطراف و داخل منطقه برخوار: شرق اصفهان، مورچه خورت و میمه استفاده شد. از آنجایی که داده‌های جمع-آوری شده از ایستگاه‌های غیر کشاورزی بود، داده‌های دما و رطوبت با استفاده از ضرایب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ اصلاح گردید. مقادیر تشعشع نیز با استفاده از آمار ساعات آفتابی ثبت شده و معادله آنگستروم محاسبه گردید (آنگستروم، ۱۹۲٤).

عملیات آبیاری و خصوصیات هیدرولیکی خاک

اجزای محاسبه شده بیلان آب با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بسیار حساس به میزان آب آبیاری بکار گرفته شده و خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها می-باشند (جی هورار، ۲۰۰۲). در طول اندازه‌گیری‌ها، کیفیت آب و تاریخ‌های آبیاری ثبت شدند. عمق‌های آبیاری در منطقه برخوار بسیار متغیر بودند و بنابراین اندازه‌گیری آنها بسیار دشوار بود. عمق آبیاری به کار گرفته شده برای یک بار با استفاده از حاصل ضرب دبی آب و زمان آبیاری و تقسیم آنها بر مساحت مزرعه محاسبه گردید. هر چند که به دلیل مشکلات در اندازه‌گیری حجم آب به کار رفته، عمق تخمینی آب آبیاری نمی‌تواند معرف عمق آب آبیاری باشد، بنابراین عمق آب آبیاری نیز با استفاده از تکنیک مدل‌سازی معکوس محاسبه گردید. از پارامترهای مربوط به خصوصیات هیدرولیکی خاک، درصد رطوبت اشباع

1. Basic drainage
2. Multi-level drainage

خاک ($\theta_{sat}(cm^3cm^{-3})$ و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat} (cm d^{-}[1]) دارای معنی فیزیکی هستند، که در مزارع انتخابی اندازه‌گیری شدند. متغیرهای رطوبت باقیمانده ($\theta_{res}(cm^3cm^{-3})$ و پارامتر λ حساسیت کمی به تغییرات مکش خاک‌ها نشان می‌دهند و از توابع انتقالی[1] تخمین زده شدند (وستن و همکاران، ۱۹۹۸). دو پارامتر هیدرولیکی (α (cm^{-1}) و n با استفاده از روش بهینه‌سازی به دست آمدند. برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک و عمق آب آبیاری یک روش غیر خطی تخمین پارامتر به نام PEST[2] (دورتی و همکاران، ۱۹۹۵) به مدل SWAP لینک گردید. در این مطالعه مدل با یک تخمین اولیه از پارامترها اجرا گردید و نتایج مدل با مشاهدات مقایسه گردید. PEST پارامترهای انتخابی را تصحیح کرده و دوباره مدل را اجرا می‌کند. مراحل اصلاح پارامترها تا زمانی که تفاوت بین نتایج مدل و مشاهدات و یا کل تکرارها به یک حد خاصی برسد ادامه می‌یابد. یک تابع هدف برای کمی کردن تفاوتها بین مدل و مشاهدات به صورت زیر تعریف گردید:

(۱)

$$O(b) = \sum_{i=1}^{N} (\theta_{obs}(t_i) - \theta_{sim}(b,t_i))^2$$

که $\theta_{obs}(t_i)$ رطوبت خاک مشاهده شده در زمان t_i، N تعداد کل مشاهدات و$\theta_{sim}(b,t_i)$ مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از آرایه با پارامترهای b است. نقش معادله معکوس پیدا کردن یک ترکیب بهینه از پارامترهایی است که تابع هدف را به حداقل می‌رساند. به منظور کاهش تعداد پارامترها عمق آبیاری‌ها ثابت در نظرگرفته شد. این فرض یک فرض قابل قبولی در منطقه برخوار بود چرا که در منطقه آبیاری‌های سنگین و سنتی صورت می‌گیرد. بنابراین با در نظرگیری دو لایه خاک تعداد کل پارامترهایی که باید بهینه شوند به ۵ پارامتر محدود گردید. رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در عمق‌های مختلف به عنوان داده‌های مشاهداتی رطوبت مورد استفاده قرار گرفتند. رطوبت خاک به صورت مستقیم و هفتگی از اعماق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتیمتر اندازه‌گیری شدند. داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک به دو دسته تقسیم شدند: دسته اول برای واسنجی مدل (تعداد مشاهدات ۲۸ و RMSE محاسبه شده برابر با ۰۲/۰) و دسته دوم برای اعتبارسنجی پارامترهای بهینه شده (تعداد مشاهدات ۲۰ و RMSE محاسبه شده برابر با ۰۳۹/۰).

پارامترهای گیاهی

پارامترهای گیاهی در مدل SWAP به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌گردند: ارتفاع گیاه، عمق ریشه، شاخص سطح برگ، همانندسازی دی اکسید کربن، تقسیم بندی وزن خشک به اجزای گیاهی و میزان آب مصرفی گیاه. بخشی از پارامترهای گیاهی می‌تواند تعدیل شوند و با استفاده از بررسی منابع تعیین گردند (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۵). در طول فصل زراعی ۸۴-۱۳۸۳ پارامترهای گیاهی از قبیل تعداد بوته در واحد سطح، شاخص سطح برگ، وزن خشک اندام‌های گیاهی و عمق ریشه در مزارع انتخابی اندازه‌گیری شد. برای پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری نبودند طیفی از مقادیر قابل قبول براساس تجربه و بررسی منابع در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی میزان تولید ماده خشک در SWAP نسبتا حساس به پارامترهای گیاهی از قبیل حداکثر میزان همانند سازی دی اکسید کربن (A_{max})، راندمان مصرف نور خورشید (ε) و سطح ویژه برگ (S_{la}) می‌باشند (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۵). این پارامترها پس از واسنجی خصوصیات هیدرولیکی خاک و عمق آبیاری به صورت دستی تخمین زده شدند. پارامترهای گیاهی مورد استفاده در شبیه‌سازی محصول گندم در جدول ۱ آورده شده است

در این مطالعه به منظور افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب در منطقه مورد نظر، سناریوهای زیر برای دستیابی به بهترین مدیریت آب آبیاری در مقایسه با شرایط فعلی در نظر گرفته شد:

---

1. Pedotransfer Functions
2. Parameter ESTmation (PEST)

جدول ۱- پارامترهای گیاهی مورد استفاده در شبیه‌سازی محصول گندم

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
دمای تجمعی از مرحله سبزینگی تا گلدهی (°C)TSUMEA	۱۳۰۰	ضریب جذب نور K_{gr}	۳۷/۰
دمای تجمعی از مرحله گلدهی تا رسیدگی (°C)TSUMAM	۷۵۰	راندمان مصرف نور ($kg\ ha^{-1}hr^{-1}/Jm^2s^{-1}$)	۴/۰
سطح ویژه برگ S_{la}	۰۰۱۷/۰	حداکثر میزان همانندسازی دی اکسید کربن (A_{max} $kg\ ha^{-1}hr^{-1}$)	۴۳
حداکثر افزایش نسبی در سطح برگ ($m^2m^{-2}d^{-1}$)	۰۰۸/۰		

این مطالعه به منظور افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب در منطقه مورد نظر، سناریوهای زیر برای دستیابی به بهترین مدیریت آب آبیاری در مقایسه با شرایط فعلی در نظر گرفته شد:

در این سناریو سه سطح آبیاری با عمق‌های ۸۰ =W_1، ۱۰۰ =W_2 و ۱۲۰ =W_3 میلی متر و چهار سطح شوری ۰/۸ =S_1، ۲ =S_2، ٤ =S_3 و ٦ =S_4 دسی‌زیمنس بر متر برای شش حالت مختلف مدیریت آبیاری MAD (۰/۳ =M_1، ۰/٤ =M_2، ۰/٥ =M_3، ۰/٦ =M_4، ۰/۷ =M_5 و ۰/۸ =M_6) در نظر گرفته شد. مدل SWAP 3.03 برای هر سطح آبیاری، MADهای مختلف و شوری‌های متفاوت آب آبیاری به طور جداگانه اجرا شد و مقادیر عملکرد، کارآیی مصرف آب و نوبت‌های آبیاری برای هر حالت شبیه‌سازی شدند.

برآورد توابع تولید در شرایط توآمان شوری و خشکی

با استفاده از داده‌های آماری حاصله از اجرای طرح و تابع تولید آب- شوری می‌توان عملکرد محصول را بعنوان تابعی از مقادیر مختلف آب کاربردی و شوری آب آبیاری به طوری که سایر عوامل تولید ثابت نگه داشته شوند، در قالب معادله $Y = f(I, EC_w, X)$ بیان کرد، که در آن Y مقدار عملکرد (kg/ha)، I مقدار آب آبیاری (cm) وEC_w هدایت الکتریکی آب آبیاری (dS/m) و X بردار ثابت سایر عوامل تأثیر گذار در تولید است.

تابع مذکور با فرم‌های مختلف زیر: خطی ساده[1] ($Y = a_0 + a_1 I + a_2 EC_w$) خطی لگاریتمی ($Y = a_0 I^{a_1} EC_w^{a_2}$، کاب داگلاس)، درجه دوم[2] ($Y = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 EC_w + a_4 EC_w^{\ 2} + a_5 I.EC_w$) و نمایی[3] ($Y = a_0 I^{a_1} EC_w^{\ a_2} e^{(a_3 I + a_4 EC_w)}$)، برآورد گردید.

پس از اینکه داده‌های آماری عملکرد حاصل از اجرای طرح، توسط نرم افزار SPSS برازش داده شد و فرم-های مختلف توابع تولید تعیین گردید. برای ارزیابی اعتبار[4] توابع بدست آمده، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده استفاده گردید. آماره‌های لازم برای این منظور، حداکثر خطا[5] (ME)، میانگین ریشه دوم خطا[6] (RMSE)، ضریب تعیین[7] (R^2) ، کارایی مدل-سازی[8] (EF) و ضریب باقیمانده[9] (CRM) هستند (همایی و و همکاران، ۲۰۰۲ و کرس و وندام، ۲۰۰۳).

نتایج و بحث

۱- اثر متقابل مقادیر مختلف آبیاری و MAD بر عملکرد برای شوری ثابت آب

در ابتدا مدل SWAP 3.03 برای سطح شوری ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر و سطوح مختلف MAD و آبیاری اجرا و مقادیر عملکرد، عملکرد نسبی، کارآیی مصرف آب و نوبت‌های آبیاری شبیه‌سازی شد. مقادیر عملکرد نسبی دانه و نوبت‌های آبیاری برای هر یک از حالت‌های مذکور و همچنین وضعیت موجود شهرستان برخوار در جدول ۲ آورده شده است

1. Linear
2. Quadratic
3. Transcendenta
4. Reliability
5. Maximum error
6. Root mean square error
7. Coefficient of determination
8. Modeling efficiency
9. Coefficient of residual mass

جدول ۲- مقادیر عملکرد نسبی دانه و تعداد آبیاری برای سطوح مختلف آبیاری و MAD (شوری آب ۸/۰ dS/m)

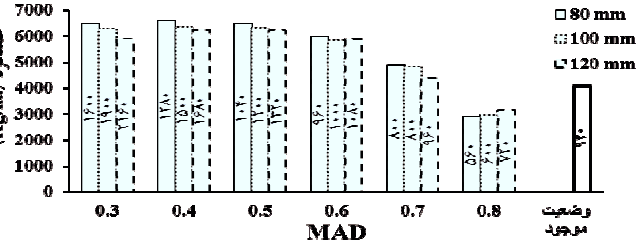
		MAD							
عمق آبیاری		۰/۳	۰/٤	۰/٥	۰/٦	۰/۷	۰/۸	وضعیت	میانگین
۸۰	عملکرد نسبی	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۷٥	۰/٦۲	۰/۳٦	–	۷/۰ A
	تعداد آبیاری	۲۰	۱٦	۱۳	۱۲	۱۰	۷	–	–
۱۰۰	عملکرد نسبی	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/٦۱	۰/۳۷	–	B
	تعداد آبیاری	۱۹	۱٥	۱۲	۱۰	۸	٦	–	–
۱۲۰	عملکرد نسبی	۰/۷٤	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۷٤	۰/٥٥	۰/۳۹	٥۱/۰	C
	تعداد آبیاری	۱۸	۱٤	۱۱	۹	۸	٦	۸	–
میانگین عملکرد نسبی		۷۸۳/۰ c	۸۰٦/۰ a	۷۹٦/۰ b	۷٤/۰ d	٥۹۳/۰ e	۳۷۳/۰ f	–	–

* شرایط فعلی و مدیریت آبیاری مرسوم آن منطقه

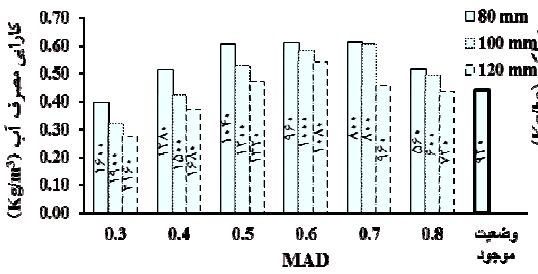
همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود در همه سناریوها به جز MAD=۰/۸ عملکرد نسبی بیشتر از عملکرد نسبی فعلی شهرستان برخوار (۵۱/۰) می‌باشد. بیشترین عملکرد نسبی مربوط به سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و MAD=۰/٤ و کمترین آن مربوط به سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و MAD=۰/۸ می‌باشد (جدول ۲). به طورکلی برای هر سطح آبیاری، MAD=۰/٤ بیشترین عملکرد نسبی و MAD=۰/۸ کمترین عملکرد نسبی را دارا می‌باشد. یکی از دلایل کاهش عملکرد نسبی در MADهای کمتر از ۰/٤ را می‌توان تنفس نامناسب توسط ریشه دانست و دلیل کاهش عملکرد نسبی در MADهای بیشتر از ۰/٤ را می‌توان تنش خشکی و کمبود آب مورد نیاز گیاه دانست. وراوی‌پور و همکاران (۱۳۸۷) در بررسی اثرات کم‌آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت سنگل کراس رقم ۷۰٤، گزارش کردند که با افزایش عمق آبیاری از ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۱۲۰ درصد، زمین به حالت غرقابی درآمده و هوای خاک خارج می‌شود، که این امر سبب خفگی ریشه و کاهش عملکرد می‌شود. نتیجه دیگری که می‌توان گرفت این است که در MADهای بزرگتر عملکرد نسبی برای سطوح آبیاری بالاتر (عمق بیشتر)، بیشتر از سطوح آبیاری با عمق پایین‌تر می‌باشد زیرا هنگامی که مقدار تنش خشکی افزایش می‌یابد و گیاه آب بیشتری را از خاک خارج می‌کند، خاک خشکتر شده و می‌تواند آب بیشتری را در هنگام آبیاری در خود ذخیره کند در نتیجه همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود برای MADهای بزرگتر، سطوح ۱۲۰ و ۱۰۰ میلیمتر عملکرد نسبی بالاتری را دارا می‌باشند.

مقادیر عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب برای حالت‌های مختلف مذکور در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. در این شکل‌ها در هر ستون مقدار کل آبیاری بر حسب میلیمتر در طول فصل رشد برای سطوح مختلف آبیاری و MAD مشخص شده است.

همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار عملکرد دانه (٦٦۱۹ کیلوگرم در هکتار) مربوط به سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و MAD=۰/٤ و کمترین آن (۲۸۹۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و MAD=۰/۸ می‌باشد که مقدار کل آبیاری هر یک از آنها در طول فصل رشد بترتیب ۱۲۸۰ و ٥٦۰ میلیمتر می‌باشد. در همه سناریوها به جز MAD=۰/۸ عملکرد دانه بیشتر از عملکرد فعلی شهرستان برخوار (٤۱۰۰کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. در این شکل نیز مشخص است که در MAD های کمتر از ۰/٤ عملکرد دانه کاهش یافته است. که دلیل آن قبلاً ذکر شده است. که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار عملکرد دانه (٦٦۱۹ کیلوگرم در هکتار) مربوط به سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و MAD=۰/٤ و کمترین آن (۲۸۹۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و MAD=۰/۸ می‌باشد که مقدار کل آبیاری هر یک از آنها در طول فصل رشد بترتیب ۱۲۸۰ و ٥٦۰ میلیمتر می‌باشد. در همه سناریوها به جز MAD=۰/۸ عملکرد دانه بیشتر از عملکرد فعلی شهرستان برخوار (٤۱۰۰کیلوگرم در هکتار)



شکل ۱- مقادیر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) برای سطوح مختلف آبیاری و MAD



شکل ۲- مقادیر کارآیی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) برای سطوح مختلف آبیاری و MAD

می‌باشد.

در این شکل نیز مشخص است که در MAD های کمتر از ۰/٤ عملکرد دانه کاهش یافته است. که دلیل آن قبلاً ذکر شده است. همچنین در شکل ۱ مشاهده می-شود که در MADهای پایین و در یک MAD معین با افزایش عمق آبیاری، مقدار عملکرد کاهش می‌یابد که می‌توان دلیل آن را افزایش بیش از حد رطوبت خاک و تنفس نامناسب گیاه دانست (وراوی‌پور و همکاران، ۱۳۸۷).

به طور کلی با افزایش عمق آبیاری کارآیی مصرف آب کاهش می‌یابد که این می‌تواند بدلیل افزایش رواناب و تلفات نفوذ عمقی باشد (شکل ۲). بیشترین مقدار کارآیی مصرف آب (۰/٦۱ کیلوگرم بر متر مکعب) مربوط به ۰/۷، ۰/٦ و ۰/۵ = MAD و عمق آبیاری ۸۰ میلیمتر می‌باشد. اختلاف عملکرد نسبی این تیمارها نسبت به تیمار سطح آبیاری ۸۰ میلیمتر و ۰/٤ = MAD بترتیب برابر ۲/۱، ٦/۹ و ۳/۲۵ درصد می‌باشد. در نتیجه بدلیل کمبود آب و صرفه‌جویی در آب آبیاری و همین طور معنی‌دار بودن عملکرد نسبی بین تیمارهای MAD ۵/۰، ٦/۰ و ۷/۰، می‌توان تیمار سطح آبیاری ۸۰ میلی متر و ۰/۵ = MAD را به عنوان بهترین تیمار از نظر مدیریتی برای سطح شوری ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر انتخاب کرد و آن را برای بکارگیری در مزرعه توصیه نمود.

۲- اثر متقابل شوری و MAD بر عملکرد برای مقادیر ثابت آب آبیاری

برای اینکه رابطه بین شوری و عملکرد بدست آید مدل SWAP 3.03 با شوری‌های مختلف برای سطوح مختلف MAD و آبیاری اجرا گردید. مقادیر عملکرد نسبی دانه و نوبت‌های آبیاری برای سطوح مختلف آبیاری، شوری و MAD در جداول ۳ تا ۵ آورده شده است.

جدول ۳- مقادیر عملکرد نسبی دانه و تعداد آبیاری برای عمق آبیاری ۸۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD

		MAD					
شوری dS/m		۰/۳	۰/٤	۰/۵	۰/٦	۰/۷	۰/۸
۲	عملکرد نسبی	۸/۰	۸۳/۰	۷۹/۰	۷۴/۰	۶۲/۰	۳۶/۰
	تعداد آبیاری	۲۰	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۷
۴	عملکرد نسبی	۷۹/۰	۰/۷۷	۷۳/۰	۰/۶۷	۵۵/۰	۰/۳۵
	تعداد آبیاری	۲۰	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۷
۶	عملکرد نسبی	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۲۶
	تعداد آبیاری	۱۹	۱۵	۱۳	۱۱	۹	۷

جدول ٤- مقادیر عملکرد نسبی دانه و تعداد آبیاری برای عمق آبیاری ۱۰۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD

شوری dS/m		MAD ۰/۳	۰/٤	۰/٥	۰/٦	۰/۷	۰/۸
۲	عملکرد نسبی	۰/۷۹	۰/۸	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۶	۰/۳۷
	تعداد آبیاری	۱۸	۱۵	۱۲	۱۰	۸	۶
۴	عملکرد نسبی	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۵۸	۰/۳۶
	تعداد آبیاری	۱۸	۱۵	۱۲	۱۰	۸	۶
۶	عملکرد نسبی	۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۴	۰/۲۷
	تعداد آبیاری	۱۷	۱۴	۱۱	۹	۸	۶

جدول ٥- مقادیر عملکرد نسبی دانه و تعداد آبیاری برای عمق آبیاری ۱۲۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD

شوری dS/m			MAD –	۰/۳	۰/٤	۰/٥	۰/٦	۰/۷	۰/۸
وضعیت موجود*	عملکرد نسبی		۵۱/۰	۷۴/۰	۷۸/۰	۷۷/۰	۷۳/۰	۰/۵۵	۰/۳۹
	تعداد آبیاری		۸	۱۸	۱۴	۱۱	۹	۸	۶
۲	عملکرد نسبی		–	۷۴/۰	۷۸/۰	۷۷/۰	۰/۷۳	۰/۵۵	۰/۳۹
	تعداد آبیاری		–	۱۸	۱۴	۱۱	۹	۸	۶
۴	عملکرد نسبی		–	۷۴/۰	۷۳/۰	۷۲/۰	۷۱/۰	۰/۵۴	۰/۳۸
	تعداد آبیاری		–	۱۸	۱۴	۱۱	۹	۷	۶
۶	عملکرد نسبی		–	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۲۸
	تعداد آبیاری		–	۱۷	۱۳	۱۰	۹	۷	۵

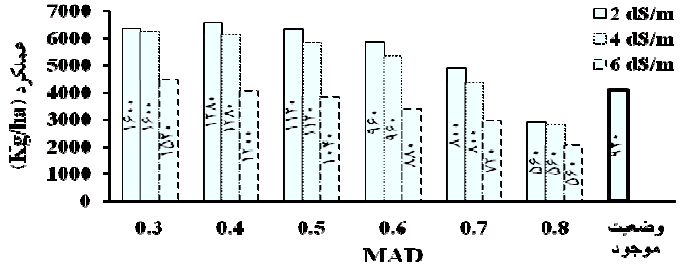
* شرایط فعلی و مدیریت آبیاری مرسوم آن منطقه

همان‌طور که در جداول ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود برای یک MAD ثابت با افزایش شوری عملکرد نسبی کاهش می‌یابد همچنین برای یک شوری ثابت با افزایش MAD (افزایش تنش خشکی) عملکرد نسبی نیز کاهش می‌یابد. برای تمامی سطوح آبیاری تیمار MAD = ۰/٤ و شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین و MAD = ۰/۸ و شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر کمترین عملکرد نسبی را دارا می‌باشند. برای سطوح شوری ٤ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر، MAD = ۰/۳ و MAD = ۰/۸ بترتیب بیشترین و کمترین عملکرد نسبی را دارند. همان طور که قبلاً ذکر شد در MAD های کمتر از ۰/٤ بدلیل تنفس نامناسب توسط ریشه، عملکرد کاهش می‌یابد اما در شرایط تنش شوری و زمانی که دور آبیاری کمتر می‌شود، گیاه مدت زمان کمتری تحت تنش شوری قرار می‌گیرد و به عبارتی کمتر تحت تأثیر فشار اسمزی حاصل از شوری آب آبیاری قرار می‌گیرد (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹). به همین دلیل در شوری‌های بیشتر از ۲ دسی‌زیمنس بر متر مقدار عملکرد نسبی MAD = ۰/۳ بیشتر از MAD = ۰/٤ شده است. همچنین اثر متقابل عمق و شوری آب آبیاری دلالت بر آن دارد که با افزایش عمق آبیاری تأثیر شوری روی عملکرد کاهش می‌یابد و از طرف دیگر با کاهش شوری اثر رطوبت روی عملکرد افزایشی است. این موضوع تا زمانی که شوری آب آبیاری از حد آستانه تحمل گیاه کمتر باشد، صادق است و پس از آن افزایش تعداد دفعات آبیاری باعث کاهش عملکرد خواهد شد. شهیدی (۱۳۸۷) پس از بررسی اثرات شوری و رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد گندم گزارش کرد که شوری در سطح ۵ درصد و عمق آب آبیاری در سطح ۱ درصد بر کاهش عملکرد اثر معنی‌داری دارد و با افزایش عمق آبیاری تأثیر شوری روی عملکرد کاهش می‌یابد.

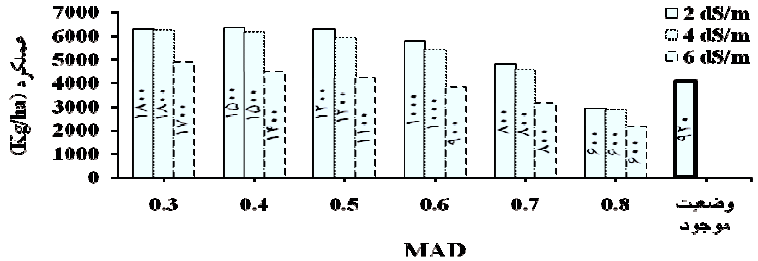
در جداول ۲ تا ۵ ملاحظه می‌شود که به طور کلی با افزایش شوری آب آبیاری، تعداد آبیاری‌ها کاهش یافته است. دلیل آن را می‌تواند کاهش تبخیر و تعرق گیاه در شوری‌های بالا دانست که این امر باعث می‌شود خاک دیرتر به MAD مربوطه برسد و در نتیجه دور آبیاری افزایش یابد. کیانی و همکاران (۱۳۸۳) تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و شوری بر عملکرد گندم در گرگان را

بررسی کردند و گزارش کردند که مقدار مصرف آب گندم با افزایش شوری آب آبیاری، کاهش می‌یابد.

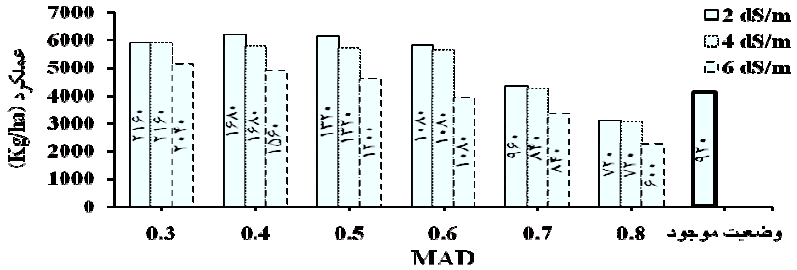
شکل‌های ۳ تا ۵ مقادیر عملکرد دانه برای تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقادیر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) برای عمق آبیاری ۸۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD



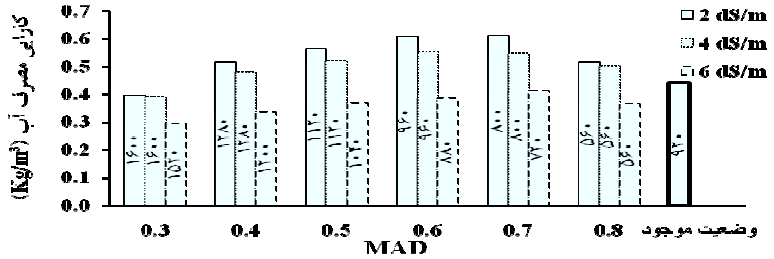
شکل ٤- مقادیر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) برای عمق آبیاری ۱۰۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD



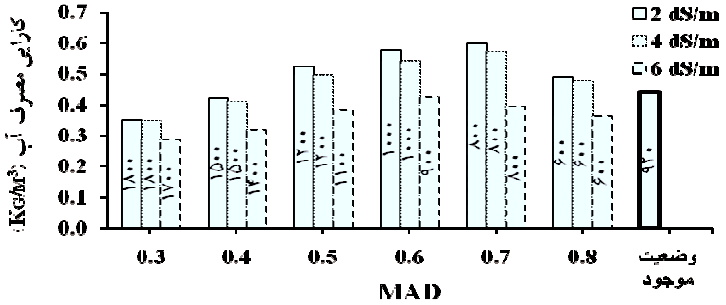
شکل ٥- مقادیر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) برای عمق آبیاری ۱۲۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD

در هر سطح آبیاری و MAD های مختلف بیشترین مقدار عملکرد دانه مربوط به شوری ۲ و کمترین آن مربوط به شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه کوتاه بودن فواصل آبیاری در شوری‌های بالا باعث می‌شود گیاه کمتر تحت تنش شوری قرار گیرد به همین دلیل در شوری‌های بالاتر از ۲ دسی-زیمنس بر متر مقدار عملکرد دانه MAD=۰/۳ بیشتر از MAD=۰/٤ می‌باشد (شکل‌های ۳ تا ٥). در همه سناریوها به جز MAD=۰/۸ عملکرد دانه برای شوری‌های ۲ و ٤ دسی‌زیمنس بر متر بیشتر از عملکرد فعلی شهرستان برخوار (٤۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. همچنین عملکرد دانه در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۱۲۰ میلیمتر و در MAD=۰/٥ و کمتر از آن برای شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر بیشتر از عملکرد فعلی شهرستان برخوار (٤۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. این نتایج بیانگر این است که مدیریت آبیاری فعلی شهرستان برخوار مناسب نمی‌باشد و می‌توان با استفاده از مدیریت آبیاری مناسب عملکرد فعلی این شهرستان را افزایش داد.

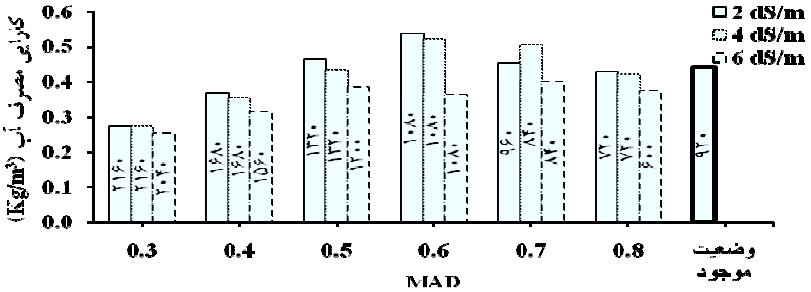
در شکل‌های ٦ تا ۸ مقادیر کارآیی مصرف آب برای تیمارهای مختلف آورده شده است.



شکل ٦- مقادیر کارآیی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) برای عمق آبیاری ۸۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD



شکل ۷- مقادیر کارآیی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) برای عمق آبیاری ۱۰۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD



شکل ۸- مقادیر کارآیی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) برای عمق آبیاری ۱۲۰ میلیمتر و سطوح مختلف شوری و MAD

بیشترین مقدار کارآیی مصرف آب تقریباً برای سه سطح شوری ۲، ٤ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر مربوط به MAD = ۰/٦ می‌باشد اما با افزایش مقدار MAD بدلیل افزایش تنش خشکی مقدار عملکرد و در نتیجه مقدار کارآیی مصرف آب کاهش یافته است. در MAD های کمتر از ۰/٦ بدلیل اینکه دور آبیاری کوتاهتر شده و در نتیجه حجم آب مصرفی افزایش یافته است، هرچند عملکرد افزایش یافته اما بدلیل زیاد بودن حجم آب مصرفی، مقدار کارآیی مصرف آب کاهش یافته است (شکل‌های ٦ تا ۸).

با توجه به جداول ۳ تا ۵، برای عمق آبیاری ۸۰ میلیمتر و شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف عملکرد نسبی MAD=۰/۵ و MAD=۰/٦ نسبت به MAD=۰/٤ (که بالاترین عملکرد نسبی را دارد) به ترتیب ٤ و ۹ درصد، برای شوری ٤ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف عملکرد نسبی MAD=۰/٤، MAD =۰/۵ و MAD=۰/٦ نسبت به MAD =۰/۳ (که بالاترین عملکرد نسبی را دارد) به ترتیب ۲، ٦ و ۱۲ درصد و برای شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر این مقادیر به ترتیب ۵، ۸ و ۱۳ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه MAD=۰/٦، کارآیی مصرف آب بالاتری نسبت به MAD=۰/۵ دارد، اما به دلیل جلوگیری از کاهش عملکرد، MAD=۰/۵ برای این سطح آبیاری و شوری ۲، ٤ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر توصیه می‌شود. برای عمق آبیاری ۱۰۰ میلیمتر و شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف عملکرد نسبی MAD=۰/۵، MAD=۰/٦ و MAD =۰/۸ نسبت به MAD=۰/٤ (که بالاترین عملکرد نسبی

را دارد) به ترتیب ۱، ۷ و ۲۰ درصد می‌باشد، برای شوری ٤ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف عملکرد نسبی ۰/٤= MAD، MAD=۰/٥، MAD=۰/٦ و MAD=۰/۸ نسبت به MAD=۰/۳ (که بالاترین عملکرد نسبی را دارد) به ترتیب ۲، ٤، ۱۱ و ۲۱ درصد و برای شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر این مقادیر به ترتیب ٥، ۸، ۱۳ و ۲۱ درصد می‌باشد. با توجه به بالاتر بودن کارآیی مصرف آب MAD=۰/۸ نسبت به MAD=۰/٦ و MAD =۰/٥ به دلیل جلوگیری از کاهش عملکرد، MAD=۰/٥ برای این سطح آبیاری و شوری ۲، ٤ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر توصیه می‌شود. برای عمق آبیاری ۱۲۰ میلیمتر و شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف عملکرد نسبی MAD=۰/٥ و MAD=۰/٦ نسبت به MAD=۰/٤ (که بالاترین عملکرد نسبی را دارد) به ترتیب ۱ و ٥ درصد، برای شوری ٤ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف عملکرد نسبی MAD=۰/٤، MAD=۰/٥ و MAD=۰/٦ نسبت به MAD=۰/۳ (که بالاترین عملکرد نسبی را دارد) به ترتیب ۱، ۱ و ۱ درصد و برای شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر این مقادیر به ترتیب ۳، ۷ و ۱٦ درصد می‌باشد. برای شوری‌های ۲، ٤ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر به دلیل ناچیز بودن افت نسبی عملکرد MAD=۰/٥ نسبت به MAD=۰/٤، این مقدار MAD برای این سطوح شوری قابل توصیه می‌باشد. با توجه به اینکه MAD=۰/٥ برای تمام تیمارها بهترین گزینه بود، در ادامه برای سه سطح آبیاری ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلیمتر در هر نوبت آبیاری و چهار سطح شوری ۰/۸، ۲، ٤ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر، بهینه سازی با نرم افزار SPSS انجام گردید.

۳- بهینه سازی

جهت بهینه سازی مصرف آب ابتدا تابع تولید آب–شوری–عملکرد با استفاده از فرم‌های مختلف (خطی ساده، خطی لگاریتمی، درجه دوم و نمایی) بر اساس شوری (dS/m)، عمق آب آبیاری سالانه (cm) و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها بدست آمد. نتایج برآورد توابع تولید و همچنین تحلیل هر یک از توابع انتخابی در جدول ٦ ارائه شده است. مقادیر آماره t در این جدول بیانگر تأثیر معنی‌دار و تعیین کنندهٔ دو عامل عمق و شوری آب آبیاری بر تغییرات عملکرد محصول بوده و آماره F بیانگر معنی‌داری کلی توابع است. در همین رابطه داتا و همکاران (۱۹۹۸) اعلام کردند که برآورد توابع تولید بر اساس روش‌های آماری، بدلیل تعیین رابطه مستقیم آب – عملکرد، بر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی استوار است ترجیح دارد. اما روسو و باکر (۱۹۸٦) محدودیت عمده این روش‌ها را وابستگی شدید آنها به مکان و سال خاص می‌دانند.

جدول ٦- ضرایب فرم‌های مختلف توابع تولید آب - شوری - عملکرد

متغیر	خطی ساده	خطی لگاریتمی	درجه دوم	نمایی
ثابت	٥/٦۱ ** (۳/٥۲)	-٥/۰۹ ns (-۰/٥۱)	-۳/۳٦۱ ns (-۰/٦۷)	-۱۲٥/۴۹ ns (-۱/۱۸)
I (cm)	۰/۰۱ ns (۰/۸۳)	-	۰/۲ ns (۱/۸٥)	-۰/۲۹ ns (-۱/۲۴)
EC (dS/m)	-۰/۳۸ ** (-۶/۰۳)	-	-۰/۷۷ * (-۲/٥۳)	-۰/۸۴ ** (-۴/۸۲)
Ln (I)	-	۲/۴۱ ns (۱/۱٦)	-	۳٥/۱۴ ns (۱/۲٥)
Ln (EC)	-	-۰/۸۴ ** (-۳/۷٦)	-	۱/۱۹ * (۲/٦۷)
I^2	-	-	-۰/ ۰۰۱ ns (-۲/۴۸)	-
EC^2	-	-	-۰/۰۸٥ ** (-۱/۳٥)	-
I.EC	-	-	۰/۰۰۸ * (۳/۷۳)	-
آماره F	۲۱/۶۶	۸/۸۷	۳٥/۸٥	۲۴/۷۶

n.s و *و** بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار به ترتیب در سطح احتمال ٥ و ۱ درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t می‌باشند.

۴- تعیین توابع بهینه تولید

در این قسمت با استفاده از توابع تولید تعیین شده، مقادیر عملکرد محصول تخمین زده شد. جهت ارزیابی توابع تولید، مقادیر تخمینی و واقعی عملکرد محصول از طریق پنج شاخص آماری (ME، RMSE، R^2، EF، CRM) مقایسه شدند (جدول ۷). 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 و کرس و وندام، ۲۰۰۳).

جدول ۷- پارامترهای آماری محاسبه شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید

نوع تابع	ME (Kg/ha)	RMSE (Kg/ha)	R^2	EF	CRM
خطی ساده	۰/۶۳ (۳) *	۰/۳۶ (۳)	۰/۸۳ (۳)	۰/۸۳ (۳)	-۰/۰۰۴ (۴)
خطی لگاریتمی	۰/۷۷ (۴)	۰/۵۰ (۴)	۰/۶۷ (۴)	۰/۶۷ (۴)	-۰/۰۰۱ (۱)
درجه دوم	۰/۲۹ (۱)	۰/۱۸ (۱)	۰/۹۸ (۱)	۰/۹۶ (۱)	۰/۰۰۲ (۲)
نمایی	۰/۳۸ (۲)	۰/۲۰ (۲)	۰/۹۴ (۲)	۰/۹۳ (۲)	۰/۰۰۳ (۳)

* اعداد داخل پرانتز درجه‌بندی مدل در شاخص آماری مربوطه است.

همان‌طور که در جدول ۷ ملاحظه می‌گردد برای کلیه پارامترهای آماری که مبنای مقایسه توابع قرار گرفته‌اند، بهترین نتایج بترتیب برای تابع درجه دوم و نمایی بدست آمد. ارزیابی راندمان تابع (EF) نشان می‌دهد که دو 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 ساده در اکثر موارد عملکرد را بیشتر از مقادیر واقعی و سایر توابع کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌نمایند. بنابراین تابع درجه دوم به عنوان تابع بهینه تولید در شرایط توأمان شوری و خشکی برای گندم در منطقه برخوار معرفی می‌گردد. 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) تابع درجه دوم را برای گوجه فرنگی به عنوان تابع تولید بهینه آب-شوری-عملکرد معرفی کردند. شوک و همکاران[1] (۲۰۰۷) نیز در آزمایشی که بر روی تولید کمی و کیفی بذر یونجه انجام دادند، تابع درجه دوم را به عنوان تابع بهینه تولید و سطح آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی را به عنوان سطح آبیاری بهینه (در آبیاری قطره‌ای) اعلام نمودند . شانگ و مائو[2] (۲۰۰۶) نیز تابع درجه دوم را برای گندم زمستانه پیشنهاد کرده‌اند.

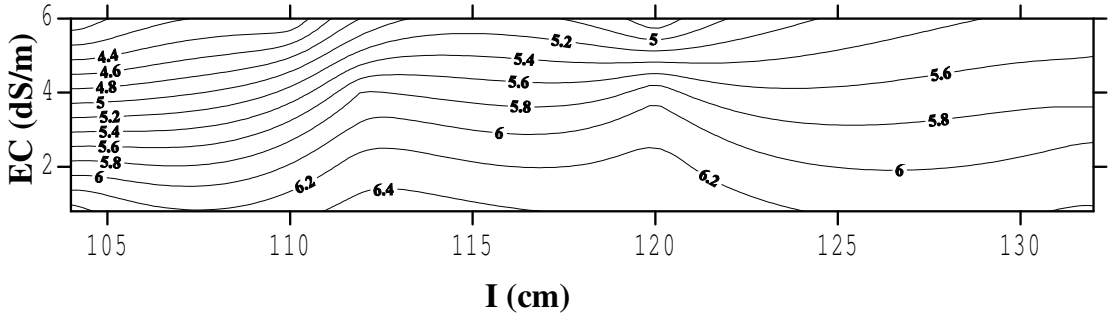
۵- منحنی‌های هم محصول

یکی دیگر از کاربردهای مطالعات توأمان شوری و خشکی در راستای بهینه سازی مصرف آب جهت سازگاری با کم‌آبی، تهیه منحنی‌های هم محصول می‌باشد. این منحنی‌ها نشان دهنده مکان هندسی ترکیبات مختلف عمق و شوری آب آبیاری است که منجر به عملکرد یکسانی در فرآیند تولید گندم می‌شوند. شکل ۹ منحنی‌های هم محصول گندم را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در یک عمق آب مشخص (I) ، هر چه شوری افزایش یابد، عملکرد (Y) کاهش و برای یک EC_w معین، هر چه مقدار آبیاری بیشتر شود، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. ولی هرگاه دو عامل فوق را با هم بررسی کنیم ملاحظه می‌شود که برای دستیابی به عملکرد مشخص، مقادیر متفاوتی از I و EC_w را می‌توان جایگزین نمود. شهیدی (۱۳۸۷) پس از بهینه‌سازی مصرف آب گندم در شرایط توأم شوری و کم‌آبی در بیرجند گزارش کرد که با افزایش شوری، می‌توان مقدار آب آبیاری بیشتری استفاده نمود به طوری که عملکرد تغییر نکند. در شکل ۹ به عنوان مثال با میزان

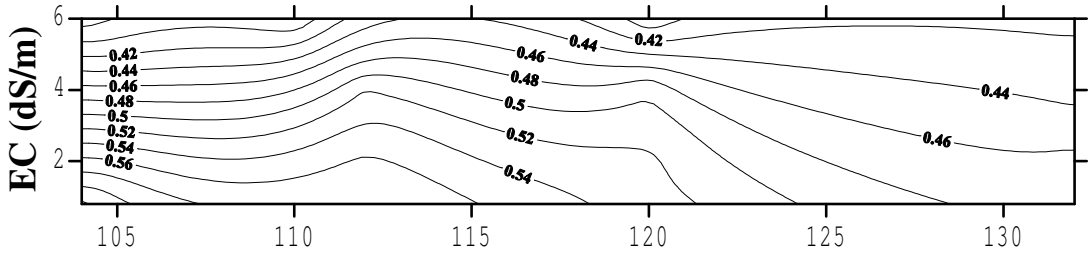
[1] Shock et al.

[2] Shang and Mao

آبیاری ۱۱۰ سانتی‌متر و شوری ٤ دسی‌زیمنس بر متر عملکرد معادل با ۵/۲ تن در هکتار است که با افزایش میزان آبیاری به مقدار ۱۲٤ سانتی‌متر می‌توان به همان عملکرد ولی با شوری ٦ 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) و شهیدی (۱۳۸۷) نیز بر این موضوع تأکید نموده‌اند. شکل ۱۰ منحنی‌های هم کارایی مصرف آب گندم را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، مقدار کارایی مصرف آب برای شوری ٤ دسی-زیمنس بر متر و مقدار آب آبیاری ۱۱۰ سانتی‌متر برابر ٤۸/۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد اما با افزایش مقدار آب آبیاری در سطح شوری ٦ دسی‌زیمنس بر متر نمی-توان به این کارایی مصرف آب رسید. بنابراین می‌توان گفت با افزایش شوری آب آبیاری و مقدار آب آبیاری کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد و با استفاده بیشتر آب آبیاری شور فقط می‌توان از کاهش عملکرد محصول جلوگیری کرد، که در این صورت باید کاهش کارایی مصرف آب را نیز پذیرفت.



شکل۹- منحنی‌های هم محصول (تن در هکتار) گندم در شرایط تنش توآمان شوری و خشکی



شکل ۱۰- منحنی‌های هم کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) گندم در شرایط تنش توآمان شوری و خشکی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدیریت‌های مختلف آبیاری در شرایط همزمان شور و خشکی بر عملکرد گندم زمستانه و بهینه‌سازی مصرف آب تحت این شرایط با استفاده از مدل SWAP در منطقه برخوار اصفهان انجام شد. به طور کلی نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری فعلی شهرستان برخوار مناسب نمی‌باشد و از آنجایی که MAD = ۰/۵ برای تمام سطوح شوری و آب آبیاری بهترین تیمار از نظر مدیریتی بود، می‌توان آن را برای بکارگیری در مزرعه توصیه نمود. همچنین استفاده از آب‌های شور تا سطح شوری ٦ دسی زیمنس برمتر نشان داد که می‌توان از این نوع آب‌ها برای کشت این محصول ارزشمند استفاده مفید نمود.

نتایج ارزیابی آماری توابع نشان داد که نرخ تغییرات عملکرد گندم 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 گندم به عنوان تابع بهینه تولید در منطقه معرفی می‌گردد. بنابراین توصیه می‌شود اولاً در راستای سازگاری با کم‌آبی

جهت تولید گندم، از تابع تولید درجه دوم بدست آمده در منطقه استفاده گردد. ثانیاً تحقیقات تکمیلی مشابه برای سایر محصولات استراتژیک منطقه (از قبیل: جو، یونجه، ذرت) انجام شود تا به توان راهبرد بهینه سازی مصرف آب را در یک تناوب کامل زراعی بکار گرفت.

نتایج بررسی منحنی‌های هم محصول نشان داد که با افزایش شوری، می‌توان مقدار آب آبیاری بیشتری استفاده نمود، به نحوی که عملکرد تغییر نکند اما جایگزینی کمیت با کیفیت آب آبیاری دارای محدوده خاصی می‌باشد. در منحنی‌های هم محصول این محدوده نقطه‌ای است که خط مماس بر منحنی موازی محور I گردد، از این نقطه به بعد هر چه میزان آبیاری افزایش یابد (با شوری ثابت) نه تنها باعث افزایش عملکرد نمی‌شود بلکه سبب هدر رفتن سرمایه نیز خواهد شد.

فهرست منابع:

۱. خانی قریه‌گپی، م.، داوری، ک.، علیزاده، ا.، هاشمی‌نیا، م. و ذوالفقاران، ا. ۱۳۸٦. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندر قند تحت کمیت‌ها و کیفیت‌های مختلف آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی. ۱(۲): ۱۰۷-۱۱۷.

۲. سپاسخواه ع ر.، توکلی ع ر. و موسوی ف. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد کم‌آبیاری، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۳. شهیدی ع، ۱۳۸۷. اثر برهم‌کنش کم‌آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزاء عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تول آب – شوری در منطقه بیرجند. رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴. کیانی ع. ۱۳۸٦. استفاده از مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم. مجموعه مقالات نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه باهنر کرمان.

۵. کیانی ع.، میرلطیفی م.، همایی م. و چراغی ع م. ۱۳۸۳. تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و شوری بر عملکرد گندم در منطقه گرگان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۱(۱):۹۰-۷۹.

۶. محمدی م.، لیاقت ع. و مولوی ح. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین ضرایب حساسیت گوجه فرنگی در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی در منطقه کرج. مجله آب و خاک. ۲٤(۳): ۵۹۲-۵۸۳.

۷. منصوری ح.، و مصطفی زاده ب. ۱۳۸۵. راهنمای نصب و اجرای مدل SWAP. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود. دانشگاه شهرکرد.

۸. نوری ح.، لیاقت ع.، پارسی نژاد م. و وظیفه دوست م. ۱۳۸۹. برآورد عملکرد گندم و ذرت علوفه‌ای در شرایط توام آبیاری و شوری با استفاده از مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP. مجله آب و خاک. ۲٤(٦): ۱۲۳۵-۱۲۲٤.

۹. وراوی‌پور م.، مشعل م. و زارع زیرک ا. ۱۳۸۷. بررسی کم‌آبیاری بر مصرف بهینه آب محصول ذرت در دشت ورامین. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۱۰. وظیفه دوست م.، علیزاده ا.، کمالی. و فیضی م. ۱۳۸۷. افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در مزارع تحت آبیاری منطقه برخوار اصفهان. مجله آب و خاک. ۲۲(۲): ٤۹۵-٤۸٤.

11. Angstrom, A. 1924. Solar and atmospheric radiation. Q. J. R. Meteorol. Soc. 50:122-125.
12. 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(3):111-125.
13. Bessembinder, J.J.E., Leffelaar, P.A., Dhindwal, A.S. and Ponsioen, T.C. 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. Agric. Water Management, 73(2):113 130.

14. Datta, K.K., Sharma, V. P., and Sharma, D. P. 1998. Estimation of a production function for wheat under saline conditions. Agric. Water Management, 36:85-94.
15. Doherty, J., Brebber, L. and Whyte, P. 1995. PEST: Model independent parameter estimation. Australian
16. Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia, 140 pp.
17. Homaee, M., Dirksen, C., and Feddes, R.A. 2002. Simulation of root water uptake, I: Non-uniform ransient salinity using different macroscopic reduction functions, Agric. Water Management. 57:89-109.
18. Jhorar, R.K. 2002. Estimation of effective soil hydraulic parameters for water management studies in semi-arid zones. PhD Thesis, ISBN 90-5808-644-5, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, the Netherlands, 157pp.
19. 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 trials and farmers' fields data, Agric. Water Manage. 2471, No of Pages 11
20. Kroes J.G., van Dam J. 2003. Reference manual SWAP version 3.03. Altera Green World Research, Altera report 773. Wageningen University and Research Center, Wageningen, the Netherlands, 211 p. ISSN: 1566-7197.
21. Li, J., S. Inanaga, Z. Li and Eneji, E. 2005, Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain, Agric. Water Management, 76:8–23.
22. Russo, D., and Bakker, D. 1986. Crop water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline waters, Soil Science Society American J. 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. Shang, S., and Mao, X. 2006. Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in North China, Agric. Water Management. 85:314–322.
25. Shock, C.C., Feibert, E.B.G., Saunders, L.D., and Klauzer, J. 2007. Deficit Irrigation for Optimum Alfalfa Seed Yield and Quality, Agron J. 99:992-998.
26. Singh R., van Dam J., Feddes RA. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district. India, Agric. Water Management, 82:253-278.
27. Singh, R. 2004. Simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining Cotton-Wheat in a semi-arid area of north-west India, Agric. Water Manag, 66:153-162.
28. Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., Kroes J.G. 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone Journal. 7:640-653.
29. Vazifedoust M. 2007. Development of an agricultural drought assessment system, Integration of crop and soil modeling remote sensing and geographical information. Phd Dissertation. Wageningen Agricultural University.
30. Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes,A. and Bas, C. Le. 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Report 156. The Netherlands, DLO Winand Staring Centre.