نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۳ / شماره ۲/ ۱۳۹۸

10.22092/JWRA.2019.119744

بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و آبشویی براساس تیمارهای مختلف مدیریت و شوری آب با استفاده از مدل AquaCrop

مسعود محمدی[۱]*، کامران داوری و بیژن قهرمان

دانش آموخته دکتری گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Mmohammadi_64@yahoo.com

استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

k.davary@gmail.com

استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

bijangh@um.ac.ir

چکیده

با توجه به محدودیت‌های تولید در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهینه‌سازی مقدار آبیاری و آبشویی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش از مدل AquaCrop واسنجی و صحت‌سنجی شده برای دو رقم گندم زمستانه (قدس و روشن) در منطقه بیرجند و یک رقم گندم بهاره (روشن بهاره) در منطقه مشهد، به‌منظور بهینه‌سازی مقدار آب آبیاری و آبشویی استفاده شد. تیمارهای آبیاری برای گندم‌های زمستانه ٪۱۲۵، ٪۱۰۰، ٪۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی و شوری آب ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر بود. تیمارهای آبیاری برای گندم بهاره ٪۱۰۰، ٪۹۰، ٪۶۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی و شوری آب ۰/۵، ۱/۹، ۵/۲۵، ۸/۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. کدنویسی انجام‌شده در نرم‌افزار MATLAB به‌منظور دست‌یابی به مقدار بهینه آبیاری و آبشویی در شرایط محدودیت زمین، با مدل AquaCrop پیوند شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که سود خالص برای مدیریت آبیاری و آبشویی مناسب در تمام سطوح شوری و رقم‌های مختلف گندم به‌جز سطوح شوری ۸/۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن بهاره، بیشتر از مدیریت‌های فعلی در شرایط مزرعه بود. مقدار افزایش سود در مدیریت‌های بهینه نسبت به مدیریت موجود برای رقم قدس در سطوح شوری ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۵۱٪/۴، ۷۸٪/۹ و ۱۴۲/۵ درصد و برای رقم روشن برای همین سطوح شوری به ترتیب ۴۲٪/۷، ۲۰٪/۸ و ۰٪/۳- بدست آمد. همچنین مقدار افزایش سود در مدیریت‌های بهینه نسبت به مدیریت موجود برای رقم روشن بهاره در سطوح شوری ۰/۵، ۱/۹، ۵/۲۵، ۸/۶ و ۱۰/۰ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۰٪/۵، ۷٪/۱۳، ۳٪/۳۴، ۴٪/۲۷- و ۴/۵۱- ٪ بدست آمد. به‌طورکلی نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در مناطقی که زه‌آب تولیدی حاصل از آبیاری یکی از مشکلات مهم محیط‌زیستی و عامل نارضایتی کشاورزان پایین‌دست آن منطقه است، می‌توان با کاهش آب آبیاری و قبول مقدار ناچیزی کاهش سود (کمینه صفر و بیشینه ۲۹ درصد) این مشکل را برطرف نمود.

واژه‌های کلیدی: زه‌آب، مدل‌سازی، گندم رقم روشن، رقم قدس

---

۱ – آدرس نویسنده مسؤل: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب

* – دریافت: دی ۱۳۹۷ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۸

مقدمه

با تخصیص بیش از ۷۰ درصد از منابع آب به بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا، کشاورزی فاریاب اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب است (فررز و سوریانو، ۲۰۰۷). یکی از مهمترین راه‌کارهای علمی کاهش مصرف آب در کشاورزی، کم‌آبیاری است. کم‌آبیاری راه‌حلی برای بهینه کردن مصرف آب برای تولید گیاهان زراعی است (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵). یکی دیگر از راه‌کارهای موجود که امروزه در دنیا مورد توجه قرار گرفته، استفاده از آب‌های نامتعارف در کشاورزی است. یکی از مهمترین منابع آب نامتعارف، منابع آب‌شور است؛ اما استفاده از آب‌شور نه‌تنها گیاه بلکه خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در طول زمان به‌ویژه با وضعیت زهکشی نامناسب موجبات انباشت نمک‌ها را در خاک فراهم می‌سازد (شهیدی، ۱۳۸۷).

از جمله روش‌های مؤثر برای جلوگیری از تجمع نمک‌ها در محیط ریشه و خسارات ناشی از آن بر گیاهان، آبشویی اراضی است. درک نحوه تأثیر تنش‌های کم‌آبی و شوری بر تولید محصول، به گامی ضروری برای برنامه‌ریزی مناسب آبیاری می‌باشد. بر اساس گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی (فائو) هر سال یک تا دو درصد از اراضی فاریاب جهان به دلیل سوء مدیریت آبیاری با استفاده از آب‌شور از چرخه تولید خارج می‌شود (دومینگوئز و همکاران، ۲۰۰۸).

مطالعات مزرعه‌ای معمولاً اثرات بلندمدت مدیریت‌های مختلف آبیاری بر عملکرد محصول و شوری خاک را در نظر نمی‌گیرند. گزینه‌های مدیریتی که به‌وسیله مطالعات صحرایی بررسی می‌شوند، به دلیل زمان‌بر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌شوند. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در پژوهش‌های مزرعه‌ای را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و آن‌ها را تبدیل به ابزاری کارآمد در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (وندام و همکاران، ۲۰۰۸). دقت نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی به‌دقت داده‌های موردنیاز بستگی دارد و در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها می‌توانند بدون محدودیت‌های مکانی و زمانی موجود در پژوهش‌های مزرعه‌ای و صرف هزینه و زمان کمتر، برای ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات درازمدت این مدیریت‌ها به کار گرفته شوند (سینگ، ۲۰۰٤). بنابراین این مدل‌ها توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که به‌صورت گسترده روی برنامه‌ریزی کم‌آبیاری و استفاده از آب‌شور در شرایط مختلف تأمین آب و شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌کنند (کائو و همکاران، ۲۰۰٦).

یکی از مدل‌های زراعی پرکاربرد، مدل AquaCrop است که از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سراسر جهان به‌دست‌آمده است. استخوان‌بندی فکری و اصول اساسی مدل برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) و الگوریتم مورداستفاده در نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه‌شده است. مدل AquaCrop در دامنه وسیعی از محصولات زراعی و باغی قابل‌استفاده است (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). مدل AquaCrop مدلی ارزشمند برای مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب است. سادگی، نیاز به حداقل داده ورودی و دقت قابل‌قبول مدل از مزایای استفاده از آن است (رائس و همکاران، ۲۰۰۹).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهینه‌سازی عمق آبیاری محصولات از اهمیت زیادی برخوردار است. بهینه‌سازی عمق آبیاری در شرایط مختلف کمبود آب، کمبود زمین، شوری آب و یا ترکیبی از این حالت‌ها، متفاوت بوده، اما هدف عمدتاً به بیشینه رساندن سود خالص است (شهیدی، ۱۳۸۷). توابع تولید محصول یکی از مهمترین عوامل موردنیاز در بهینه‌سازی عمق آبیاری است (شهیدی، ۱۳۸۷). 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 است (شهیدی، ۱۳۸۷). درصورتی‌که میزان آب قابل‌دسترس مشخص باشد، با محاسبه عمق بهینه آب آبیاری می‌توان سطح زیر کشت بهینه را نیز تعیین نمود که تهیه این اطلاعات، کمک بزرگی به امر تصمیم‌گیری در بخش مدیریت آبیاری خواهد نمود (شهیدی، ۱۳۸۷).

مطالعات صورت گرفته توسط پژوهش‌گران مختلف نشان داد، مدل AquaCrop می‌تواند با دقت نسبتاً بالایی عملکرد محصول را تحت تیمارهای مختلف آبیاری شبیه‌سازی کند (سالمی و همکاران، ۲۰۱۱؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ شمس‌نیا و پیرمرادیان، ۲۰۱۳؛ کومار و همکاران، ۲۰۱٤). بنابراین پژوهش‌گران دیگری از این مدل برای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی آبیاری استفاده کردند. گارسیا–ویلا و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل AquaCrop بهینه‌سازی در شرایط کم‌آبیاری را برای گیاه کتان انجام دادند. آن‌ها ابتدا سناریوهای مختلف کم‌آبیاری را با مدل انجام دادند و سپس گزارش کردند که بهترین تابع تولید برازش داده‌شده، تابع تولید درجه دوم است. در ادامه با استفاده از یک مدل اقتصادی که سود خالص را محاسبه می‌کند، اعلام کردند بیشترین سود با توجه به ویژگی‌های آب و هوایی سال زراعی (مرطوب، نرمال و خشک) در دامنه مقادیر نیاز آبی ٥٤٠ تا ٧٤٠ میلی‌متر بدست می‌آید.

گیرتس و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل AquaCrop رهنمودهایی به‌صورت منحنی برای کاربرد به‌موقع آب آبیاری برای گیاهی که در شرایط همزمان بارندگی و آبیاری کشت می‌شود، ارائه داده و روش خود را برای گیاه کینوا آزمایش کردند و سه برنامه آبیاری به ترتیب برای سال‌های مرطوب، نرمال و خشک در فلات مرکزی بولیوی ارائه کردند. آن‌ها گزارش کردند که مدل AquaCrop ابزار مناسبی است که می‌تواند با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب آبیاری و کاربرد به‌موقع آب آبیاری به کشاورزان کمک کند.

گارسیا–ویلا و فررز (۲۰۱۲) با استفاده از مدل AquaCrop بهینه‌سازی مدیریت آبیاری را در سطح مزرعه و در منطقه جنوب غربی اسپانیا برای چهار گیاه پنبه، ذرت، سیب‌زمینی و آفتاب‌گردان انجام دادند. آن‌ها ابتدا با استفاده از مدل AquaCrop و استفاده از روش‌های رگرسیونی تابع تولید را برای هر یک از چهار محصول برای دو سال مطلوب و نامطلوب از نظر ویژگی‌های اقلیمی (بارندگی) تعیین کردند و سپس با استفاده از یک مدل اقتصادی، مدیریت آبیاری مناسب را برای هر یک از محصولات فوق تعیین نمودند. آن‌ها گزارش کردند که این مدل می‌تواند به کشاورز کمک کند تا بتواند قبل از دوره کشت در مورد الگوی کشت و سناریوهای مختلف آبیاری تصمیم‌گیری کند. اما این مدل به شبکه‌های آبیاری که در همان منطقه برای تخصیص آب بنا شده است، محدود می‌شود.

با توجه به بررسی منابع و مطالعات انجام‌شده می‌توان مطرح نمود در بحث بهینه‌سازی مصرف آب تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی در شرایط شوری و کم‌آبی با استفاده از مدل AquaCrop مطالعه‌ای صورت نگرفته و از نرم‌افزار MATLAB به‌عنوان ابزاری پیوند شده به مدل AquaCrop در امر بهینه‌سازی استفاده نشده است. با افزایش جمعیت و کاهش منابع آب تخصیص‌یافته به بخش کشاورزی، افزایش بهره‌وری آب یکی از مسائل مهم و اساسی در بخش کشاورزی است (کیجنی و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین کاربرد به‌موقع آب آبیاری اساساً می‌تواند راندمان آبیاری و بهره‌وری آب را با فراهم کردن شرایط بهینه رشد در سراسر دوره رشد، افزایش دهد (مالدن، ۲۰۰۳؛ رائس و همکاران، ۲۰۰٦). ازاین‌رو باید رهنمودهای کاربردی کاربرد به‌موقع آب آبیاری برای کارشناسان آب و کشاورزان تهیه شود. این رهنمودها اجازه خواهند داد که آب تخصیص‌یافته به‌طور مناسب به بخش کشاورزی برای گیاه و منطقه‌ای خاص استفاده شود. هدف اصلی در این پژوهش ارائه روش بهینه‌سازی مصرف آب در شرایط توأم آب–شوری به‌منظور تضمین بیشینه سود خالص و همچنین کمینه کردن زه‌آب تولیدی در

شـــرایط محـدودیـت زمین بـا اســتفـاده از پیونـد مدل AquaCrop به نرم‌افزار MATLAB است..

مواد و روش‌ها

بهینه‌سازی مدیریت آبشویی و آبیاری

در این پژوهش از مدل AquaCrop واسنجی و صـحت‌سنجی شده برای دو رقم گندم در منطقه بیرجند و یک رقم گندم در منطقه مشـــهد اســتفاده شـــد (محمدی، ۱۳۹٤؛ محمـدی و همکاران، ۱۳۹٤). محمدی و همکاران (۱۳۹٤) از نتایج مزرعه‌ای شـــهیدی (۱۳۷۸) و حق‌وردی (۱۳۹۰) برای واسـنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop اسـتفاده کردند. در پژوهش شـهیدی (۱۳۸۷) که در منطقه بیرجند انجام شـــده بود، تیمارهای آبیاری برای گندم‌های زمســـتانه (دو رقم روشـــن و قدس) ۱۲۵، ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی و شوری آب ۱/٤، ٤/۵ و ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر بود (جـدول ۱). در پژوهش حق‌وردی (۱۳۹۰) کـه در منطقه مشـــهد انجام شـــده بود، تیمارهای آبیاری برای گندم بهاره (رقم روشـــن) ۱۰۰، ۹۰، ٦۵ و ٤۰ درصـــد نیاز آبی و شـــوری آب ۰/۵، ۱/۹، ۵/۲۵، ۸/٦ و ۱۰/۰ دســـی-زیمنس بر متر بود (جدول ۲).

بهینه‌ســـازی مدیریت عمق آبشـــویی و آبیاری، به ترتیب مراحل زیر انجام شد:

۱- تعیین ســـناریوهای مدیریتی مختلف برای هر شـــوری آب آبیاری و هر رقم گندم به‌صورت مجزا (جدول۳).

جدول ۱- مدیریت‌های آبیاری در پژوهش شهیدی (۱۳۸۷)

نوبت آبیاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
روزهای بعد از کاشت	۲	۱۰۳	۱۱۷	۱۳۱	۱۵۴	۱۶۵	۱۷۵
عمق آبیاری برای هر سطح شوری (میلی‌متر)	۳۰	۷۰	۷۶	۹۱	۹۷	۹۰	۸۰

جدول ۲- مدیریت‌های آبیاری در پژوهش حق‌وردی (۱۳۹۰)

نوبت آبیاری		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
روزهای بعد از کاشت		۲	۱۲	۲۳	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵	۷۵	۸۵
عمق آبیاری (mm)	شوری ۰/۵ (dS/m)	۴۰	۴۰	۳۶	۵۴	۶۰	۹۰	۹۶	۱۱۲	۱۵۰
	شوری ۱/۹ (dS/m)	۴۰	۴۰	۳۲/۴	۴۸/۶	۵۴	۸۱	۸۶/۴	۱۰۰/۸	۱۳۵
	شوری ۵/۲۵ (dS/m)	۴۰	۴۰	۲۳/۴	۳۵/۱	۳۹	۵۸/۵	۹۶	۱۱۲	۹۷/۵
	شوری ۸/۶ (dS/m)	۴۰	۴۰	۳۲/۴	۴۸/۶	۵۴	۸۱	۸۶/۴	۱۰۰/۸	۱۳۵
	شوری ۱۰/۰ (dS/m)	۴۰	۴۰	۳۶	۵۴	۶۰	۹۰	۹۶	۱۱۲	۱۵۰

برای بـه دســـت آوردن عمق‌هـای مختلف آبیـاری (عمق ثـابت) ابتدا تبخیر – تعرق مرجع متوســـط روزانه در دهه حداکثر نیاز آبی گیاه تعیین شـــد. ســـپس با توجه به دور آبیاری، مقدار اعماق آبیاری در دامنه ۰/٤ تا ۱/۳ با گام‌های ۰/۱ محاســـبه شـــد و به‌عنوان میزان آبیاری برای هر دور آبیاری در نظر گرفته شد. برای مثال اگر فرض شود تبخیر – تعرق مرجع متوسـط روزانه پنج میلی‌متر بر روز باشد و دور آبیاری شـش روز، بنابراین دامنه تغییرات عمق آبیاری عبارت اســـت از: ٦×۵×۰/٤ تا ٦×۵×۱/۳ میلی‌متر. درواقع میزان آبیاری از ٤۰ تا ۱۳۰ درصـد آبیاری کامل به‌صـورت گام‌های ۱۰ درصدی تغییر می‌کند.

در این پژوهش مـدل Aquacrop درواقع نقش تابع تولید در شرایط مختلف مدیریت آبیاری و آبشویی را داشت.

۲- کدنویســـی در نرم‌افزار MATLAB به‌منظور اجرای سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری و آبشویی با استفاده از مدل Aquacrop و انتخاب بهترین سـناریو تحت شـرایط محدودیت زمین.

در شـرایطی که کمبود اراضـی کشـاورزی عامل محدودکننده تولید اسـت، کل اراضـی کشـاورزی کشـت می‌شـود. در این شـرایط ازنظر میزان آب قابل‌دسـترس محدودیتی وجود ندارد (مانند برخی از اراضـی شـمال کشـور)، لذا هدف تعیین عمقی از آب آبیاری اسـت که به‌موجب آن درآمد خالص بیشینه شود. با استفاده از معادله

(۱) سود خالص تحت شرایط محدودیت زمین برای سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری محاسبه شد:

$$B = P_c \times Y_i - C_f - P_w \times I_i \quad (۱)$$

که در آن:

B بیشینه سود خالص در یک هکتار (ریال)، P_C قیمت محصول (ریال بر کیلوگرم)، Y_i عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار)، C_f هزینه‌های ثابت (ریال بر هکتار)، P_w هزینه متغیر (ریال بر مترمکعب آب آبیاری) و I_i مقدار آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) می‌باشند.

جدول ۳- مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی

نوع مدیریت	مقدار آبیاری	مقدار آبشویی
دورهای مختلف آبیاری (دور ثابت، از ۶ تا ۱۴ روز متغیر است)	۱- عمق‌های مختلف آبیاری (عمق ثابت، درصدهایی از تبخیر- تعرق روزانه*)	۱- بدون آبشویی ۲- آبشویی با مقدار ثابت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) ۳- موردی با رسیدن شوری خاک به حد آستانه تحمل گیاه (میلی‌متر)
	۲- آبیاری تا حد گنجایش مزرعه-ای	۱- بدون آبشویی ۲- آبشویی با مقدار ثابت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) ۳- موردی با رسیدن شوری خاک به حد آستانه تحمل گیاه (میلی‌متر)
تخلیه مجاز رطوبتی مختلف (MAD های مختلف، از ۴۰، ۴۲، ۴۴، ...، ۶۶ درصد متغیر است)	۱- عمق‌های مختلف آبیاری (عمق ثابت، درصدهایی از تبخیر- تعرق روزانه)	۱- بدون آبشویی ۲- آبشویی با مقدار ثابت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) ۳- موردی با رسیدن شوری خاک به حد آستانه تحمل گیاه (میلی‌متر)
	۲- آبیاری تا حد گنجایش مزرعه-ای	۱- بدون آبشویی ۲- آبشویی با مقدار ثابت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) ۳- موردی با رسیدن شوری خاک به حد آستانه تحمل گیاه (میلی‌متر)
تخلیه عمق‌های مشخصی از ناحیه ریشه (۳۰، ۳۲، ۳۴، ...، ۴۸ میلی‌متر متغیر است)	۱- عمق‌های مختلف آبیاری (درصدهایی از عمق آب تخلیه شده از خاک از ۵۰ تا ۱۲۰ درصد)	۱- بدون آبشویی ۲- آبشویی با مقدار ثابت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) ۳- موردی با رسیدن شوری خاک به حد آستانه تحمل گیاه (میلی‌متر)
	۲- آبیاری تا حد گنجایش مزرعه-ای	۱- بدون آبشویی ۲- آبشویی با مقدار ثابت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد) ۳- موردی با رسیدن شوری خاک به حد آستانه تحمل گیاه (میلی‌متر)

در پژوهش حاضر هزینه‌های ثابت برای مشهد و بیرجند به ترتیب ۱۸۸۰۰۰۰۰ ریال بر هکتار و۱۲۵٤۱٦۰۰ ریال بر هکتار، قیمت گندم ۱۱۵۵۰ ریال بر کیلوگرم (وب‌سایت جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، ۱۳۹۳) و قیمت آب در مشهد ۱۸۷۰ ریال بر مترمکعب (خواجه روشنایی و همکاران، ۱۳۸۹) و در بیرجند ۲۰۰۰ ریال بر مترمکعب (بر اساس بازدید میدانی و اظهارات آب‌بران منطقه) در نظر گرفته شد. قیمت آب قبل از وارد کردن در برنامه بهینه‌سازی به ریال بر سانتی متر آب آبیاری تبدیل شد.

در بعضی از مناطق ایران، آب آبیاری از رودخانه-ها تأمین و زه‌آب تولیدی مجدداً به رودخانه باز می‌گردد. با توجه به این‌که در این مناطق کمینه کردن زه‌آب از لحاظ محیط‌زیستی بسیار حائز اهمیت است و همین‌طور به نفع کشاورزان پایین‌دست رودخانه است (به کمترین مقدار رساندن زه‌آب تولیدی، کیفیت آب رودخانه برای زمین‌های پایین‌دست رودخانه بهبود می‌یابد)؛ بنابراین در این پژوهش کمینه کردن زه‌آب خروجی در کنار بیشینه کردن سود خالص به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی از روش وزن‌دهی تجمعی ساده (SAWM[1]) که

[1] - Simple Additive Weighting Method

یکی از بهترین و مورد استفاده‌ترین روش‌های مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است، استفاده شد (معماریانی و همکاران، ۲۰۰۹).

معادله ریاضی روش SAWM را می‌توان به‌صورت زیر ارایه نمود (معماریانی و همکاران، ۲۰۰۹؛ پودوزکو، ۲۰۱۱):

$$A^* = \left\{ A_i \middle| \max_i \Sigma_{j=1}^{n} W_j X_{ij} / \Sigma_{j=1}^{n} W_j \right\} \quad (۲)$$

که در آن:

A^* بهترین گزینه، W_j وزن هر معیار، X_{ij} مقدار آلترناتیو i ام و معیار j ام در ماتریس تصمیم‌گیری با یک مقیاس کمی قابل‌مقایسه، می‌باشند. معمولاً وزن‌ها نرمال شده هستند یعنی:

$$\Sigma_{j=1}^{n} W_j = 1 \quad (۳)$$

در این پژوهش با توجه به این‌که واحد سود و زه‌آب متفاوت می‌باشند، بنابراین با استفاده از روابط زیر به ترتیب مقادیر سود و زه‌آب بی‌بعد شد:

$$X_{ij}^{B} = \frac{B_{ij}}{B_j^{max}} \quad (٤)$$

$$X_{ij}^{D} = \frac{D_j^{min}}{D_{ij}} \quad (٥)$$

که در آن‌ها:

X_{ij}^{B} مقادیر بی‌بعد شده سود، X_{ij}^{D} مقادیر بی‌بعد شده زه‌آب، B_{ij} سود بدست آمده در هر مدیریت (ریال)، B_j^{max} سود بیشینه (ریال)، D_{ij} عمق زه‌آب تولیدی در هر مدیریت (میلی‌متر) و D_j^{min} کمترین عمق زه‌آب (میلی‌متر) است. برای تعیین وزن معیارها (سود و زه‌آب) از روش میانگین حسابی استفاده شد. در این روش قبل از تعیین وزن معیارها ابتدا ماتریس مقایسات زوجی تشکیل می‌شود که ابعاد ماتریس به تعداد پارامترهایی که باید وزن آن‌ها تعیین شوند، بستگی دارد. به‌عنوان‌مثال اگر تعداد پارامترها دو و سه عدد باشند، ماتریس آن‌ها به ترتیب ۲×۲ و ۳×۳ خواهد بود. در این ماتریس سطر i با ستون j مقایسه می‌شود. به همین علت تمامی عناصر قطر اصلی این ماتریس عدد یک است. همچنین هر مقدار زیر قطر اصلی، معکوس مقدار بالای قطر اصلی است. سپس مجموع مقادیر هر ستون ماتریس محاسبه و مقدار هر عنصر آن ستون بر مجموع مقادیر آن ستون تقسیم می‌شود (هر ستون نرمال می‌شود). پس از آن میانگین مقادیر هر ردیف ماتریس به‌عنوان وزن هر اولویت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این‌که بیشینه کردن سود و کمینه کردن زه‌آب تولیدی در این پژوهش به ترتیب در اولویت اول و دوم قرار دارند. به عبارتی درجه اهمیت بیشینه کردن سود دو برابر بیشینه کردن زه‌آب تولیدی است؛ بنابراین ماتریس اولویت معیارها به‌صورت زیر تعریف و وزن آن‌ها با استفاده از روش میانگین حسابی تعیین شدند:

$$A = \begin{matrix} \\ B \\ D \end{matrix} \begin{bmatrix} B & D \\ 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow[Columns]{Normalized} \begin{bmatrix} 2/3 & 2/3 \\ 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \xrightarrow[rowes]{Average\ of}$$

$$W = \begin{bmatrix} 0.67 \\ 0.33 \end{bmatrix} \quad (٦)$$

که ۰/٦۷ ضریب وزنی سود و ۰/۳۳ ضریب وزنی زه‌آب است. این ضرایب وزنی بستگی به اولویت‌بندی کاربر دارد و بین صفر و یک قابل‌تغییر می‌باشند. به‌عنوان‌مثال اگر برای کاربر درجه اهمیت بیشینه کردن سود سه برابر کمینه کردن زه‌آب تولیدی باشد. این ضرایب وزنی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۲۵ بدست می‌آیند؛ بنابراین کاربر می‌تواند هر مقدار ضریب وزنی را برای سود و زه‌آب در مدل انتخاب کند، به‌شرط این‌که مجموع دو ضریب برابر با یک شود.

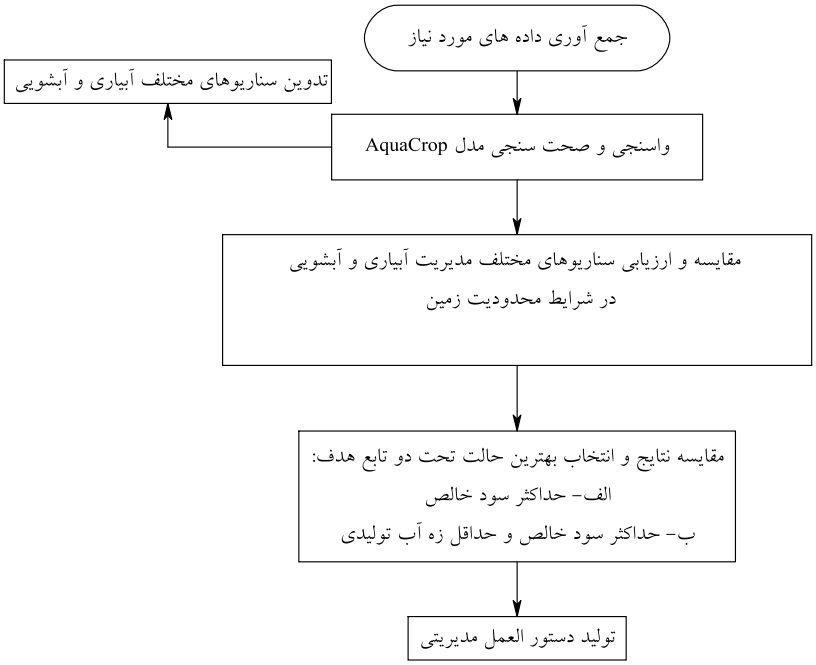
در این پژوهش بهترین مدیریت آبیاری به‌منظور دستیابی به بیشینه سود محصول و کمینه کردن زه‌آب تولیدی از رابطه زیر تعیین شد:

$$A^* = \max \left(0.67 \times X_{ij}^{B} + 0.33 \times X_{ij}^{D} \right) \quad (۷)$$

در شکل (۱) فلوچارت مربوط به مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی آورده شده است. برای آب آبیاری با کیفیت مناسب فقط مدیریت‌های مختلف آبیاری اجرا شدند، زیرا آبشویی برای این نوع کیفیت آب نیاز نبود؛ اما برای دیگر کیفیت‌های آب آبیاری همه‌ی مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی همزمان اجرا شد.

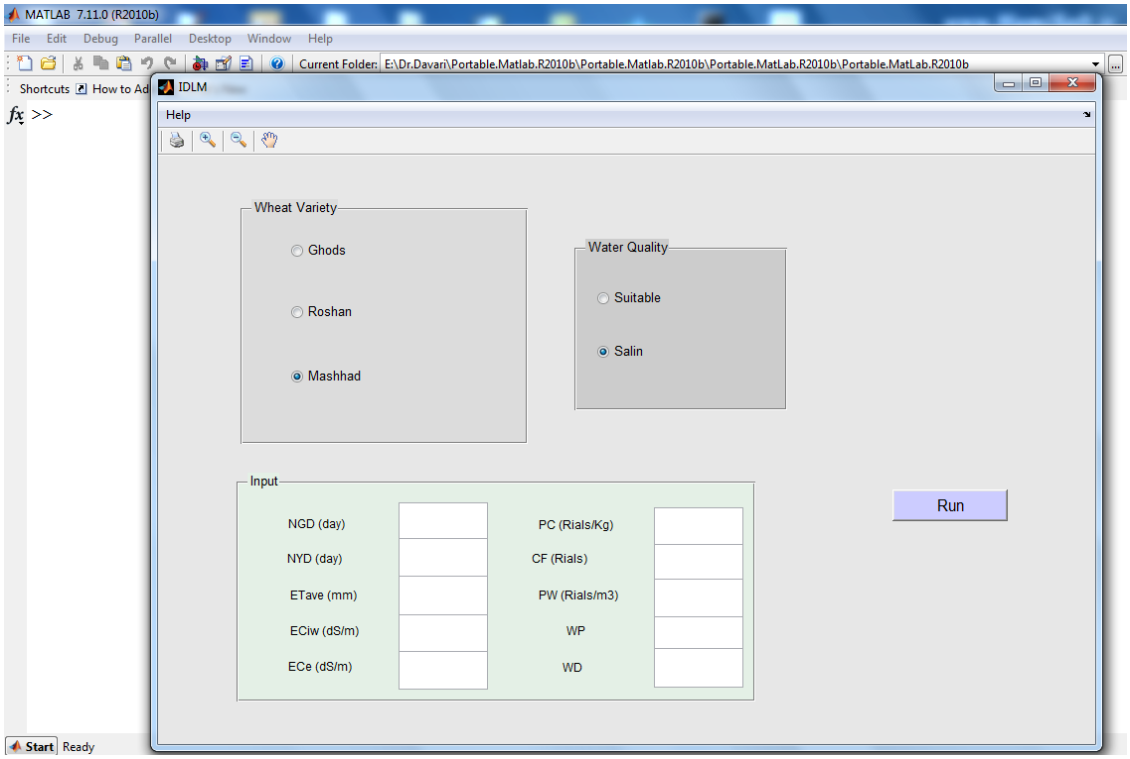
برای پیوند کردن مدل Aquacrop به نرم‌افزار MATLAB از Plug-in program مدل Aquacrop که

در سایت فائو موجود است، استفاده شد. به‌طوری‌که ابتدا فایل project که شامل فایل‌های هواشناسی، گیاهی، آبیاری، مزرعه‌ای و خاک بود، برای هر رقم گندم با استفاده از مدل Aquacrop ساخته شد. سپس با استفاده Plug-in program مدل Aquacrop این فایل با کد نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB پیوند و مدل برای مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی اجرا شد.



شکل ۱- فلوچارت بهینه‌سازی اقتصادی به‌منظور تعیین مدیریت آبیاری و آبشویی مناسب

کدنویسی انجام‌شده در نرم‌افزار MATLAB که با مدل AquaCrop به‌منظور بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی پیوند شده بود، با استفاده از نوارابزار User Interface Graphical (GUI) به یک رابط تصویری تبدیل شد. در شکل (۲) نمایی از این رابط گرافیکی کاربر ارائه‌شده است. در قسمت Wheat Variety نوع رقم گندم و در قسمت Water Quality نوع کیفت آب مناسب (Suitable) یا شور (Saline) انتخاب می‌گردد. در قسمت Input پارامترهای تعداد روزهای فصل کاشت محصول (NGD)، تعداد روزهای سال (NYD)، تبخیر-تعرق متوسط روزانه در دهه حداکثر نیاز آبی گیاه برحسب میلی‌متر (ETave)، شوری آب آبیاری برحسب دسی‌زیمنس بر متر (ECiw)، شوری حد آستانه کاهش محصول برحسب دسی‌زیمنس بر متر (ECe)، قیمت محصول برحسب ریال بر کیلوگرم (PC)، هزینه‌های ثابت زمین بر حسب ریال بر هکتار (CF)، قیمت آب برحسب ریال بر مترمکعب (PW)، ضریب وزنی سود خالص (WP) و ضریب وزنی حداقل زه‌آب تولیدی (WD) وارد می‌شوند و درنهایت با کلیک بر گزینه Run مدل اجراشده و بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی برای شرایط مختلف در فایل Notepad در قسمت خروجی برنامه ذخیره می‌شود.



شکل ۲- نمایی از رابط گرافیکی کاربر برای استفاده از مدل بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی

شرایط محدودیت زمین

در این شـــرایط از لحـاظ میزان آب آبیـاری قابل‌دسترس محدودیتی وجود نداشته و عامل محدودکننده تولید، کمبود اراضـی کشـاورزی اسـت. در چنین شرایطی کل اراضـی کشـاورزی کشـت می‌شود. لذا هدف از تعیین مدیریت آبیاری و آبشـویی مناسـب در شـرایطی که هدف دسـتیابی به بیشینه سود خالص باشد، تعیین مدیریتی است که به‌موجب آن درآمد خالص بیشـینه شـود و در شرایطی که هدف دسـتیابی به بیشـینه سود و کمینه زه‌آب خروجی باشد، تعیین مدیریتی است که به‌موجب آن به‌طور همزمان هم درآمد خالص بیشـینه شود و هم زه‌آب خروجی کمینه باشد.

در وضـعیت محدودیت زمین، قیمت محصـول، عملکرد محصـول و آب بهاء نقش مهمی در تعیین بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی دارند؛ اما چون کل سطح اراضی کشت می‌شوند، هزینه‌های ثابت زمین شامل کاشت، داشت و برداشت در میزان بهترین مدیریت مؤثر نیست (شهیدی، ۱۳۸۷).

نتایج و بحث

بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی در شرایط محدودیت زمین

ویژگی‌های بهترین مدیریت آبیاری و آبشـویی با هدف دسـتیابی به حداکثر سود و حداقل زه‌آب برای ارقام مختلف گندم (قدس، روشن و روشن بهاره) تحت شرایط محدودیت زمین در جدول (٤) ارائه‌شـده اسـت. در این جدول ملاحظه می‌شـود که اگر هدف، دسـتیابی به بیشینه سـود خالص باشـد، با افزایش شـوری آب آبیاری، میزان زه‌آب تولیـدی افزایش می‌یـابـد کـه نشـــان می‌دهـد در شـــوری‌های بالا جذب آب توســـط گیاه کاهش می‌یابد. همچنین در این جـدول مشـــاهـده می‌شـــود اگر هدف، دسـتیابی به حداکثر سـود خالص باشـد میزان آب آبیاری، آب آبشویی و همین‌طور زه‌آب بیشتر است نسبت به زمانی که هدف، دسـتیابی به بیشینه سود خالص و کمترین زه‌آب تولیدی باشـد. درواقع زمانی که هدف دسـتیابی به بیشـینه سـود خالص و کمترین زه‌آب تولیدی باشـد، مدل با تغییر نوع مدیریت آبیاری و کاهش دادن میزان آبشـــویی به‌ویژه آبشـــویی فقط در دو آبیاری آخر، میزان آب مصـــرفی را

کاهش داده و میزان زه‌آب تولیدی را به کمترین مقدار ممکن و حتی به صفر رسانده است؛ بنابراین، در مناطقی که کمینه کردن زه‌آب تولیدی در کنار بیشینه کردن سود خالص اهمیت داشته باشد، با استفاده از این مدل می‌توان مدیریتی را به کشاورز پیشنهاد داد که در آن علاوه بر دستیابی به سود خالص مناسب، زه‌آب تولیدی را کاهش و حتی به صفر برساند (جدول ۵). هر چند سود خالص بدست آمده در این مدیریت کمی کمتر از سود بدست آمده در مدیریتی است که هدف فقط دستیابی به بیشینه سود خالص است (جدول ۵)؛ اما فوایدی که از کمینه کردن زه‌آب تولیدی برای محیط‌زیست حاصل می‌شود می‌تواند این کاهش عملکرد را توجیه کند. در این مدیریت‌ها شوری خاک برای فصل آینده مسلماً افزایش خواهد یافت و کافی است در فصل زمستان و قبل از کاشت که کیفیت آب مناسب‌تر و بارندگی بیشتر است با یک نمونه‌برداری ساده از خاک، میزان شوری خاک را اندازه‌گیری کرد و در صورت بالا بودن شوری خاک، عمل آبشویی را انجام داد. راه‌کار دیگری که در استفاده از آب‌شور برای کشاورزی به‌منظور کاهش اثرات مضر محیط‌زیستی آن، می‌تواند وجود داشته باشد، شوری‌زدایی آب‌شور قبل از استفاده برای کشاورزی است؛ اما باید دید که آیا هزینه شوری‌زدایی آب‌شور و همین‌طور هزینه انتقال پساب تولیدی از دستگاه‌های شوری‌زدایی آب شور، از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه است یا خیر. منابع مختلفی گزارش کردند که شوری‌زدایی آب‌شور برای استفاده کشاورزی اقتصادی نیست. ازجمله آقاخانی و همکاران (۱۳۹۲) گزارش کردند شیرین کردن آب‌شور برای کشاورزی به دلیل هزینه اولیه و جاری بالا و همین‌طور مشکل دفع پساب شور و هزینه دفع آن، توجیه اقتصادی ندارد. آن‌ها اعلام کردند ازآنجایی‌که قسمت اعظم کشاورزی کشور خرده مالکیت است، لذا عملاً کاربرد روش‌های فعلی شوری‌زدایی با توجه به مقیاس کوچک اکثر اراضی کشور هزینه‌های بالایی را به همراه خواهد داشت. از طرف دیگر ازآنجاکه در قسمت اعظم کشور آب موردنیاز کشاورزی از طریق منابع زیرزمینی تأمین می‌شود، لذا عملاً تبدیل‌شدن بخشی از این آب به پساب نیز مخالفت‌های زیادی را بین کشاورزان ایجاد خواهد کرد.

همان‌طور که مطرح شد در مدیریت‌هایی که هدف آن‌ها دستیابی به حداکثر سود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی است، می‌توان با قبول کمی کاهش سود، زه‌آب خروجی را به کمترین مقدار رساند؛ بنابراین با در نظر گرفتن این مدیریت‌ها در منطقه‌ای که از رودخانه آبگیری می‌شود، باید دید که این کاهش سود در مناطق بالادست که زه‌آب خروجی از مزارع خود را کاهش می‌دهند و سبب بهبود کیفیت آب در مناطق پایین‌دست می‌شوند، با افزایش سود بدست آمده در مناطق پایین‌دست در اثر بهبود کیفیت آب، جبران خواهد شد.

در جدول (۵) مقادیر عملکرد، سود، میزان آب آبیاری و آبشویی را برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی و همین‌طور مدیریت‌های موجود (پژوهش شهیدی (۱۳۸۷) و حق‌وردی (۱۳۹۰)) در رقم‌های مختلف گندم و سطوح مختلف شوری آب ارائه‌شده است. با توجه به این جدول، میزان عملکرد گندم برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در تمام سطوح شوری و رقم‌های مختلف گندم به‌جز سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر مربوط به رقم روشن و ۸/٦ و ۱۰/۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن بهاره، بیشتر از مدیریت‌های موجود بدست آمده است. مقدار افزایش عملکرد در مدیریت‌های بهینه نسبت به مدیریت موجود برای رقم قدس در سطوح شوری ۱/٤، ٤/۵ و ۹/٦ به ترتیب ۲۰/۵، ۳۰ و ۲۳/٤ درصد و برای رقم روشن برای همین سطوح شوری به ترتیب ۲٦/٦، ۹/۲ و ۱۰/۸- درصد بود. این افزایش برای رقم روشن بهاره در سطوح شوری ۰/۵، ۱/۹، ۵/۲۵، ۸/٦ و ۱۰/۰ به ترتیب ٤/٤، ۹/۲، ۲۳/٤، ۱۱/٤- و ۲٦/۲- درصد بدست آمد. با توجه به این‌که مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای این سطوح شوری مقدار عملکرد را نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده کمتر برآورد نموده است، بنابراین مقدار

عملکرد برای مدیریت‌های بهینه در شرایط واقعی و مزرعه بیشتر خواهد بود. همچنین سود خالص برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در تمام سطوح شوری و رقم‌های مختلف گندم به‌جز سطوح شوری ۸/٦ و ۱۰/۰ دسی‌زیمنس بر متر مربوط به رقم روشن بهاره و سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر مربوط به رقم روشن زمستانه، بیشتر از مدیریت‌های موجود بدست آمده است. بیشترین اختلاف سود خالص در سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر رقم قدس (۱٤۲ درصد افزایش) و کمترین سود خالص در سطح شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن بهاره (پنج درصد افزایش) بود. دلیل کاهش عملکرد بدست آمده در مدل برای سطوح شوری ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر مربوط به رقم روشن بهاره نسبت به پژوهش حق‌وردی (۱۳۹۰) و سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر مربوط به رقم روشن زمستانه پژوهش شهیدی (۱۳۸۷) این است که در مرحله واسنجی مدل AquaCrop (محمدی (۱۳۹٤))، مدل AquaCrop نتوانست در این سطوح شوری آب آبیاری، به عملکردی که حق‌وردی (۱۳۹۰) و شهیدی (۱۳۸۷) در مزرعه بدست آورده بودند، دست پیدا کند و عملکرد محصول را در این سطوح شوری، کمتر برآورد می‌کرد. در جدول (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش شوری آب آبیاری میزان آب ناخالص آبیاری کاهش می‌یابد که با واقعیت سازگار نیست. شهیدی (۱۳۸۷) با پژوهش بر روی گندم و اکبری (۱۳۸۳) بر روی گندم و چغندرقند دلیل این امر را ثابت گرفتن آب بهاء در شوری‌های مختلف آب آبیاری گزارش کرده‌اند. دلیل دیگر این امر می‌تواند این باشد که در شوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل گندم (شش دسی‌زیمنس بر متر (علیزاده، ۱۳۸۳)) افزایش آب آبیاری باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود. حتی اگر فرض شود باعث افزایش عملکرد محصول می‌شود، این افزایش عملکرد به اندازه‌ای ناچیز است که نمی‌تواند هزینه‌های ناشی از آب مصرفی بیشتر را جبران کند. به همین دلیل است که در شوری‌های کمتر از حد آستانه تحمل گندم، میزان آب ناخالص آبیاری در رقم روشن زمستانه (سطح شوری ٤/٦ دسی‌زیمنس بر متر) و روشن بهاره (۵/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر) افزایش‌یافته است اما در شوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل، میزان آب ناخالص آبیاری کاهش‌یافته است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد اگر هدف از تعیین بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی دستیابی به بیشترین سود خالص و کمترین زه‌آب تولیدی باشد، میزان سود خالص نسبت به زمانی که هدف فقط دستیابی به بیشترین سود خالص باشد، کمی کاهش می‌یابد. این کاهش سود در رقم قدس برای سطوح شوری ۱/٤، ٤/۵ و ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۱/۱، ۷/٦ و ۲۲/۲ درصد، در رقم روشن برای سطوح شوری ۱/٤، ٤/۵ و ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۸/۱، ۳/۱ و ۰ درصد و در رقم روشن بهاره برای سطوح شوری ۰/۵، ۱/۹، ۵/۲۵، ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۰، ۰، ۲۲/۷، ۲۲/۹ و ۱۷/۱ درصد می‌باشند. در شوری‌های بالا چون مبلغ سود حاصله کم است، بنابراین میزان درصد کاهش بخصوص در رقم قدس افزایش‌یافته است.

با توجه به این‌که مقدار سود خالص بدست آمده در تمامی سطوح شوری برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در رقم روشن بیشتر از رقم قدس بدست آمده است بنابراین ازنظر اقتصادی در منطقه بیرجند که در شرایط محدودیت آب قرار دارد، توصیه می‌شود که رقم روشن مورد کشت قرار بگیرد و برای بهبود مدیریت‌های آبیاری در این منطقه از مدیریت‌های بدست آمده در این پژوهش استفاده کنند. در منطقه مشهد نیز سود حاصله از مدیریت‌های بدست آمده از مدل بیشتر از سود موجود در پژوهشات حق‌وردی (۱۳۹۰) بدست آمد؛ بنابراین، در این منطقه نیز می‌توان با استفاده از مدیریت‌های مناسب تعیین‌شده در سطوح شوری مختلف سود حاصله از کشت گندم را افزایش داد.

به‌طورکلی، نتایج بهینه‌سازی نشان داد در مناطقی که زه‌آب تولیدی حاصل از آبیاری، یکی از مشکلات مهم محیط‌زیستی و همین‌طور عامل نارضایتی کشاورزان پایین‌دست آن منطقه است، می‌توان با قبول مقدار ناچیزی

کاهش سود این مشکل را برطرف نمود. به عبارتی با توجه به جدول (۵) میزان آب آبیاری و همین‌طور میزان آبشویی را کاهش داد و حتی در بعضی موارد میزان آبشویی را فقط در دو آبیاری انتهایی انجام داد و در صورت لزوم در هنگام زمستان که کیفیت آب مناسب‌تر و بارندگی بیشتر است عمل آبشویی را انجام داد. هر چند که به‌منظور صحت این نتایج بهتر است مدیریت‌های بهینه حاصل از این پژوهش در سطح مزرعه آزمایش شود و میزان عملکرد و سود بدست آمده در شرایط مزرعه با مقادیر بدست آمده توسط مدل بهینه‌سازی مقایسه شود.

جدول ۴- مشخصات بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی با هدف دستیابی حداکثر سود و حداقل زه‌آب برای ارقام مختلف گندم (قدس، روشن و روشن بهاره) تحت شرایط محدودیت زمین

نوع رقم	شوری آب (dS/m)	نوع هدف											
		بیشترین سود						بیشترین سود و کمترین زه‌آب					
		نحوه آبیاری			عمق خالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان آبشویی	عمق ناخالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان زه‌آب (mm)	نحوه آبیاری			عمق خالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان آبشویی	عمق ناخالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان زه‌آب (mm)
		دور آبیاری ثابت (روز)	مقدار تخلیه مجاز رطوبت (میلی‌متر)	مقدار تخلیه مجاز رطوبت (درصد)					دور آبیاری ثابت (روز)	مقدار تخلیه مجاز رطوبت (میلی‌متر)	مقدار تخلیه مجاز رطوبت (درصد)				
قدس	۱/۴	–	۴۰	–	۴۰	۰	۴۰	۳۴/۱	–	–	۶۴	۳۲	۰	۳۲	۰
	۴/۵	–	۴۴	–	۵۷	۲۵ درصد	۷۱	۹۸/۷	–	–	۶۶	۳۲	۱۰ درصد آبیاری	۳۵	۰
	۹/۶	–	–	۶۶	۶۴	۳۲ و ۳۸ میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	۷۷	–	–	۶۴	۲۴	۱۵ درصد	۲۸	۰
روشن	۱/۴	–	–	۵۸	۳۲	۰	۳۲	۴۴/۹	–	۴۲	–	۳۴	۰	۳۴	۰
	۴/۵	–	–	۵۲	۲۴	۱۵ درصد	۲۸	۴۷/۸	–	۴۶	–	۲۸	۳۰ درصد	۳۶	۰
	۹/۶	–	۴۶	–	۲۳	۲۰ و ۲۲ میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	۳۴	–	۴۶	–	۲۳	۲۰ و ۲۲ میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	۳۴
روشن بهاره	۰/۵		۴۰		۴۴	۰	۴۴	۰	–	۴۰	–	۴۴	۰	۴۴	۰
	۱/۹	۱۰	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	۰	–	۰	۱۰	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	۰	–	۰
	۵/۲۵	۱۰	–	–	۶۰	۱۵ درصد	۷۵	۱۰۲/۶	۱۱	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	۰	–	۰
	۸/۶	۱۴	–	–	۸۴	۱۵ درصد	۹۷	۱۳۸	۱۴	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	۲۵ و ۲۸ میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	۴۴
	۱۰/۰	۱۴	–	–	۸۴	۱۰ درصد	۹۲	۱۴۴/۷	۱۴	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	۳۰ و ۳۴ میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	۵۳

جدول ۵- عملکرد، سود و مقادیر آبیاری بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی با هدف دستیابی به حداکثر سود و حداقل زه‌آب برای ارقام مختلف گندم تحت شرایط محدودیت زمین

نوع هدف											
		مدیریت موجود*			بیشترین سود				بیشترین سود و کمترین زه‌آب				
نوع رقم	شوری آب (dS/m)	عملکرد (Mg/ha)	سود (هزار ریال)	مجموع عمق ناخالص آبیاری (میلی‌متر)	عملکرد (Mg/ha)	سود (هزار ریال)	مجموع عمق خالص آبیاری (میلی‌متر)	مجموع عمق آبشویی (میلی‌متر)	مجموع عمق ناخالص آبیاری (میلی‌متر)	عملکرد (Mg /ha)	سود (هزار ریال)	مجموع عمق خالص آبیاری (میلی‌متر)	مجموع عمق آبشویی (میلی‌متر)	مجموع عمق ناخالص آبیاری (میلی‌متر)
قدس زمستانه	۱/۴	۳/۸۷۱	۲۱۴۸۸/۴۵	۵۳۴	۴/۶۶۵	۳۲۵۳۹/۱۵	۴۴۰	۰	۴۴۰	۴/۶۴۸	۳۲۱۸۲/۸۰	۴۴۸	۰	۴۴۸
	۴/۵	۳/۳۷۱	۱۵۷۱۳/۴۵	۵۳۴	۴/۳۸۱	۲۸۱۱۸/۹۵	۳۹۸	۹۹	۴۹۷	۴/۰۱۵	۲۶۱۳۱/۶۵	۳۵۰	۳۵	۳۸۵
	۹/۶	۲/۵۹۸	۶۷۸۵/۳۰	۵۳۴	۳/۲۰۵	۱۶۴۵۶/۱۵	۳۳۱	۷۰	۴۰۱	۲/۷۸۵	۱۳۴۶۵/۱۵	۲۶۸	۴۰	۳۰۸
روشن زمستانه	۱/۴	۴/۵۳۷	۲۹۱۸۰/۷۵	۵۳۴	۵/۷۴۴	۴۱۶۴۱/۶۰	۶۰۸	۰	۶۰۸	۵/۲۴۴	۳۸۵۰۶/۶۰	۴۷۶	۰	۴۷۶
	۴/۵	۴/۰۶۰	۲۳۶۷۱/۴۰	۵۳۴	۴/۴۳۴	۲۸۵۹۱/۱۰	۴۳۸	۶۶	۵۰۴	۴/۱۱۲	۲۷۷۵۲/۰۰	۲۷۷	۸۳	۳۶۰
	۹/۶	۳/۷۱۳	۱۹۶۶۳/۵۵	۵۳۴	۳/۳۱۱	۱۹۶۰۰/۴۵	۲۶۳	۴۲	۳۰۵	۳/۳۱۱	۱۹۶۰۰/۴۵	۲۶۳	۴۲	۳۰۵
روشن بهاره	۰/۵	۶/۲۰۰	۳۹۹۶۳/۱۰	۶۸۷	۶/۴۷۲	۴۱۹۶۴/۰۰	۷۴۸	۰	۷۴۸	۶/۴۷۲	۴۱۹۶۴/۰۰	۷۴۸	۰	۷۴۸
	۱/۹	۵/۷۵۰	۳۵۹۰۰/۶۹	۶۲۶/۳	۶/۲۷۷	۴۰۸۳۰/۰۱	۶۸۸/۲	۰	۶۸۸/۲	۶/۲۷۷	۴۰۸۳۰/۰۱	۶۸۸/۲	۰	۶۸۸/۲
	۵/۲۵	۴/۸۰۰	۲۶۵۱۳/۹۵	۵۴۱/۵	۵/۹۲۶	۳۵۶۲۰/۳۰	۶۰۰	۱۵۰	۷۵۰	۵/۰۹۸	۲۹۰۲۲/۷۲	۵۹۱/۴	۰	۵۹۱/۴
	۸/۶	۵/۰۶۰	۲۷۹۳۱/۱۹	۶۲۶/۳	۴/۴۸۳	۲۰۲۸۱/۳۵	۵۹۰	۸۹	۶۷۹	۳/۸۴۴	۱۶۴۹۵/۰۴	۴۳۳/۸	۵۳	۴۸۶/۸
	۱۰/۰	۵/۳۲۰	۲۹۷۹۹/۱۰	۶۸۷	۳/۹۲۴	۱۴۴۷۹/۴۰	۵۸۵	۵۹	۶۴۴	۳/۴۴۰	۱۲۳۵۹/۹۲	۳۹۴/۴	۶۴	۴۵۸/۴

*مدیریت موجود، در واقع مدیریت‌هایی است که شهیدی (۱۳۸۷) در شرایط مزرعه‌ای و با سطوح شوری ۱/٤، ٤/۵ و ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر برابی دو رقم گندم زمستانه قدس و روشن (جدول ۱) و حق‌وردی (۱۳۹۰) با سطوح شوری ۰/۵، ۱/۹، ۵/۲۵، ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر برای رقم روشن بهاره (جدول ۲) انجام دادند

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشـــان داد ســـود خالص برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشـویی در تمام سطوح شوری و رقم‌هـای مختلف گنـدم به‌جز ســـطوح شـــوری ۸/٦ و ۱۰ دسـی‌زیمنس بر متر رقم روشن بهاره، بیشتر از مدیریت‌های موجود در پژوهش شـــهیـدی (۱۳۸۷) و حق‌وردی (۱۳۹۰) بود. در شـوری‌های کمتر از حد آسـتانه تحمل گندم، میزان آب ناخالص آبیاری در رقم روشـن زمسـتانه (سطح شوری ٤/٦ دسـی‌زیمنس بر متر) و روشن بهاره (۵/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر) افزایش اما در شوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل، میزان آب ناخالص آبیاری کاهش یافت. دلیل این امر کاهش عملکرد محصـول در شـوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل گندم (شـش دسـی‌زیمنس بر متر (علیزاده، ۱۳۸۳)) و ثابت گرفتن آب بهـاء در شـــوری‌هـای مختلف آب آبیـاری بود. زمانی که هدف، دسـتیابی به حداکثر سـود خالص بود میزان آب آبیاری، آب آبشـویی و همین‌طور زه‌آب نسبت به زمانی که هدف، دسـتیابی به حداکثر سـود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی بود، بیشـتر بود. درواقع زمانی که هدف، دستیابی به حـداکثر ســـود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی بود، مدل با تغییر نوع مـدیریـت آبیـاری و کاهش دادن میزان آبشـــویی به‌ویژه آبشـــویی در دو آبیاری آخر، میزان آب مصـــرفی را کـاهش داد و میزان زه‌آب تولیـدی را بـه صـــفر رســـانـد. به‌طورکلی با ابزار بهینه‌سـازی تولیدشده در این پژوهش، در منـاطقی که زه‌آب تولیدی حاصـــل از عمل آبیاری، یکی از مشـکلات مهم محیط‌زیسـتی و همین‌طور عامل نارضـایتی کشاورزان پایین‌دست آن منطقه است، می‌توان با قبول مقدار ناچیزی کاهش سود این مشکل را بر طرف نمود؛ اما بایستی بررسـی نمود که آیا کاهش سـود در اثر کاهش آبشـویی در مناطق بالادسـت، با افزایش سود در اثر بهبود کیفیت آب در مناطق پایین‌دست، جبران خواهد شد یا خیر؟

پیشنهاد می‌شود که مدل AquaCrop و مدل پیوند شـــده بـه آن در منـاطقی کـه آب آبیاری از رودخانه تأمین می‌شـــود، برای ارزیـابی تأثیر مدیریت‌هایی که در آن زه‌آب تولیدی حداقل اسـت، اسـتفاده شود. به عبارتی بررسی شود که آیا کاهش سود در اثر کاهش آبشویی در مناطق بالادست، بـا افزایش ســـود در اثر بهبود کیفیـت رودخـانـه در مناطق پایین‌دست جبران خواهد شد؟ همچنین پیشنهاد می‌گردد که در یک منطقه مشـــخص برای محصـــولات مختلف بهترین مـدیریـت‌هـای آبیاری و آبشـــویی با اســـتفاده از این مدل اقتصادی تعیین گردد و سپس دقت آن در سطح مزرعه مورد ارزیابی قرار گیرد. در صورت موفقیت‌آمیز بودن مدیریت‌های آبیاری، جهاد کشاورزی می‌تواند به‌منظور بهبود مدیریت‌های آبیـاری و افزایش ســـود کشـــاورزان، این مدیریت‌ها را به کشاورزان هر منطقه توصیه کند.

فهرست منابع

۱. آقاخانی، ع. م، فیضـی. م، صـلحی. و ر، اعتدالی. ۱۳۹۲. شوری‌زدایی آب برای کشاورزی: ضرورت، اهمیت و محدودیت‌ها. نشریه مدیریت اراضی. دوره ۱، شماره ۱. ص ۳۱-۱۷.

۲. اکبری، م. ۱۳۸۳. بهبود مـدیریـت آبیـاری مزارع بـا اســـتفـاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP، رساله دوره دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

۳. حق‌وردی، ا. ۱۳۹۰. ارائه تابع تولید شـوری-آب-محصـول برای گندم بهاره با اسـتفاده از روش رویه پاسـخ. پایان‌نامه دوره دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

٤. خواجه روشنایی، ن. ک، دانشور. و غ، محتشمی برزادران. ۱۳۸۹. تعیین ارزش اقتصادی آب در روش تابع تولید، با به‌کارگیری مدل‌های کلاسیک و آنتروپی (مطالعه موردی: محصول گندم در شهرستان مشهد). نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی. دوره ٢٤، شماره۱. ص ۱۱۹-۱۱۳.

٥. سپاسخواه، ع. ع، توکلی. و ف، موسوی. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد کم‌آبیاری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۸۸ صفحه.

٦. شهیدی، ع. ۱۳۸۷. اثر برهم‌کنش کم‌آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزاء عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب-شوری در منطقه بیرجند. پایان‌نامه دوره دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

٧. علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. دانشگاه امام رضا. چاپ چهارم.

٨. محمدی، م.١٣٩٤. بهینه‌سازی آبشویی تحت سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری با آب‌شور و لب‌شور به‌منظور دست‌یابی به حداکثر سود خالص و حداقل آب آبشویی (مطالعه موردی: گندم زمستانه و بهاره). پایان‌نامه دوره دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

٩. محمدی، م. ک، داوری. ب، قهرمان. ح، انصاری. و ا، حق‌وردی. ١٣٩٤. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. شماره ۲۹، دوره ۳. ص ۲۹۵-۲۷۷.

١٠. محمدی، م. ب، قهرمان. ک، داوری. ح، انصاری. و ع، شهیدی. ١٣٩٤. اعتبار سنجی مدل AquaCrop به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه تحت شرایط همزمان تنش شوری و خشکی. نشریه آب‌وخاک. شماره ۲۹، دوره ۱. ص ٨٤-٦٧.

11. Dominguez, A., E., Lopez-mata, A., De Juna, a., Artigao, and J. Tarjuelo. 2008. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions the use of MOPECO model. Brazil, International Conference of agricultural Engineering XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agricola.
12. Fereres, E., and M.A. Soriano. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. J. Exp. Bot. 58, 147–159.
13. García-Vila, M., and E. Fereres. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. European Journal of Agronomy, 36:21– 31.
14. García-Vila, M., E., Fereres, L., Mateos, F., Orgaz, and P. Steduto. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agron. J. 101:477–487.
15. Geerts, S., D., Raes, and M. Garcia. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. Agricultural Water Management, 98:213–216.
16. Kijne, J.W., R., Barker, and D. Molden. 2003. Improving water productivity in agriculture: editor's overview. In: Kijne, J.W., Barker, R.M.D. (Eds.), Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, p. xi–xix.
17. Kumar, P., A., Sarangi, D.K., Singh, and SS. Parihar. 2014. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. Irrigation and Drainage, 63: 474–487.

18. Kuo, S.F., B.J., Lin, and H.J. Shieh. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Management, 82:433-451.
19. Memariani, A., A., Amini, and A. Alinezhad. 2009. Sensitivity analysis of simple additive weighting method (SAW): The results of change in the weight of one attribute on the final ranking of alternatives. Journal of Industrial Engineering, 4: 13-18.
20. Molden, D. 2003. A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, pp. 1–18.
21. Podvezko, V. 2011. The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics. 22 (2): 134-146.
22. Raes, D., S., Geerts, E., Kipkorir, J., Wellens, and A. Sahli. 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. Agric. Water ManageMent, 81, 335–357.
23. Raes, D., P., Steduto, T.C., Hsiao, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agron. J. 101:438–447.
24. Salemi, H., M.A., Mohd Soom, T.S., Lee, S.F., Mousavi, A., Ganji, and M. KamilYusoff. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research, 610: 2204-2215.
25. Shamsnia, S. A., and N. Pirmoradian. 2013. Simulation of Rainfed Wheat Yield Response to Climatic Fluctuations Using AquaCrop Model (Case Study: Shiraz Region in Southern of Iran). International Journal of Engineering Science Invention, 2(4):51-56.
26. Singh, A., S., Saha, and S. Mondal. 2013. Modelling irrigated wheat production using the FAO Aquacrop model in west Bengal, India, for sustainable agriculture. Irrigation and Drainage, 62:50–56.
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. Agricultural Water Management, 66: 153-162.
28. Steduto, P., T.C., Hsiao, D., Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agron. J. 101:426–437.
29. Van Dam, J.C., P., Groenendijk, R.F.A., Hendriks, and J.G. Kroes. 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone Journal, 7:640-653.

Optimizing Irrigation Water Depth and Leaching Based on Different Water Management and Salinity Treatments Using AquaCrop Model

M. Mohammadi [1] *, K. Davary, and B. Ghahraman

PhD graduate, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.
Mmohammadi_64@yahoo.com
Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.
k.davary@gmail.com
Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.
bijangh@um.ac.ir

Abstract

Considering limitations of agricultural productions in arid and semi-arid regions, optimization of irrigation depth and leaching is very important. In this study, calibrated and validated AquaCrop model was used in order to optimize irrigation water depth and leaching for two varieties of winter wheat (Ghods and Roshan) in Birjand region and one variety of wheat (spring Roshan) in Mashhad region. For winter wheat, irrigation treatments included 125%, 100%, 75% and 50% of water requirement and water salinities of 1.4, 4.5, and 9.6 dS/m for winter wheat. For spring wheat, irrigation treatments consisted of 100%, 90%, 65%, and 40% of water requirement and water salinities of 0.5, 0.9, 5.25, 8.6, and 10 dS/m. The coding written in Matlab program was linked to the AquaCrop in order to achieve the optimized values of irrigation and leaching in the land constraint conditions. The optimization results showed that net profit for the best irrigation and leaching management at all salinity levels and different wheat varieties, except for salinity levels of 8.6 and 10 dS/m in the spring Roshan variety and level of 9.6 dS/m in the winter Roshan variety, was more than the current management in field conditions. The increases in profits in optimal management compared to the current management for Ghods variety at the salinity levels of 1.4, 4.5, and 9.6 dS/m were 51.4%, 78.9%, and 142.5%, respectively. For the same salinity levels for Roshan variety, the increments were 42.7%, 20.8% and -0.3%, respectively. The increase in profits in optimal management compared to the current management for the spring Roshan variety at the salinity levels of 0.5, 0.9, 5.25, 8.6 and 10 dS/m, were 5%, 13.2%, 34.3%, -27.7%, and -51.4%, respectively. In general, the results show that in the regions where drainage problem due to irrigation water is an important environmental problem and causes dissatisfaction among the downstream farmers, applying less water and accepting negligible decrease in the benefits (minimum 0 and maximum 29%) could resolve the problem.

Keywords: Drainage water, Modelling, Wheat cv. Roshan, Ghods variety

[1] - Corresponding author: Department of Water Engineering, Agricultural College, Ferdowsi University of Mshhad

* -Received: January 2019, and Accepted: August 2019