نشریه دانش آب و خاک / جلد ۳۳ شماره ۱ صفحه‌های ۹۳ تا ۱۰۷/ سال ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

ارائه مدل بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی در شرایط محدودیت آب به منظور دست‌یابی به حداکثر سود خالص و حداقل آب آبشویی

مسعود محمدی*[۱]، کامران داوری[۲] و هادی دهقان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰٤/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

۱- دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Mmohammadi_64@yahoo.com

چکیده

آبیاری نقش بسیار مهمی در افزایش تولید مواد غذایی دارد و از آنجایی که مناطق خشک و نیمه‌خشک با کمبود آب مواجه هستند، بهینه‌سازی عمق آبیاری و آبشویی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی از جمله مدل AquaCrop، در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف آبیاری و انتخاب مدیریت مناسب آب به‌خصوص در شرایط کمبود منابع آب می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد. در این تحقیق از مدل AquaCrop واسنجی و صحت‌سنجی شده برای دو رقم گندم در منطقه بیرجند و یک رقم گندم در منطقه مشهد استفاده گردید. کدنویسی انجام شده در نرم‌افزار MATLAB به منظور بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی در شرایط محدودیت آب، با مدل AquaCrop لینک گردید. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که سود خالص برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در تمام سطوح شوری و رقم‌های مختلف گندم به جز سطوح شوری ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم مشهد و سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن، بیشتر از مدیریت‌های موجود در تحقیق شهیدی و حق‌وردی بود. در شرایطی که هدف، دستیابی به حداکثر سود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی بود مدل با تغییر نوع مدیریت آبیاری و کاهش دادن میزان آبشویی بخصوص آبشویی فقط در دو آبیاری آخر، میزان آب مصرفی را کاهش داد و میزان زه‌آب تولیدی را به صفر رساند. همچنین نتایج نشان داد میزان کاهش آب ناخالص آبیاری در شوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل گندم نسبت به دیگر سطوح شوری، بسیار کم بود و اختلاف ناچیزی داشتند. به علت اینکه در سطوح شوری بالا نسبت به سطوح شوری پایین، افت محصول در کم‌آبیاری‌ها بیشتر بود و در نتیجه در سطوح بالاتر از حد آستانه تحمل گندم، کم‌آبیاری اقتصادی و مقرون به صرفه نبود. به طور کلی نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در منطقه بیرجند و مشهد می‌توان با استفاده از بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در سطوح مختلف شوری، سود حاصله از کشت گندم را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: بیرجند، گندم، مدل AquaCrop ، مدیریت آبیاری، MATLAB

Introducing Optimized Irrigation – Leaching Model under Water Deficiency Conditions to Gain Maximum Net Benefit and Minimum Leaching Water

M Mohammadi[1*], K Davary[2] and H Dehghan[3]

Received: July 22, 2018 Accepted: March 8, 2021

1- PhD graduate, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2- Prof., Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3- Assist. Prof., Water Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute
*Corresponding Author, Email: Mmohammadi_64@yahoo.com

Abstract

Irrigation plays an important role in increasing crop yield especially in arid and semi-arid regions, where optimizing irrigation depth and leaching is crucial. Using simulation models such as AquaCrop help to analyze different irrigation scenarios and also help farmers to optimize water resources management in such conditions. In this study, calibrated and validated AquaCrop model was used for two wheat varieties in Birjand region and one wheat variety in Mashhad region. A Matlab program has been developed to link to the AquaCrop in order to achieve the optimized values of irrigation and leaching in the water 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^{-1} in the Mashhad variety and level of 9.6 dS m^{-1} in the Roshan variety, was more than the current management researches of Shahidi and Haghverdi. While the aim is to achieve maximum profit and minimal drainage water, the model by changing the type of irrigation management and reduce leaching, especially in the last two irrigations only, reduced the amount of water consumed and the amount of drainage water to zero. The results also showed the reduction of gross irrigation water in the salinity levels more than tolerance threshold of wheat was less than the other salinity levels and the difference was completely negligible. Because in high salinity levels, yield reduction in deficit irrigation was more in comparison with low salinity levels, therefore deficit irrigation in salinity levels of more than the wheat tolerance threshold is not economic. Generally, the optimization results showed that in the area of Birjand and Mashhad, using the best irrigation and leaching management at different salinity levels can increase the benefit of wheat cultivation.

Keywords: AquaCrop model, Iirrigation management, Birjand,,Matlab, Wheat

مقدمه

یکی از مهم‌ترین منابع آب نامتعارف، منابع آب شور است. از آنجایی که معمولاً در مناطق خشک و نیمه-خشک آب مصرفی در کشاورزی حاوی مقادیری از املاح محلول است، در طی زمان به‌ویژه با وضعیت زهکشی نامناسب و ضعیف موجبات تراکم نمک‌های محلول را در خاک فراهم می‌سازد. یکی از روش‌های مؤثر جهت جلوگیری از تجمع املاح در محیط ریشه و خسارات ناشی از آن بر گیاهان، استفاده از آبشویی اراضی است.

بر اساس گزارش سازمان خواروبار جهانی (فائو) هر سال ۱ تا ۲ درصد از اراضی فاریاب جهان به دلیل سوء مدیریت آبیاری با استفاده از آب شور از دست می‌روند (دومینگواز و همکاران ۲۰۰۸). کم‌آبی و شوری آب آبیاری در کشور ما نیز 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. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و آن‌ها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (ون‌دام و همکاران ۲۰۰۸). این مدل‌ها می‌توانند 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 (سینگ ۲۰۰٤). در چند دهه گذشته مدل‌های زیادی برای مطالعه مدیریت آبیاری در سطح مزرعه معرفی و به کاربرده شده‌اند از جمله می‌توان به مدل SWAP[1] (کروس و وندام ۲۰۰۸)، مدل‌های زراعی مانند مدل SOYMOD[۲] (میر و همکاران ۱۹۸۱)، مدل CERES[۳] (جونز و همکاران ۱۹۸٦)، مدل SOYGRO[٤] (اگلی و برونینگ ۱۹۹۲)، مدل APSIM[5] (مارینو و همکاران ۲۰۰۵)، مدل MSM (زندپارسا و همکاران ۲۰۰٦ و مجنونی هریس و همکاران ۲۰۱۱) و برخی دیگر از مدل‌ها مانند CropSyst[6] (تودورویچ و همکاران ۲۰۰۹) هم وجود دارند که به صورت تک گیاهی عمل می‌کنند. استفاده از بیشتر این مدل‌ها به دلیل نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی بسیار پیچیده، و داده‌های ورودی زیاد، دشوار می‌باشند. این مدل‌ها همچنین برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و گیاهی و مکان‌های مختلف دنیا غیرقابل دسترسی هستند (تودورویچ و همکاران ۲۰۰۹). یکی دیگر از مدل‌های زراعی پرکاربرد، مدل AquaCrop می‌باشد که از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است. اصول اساسی این مدل برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) و الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه شده است. این مدل در دامنه وسیعی از محصولات زراعی قابل استفاده است. مدل AquaCrop مدلی قدرتمند و ارزشمند برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب می‌باشد. سادگی، نیاز به حداقل داده ورودی و دقت قابل قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های تولید در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهینه‌سازی عمق 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 عمدتاً حداکثر کردن سود خالص می‌باشد. در صورتی که میزان آب قابل دسترس 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.

مطالعات صورت گرفته توسط محققین مختلف نشان داد، مدل AquaCrop می‌تواند با دقت نسبتاً بالایی عملکرد محصول را تحت تیمارهای مختلف آبیاری شبیه‌سازی نماید (سالمی و همکاران ۲۰۱۱، سینگ و همکاران ۲۰۱۳، شمس‌نیا و پیرمرادیان ۲۰۱۳، کومار و همکاران ۲۰۱٤). بنابراین محققین دیگری از این مدل برای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی آبیاری استفاده کردند از جمله گارسیا-ویلا و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل AquaCrop بهینه‌سازی در شرایط کم‌آبیاری را برای گیاه کتان انجام دادند. آنها

1 -Soil Water Atmosphere Plant
2 - Soybean Products Model
3 - Crop Environment Resource Synthesis
4 - Soybean Crop Growth Model
5 - Agricultural Production Systems Simulator
6 - Cropping Systems Simulation Model

ابتدا سناریوهای مختلف کم‌آبیاری را با مدل انجام دادند و سپس گزارش کردند که بهترین تابع تولید برازش داده شده، تابع تولید درجه دوم می‌باشد. در ادامه با استفاده از یک مدل اقتصادی که سود خالص را محاسبه می‌کند، اعلام کردند بیشترین سود با توجه به نوع سال (مرطوب، نرمال و خشک) در دامنه مقادیر آبیاری ٥٤٠ تا ٧٤٠ میلی‌متر بدست می‌آید. گیرتس و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل AquaCrop رهنمودهایی به صورت گراف برای کاربرد به موقع 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 سال 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 به موقع آب آبیاری به کشاورزان کمک نماید. 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، سیب زمینی آفتابگردان انجام دادند. آنها ابتدا با استفاده از مدل AquaCrop و استفاده از روش‌های رگرسیونی تابع تولید را برای هر یک از هر چهار محصول برای دو سال مطلوب و نامطلوب از نظر اقلیمی تعیین کردند و سپس با استفاده از یک مدل اقتصادی، بهترین مدیریت آبیاری را برای هر یک از محصولات فوق تعیین نمودند. واعظ مدنی و همکاران (۲۰۱۹) استفاده تلفیقی از مدل AquaCrop و روش توماس- فیرینگ را در برآورد عملکرد گندم دیم بررسی کردند. نتایج نشان داد که علیرغم عدم تغییر معنی‌دار بارش، بدلیل افزایش دما، عملکرد گندم در پنج سال آتی ۱۳ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین به دلیل کافی نبودن بارش پیش‌بینی شده، انجام آبیاری تکمیلی به مقدار ٤٠ میلی‌متر برای کشت گندم دیم در منطقه پیش-بینی گردید تا پتانسیل تولید افزایش یابد. با توجه به بررسی منابع و مطالعات انجام شده در ایران و جهان می‌توان گفت در بحث بهینه‌سازی مصرف آب تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی در شرایط شوری و کم‌آبی با استفاده از مدل AquaCrop مطالعه‌ای صورت نگرفته است و در هیچکدام از این تحقیقات از نرم افزار MATLAB به عنوان ابزاری لینک شده به مدل AquaCropدر امر بهینه‌سازی استفاده نشده است.

کاربرد به موقع آب آبیاری اساساً می‌تواند راندمان آبیاری و بهره‌وری آب را با اجتناب از کم یا بیش‌آبیاری و همچنین فراهم کردن شرایط بهینه رشد در سرتاسر دوره رشد، افزایش دهد (مالدن ۲۰۰۳، رائس و همکاران ٢٠٠٦). از این رو باید رهنمودهای کاربردی برای کاربرد آب آبیاری برای کارشناسان آب و کشاورزان تهیه شود. این رهنمودها اجازه خواهند داد که به طور مناسب آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی برای گیاهی خاص و در منطقه‌ای بخصوص استفاده شود. هدف اصلی در این تحقیق ارائه مدل بهینه‌سازی مصرف آب تحت شرایط توأم آب- شوری به منظور تضمین حداکثر سود خالص و همچنین حداقل کردن زه‌آب تولیدی درشرایط محدودیت آب با استفاده از لینک مدل AquaCrop به نرم‌افزار MATLAB می‌باشد. نوآوری این تحقیق بررسی سناریوهای مختلف آبیاری و آبشویی و نیز چالش کاربرد مدل AquaCrop در شرایط شوری به عنوان تابع تولید در فرآیند بهینه‌سازی است.

مواد و روش‌ها

بهینه‌سازی مدیریت آبشویی و آبیاری

در این تحقیق از مدل AquaCrop واسنجی و صحت‌سنجی شده برای دو رقم گندم در منطقه بیرجند و

یک رقم گندم در منطقه مشهد استفاده گردید (محمدی ۲۰۱۵، محمدی و همکاران ۲۰۱۵). برای بهینه‌سازی مدیریت آبشویی و آبیاری تحت سناریوهای مختلف مدیریتی، به ترتیب مراحل زیر انجام شد:

۱- تعیین سناریوهای مدیریتی مختلف برای هر شوری آب آبیاری و هر رقم گندم به صورت مجزا (جدول۱).

در این تحقیق مدل Aquacrop در واقع نقش تابع تولید در شرایط مختلف مدیریت آبیاری و آبشویی را دارد.

۲- کدنویسی در نرم افزار MATLAB به منظور اجرای سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری و آبشویی با استفاده از مدل Aquacrop و انتخاب بهترین سناریو تحت شرایط محدودیت آب. در شرایط محدودیت آب، سطح زیر کشت تابعی از میزان آب کاربردی است. در این شرایط عمق بهینه لزوماً ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه نخواهد بود چرا که به دلیل عدم محدودیت سطح زیر کشت، می‌توان عمق آبیاری را کاهش داده در عوض اراضی بیشتری را کشت نمود به نحوی که سود خالص حاصل از کاربرد واحد حجم آب مصرفی حداکثر گردد که چنین شرایطی در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور حاکم است. در شرایط محدودیت آب ابتدا میزان سود حداکثر در شرایطی که محدودیت آب وجود نداشته باشد، با استفاده از معادله ۱ تعیین شد تا میزان آب مصرفی بهینه برای سناریوهای مختلف بدست آید.

سپس از معادله ۲ مقدار سود خالص برای سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری تحت شرایط محدودیت آب تعیین گردید:

$$MaxB = P_c \times Y_i - C_f - P_w \times I_i \qquad [۱]$$

$$MaxB = P_c \times Y_i \times \left(\frac{I_o}{I_i}\right) - C_f \times \left(\frac{I_o}{I_i}\right) - P_w \times I_o \qquad [۲]$$

که در آن B حداکثر سود خالص در یک هکتار (ریال)، PC قیمت محصول (ریال بر کیلوگرم)، Y_i عملکرد محصول (کیلوگرم)، C_f هزینه‌های ثابت (ریال)، P_w هزینه متغیر (ریال بر سانتی‌متر آب آبیاری)، I_i مقدار آب آبیاری (سانتی‌متر) و I_o مقدار آب آبیاری بهینه (سانتی‌متر) در شرایط بدون محدودیت آب می‌باشد. در شرایط محدودیت آب اگر عمق آب آبیاری در سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری بیشتر از I_o باشد، سود حداکثر از معادله ۱ و در غیر این صورت از معادله ۲ محاسبه می‌شود، که در واقع به عنوان قید برنامه می‌باشد.

در بعضی از مناطق ایران آب آبیاری از رودخانه‌ها تأمین و زه‌آب تولیدی مجدداً به رودخانه باز می‌گردد. با توجه به این که در این مناطق حداقل کردن زه‌آب از لحاظ زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است و همین‌طور به نفع کشاورزان پایین دست رودخانه می‌باشد (با حداقل کردن زه آب تولیدی کیفیت آب رودخانه برای زمین‌های پایین-دست رودخانه بهبود می‌یابد). بنابراین در این تحقیق حداقل کردن زه‌آب خروجی در کنار ماکزیمم کردن سود خالص به عنوان اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی از روش وزن‌دهی تجمعی ساده SAWM[1] که یکی از بهترین و مورد استفاده‌ترین روش-های مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌باشد، استفاده شد.

روش وزن‌دهی تجمعی ساده SAWM را به صورت ریاضی می‌توان به صورت زیر بیان نمود (معماریانی و همکاران ۲۰۰۹، پودوزکو ۲۰۱۱):

$$A^* = \left\{ A_i \middle| \max_i \Sigma_{j=1}^{n} W_j X_{ij} / \Sigma_{j=1}^{n} W_j \right\} \qquad [۳]$$

که A* بهترین گزینه، Wj وزن هر معیار، Xij مقدار گزینه iام و معیار jام در ماتریس تصمیم‌گیری با یک مقیاس کمی قابل مقایسه است. معمولا وزن‌ها نرمال شده هستند یعنی:

$$\Sigma_{j=1}^{n} W_j = 1 \qquad [٤]$$

1 - Simple Additive Weighting Method

وزن‌های اهمیت توسط تصمیم گیرنده برای هر یک از معیارها در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی

نوع مدیریت	مقدار آبیاری	مقدار آبشویی
دورهای مختلف آبیاری (دور ثابت، از ٦ تا ١٤ 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
	۲- آبیاری تا حد ظرفیت زراعی	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
تخیله مجاز رطوبتی مختلف (MAD های مختلف، از ٤٠، ٤٢، ٤٤، ...،٦٦ 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
	۲- آبیاری تا حد ظرفیت زراعی	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
تخیله عمق‌های مشخصی از ناحیه ریشه (۳۰ ، ۳۲، ۳٤، ...، ٤٨ 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
	۲- آبیاری تا حد ظرفیت زراعی	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

*برای بدست آوردن اعماق مختلف آبیاری (عمق ثابت) ابتدا تبخیر - تعرق مرجع متوسط روزانه در دهه حداکثر تعیین شد. سپس با توجه بـه دور آبیاری، مقدار اعماق آبیاری در دامنه ۰/٤ تا ۱/۳ با گام‌های ۰/۱ محاسبه گردید و به عنوان میزان آبیاری برای هر دور آبیاری در نظر گرفته شد. برای مثال اگر فرض شود تبخیر – تعرق مرجع متوسط روزانه ۵ میلی‌متر در روز باشد و دور آبیاری ٦ روز، بنابراین دامنه تغییرات عمـق آبیـاری عبـارت است از: ٦×۵×۰/٤ تا ٦×۵×۱/۳ میلی‌متر. در واقع میزان آبیاری از ٤۰ تا ۱۳۰ درصد آبیاری کامل به صورت گام‌های ۱۰ درصدی تغییر می‌کند.

در این تحقیق چون واحد سود و زه‌آب متفاوت می‌باشند، بنابراین با استفاده از روابط زیر به ترتیب مقادیر سود و زه‌آب بی‌بعد شدند:

$$X_{ij}^{B} = \frac{B_{ij}}{B_{j}^{max}} \qquad [۵]$$

$$X_{ij}^{D} = \frac{D_{j}^{min}}{D_{ij}} \qquad [٦]$$

که X_{ij}^{B} مقادیر بی‌بعد شده سود، X_{ij}^{D} مقادیر بی‌بعد شده زه‌آب، B_{ij} سود بدست آمده در هر مدیریت (تومان)، B_j^{max} سود ماکزیمم (تومان)، D_{ij} زه‌آب تولیدی در هر مدیریت (میلی‌متر) و D_j^{min} حداقل زه‌آب (میلی‌متر) می‌باشد.

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 بستگی دارد به تعداد پارامترهایی که باید وزن آن‌ها تعیین شوند. به عنوان مثال اگر تعداد پارامترها ۲ و ۳ 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 می‌باشد. همچنین هر مقدار زیر قطر اصلی، معکوس مقدار بالای قطر اصلی می‌باشد. 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 به عنوان وزن هر اولویت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که ماکزیمم کردن سود و حداقل کردن زه‌آب تولیدی در این تحقیق به ترتیب در اولویت اول و دوم قرار دارند. به عبارتی درجه اهمیت ماکزیمم کردن سود دو برابر حداقل کردن زه‌آب تولیدی می‌باشد. بنابراین ماتریس اولویت معیارها به صورت زیر تعریف و وزن آنها با استفاده از روش میانگین حسابی تعیین گردیدند:

$$A=\begin{matrix}B\\D\end{matrix}\begin{bmatrix}B & D\\ 1 & 2\\ 1/2 & 1\end{bmatrix}\xrightarrow[Columns]{Normalized}\begin{bmatrix}2/3 & 2/3\\ 1/3 & 1/3\end{bmatrix}\xrightarrow[rowes]{Average\ of} W=\begin{bmatrix}0.67\\ 0.33\end{bmatrix} \qquad [۷]$$

که ۰/٦۷ ضریب وزنی سود و ۰/۳۳ ضریب وزنی زه‌آب می‌باشد. لازم به ذکر است این ضرایب وزنی بستگی به اولویت‌بندی کاربر دارد و بین صفر و یک قابل تغییر می‌باشند. به عنوان مثال اگر برای کاربر درجه اهمیت ماکزیمم کردن سود سه برابر حداقل 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 نماید، به شرط این که مجموع دو ضریب برابر با یک شود.

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

$$A^{*}=\max\left(0.67\times X_{ij}^{B}+0.33\times X_{ij}^{D}\right) \qquad [۸]$$

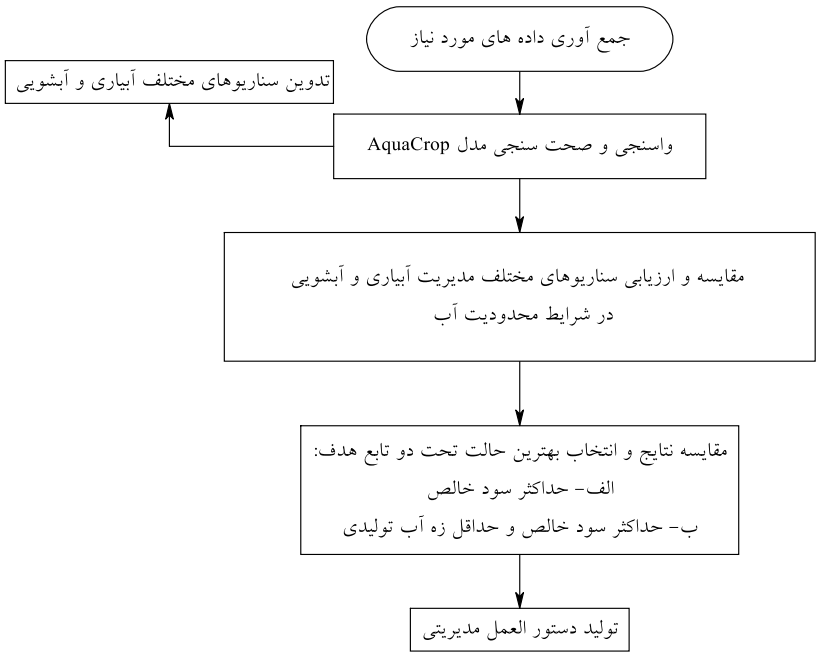
در شکل ۱ روندنمای مربوط به مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای آب آبیاری با کیفیت مناسب فقط مدیریت مختلف آبیاری اجرا شدند، زیرا آبشویی برای این نوع کیفت آب نیاز نبود. اما برای دیگر کیفیت‌های آب آبیاری همه‌ی مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبشویی همزمان اجرا شدند.

نتایج و بحث

بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی

شیوه برآورد بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی بسته به این که محدودیت مربوط به آب یا زمین باشد، متفاوت خواهد بود. در منطقه بیرجند و مشهد که جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شوند، همواره محدودیت آب وجود دارد و معمولاً در خصوص زمین محدودیتی نداریم. در مطالعه 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، ۲۰۱٤) و قیمت آب در مشهد ۱۸۷۰ ریال بر متر مکعب (خواجه روشنایی و همکاران ۲۰۱۰) و در بیرجند

۲۰۰۰ ریال بر متر مکعب (براساس بازدید میدانی) در نظر گرفته شد.



شکل ۱- روندنمای بهینه‌سازی اقتصادی به منظور تعیین بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی.

بهینه‌سازی آبیاری و آبشویی در شرایط محدودیت آب

در این شرایط کل آب قابل دسترس محدود بوده لذا سطح زیر کشت تابعی از میزان آب کاربردی است. با توجه به اینکه در شرایط محدودیت آب، کل آب قابل دسترس مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین نقش هزینه‌های ثابت در هکتار و قیمت محصول در تعیین بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی مهم می‌باشند. اما قیمت آب نقش مهمی در تعیین این مدیریت ندارد. هدف از تعیین بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در شرایطی که هدف دستیابی به حداکثر سودخالص باشد، تعیین مدیریتی است که به موجب آن درآمد خالص حداکثر شود و در شرایطی که هدف دستیابی به حداکثر سود و حداقل زه‌آب خروجی باشد، تعیین مدیریتی است که به موجب آن به طور همزمان هم درآمد خالص حداکثر شود و هم زه‌آب خروجی حداقل باشد. در بعضی از مناطق ایران از جمله استان خوزستان آب آبیاری از رودخانه‌ها تأمین و زه‌آب تولیدی مجدداً به رودخانه باز می‌گردد. با توجه به این که در این مناطق حداقل کردن زه‌آب از لحاظ زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است و همین‌طور به نفع کشاورزان پایین‌دست رودخانه می‌باشد (با حداقل کردن زه آب تولیدی کیفیت آب رودخانه برای زمین‌های پایین‌دست رودخانه بهبود می‌یابد). بنابراین در این مناطق بهترین مدیریتی که در آن بتوان به حداکثر سود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی دست یافت، بسیار حائز اهمیت است. مشخصات بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی با هدف دستیابی به ماکزیمم سود و حداقل زه‌آب برای ارقام مختلف گندم (قدس، روشن و مشهد) تحت شرایط محدودیت آب در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود به دلیل این که در شرایط محدودیت آب نقش کم‌آبیاری با اهمیت می‌گردد، تقریباً نوع مدیریت‌ها و میزان آب آبیاری در سطوح مختلف شوری مشابه هم بدست آمده است. همچنین میزان زه‌آب در این شرایط کم و در بعضی سطوح شوری حتی به صفر رسیده است. بنابراین در مناطقی که حداقل کردن زه‌آب تولیدی در کنار حداکثر سود خالص اهمیت داشته

باشد، با استفاده از این مدل می‌توان مدیریتی را به کشاورز پیشنهاد داد که در آن علاوه بر دستیابی به حداکثر سود خالص، زه‌آب تولیدی را کاهش و حتی به صفر برساند. هر چند سود خالص بدست آمده در این مدیریت کمی کمتر از سود بدست آمده در مدیریتی است که هدف فقط دستیابی به حداکثر سود خالص می‌باشد. اما فوایدی که از حداقل کردن زه‌آب تولیدی برای محیط زیست حاصل می‌گردد می‌تواند این کاهش عملکرد را توجیه نماید. 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 برای کاهش شوری خاک انجام داد. راهکار دیگری که در استفاده از آب شور برای کشاورزی به منظور کاهش اثرات مضر زیست-محیطی آن، می‌تواند وجود داشته باشد، شیرین کردن آب شور قبل از استفاده برای کشاورزی می‌باشد. اما باید دید که آیا هزینه شیرین کردن آب شور و همین‌طور هزینه انتقال پساب تولیدی از آب شیرین‌کن‌ها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است. منابع مختلفی گزارش کردند که شیرین کردن آب شور برای استفاده کشاورزی اقتصادی نمی‌باشد. از جمله آقاخانی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند شیرین کردن آب شور 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 از آنجایی که قسمت اعظم کشاورزی کشور به صورت خرده‌مالکی می‌باشد، لذا عملاً کاربرد روش‌های فعلی شوری‌زدایی با توجه به مقیاس کوچک اکثر اراضی کشور هزینه‌های بالایی را به همراه خواهد داشت. از طرف دیگر از آنجا که قسمت اعظم کشور آب مورد نیاز کشاورزی خود را از منابع زیرزمینی بدست می‌آورند، لذا عملاً تبدیل شدن بخشی از این آب به پساب نیز مخالفت-های زیادی را بین کشاورزان ایجاد خواهد کرد.

همان‌طور که بیان شد در مدیریت‌هایی که هدف دستیابی به حداکثر سود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی می‌باشد، می‌توان با قبول کمی کاهش سود، زه‌آب خروجی را به حداقل 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 کیفت آب، جبران خواهد شد.

در جدول ۳ مقادیر عملکرد، سود، میزان آب آبیاری و آبشویی را برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در رقم‌های مختلف گندم و سطوح مختلف شوی آب ارائه شده است. با توجه به این جدول میزان عملکرد گندم برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در تمام سطوح شوری و رقم‌های مختلف گندم به جز سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن، ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم مشهد، بیشتر از مدیریت‌های موجود در تحقیق شهیدی (۲۰۰۸) و حق‌وردی (۲۰۱۱) بدست آمده است. 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 به جز سطح شوری ۹/٦ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن، ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم مشهد، بیشتر از مدیریت‌های موجود در تحقیق شهیدی (۲۰۰۸) و حق‌وردی (۲۰۱۱) بدست آمده است. بیشترین اختلاف سود خالص در سطح شوری ٤/٥ دسی‌زیمنس بر متر رقم قدس (۷۰ درصد افزایش) و کمترین سود خالص در سطح شوری ۰/٥ دسی‌زیمنس بر متر رقم مشهد (۱۷ درصد افزایش) می‌باشد. دلیل کاهش عملکرد بدست آمده در مدل برای سطوح شوری ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم مشهد نسبت به طرح حق‌وردی (۲۰۱۱) را می‌توان خطای احتمالی

در تحقیق حق‌وردی (۲۰۱۱) دانست، زیرا در این تحقیق تیمارها بدون تکرار آزمایش شده بودند. همچنین در مرحله واسنجی مدل AquaCrop، مدل نمی‌توانست در این سطوح شوری آب آبیاری به این عملکرد دست پیدا نماید. در جدول ۳ مشاهده می‌گردد که با افزایش شوری آب آبیاری میزان آب ناخالص آبیاری کاهش می‌یابد که با واقعیت سازگار نمی‌باشد. شهیدی (۲۰۰۸) با تحقیق بر روی گندم و اکبری (۲۰۰٤) 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 (٦ دسی‌زیمنس بر متر) افزایش آب آبیاری باعث کاهش عملکرد محصول می‌گردد. حتی اگر فرض شود باعث افزایش عملکرد محصول می‌گردد، این افزایش عملکرد به اندازه‌ای ناچیز می‌باشد که نمی‌تواند هزینه‌های ناشی از آب مصرفی بیشتر را جبران نماید. همچنین جدول ۳ مشاهده می‌گردد در تمام مدیریت‌های آبیاری به دلیل این که میزان آب آبیاری در دو حالت دستیابی به حداکثر سود خالص و حالت دستیابی به حداکثر سود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی، برابر می‌باشد (به جز سطوح شوری ٤/٥ و ۹/٦ دسی‌ریمنس بر متر رقم قدس و ۱/٤ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن)، بنابراین میزان سود حاصله در این دو حالت مشابه می‌باشند. با توجه به جدول ۳، میزان کاهش آب ناخالص آبیاری در شوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل گندم نسبت به دیگر سطوح شوری، بسیار کم بود و اختلاف ناچیزی داشتند. به این علت که در سطوح شوری بالا نسبت به سطوح شوری کم، افت محصول در کم‌آبیاری‌ها بیشتر است و در نتیجه در سطوح بالاتر از حد آستانه گندم، کم‌آبیاری اقتصادی و مقرون به صرفه نمی‌باشد. تحقیقات شهیدی (۲۰۰۸) و آبات و همکاران (۲۰۰٤) نیز نتایج مشابه‌ای را گزارش کرده‌اند. با توجه به این که 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 از نظر اقتصادی در منطقه بیرجند که در شرایط محدودیت آب قرار دارد، توصیه می‌گردد که این رقم مورد کشت قرار گیرد و برای بهبود مدیریت‌های آبیاری در این منطقه از مدیریت‌های بدست آمده در این تحقیق استفاده نمایند. در منطقه مشهد نیز سود حاصله از مدیریت‌های بدست آمده از مدل بیشتر از سود موجود در تحقیقات حق‌وردی (۲۰۱۱) بدست آمد. بنابراین در این منطقه نیز می‌توان با استفاده از بهترین مدیریت‌های تعیین شده در سطوح شوری مختلف سود حاصله از کشت گندم را افزایش داد.

به‌طور کلی نتایج بهینه‌سازی نشان داد در مناطقی که زه‌آب تولیدی حاصل از عمل آبیاری، یکی از مشکلات مهم زیست‌محیطی و همین‌طور عامل نارضایتی کشاورزان پایین‌دست آن منطقه می‌باشد، می‌توان با قبول مقدار ناچیزی کاهش سود این مشکل را برطرف نمود. به عبارتی با توجه جدول ۳ می‌توان 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 می‌باشد عمل آبشویی را انجام داد. همچنین در مناطقی که محدودیت آب یکی از مشکلات مهم کشاورزی در آن منطقه می‌باشد، می‌توان با کاهش آب آبیاری به عبارتی کم‌آبیاری، آب مصرفی در یک هکتار را کاهش و سطح زیر کشت را افزایش داد و با این روش به سود بیشتری دست یافت. در این مناطق نیز به دلیل کاهش آب آبیاری در هر آبیاری میزان ظرفیت شبکه‌های آبیاری کاهش یافته و در نتیجه هزینه‌های اجرای شبکه‌های آبیاری و زهکشی به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. هر چند که به منظور صحت این نتایج بهتر است مدیریت‌های بهینه حاصل از این تحقیق در سطح مزرعه آزمایش گردد و میزان عملکرد و سود بدست آمده در شرایط مزرعه با مقادیر بدست آمده توسط مدل بهینه‌سازی مقایسه گردد.

جدول ۲- مشخصات بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی با هدف دستیابی به ماکزیمم سود و حداقل زه‌آب برای ارقام مختلف گندم (قدس، روشن و مشهد) تحت شرایط محدودیت آب.

نوع رقم	شوری آب ($dS\ m^{-1}$)	نوع هدف													
		ماکزیمم کردن سود						ماکزیمم کردن سود و حداقل کردن زه‌آب							
		نحوه آبیاری						نحوه آبیاری							
		دور آبیاری ثابت (day)	رطوبت (mm)	مقدار تخیله مجاز رطوبت (٪)	عمق خالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان آبشویی	عمق ناخالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان زه‌آب (mm)	دور آبیاری ثابت (day)	رطوبت (mm)	مقدار تخیله مجاز رطوبت (٪)	عمق خالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان آبشویی	عمق ناخالص آبیاری در هر نوبت (mm)	میزان زه‌آب (mm)
قدس	۱/٤	–	٤٦	–	٤٦	۰	٤٦	۰	–	٤٦	–	٤٦	۰	٤٦	۰
	٤/٥	–	٤٢	–	٣٤	٢٥درصد	٤٢	١١/٧	–	٤٦	–	٣٢	٢٥درصد ٢٤ و ٣٠ میلی-	٤٠	۰
	۹/٦	–	–	٦٦	٥٦	١٥درصد	٦٤	٦٩/٦	–	٤٦	–	٣٧	متر در دو آبیاری آخر	–	٤٥
روشن	۱/٤	–	٤٨	–	آبیاری تا θ_{FC}	۰	–	١٧/٥	–	٤٢	–	٣٤	۰	٣٤	۰
	٤/٥	–	٤٦	–	٣٧	١٠درصد	٤١	٧/٤	–	٤٦	–	٢٨	٣٠درصد	٣٦	۰
	۹/٦	–	٤٦	–	٣٧	١٠درصد	٤١	۰	–	٤٦	–	٣٧	١٠درصد	٤١	۰
مشهد	۰/٥	١٤	–	–	٧٠	۰	٧٠	۰	١٤	–	–	٧٠	۰	٧٠	۰
	١/٩	١٤		–	٧٠	۰	٧٠	۰	١٤	–	–	٧٠	۰	٧٠	۰
	٥/٢٥	١٤	–	–	٧٠	١٥درصد ٢٥ و ٢٨	٨١	١٤	١٤	–	–	٧٠	۰ ٢٥ و ٢٨	٧٠	۰
	٨/٦	١٤	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	میلی‌متر در دو آبیاری آخر ٣٠ و ٣٤	–	٤٤	١٤	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	میلی‌متر در دو آبیاری آخر ٣٠ و ٣٤	–	٤٤
	١٠	١٤	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	٥٣	١٤	–	–	آبیاری تا θ_{FC}	میلی‌متر در دو آبیاری آخر	–	٥٣

جدول ۳- عملکرد، سود و مقادیر آبیاری بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی با هدف دستیابی به ماکزیمم سود و حداقل زه‌آب برای ارقام مختلف گندم تحت شرایط محدودیت آب.

نوع رقم	شوری آب ($dS\ m^{-1}$)	نوع هدف: ماکزیمم کردن سود — عملکرد ($t\ ha^{-1}$) بهینه	عملکرد ($t\ ha^{-1}$) موجود	سود (تومان) بهینه	سود (تومان) موجود	مجموع عمق خالص آبیاری (mm)	مجموع عمق آبشویی (mm)	مجموع عمق ناخالص آبیاری (mm) بهینه	مجموع عمق ناخالص آبیاری (mm) موجود	نوع هدف: ماکزیمم کردن سود و حداقل کردن زه‌آب — عملکرد ($t\ ha^{-1}$)	سود (تومان)	مجموع عمق خالص آبیاری (mm)	مجموع عمق آبشویی (mm)	مجموع عمق ناخالص آبیاری (mm)
قدس	۱/٤	٤/٥٧٤	۳/۸۷۱	۲۷۳٦٦۸۳	۲۱٤۸۸٤٥	٤۱٤	۰	٤۱٤	٥۳٤	٤/٥٧٤	۲۷۳٦٦۸۳	٤۱٤	۰	٤۱٤
	٤/٥	٤/۰٤٤	۳/۳۷۱	۲٦۷٥٤۱۲	۱٥۷۱۳٤٥	۳۰۲	۷٦	۳۷۸	٥۳٤	۳/۸۷۱	۲٥۸۳۰۲٦	۲۸۸	۷۲	۳٦۰
	۹/٦	۳/۱٥۲	۲/٥۹۸	۱۰۳٦٥۰۲	٦۷۸٥۳۰	۳۳٤	٥۰	۳۸٤	٥۳٤	۲/٦٥۸	۹۷۱۹۲٦	۲۱٥	٥٤	۲٦۹
روشن	۱/٤	٥/۲۹٥	٤/٥۳۷	٤۳۱۰٤٤۰	۲۹۱۸۰۷٥	٤٦٦	۰	٤٦٦	٥۳٤	٥/۲٤٤	٤۱۱۹۰۹۸	٤۷٦	۰	٤۷٦
	٤/٥	٤/۱۹٦	٤/۰٦۰	۳۰٤۳٦٤۱	۲۳٦۷۱٤۰	۳۳٥	۳٤	۳٦۹	٥۳٤	٤/۱۱۲	۳۰۰۹۱۰٤	۲۷۷	۸۳	۳٦۰
	۹/٦	۳/۱٥۸	۳/۷۱۳	۱۲٦۸۳٤۳	۱۹٦٦۳٥٥	۲٦۱	۲٦	۲۸۷	٥۳٤	۳/۱٥۸	۱۲٦۸۳٤۳	۲٦۱	۲٦	۲۸۷
مشهد	۰/٥	٥/۰۷۱	٦/۲۰۰	٤٦۷۲۲٦۰	۳۹۹٦۳۱۰	٤۹۰	۰	٤۹۰	٦۸۷	٥/۰۷۱	٤٦۷۲۲٦۰	٤۹۰	۰	٤۹۰
	۱/۹	٥/۰٦٦	٥/۷٥۰	٤۲۹۰٦۱۸	۳٥۹۰۰٦۹	٤۹۰	۰	٤۹۰	٦۲٦/۳	٥/۰٦٦	٤۲۹۰٦۱۸	٤۹۰	۰	٤۹۰
	٥/۲٥	٥/۲۰۸	٤/۸۰۰	٤۰٦۷۳۹٤	۲٦٥۱۳۹٥	٤۹۳	۷٤	٥٦۷	٥٤۱/٥	٤/۷۰۲	٤۰۳۲٤۱۳	٤۹۰	۰	٤۹۰
	۸/٦	۳/۸٤٤	٥/۰٦۰	۲۳۰۰۷٦۷	۲۷۹۳۱۱۹	٤۳۳/۸	٥۳	٤۸٦/۸	٦۲٦/۳	۳/۸٤٤	۲۳۰۰۷٦۷	٤۳۳/۸	٥۳	٤۸٦/۸
	۱۰	۳/٤٤۰	٥/۳۲۰	۱۷۳٦٤۲۹	۲۹۷۹۹۱۰	۳۹٤/٤	٦٤	٤٥۸/٤	٦۸۷	۳/٤٤۰	۱۷۳٦٤۲۹	۳۹٤/٤	٦٤	٤٥۸/٤

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد سود خالص برای بهترین مدیریت آبیاری و آبشویی در تمام سطوح شوری و رقم‌های مختلف گندم به جز سطح شوری ۹/٦ دسی-زیمنس بر متر رقم روشن، ۸/٦ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر رقم مشهد، بیشتر از مدیریت‌های موجود در تحقیق شهیدی (۲۰۰۸) و حق‌وردی (۲۰۱۱) بود. در تمام مدیریت-های آبیاری به دلیل این که میزان آب آبیاری در دو حالت دست‌یابی به حداکثر سود خالص و حالت دست‌یابی به حداکثر سود خالص و حداقل زه‌آب تولیدی، برابر بود (به جز سطوح شوری ٤/٥ و ۹/٦ دسی‌ریمنس بر متر رقم قدس و ۱/٤ دسی‌زیمنس بر متر رقم روشن)، میزان سود حاصله در این دو حالت مشابه بدست آمد. میزان کاهش آب ناخالص آبیاری در شوری‌های بالاتر از حد آستانه تحمل گندم نسبت به دیگر سطوح شوری، بسیار کم بود و اختلاف ناچیزی داشتند. به این علت که در سطوح شوری بالا نسبت به سطوح شوری کم، افت محصول در کم-آبیاری‌ها بیشتر بود و در نتیجه در سطوح بالاتر از حد آستانه گندم، کم‌آبیاری اقتصادی و مقرون به صرفه نبود. به‌طور کلی ابزار بهینه‌سازی تولید شده در این تحقیق داری سه ویژگی می‌باشد:

در مناطقی که زه‌آب تولیدی حاصل از عمل آبیاری، یکی از مشکلات مهم زیست محیطی و همین‌طور عامل نارضایتی کشاورزان پایین‌دست آن منطقه می‌باشد، می‌توان با قبول مقدار ناچیزی کاهش سود این مشکل را بر طرف نمود. اما بایستی بررسی نمود که آیا کاهش سود در اثر کاهش آبشویی در مناطق بالادست، با افزایش سود در اثر بهبود کیفیت آب در مناطق پایین دست، جبران خواهد شد.

در مناطقی که محدودیت آب یکی از مشکلات مهم کشاورزی در آن منطقه می‌باشد، می‌توان با کاهش آب آبیاری به عبارتی کم‌آبیاری، آب مصرفی در یک هکتار را کاهش و سطح زیر کشت را افزایش داد و با این روش به سود بیشتری دست یافت. البته بایستی این نکته را مد نظر قرار داد که در شرایط کم‌آبیاری مدت آبیاری کاهش خواهد یافت و این می‌تواند در هزینه ثابت زمین تحت این شرایط تأثیرگذار باشد. بنابراین در صورت امکان می‌توان با در نظر گرفتن هزینه ثابتی برای هر مدیریت آبیاری یا ضریب کاهشی در مدیریت‌های کم‌آبیاری، این مشکل را تا حدودی برطرف نمود.

در این مناطق نیز به دلیل کاهش آب آبیاری در هر نوبت آبیاری میزان ظرفیت شبکه‌های آبیاری کاهش یافته و در نتیجه هزینه‌های اجرای شبکه‌های آبیاری و زهکشی به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

در ادامه پیشنهاد می‌گردد که مدل AquaCrop و مدل لینک‌شده به آن در مناطقی که آب آبیاری از رودخانه تأمین می‌گردد، برای ارزیابی تأثیر مدیریت‌هایی که در آن زه‌آب تولیدی حداقل می‌باشد، استفاده شود. به عبارتی بررسی نمود که آیا کاهش سود در اثر کاهش آبشویی در مناطق بالادست، با افزایش سود در اثر بهبود کیفیت رودخانه در مناطق پایین دست جبران خواهد شد. همچنین در یک منطقه مشخص برای محصولات مختلف بهترین مدیریت‌های آبیاری و آبشویی با استفاده از این مدل اقتصادی تعیین گردد و سپس صحت آن در سطح مزرعه مورد ارزیابی قرار گیرد. در صورت موفقیت‌آمیز بودن مدیریت‌های آبیاری، جهاد کشاورزی می‌تواند در جهت بهبود مدیریت‌های آبیاری و افزایش سود کشاورزان، این مدیریت‌ها را به کشاورزان هر منطقه توصیه نماید. در مطالعات آینده، در صورت نیاز به آبشویی در زمستان برای مدیریت‌هایی که در فصل رشد، آبشویی نشده‌اند یا کمتر آبشویی شده‌اند، در صورت امکان هزینه آبشویی در محاسبه سود خالص لحاظ گردد.

منابع مورد استفاده

Abbate PE, Dardanelli JL, Cantarero MG, Maturano M, Melchiori RJM and Suero EE, 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. Crop Science 44(2): 474-483.

Aghakhani A, Feizi M, Solhi M and Ramezani Etedali M, 2013. Water desalination for agriculture, necessity, importance and limitations. Journal of Land Management 1 (1): 17-31 (In Persian with English abstract).

Agricultural organization of Khorasan Razavi, 2014 [On Line]. Available from: https://koaj.ir/Modules/showframework.aspx?RelFacilityId=1241&ObjectID=252&FrameworkPageType=SEC.

Akbari M, 2004. Combining of remote sensing, field data and SWAP simulation model for improving field irrigation management. PhD Dissertation, Tarbiat Modares University.

Dominguez A, Tarjuelo JM, De Juna JA, Lopez-Mata E, Breidy J and Karam F, 2011. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions: The MOPECO-Salt model. Agricultural Water Management 98(9): 1451-1461.

Egli DB and Bruening W, 1992. Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO. Agricultural and Forest Meteorology 62(1-2): 19-29.

García-Vila M and Fereres E, 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(1): 21-31.

García-Vila M, Fereres E, Mateos L, Orgaz F and Steduto P, 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agronomy Journal 101(3): 477-487.

Geerts S, Raes D and Garcia M, 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. Agricultural Water Management 98(1): 213-216.

Haghverdi A, 2011. Deriving crop-water-salinity production function for spring wheat using response surface methodology. PhD Dissertation, Ferdowsi University of Mashhad.

Jones CA, Kiniry JR and Dyke PT, 1986. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development, User's guide of CERES-Maize. Texas University Press College Station, USA.

Khajeh Roshanaei N, Daneshvar Kakhki M and Mohtashami GR, 2010. Estimating economic value of water in production function method, applying classic and entropy approaches (Case study: wheat in Mashhad). Agricultural Economics and Development 24(1): 113-119 (In Persian with English abstract).

Kroes JG and Van Dam JC, 2008. Reference Manual SWAP, version 3.2. Alterra Green World Research. Wagennigen. Report 1649.

Kumar P, Sarangi A, Singh DK and Parihar SS, 2014. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. Irrigation and Drainage 63(4): 474-487.

Majnooni-Heris A, Zand-Parsa S, Sepaskhah AR, Kamgar-Haghighi AA and Yasrebi J, 2011. Modification and validation of maize simulation model (MSM) at different applied water and nitrogen levels under furrow irrigation. Archives of Agronomy and Soil Science 57(4): 401-420.

Marinov D, Querner E and Roelsma J, 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. Journal of Contaminant Hydrology 77(3): 145-164.

Memariani A, Amini A and Alinezhad A, 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 Optimization in Industrial Engineering (4): 13-18.

Meyer GE, Curry RB, Streeter JG and Baker CH, 1981. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. Transactions of the ASAE 24(2): 421-0429.

Mohammadi M, Davary K, Ghahraman B, Ansari H and Haghverdi A, 2015. Calibration and validation of AquaCrop model for simulation of spring wheat yield under simultaneous salinity and water stress. Journal of Water Research in Agriculture 29 (3): 277- 295 (In Persian with English abstract).

Mohammadi M, Ghahraman B, Davary K, Ansari H and Shahidi A, 2015. Validation of AquaCrop model for simulation of winter wheat yield and water use efficiency under simultaneous salinity and water stress. Journal of Water and Soil 29(1): 67-84 (In Persian with English abstract).

Molden D, Murray-Rust H, Sakthivadivel R and Makin I, 2003. A water-productivity framework for understanding and action. Pp. 1-18. In: Kijne JW, Barker R and Molden D (eds). Water Productivity in Agriculture: Limits and opportunities for improvement. CAB international publishing. UK.

Podvezko V, 2011. Comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. Engineering Economics 22(2): 134-146.

Raes D, Geerts S, Kipkorir E, Wellens J and Sahli A, 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. Agricultural Water Management 81(3): 335-357.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E, 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal 101(3):438-447.

Salemi H, Soom MAM, Lee TS, Mousavi SF, Ganji A and Yusoff MK, 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research 6(10): 2204-2215.

Shahidi A, 2008. Interaction of deficit irrigation and salinity on yield and yield components of wheat cultivars and determining water – salinity production function in the Birjand region. PhD Dissertation, Shahid Chamran University of Ahvaz.

Shamsnia SA and Pirmoradian N, 2013. Simulation of Rainfed wheat yield response to climatic fluctuations using model (Case study: Shiraz region in southern of Iran). International Journal of Engineering Science Invention 2(5): 51-56.

Singh A, Saha S and Mondal S, 2013. Modelling irrigated wheat production using the FAO AquaCrop model in West Bengal, India, for sustainable agriculture. Irrigation and Drainage 62(1): 50-56.

Singh R, 2004. Simulations 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(2): 153-162.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E, 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal 101(3): 426-437.

Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, Saab MTA, Stöckle C and Steduto P, 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy Journal 101(3): 509-521.

Vaez Madani MA, Fakheri Fard A and Majnooni- Heris A, 2019. Using combined AquaCrop model and Thomas- Fering method in analyzing rainfed wheat yield. Water and Soil Science-University of Tabriz 29 (3): 95-108 (In Persian with English abstract).

Van Dam JC, Groenendijk P, Hendriks RF and Kroes JG, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone Journal 7(2): 640-653.

Zand-Parsa S, Sepaskhah AR and Ronaghi A, 2006. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. Agricultural Water Management 81(3): 227-256.