نشریه آب و خاک
جلد ۲۴، شماره ۳، مرداد - شهریور ۱۳۸۹، ص. ۴۷۵-۴۶۳

Journal of Water and Soil
Vol. 24, No. 3, July-Aug 2010, p. 463-475

تعیین عمق بهینه آبیاری محصولات زراعی در شرایط شوری با استفاده از مدلSWAP

وحیدرضا وردی‌نژاد[1*]- تیمور سهرابی[2]- نادر حیدری[3]- شهاب عراقی‌نژاد[4]- محمد فیضی[5]

تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۱۹
تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۲

چکیده

در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای و به منظور تعیین توابع تولید-آب-شوری محصولات عمده شبکه‌های آبیاری آبشار و رودشت اصفهان با حدود ۵۴۰۰۰ هکتار مساحت قابل آبیاری، مدل SWAP به روش مدلسازی معکوس واسنجی گردید. این محصولات شامل گندم، جو، پنبه، چغندرقند، پیاز، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای بوده و آزمایش‌های مزرعه‌ای مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور بر عملکرد محصولات فوق، طی سال‌های ۷۷-۱۳۷۵ و ۸۶-۱۳۸۴ در ایستگاه تحقیقات زهکشی و اصلاح اراضی رودشت اصفهان انجام گردید. با توجه به تعداد کم تیمارهای مزرعه‌ای و به منظور تعیین تابع تولید مناسب، مدل SWAP پس از واسنجی پارامترهای گیاهی و پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک، برای مقادیر مختلف عمق و سطوح مختلف شوری آب آبیاری اجرا شد. تابع تولید به فرم درجه دوم، برای ۶ سطح شوری ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر برای هر یک از محصولات انتخابی محاسبه گردید. بر اساس تابع تولید، تابع هزینه و قیمت فروش هر یک از محصولات بر مبنای سال ۱۳۸۷، عمق بهینه آبیاری با هدف حداکثر نمودن سود خالص در شرایط مختلف محدودیت کمی و کیفی آب و زمین محاسبه گردید. بر اساس نتایج، در شرایط محدودیت کمی آب و برای ۱۰۰۰۰ متر مکعب آب در دسترس، حداکثر سود خالص از کشت پیاز، با سطح کشت ۱/۱۶ هکتار (۸۶۲ میلیمتر عمق آب مصرفی) و سود خالص ۵۲/۶ میلیون ریال حاصل گردید. در شرایط محدودیت زمین نیز برای مقدار مشخص آب در دسترس، حداکثر سود خالص از کشت محصول پیاز حاصل شد. در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب و ۱۰۰۰۰ مترمکعب آب در دسترس، در سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر، حداکثر سود خالص (۳۵/۱۱ میلیون ریال) از کشت پیاز با سطح کشت ۱/۴۴ هکتار حاصل و در سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر حداکثر سود از کشت گندم (۱۸/۳۷ میلیون ریال) و سپس جو (۱۳/۹ میلیون ریال) حاصل گردید. به خاطر افت شدید عملکرد پیاز و ذرت علوفه‌ای در سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر، سود خالص کشت پیاز و ذرت علوفه‌ای در این سطح شوری منفی گردید. در سطح شوری۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، حداکثر سود خالص از کشت جو و سپس چغندرقند حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: شوری، مدل SWAP، حداکثر سود خالص، عمق بهینه آبیاری، حوزه آبریز زاینده‌رود

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 بهینه از این منابع نمایان خواهد شد. شوری و کمبود آب از محدودیت‌های عمده تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. در این مناطق گیاهان بر حسب کمیت و کیفیت آب، ممکن است تحت تأثیر همزمان تنش‌های شوری و خشکی قرار گیرند. با توجه به محدودیت‌های تولید در این مناطق، بهینه‌سازی عمق آبیاری محصولات حائز اهمیت زیادی 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. توابع تولید محصول یکی از مهمترین عوامل مورد نیاز در بهینه‌سازی عمق 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 (۴). 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

۱، ۲ و۴- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: (Email: verdinejad@ut.ac.ir
۳- استادیار پژوهش مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
۵- پژوهشگر مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

نیمه خشک، مقدار آبیاری و شوری آن از تأثیرگذارترین عوامل بر تولید می‌باشد. روسو و همکاران برای تعیین عملکرد ذرت و پنبه، با مقادیر مختلف کمی و کیفی آب آبیاری، عملکرد محصول را به صورت تابع درجه دو از رطوبت حجمی و شوری خاک بدست آوردند و عنوان کردند که این تابع غیرخطی، بهتر از تابع دو تکه‌ای ماس و هافمن، عملکرد محصول را پیش‌بینی می‌کند (۲۱). لتی و همکاران (۱۸) برای تعیین تابع تولید محصول با آب آبیاری شور، مدلی را توسعه دادند که عملکرد نسبی را به صورت تابعی درجه دو از شوری آب آبیاری و نسبت عمق آب آبیاری به مقدار تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A در دوره رشد محصول برآورد می‌کرد. ذولفقاران، اثر مقدار آب آبیاری بر عملکرد گندم را در سطوح مختلف شوری، بررسی و فرم تابع تولید درجه دوم را برای تابع تولید گندم پیشنهاد نمود (۳). روش‌های بهینه‌سازی عمق آبیاری در دو مقیاس فصلی و درون فصلی انجام می‌گردد. در این تحقیق مقیاس برآورد عمق بهینه آبیاری به صورت فصلی مدنظر بوده و در این حالت عمق بهینه آبیاری هر محصول بستگی به تابع تولید محصول، هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت محصول و محدودیت‌های کمی یا کیفی آب و زمین دارد. در این زمینه انگلیش و همکاران، مطالعاتی را بر روی گندم زمستانه انجام دادند و بر اساس توابع ریاضی تولید و هزینه، عمق بهینه آب مصرفی را در دو حالت محدودیت آب و زمین محاسبه کردند (۴ و۱۴). انصاری عمق‌های شاخص و بهینه آبیاری را بر اساس توابع تولید و هزینه برای سه رقم ذرت زودرس با هدف کسب حداکثر سود تعیین و به این نتیجه رسید که با وجود حداکثر عملکرد در آبیاری کامل، سود خالص حداکثر نبوده و در شرایط محدودیت زمین، با هدف استفاده از حداکثر اراضی حدود ۳ درصد و در شرایط محدودیت آب با هدف استفاده حداکثر از آب، حدود ۱۹ درصد کاهش در مصرف آب نسبت به آبیاری کامل خواهند داشت (۱). به منظور برآورد دقیق توابع تولید، نیاز به دامنه گسترده‌ای از داده می‌باشد که با توجه به محدودیت تیمارها در یک آزمایش مزرعه‌ای، برآورد چنین توابعی با محدودیت روبرو خواهد شد. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد محصول، محدودیت فوق تا حدی رفع می‌گردد. دقت این مدل‌ها، عمدتاً به دقت داده‌های ورودی مدل بستگی داشته و در صورت که به درستی واسنجی شوند، بدون محدودیت‌های زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه زیاد، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری بکار گیرند (۲۰). مدل‌های شبیه‌سازی معتبری برای پاسخگویی به مسائل شوری توسعه یافته‌اند. یکی از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد محصول، مدل SWAP می‌باشد که برای شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در محیط اشباع و غیراشباع خاک، در مقیاس مزرعه‌ای کاربرد دارد. این مدل شامل تعدادی زیرمدل فیزیکی برای تحلیل اثرات متقابل میان حرکت آب، املاح، رشد و عملکرد محصول تحت رژیم‌های مختلف عمق و شوری آب آبیاری، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری و پیش‌بینی شوری خاک‌رخ در طولانی مدت می‌باشد (۱۷). کیانی 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 (۹). سینگ 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 (۲۲). وظیفه دوست و همکاران (۲۵) به منظور افزایش بهره‌وری آب محصولات گندم، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و چغندرقند، تحقیقی را به کمک مدل SWAP در شرایط محدودیت کمی آب در منطقه برخوار اصفهان انجام دادند. آنها پس از واسنجی مدل، با تغییر عمق و دور آبیاری توابع بهره‌وری آب را برای محصولات فوق استخراج و براساس آنها و تغییر برنامه آبیاری، بهره‌وری آب محصولات را افزایش دادند. دروگرز و همکاران (۱۳) در ارزیابی اثر تغییرات کمی و کیفی آب بر شوری خاک و عملکرد محصول پنبه در منطقه رودشت اصفهان از مدل SWAP استفاده و نتیجه گرفتند که این مدل در پیش‌بینی شوری خاک و عملکرد پنبه، دقیق، کارا و قابل انتقال به سایر شرایط می‌باشد. هدف پژوهش حاضر استخراج توابع تولید محصولات عمده شبکه‌های آبیاری آبشار و رودشت اصفهان با استفاده از مدل SWAP و تعیین عمق بهینه آب آبیاری هر یک از محصولات می‌باشد. براساس نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای، مدل SWAP به طور کامل واسنجی و براساس آن توابع تولید هر یک از محصولات، برای سطوح مختلف شوری آب آبیاری بدست آمد. عمق بهینه آبیاری محصولات با هدف حداکثر سود خالص، برای سطوح مختلف شوری و برای شرایط محدودیت کمی و کیفی آب و محدودیت زمین محاسبه و کاربرد آن در مدیریت زراعی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ایستگاه تحقیقات زهکشی و اصلاح اراضی رودشت در ۶۵ کیلومتری شرق اصفهان در طول جغرافیایی ۵۲ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۲/۵ درجه شمالی و ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا واقع و از نظر اقلیم، خشک با طیف درجه حرارت ۳ تا ۳۰ درجه سانتیگراد، با متوسط بارش سالیانه ۱۲۰ میلیمتر می‌باشد. به منظور تعیین اثر مدیریت‌های مختلف شوری و مقدار آب آبیاری، بر عملکرد محصول، رطوبت و شوری خاک، آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات زهکشی رودشت در قالب طرح تحقیقاتی بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان انجام گرفت. این

آزمایش‌ها روی محصولات گندم، جو، پنبه، چغندرقند، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و پیاز به عنوان محصولات عمده منطقه طی چندین سال توسط فیضی و همکاران انجام شد (۷، ۸، و ۹). برای محصولات گندم، جو، پنبه، چغندرقند و آفتابگردان، طرح تحقیقاتی درقالب سه تیمار کیفیت آب آبیاری Q_1، Q_2 و Q_3 به ترتیب با شوری‌های ۲، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و دو تیمار آبشویی LR_0 و LR_1 به ترتیب بدون آبشویی و آبشویی بر اساس ۷۵ درصد عملکرد محصول و دو تیمار مدیریت آبیاری GU (کاربرد آب شیرین با شوری حدود ۲ دسی‌زیمنس بر متر در مرحله جوانه‌زدن و استقرار گیاه و از این مرحله تا پایان فصل زراعی کاربرد سه سطح شوری فوق) وGQ (اعمال کیفیت آب در تمام فصل زراعی) در چهار تکرار به صورت طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. برای محصول پیاز چهار سطح شوری شامل ۱/۵، ۳، ۵ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر و عمق آبیاری تقریبا ثابت (۶۵ میلیمتر در هر نوبت) اعمال گردید. برای ذرت علوفه‌ای سه تیمار آبیاری ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز خالص آبیاری اعمال گردید که برای هر تیمار، شوری آب آبیاری یکسان، با دامنه شوری ۰/۸ تا ۱ در مرحله جوانه زنی و ۲ تا ۴/۴ دسی‌زیمنس بر متر در ادامه دوره رشد اعمال گردید. آزمایش گندم طی سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵، چغندرقند طی سال ۱۳۸۶، ذرت علوفه‌ای ۱۳۸۴، پیاز سال‌های ۸۶-۱۳۸۵، پنبه، جو و آفتابگردان در تناوب با همدیگر طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۷ در این ایستگاه انجام گردید. برنامه زراعی محصولات فوق در جدول (۱) و پارامترهای جمع آوری شده جهت شبیه‌سازی و واسنجی مدل SWAP در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول، داده‌های هواشناسی برای تعیین تبخیر و تعرق محصول، پارامترهای فیزیکی خاک و نیز شوری خاک برای بررسی حرکت آب و املاح در خاک‌رخ، کربن آلی به همراه پارامترهای فیزیکی خاک، در تخمین اولیه ضرایب هیدرولیکی خاک بر اساس توابع انتقالی، پارامترهای گیاهی در تعیین میزان عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تعیین عمق بهینه آبیاری برای هر محصول بستگی به تابع تولید، هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت فروش محصول و نیز شرایط محدودیت آب یا زمین دارد. در اکثر تحقیقات، فرم تابع تولید محصول درجه دو از عمق آب آبیاری می‌باشد (۱ و ۴). این فرم برای یک سطح مشخص شوری آب آبیاری به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$y = a_1 + b_1 I + c_1 I^2 \qquad (۱)$$

که در آن I عمق آب آبیاری طی فصل رشد (سانتیمتر)، y عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) و (a_1,b_1,c_1) پارامترهای تابع تولید می‌باشد.

برای تعیین توابع هزینه محصولات انتخابی، تمام هزینه‌ها شامل آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت، برداشت، زمین، آبیاری و آب‌بهای مربوط به هر محصول جمع آوری شد. هزینه‌های آبیاری و آب‌بها به عنوان هزینه‌های متغیر محصول در نظر گرفته شد و سایر هزینه‌ها به عنوان هزینه ثابت، محاسبه گردید. نوع تابع هزینه مطابق اکثر تحقیقات، فرم خطی فرض گردید (۴). بر این اساس تابع آب مصرفی- هزینه و سود خالص محصول c، از روابط زیر محاسبه گردید.

جدول۱- تاریخ کشت و برداشت محصولات انتخابی

محصول	تاریخ کشت	تاریخ برداشت
گندم	۱۳۸۴/۱۰/۱	۱۳۸۵/۳/۲۰
جو	۱۳۷۶/۰۹/۰۱	۱۳۷۷/۰۳/۱۸
پنبه	۱۳۷۶/۰۲/۱۷	۱۳۷۶/۰۹/۰۱
پیاز	۱۳۸۵/۰۷/۲۵	۱۳۸۶/۴/۱۰
آفتابگردان	۱۳۷۶/۰۴/۰۴	۱۳۷۶/۰۷/۲۱
چغندرقند	۱۳۸۶/۰۲/۱۰	۱۳۸۶/۰۷/۲۱
ذرت علوفه‌ای	۱۳۸۴/۰۳/۱۳	۱۳۸۴/۰۶/۱۶

جدول۲- پارامترهای اندازه‌گیری یا جمع‌آوری شده برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات توسط مدلSWAP

پارامتر	روش	تعداد
هواشناسی	ایستگاه هواشناسی رودشت	روزانه
بافت خاک	روش USDA	یکبار
چگالی ظاهری خاک	نمونه گیر مغزی	یکبار
هدایت آبی اشباع	روش بار افتان	یکبار
شوری خاک	هدایت الکتریکی‌سنج	۷-۳ بار
رطوبتFC وPWP	دستگاه صفحه فشار	یکبار
کربن آلی	روش اکسیداسیون	یکبار
حجم آب آبیاری	کنتور حجمی	هر آبیاری
شوری آب آبیاری	هدایت الکتریکی‌سنج	هر آبیاری
مراحل توسعه گیاه	مشاهده مزرعه‌ای	۶-۵ بار
ارتفاع گیاه	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	۶-۵ بار
شاخص سطح برگ	LAI سنج	۶-۵ بار
عمق توسعه ریشه	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	۶-۵ بار
عملکرد	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	یکبار

$$C_c = a_2 + b_2 I \qquad (۲)$$

$$NB = P_c \cdot y - C_c \qquad (۳)$$

که در آن C_c تابع هزینه (ریال بر هکتار)، a هزینه‌های ثابت محصول c (ریال بر هکتار)، b ضریب هزینه‌های متغیر (ریال بر هکتار بر سانتیمتر)، P_c قیمت فروش (ریال بر کیلوگرم) و NB سود خالص در هکتار (ریال بر هکتار) محصول c می‌باشد. هزینه‌های ثابت در هکتار برای هر یک از محصولات براساس نرخ ارائه خدمات کشاورزی شهرستان اصفهان (شامل هزینه‌های زمین، آماده‌سازی

زمین، کاشت، داشت و برداشت) برای سال ۱۳۸۷ محاسبه شد (۲). برای برآورد هزینه‌های متغیر، هزینه‌های آبیاری و آب بها به عنوان هزینه متغیر در نظر گرفته شد. براساس نوع محدودیت منطقه، محاسبه عمق بهینه آبیاری متفاوت می‌باشد. لذا ابتدا باید نوع محدودیت منطقه تعیین و سپس عمق بهینه بر این اساس محاسبه شود. عوامل محدود کننده تولید در رابطه با عمق بهینه آبیاری، محدودیت‌های کمی و کیفی آب و محدودیت زمین می‌باشد که برای هر حالت، عمق بهینه متفاوت است. مقدار آب مصرفی حداکثر عملکرد (I_m)، با مشتق‌گیری از تابع تولید و مساوی صفر قرار دادن آن محاسبه می‌شود (۱۴).

$$I_m = -b_1/(2c_1) \qquad (۴)$$

زمانی که زمین عامل محدود کننده باشد، سطح کشت ثابت بوده و مقدار بهینه آب مصرفی با مساوی صفر قرار دادن مشتق سود خالص حاصل می‌شود که در این حالت حداکثر سود خالص بدست می‌آید (۱۴ و ۱۵). در این شرایط قیمت فروش محصول، عملکرد محصول، آب‌بها و هزینه‌های متغیر آبیاری نقش مهمی در تعیین عمق بهینه آبیاری دارند، ولی به دلیل کشت کل سطح اراضی، هزینه‌های ثابت تأثیری در عمق بهینه ندارد.

$$\frac{\partial NB}{\partial I}=0 \quad \rightarrow P_c\frac{\partial y}{\partial I}=\frac{\partial C_c}{\partial I} \quad \rightarrow I_L=\frac{b_2-P_c b_1}{2P_c c_1} \qquad (۵)$$

در شرایط محدودیت منابع آب، سطح زیر کشت و تحت آبیاری، تابعی از آب مصرفی می‌باشد. در این حالت حد بهینه آب مصرفی که حداکثر سود را به همراه دارد، از حل رابطه (۶) حاصل خواهد شد (۱۴ و ۱۵). در این شرایط کل آب قابل دسترس مورد استفاده قرار گرفته، لذا هزینه‌های متغیر نقشی در عمق بهینه نداشته، اما هزینه‌های ثابت در تعیین عمق بهینه مؤثر می‌باشد.

$$I\left[P_c\frac{\partial y}{\partial I}-\frac{\partial C_c}{\partial I}\right]=P_c y-C_c \rightarrow I_w=\left(\frac{P_c a_1-a_2}{P_c c_1}\right)^{0.5} \qquad (۶)$$

در روابط فوق I_m، I_L و I_w به ترتیب عمق حداکثر عملکرد و عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت زمین و آب می‌باشند.

مدل شبیه‌سازی SWAP

در مدل SWAP حرکت آب در خاک‌رخ براساس معادله ریچاردز و حل آن به روش عددی تفاضلهای محدود و با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی معین صورت می‌گیرد. ارتباط بین رطوبت خاک، بار هیدرولیکی و ضرایب هیدرولیکی در توابع رطوبتی و تابع هدایت آبی غیر اشباع مشخص می‌گردد که این توابع هیدرولیکی برای هر لایه خاک، برای شبیه‌سازی مورد نیاز می‌باشند که عمق هر لایه بستگی به آزمایش‌های مزرعه‌ای داشته، بطوریکه هر چه تعداد لایه‌ها بیشتر(به طبع آن ضخامت هر لایه کمتر) باشد، دقت افزایش یافته؛ اما ممکن است که حل عددی ناپایدار گردد. در این تحقیقات عموماً ۳ لایه خاک و هر کدام به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برداشت گردیده و وارد مدل شد. در مدل SWAP میزان کاهش جذب به علت کاهش میزان آب و افزایش شوری به ترتیب از توابع پیشنهادی فدس و همکاران و ماس و هافمن استفاده می‌شود (۱۶، ۱۷ و ۱۹). برای محاسبه میزان جذب واقعی توسط ریشه گیاه در مدل SWAP از نظریه ضرب پذیری استفاده می‌شود (۱۷).

$$S_a(z)=\alpha_{rd}\alpha_{rw}\alpha_{rs}\alpha_{rf}S_p(z) \qquad (۷)$$

که در آن $S_a(z)$ و $S_p(z)$ فلاکس واقعی و پتانسیل جذب آب توسط ریشه ($cm^3cm^{-3}S^{-1}$)، α_{rd} (–)، α_{rw} (–)، α_{rs} (–) و α_{rf} به ترتیب توابع کاهشی بخاطر تنش‌های ماندابی (کمبود اکسیژن)، خشکی، شوری و تنش یخبندان خاک می‌باشد. شرایط مرزی بالادست (لایه سطحی) براساس فلاکس تبخیر و تعرق، میزان آبیاری و بارش و بکارگیری معادله بیلان آب در خاک تعیین می‌شود. مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از معادله پنمن–مانتیث و براساس داده‌های هواشناسی روزانه تشعشع، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و مشخصات گیاهی شامل ارتفاع گیاه، آلبیدو سطحی و حداقل مقاومت گیاه صورت می‌گیرد (۱۰). شرایط مرزی پایین‌دست می‌تواند زهکشی آزاد، سفره آب زیرزمینی و نوسانات آن و یا مقدار فلاکس معین از مرز پایین، تعریف گردد. برای شبیه‌سازی رشد محصول دو الگوریتم وجود دارد. یکی الگوریتم ساده دورنبوس و کسام می‌باشد و الگوریتم دوم با استفاده از یک مدل پیشرفته[1] رشد محصول را شبیه‌سازی می‌کند. مزیت الگوریتم دوم، توانایی شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و دانه پتانسیل و واقعی را دارا می‌باشد، در حالیکه الگوریتم ساده تنها عملکرد نسبی را شبیه‌سازی می‌کند (۱۲ و ۲۴).

داده‌های ورودی مدل

داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای مرز بالایی به صورت روزانه شامل دمای حداکثر و حداقل، رطوبت هوا، میزان تشعشع، سرعت باد و بارندگی روزانه می‌باشد که این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی رودشت جمع آوری گردید. شرایط مرز پایین حالت حضور سطح ایستابی بوده و سری زمانی آن به صورت ماهانه برای هر کدام از محصولات به مدل داده شد. تغییرات سطح ایستابی با استفاده از یک چاهک مشاهده‌ای در محل انجام آزمایشات اندازه‌گیری گردیده و نوسانات آن طی انجام آزمایش‌ها، از ۱/۹ تا ۲/۹ متر متغیر بوده است.

برای تعیین خصوصیات خاک‌رخ، تعداد لایه‌های خاک‌رخ در مدل مشخص گردید. خاک‌رخ تا عمق ۶۰ سانتی‌متر (برای ذرت علوفه‌ای در دو لایه و هر کدام به ضخامت ۳۰ و برای سایر محصولات که

1- WOFOST: WOrld FOod STudies

محل کشت آنها یکسان بود، در سه لایه و هر کدام بـه ضـخامت ۳۰ سانتی‌متر) به مدل داده شد. در مرحله بعد ضـرایب توابـع هیـدرولیکی خاک وارد مدل گردید. از بـین پارامترهـای روابـط منحنـی مشخـصه رطوبتی و هدایت آبی غیر اشباع، رطوبـت و هـدایت هیـدرولیکی حـد اشباع دارای معنی فیزیکی بوده و اندازه‌گیـری شـده‌انـد. بـرای سـایر ضرایب توابع هیدرولیکی خاک (λ، θ_{res}، α و n) با استفاده از توابع انتقالی در نظر گرفته شده در محیط SWAP و براساس بافت، چگالی ظاهری و کربن آلی هر لایه خاک، یک تخمین اولیه صورت گرفت و به منظور برآورد دقیق آنها روش بهینه‌سازی بکار گرفتـه شـد (۵). بـه منظور بهینه‌سازی چهار پارامتر فوق مـدل PEST[1] بـه مـدل SWAP لینک گردید. این مـدل، پارامترهـا را بـه روش معکـوس و رگرسـیون غیرخطی (الگوریتم گوس–مارکوارد لاونبرگ)، به روش تکـرار بهینـه می‌کند (۱۱). تابع هدف برای برآورد پارامترها، کمینـه کـردن تفـاوت بین رطوبت شبیه‌سازی مدل و مشاهدات بوده و به صورت رابطـه (۸) تعریف گردید. رطوبت مشاهده‌ای در طول فـصل رشـد و قبـل از هـر آبیاری از هر لایه خاک و به روش وزنی اندازه‌گیری گردید.

$$\min\ \varphi(\theta,b)=\sum_{i=1}^{N} w_i\left[\theta_{obs}(z,t_i)-\theta_{sim}(z,b,t_i)\right]^2 \qquad (۸)$$

که در آن $b(\lambda,\theta_{res},n,\alpha)$ بردار مجهـولات، $\theta_{obs}(z,t_i)$ رطوبـت مـشاهده شـده در عمـق z و زمـان t_i، $\theta_{sim}(z,b,t_i)$ مقـادیر رطوبـت شبیه‌سازی شده بر اساس آرایه بردار مجهولات، N تعداد مـشاهدات و w_i ضرایب وزنی هر قرائت می‌باشد که در این تحقیق فـرض گردیـد که ارزش همه داده‌ها یکسان و عدد یک لحاظ گردید. در رابطه فـوق هدف یافتن مقدار منحصر به فرد b به گونه‌ای است کـه تـابع هـدف کمینه شود. محدودیت‌هـای تـابع هـدف از جملـه حـد بـالا و پـایین پارامترهای مجهول (جدول ۳) در یک فایل کنتـرل بـه مـدل تعریـف گردید. برای تخمین پارامترهای انتقال املاح، برای شرایط مرزی بـالا غلظت باران صفر و برای شرایط اولیه، غلظت املاح خـاک بـرای هـر عمق خاک‌رخ که قبل از کشت اندازه‌گیری شده بود، به مدل داده شد. شبیه‌سازی انتقال املاح درخاک توسط مدل SWAP بر مبنای انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی و جذب می‌باشد. ایزوترم جـذب استفاده شده در مدل برای رابطه بین مقدار ماده جذب شـده و غلظـت ماده مورد نظر در فاز مایع، ایزوترم فروندلیخ (رابطه ۹) می‌باشد (۱۷).

$$Q=K_d.C_{ref}\left(C/C_{ref}\right)^{\beta} \qquad (۹)$$

که در آن Q مقدار جذب، K_d، β ضرایب تجربی ایزوتـرم جـذب فروندلیخ، C و C_{ref} مقدار غلظت و غلظت مرجـع مـی‌باشـد. تخمـین پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس و با لینک مدل به مدل PEST انجـام شـد. ضـریب پخـشیدگی مولکـولی (D_{dif})، ضـریب انتشارپذیری (γ) و K_d، β پارامترهـایی بودنـد کـه بـه روش حـل معکوس بهینه‌سازی شدند. تابع هدف برای این منظور، کمینـه کـردن تفاوت بین شوری عصاره اشباع شبیه‌سـازی و مـشاهده‌ای در مزرعـه تعریف گردید (رابطه ۱۰).

$$\min\varphi(EC_e,b)=\sum_{i=1}^{N}\left[EC_{e,obs}(z,t_i)-EC_{e,sim}(z,b,t_i)\right]^2 \qquad (۱۰)$$

کـه در آن $b(\gamma,D_{dif},K_d,\beta)$ بـردار مجهـولات، $EC_{e,obs}(z,t_i)$ شـوری عـصاره اشـباع انـدازه‌گیـری شـده در عمـق z و زمـان t_i، $EC_{e,sim}(z,b,t_i)$ مقادیر شبیه‌سازی شده با اسـتفاده از آرایـه بـردار مجهولات می‌باشد. در تخمین پارامترهـای گیـاهی محـصولات ذرت علوفه، پنبه و پیاز، مدل ساده (به علت اندازه گیـری نـشدن برخـی از پارامترها) و برای بقیه محصولات مدل پیشرفته استفاده شد. مهمترین پارامترهای ورودی مدل پیشرفته عبارتند از: سری‌های زمـانی ارتفـاع گیاه، عمق ریشه، شاخص سطح بـرگ، سـطح ویـژه بـرگ و حـداکثر میزان همانند سازی دی‌اکسیدکربن به عنوان تابعی از مراحل توسـعه، فاکتور کاهش حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکـسیدکربن بـه عنـوان تابعی از میانگین دمای روزانه و حداقل دمای روزانه، تقسیم‌بندی وزن خشک به اجزا چهارگانه گیـاه، نگهـداری تـنفس اجـزا، حـداکثر نـرخ افزایش شاخص سطح برگ، مجموع دمـای روزانـه از جوانـه زدن تـا گلدهی و از گلدهی تا رسیدن، راندمان مصرف نور، ضریب جذب نـور، مقادیر مکش خاک در ارتباط با سهولت جـذب آب (پارامترهـای تـابع جذب فدس (رابطه ۱۱): h_1,h_2,h_3,h_4)، پارامترهای تابع جذب مـس و هافمن (رابطه ۱۲) شامل شوری حـد آسـتانه و شـیب کـاهش جـذب (a,b) (۱۷ و ۲۰). بین مکش h_2 و h_3، جذب آب بهینه و برای مکـش بیشتر از h_2 و کمتر از h_3، کمتر از حد بهینه است.

$$\alpha_{rw}=\begin{cases}(h_2-h_1)^{-1}\times(h-h_1) & if \quad h_2\le h\le h_1\\ 1 & if \quad h_3\le h\le h_2\\ (h_3-h_4)^{-1}\times(h-h_4) & if \quad h_4\le h\le h_3\end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$\alpha_{rs}=1-b(EC_e-a) \qquad (۱۲)$$

برخی از پارامترهای گیاهی از قبیل مراحل توسعه و رشـد گیـاه، ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ، عمق توسـعه ریـشه، مجمـوع دمـای روزانه از جوانه زدن تا گلدهی و از گلدهی تا رسیدن و عملکرد دانـه و کل بیوماس اندازه‌گیری شده و مستقیماً وارد مـدل گردیـد. پـاره‌ای از پارامترهای گیاهی از قبیل تقسیم‌بندی وزن خشک به اجـزا چهارگانـه گیاه، نگهداری تنفس اجزا، پارامترهای تابع جذب فـدس، پارامترهـای تابع جذب مس و هافمن و ضـریب جـذب نـور بـر اسـاس تحقیقـات پیشین به مدل داده شـد (۱۵و۲۵). بـه منظـور شـبیه‌سـازی عملکـرد محصولات، مدل برای هر یک از محصولات واسنجی گردید. نظر بـه اینکه کشت محصول در سال‌های مختلف انجام شده بود، این احتمال وجود داشت که پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح طی این سال‌ها تغییر نماید. لذا پارامترهای هیـدرولیکی لایـه هـای خـاک بـرای هـر محصول به صورت جداگانه واسنجی شـد کـه هـدف حـداقل کـردن

2- PEST: Parameter ESTimation

اختلاف رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای سه عمق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ بود. بعد از واسنجی پارامترهای هیدرولیکی هر لایه، پارامترهای انتقال املاح لایه‌های خاک برای هر محصول واسنجی گردید. در آخرین واسنجی پارامترهای گیاهی و عملکرد واسنجی گردید. به منظور ارزیابی و سنجش اعتبار مدل، از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) و برای آزمون معنی‌داری از آزمون t استفاده گردید. به منظور تعیین تابع تولید محصولات تحت سطوح مختلف شوری، از مدل SWAP واسنجی شده استفاده گردید. مدل برای سطوح مختلف شوری (شامل ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) اجرا شد. برای هر یک از سطوح شوری، عمق آبیاری در هر نوبت آبیاری از ۱ تا ۱۵ سانتیمتر تغییر کرد. برای این منظور مدل SENSAN به مدل SWAP لینک گردید. به این ترتیب هر بار با تغییر عمق و سطح شوری، دیگر نیازی به اجرای دستی مدل نبود و با استفاده از آن، این کار بطور خودکار انجام گردید. پارامترهای تابع تولید محصولات انتخابی به روش حداقل مربعات معمولی(OLS)، با استفاده از نرم‌افزار شازم[1] و برای هر سطح شوری محاسبه گردید. شازم یک نرم‌افزار جامع کامپیوتری برای اقتصادسنجی و محاسبات آماری بوده و نسخه اولیه آن در دانشگاه تروسو نروژ برای تخمین و آزمودن پارامترهای انواع مدل‌های همبستگی به روش‌های خطی و غیرخطی بسط و در نسخه‌های بعدی برای سایر محاسبات و آزمون‌های آماری توسعه یافته است(۲۶).

نتایج و بحث

پیش‌بینی عملکرد محصول

پس از واسنجی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک، تطابق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهدای رطوبت و شوری عصاره اشباع خاک مشاهده شد. در جدول (۳) مقادیر بهینه این پارامترها ارائه شده است. پس از واسنجی برخی پارامترهای زراعی، در شکل (۱) عملکرد شبیه‌سازی و مشاهده‌ای برای محصولات مختلف نشان داده شده است. مقایسه عملکردهای بدست آمده از مدل و عملکردهای اندازه‌گیری شده در مزرعه نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و واقعی وجود دارد. به منظور ارزیابی مدل، شاخص‌ها و آزمون آماری t بر روی داده‌ها تعیین و نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. براین اساس، حداقل ضریب همبستگی مربوط به آفتابگردان (۰/۸۷۷) و حداکثر آن مربوط به محصول ذرت‌علوفه‌ای (۰/۹۸۳) می‌باشد.به منظور مقایسه مقادیر مدل و اندازه‌گیری شده، از آزمون t جفت شده با سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده گردید که نتایج آزمون t (مقدار P و t) برای هر یک از محصولات و سطح اطمینان فوق، در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به مقادیر آزمون t، مقدار P-value برای تمام محصولات از ۰/۰۵ بزرگتر و این به مفهوم این است که اختلاف مقادیر شبیه‌سازی مدل و اندازه‌گیری، در حدود اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد.

جدول۳- حد بالا و پایین پارامترهای مجهول و حد بهینه آنها برای چغندرقند، عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر

پارامتر	حد بالا	حد پایین	حد بهینه
$\alpha(cm^{-1})$	۰/۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۰۵
$n(-)$	۲/۵	۱	۱/۲۷۲۷
$\theta_{res}(cm^3cm^{-3})$	۰/۲	۰	۰/۰۱
$\lambda(-)$	۴	-۴	-۱/۲۸۲
$\beta(-)$	۱۰	۰	۱/۱۵
$K_d(cm^3mg^{-1})$	۱۰۰	۰	۵/۷۱
$D_{\text{dif}}(cm^2day^{-1})$	۱۰	۰	۱/۴
$\gamma(cm)$	۲۰	۰	۵/۱

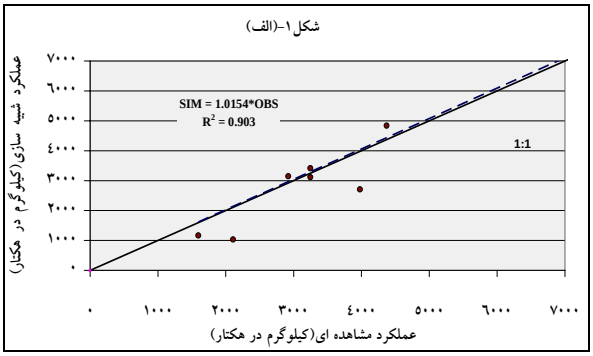
جدول٤- مقادیر شاخص‌های آماری R^2 و RMSE و آزمون t برای هر یک از محصولات

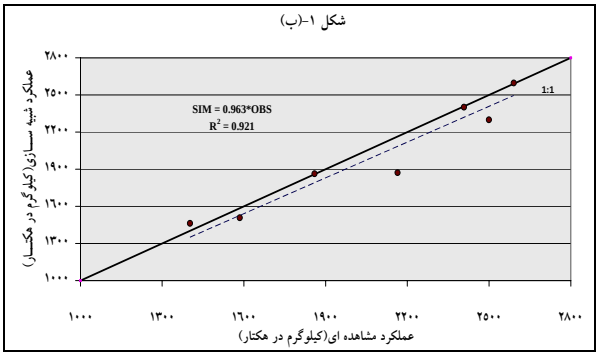
محصول	R^2 (-)	RMSE (ton/ha)	t value	P value
گندم	۰/۹۰۳	۱۸/۲۲	۰/۳۳	۰/۷۴۷
چغندرقند	۰/۸۸۷	۵/۳۷	۱/۱	۰/۳۰۵
پیاز	۰/۹۸۲	۷/۱۷	۰/۴۷	۰/۶۶۹
جو	۰/۹۵۱	۸/۲۰	-۱/۰۳	۰/۳۴۳
پنبه	۰/۹۲۱	۶/۹۴	۱/۴۸	۱/۱۸۸
آفتابگردان	۰/۸۷۷	۱۷/۴۵	-۱/۱۷	۰/۲۸۶
ذرت علوفه‌ای	۰/۹۸۳	۱/۲۹	-۰/۳۸	۰/۷۴۲

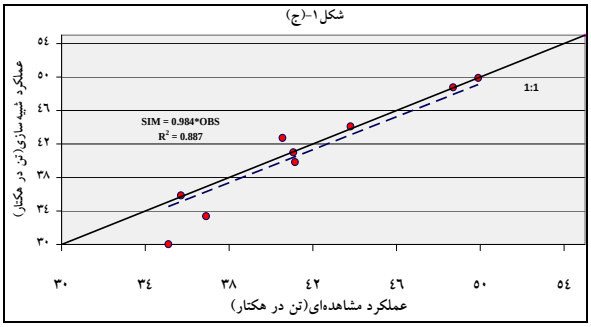
تابع هزینه محصولات انتخابی

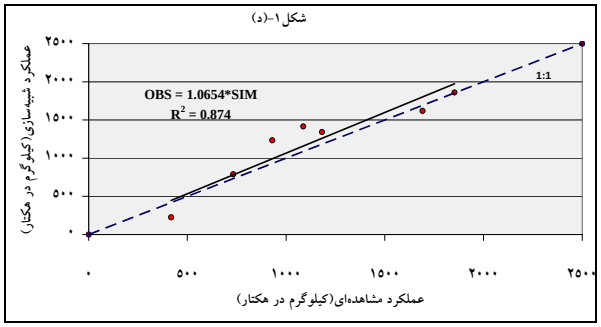
هزینه‌های ثابت و متغیر در واحد سطح (a وb) براساس نرخ ارائه خدمات کشاورزی شهرستان اصفهان برای سال۱۳۸۷ برآورد شد که نتایج آنها در جدول (۵) ارائه شده است. قیمت خرید هر کیلوگرم از محصولات گندم، پنبه، جو، ذرت علوفه‌ای، چغندرقند، آفتابگردان و پیاز در سال ۱۳۸۷، به ترتیب ۳۰۵۰، ۵۴۰۰، ۲۷۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۹۰۰۰، ۶۴۰ ریال بود. قیمت خرید مربوط به گندم، جو، پنبه، چغندرقند و پیاز در سال ۱۳۸۷ تضمینی بوده و قیمت سایر محصولات در یک دامنه، متغیر بوده و متوسط آن لحاظ گردید. قیمت برخی از محصولات خرید تضمینی از جمله پیاز، از ۱۳۷۵ ریال در فصل برداشت تا ۳۰۲۰ ریال در سایر ماه‌ها متفاوت بوده است؛ اما در تجزیه و تحلیل‌های عمق بهینه آبیاری پیاز، قیمت خرید تضمینی آن در نظر گرفته شد (۱).

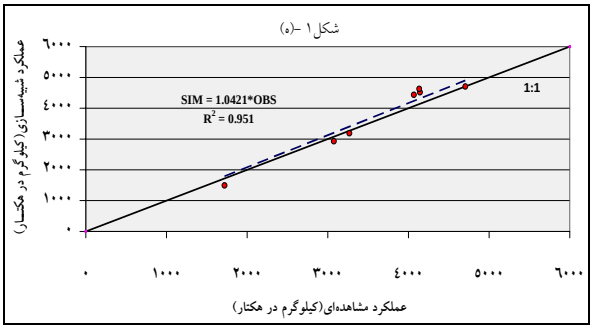
1- SHAZAM

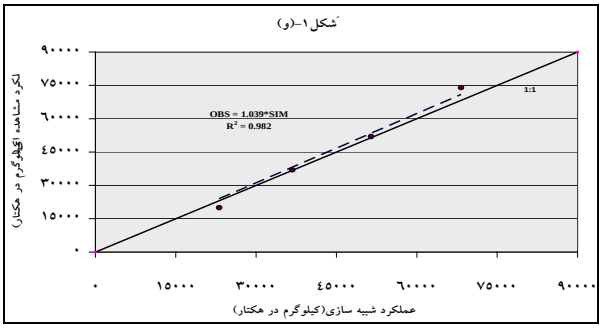


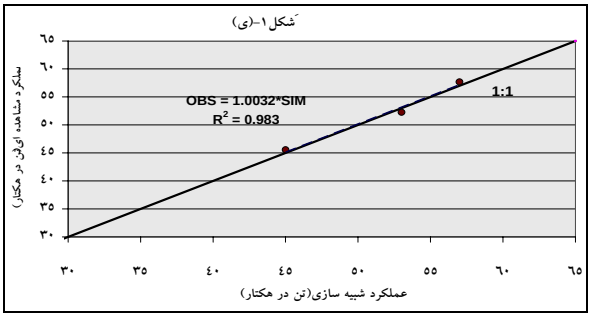












شکل۱ – عمکرد شبیه‌سازی و مشاهده شده محصولات زراعی انتخابی الف:گندم، ب: پنبه، ج: چغندرقند، د: آفتابگردان ، ه: جو، و: پیاز، ی: ذرت علوفه‌ای (خط ممتد خط با شیب ۱:۱ و خط منقطع برازش شده بر داده‌ها می‌باشد)

جدول۵ - هزینه ثابت (a)* و ضریب هزینه متغیر (b) محصولات انتخابی بر اساس آمار سال ۱۳۸۷**

محصول	a	b
گندم	۶۷۸۸۰۹۰	۱۸۵۴۸
جو	۵۷۶۶۹۴۰	۱۷۰۰۱
آفتاب گردان	۸۹۴۲۹۶۰	۱۴۴۸۵
پنبه	۹۲۳۹۰۰۰	۱۰۹۹۱
چغندرقند	۱۲۱۷۸۰۳۰	۱۳۵۸۸
پیاز	۲۶۴۴۳۷۲۰	۲۹۷۱۲
ذرت علوفه‌ای	۷۱۹۲۵۴۰	۲۷۸۴۱

* و ** به ترتیب بر حسب ریال و ریال بر هکتار بر سانتیمتر می‌باشد

توابع تولید

براساس داده‌های حاصل از اجرای مدل SWAP، پارامترهای تابع درجه دوم تولید (رابطه ۱) هر یک از محصولات محاسبه گردید. برای هر محصول، مدل در هر سطح شوری ۱۵ بار اجرا و با استفاده از داده‌های عملکرد متناسب با هر عمق آبیاری، پارامترهای تابع تولید به روش (OLS)، محاسبه و برای هر یک از محصولات در جدول (۶) ارائه شده است. برای محصول پیاز در کلاس شوری ۸ و۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، عملکرد صفر حاصل گردید که در جدول (۶) با * مشخص می‌باشد. برای پارامترهای جدول (۶)، عمق آبیاری بر حسب سانتی‌متر و عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم بر هکتار می‌باشد.

عمق بهینه آبیاری

براساس ضرایب تابع تولید، هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت فروش محصولات انتخابی و با بکارگیری روابط (۵) و (۶) عمق بهینه آب مصرفی گیاه در طول فصل زراعی برای سطوح مختلف شوری محاسبه شد. همچنین براساس رابطه (۴)، حداکثر عمق آب آبیاری برای حصول حداکثر عملکرد، برای سطوح مختلف شوری محاسبه شد که نتایج آنها در جدول (۷) ارائه شده است.

کاربرد عمق بهینه آبیاری در مدیریت زراعی

برنامه‌ریزی در شرایط محدودیت کمی آب

در این شرایط کیفیت آب مناسب (مثلاً با شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر) و از نظر سطح کشت محدودیتی وجود ندارد و تنها مقدار آب قابل دسترس محدود کننده تولید می‌باشد. در این شرایط کل اراضی قابل کشت نبوده و به منظور کسب حداکثر سود، باید تنها بخشی از اراضی را و با عمق بهینه آبیاری کشت نمود. بر این اساس، با در نظر گرفتن شوری آب برابر۱ دسی‌زیمنس بر متر و برای مقادیر مختلف آب قابل دسترس فرضی، سطح کشت بهینه هر محصول محاسبه و نتایج آن در جدول (۸) ارائه شده است. این سطح بهینه از تقسیم مقدار آب قابل دسترس بر عمق بهینه بدست آمده و تمام محاسبات با فرض حالت تک محصولی انجام گردیده و بهینه‌سازی الگوی کشت مدنظر نمی‌باشد. در جدول (۸)، سطح بهینه کشت و سود خالص برای مقادیر آب در دسترس فرضی۴۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متر مکعب براساس عمق بهینه آنها، ارائه شده است. در شرایط محدودیت فقط کمی آب، برای ۱۰۰۰۰ متر مکعب آب قابل دسترس، اگر محصول گندم کشت گردد، سطح کشت ۱/۹۵ هکتار و سودخالص آن ۲۳/۵۹ میلیون ریال می‌باشد. در حالی که اگر زارع با همان مقدار آب پیاز بکارد، سطح کشت آن ۱/۶ هکتار و سودخالص ۵۲/۶۲ میلیون ریال حاصل می‌گردد؛ که در حالت کشت پیاز، سطح کشت ۱۸درصد کاهش و سود خالص ۱۲۳درصد افزایش خواهد یافت. اگر به جای کشت محصول گندم، آفتابگردان کشت شود، سطح کشت ۵/۱درصد افزایش و سود خالص۲۱درصد کاهش می‌یابد.

برنامه‌ریزی در شرایط محدودیت زمین

در این شرایط مساحت زمین عامل محدود کننده بوده و آب آبیاری به لحاظ کمی و کیفی، هیچ محدودیتی ندارد. در این شرایط کل اراضی به زیر کشت می‌رود که عمق بهینه آبیاری که منجر به حداکثر سود خالص می‌گردد، بصورت جدول (۷) می‌باشد. برای این شرایط، با در نظر گرفتن سطح شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار آب قابل دسترس ۴۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ مترمکعب، سطح کشت محصولات در جدول (۹) ارائه شده است. با توجه به جدول (۹)، اگر زارع ۱۰۰۰۰ مترمکعب آب در دسترس داشته باشد، با کشت چغندرقند، سطح کشت ۰/۸۱ هکتار و سود خالص آن ۱۱/۴۸ میلیون ریال می‌باشد؛ اما با کشت پیاز، سطح کشت ۵۱درصد و سود خالص ۳۰۷درصد افزایش خواهد یافت.

برنامه‌ریزی در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب

در این شرایط آب قابل دسترس محدود بوده و دارای محدودیت کیفی نیز می‌باشد. مقادیر عمق بهینه آبیاری در این شرایط نیز در جدول (۷) و برای هر یک از محصولات ارائه شده است. برای مقدار آب قابل دسترس ۱۰۰۰۰ مترمکعب، سطح کشت و سود خالص حاصل از آن، برای سطوح مختلف شوری آب آبیاری، استخراج و در جداول (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. براساس این جداول و برای آب قابل دسترس۱۰۰۰۰ متر مکعب، در سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر، حداکثر سود خالص (۳۵/۱۱ میلیون ریال) از کشت پیاز با سطح کشت ۱/۴۴ هکتار حاصل خواهد شد. با افزایش سطح شوری به ۴ دسی‌زیمنس بر متر و همان مقدار آب، حداکثر سود خالص از کشت گندم با مقدار ۲۲/۳۲ میلیون ریال حاصل می‌گردد. در سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر با ۱۰۰۰۰ مترمکعب آب، حداکثر سود برای زارع از کشت گندم (۱۸/۳۷ میلیون ریال) و سپس جو (۱۳/۹ میلیون ریال) حاصل می‌گردد.

در این شرایط به خاطر افت شدید عملکرد پیاز و ذرت علوفه‌ای، سود خالص آنها منفی گردید. با افزایش شوری به ۱۰، حداکثر سود خالص با همان مقدار آب در دسترس، از کشت جو حاصل می‌گردد که سود خالص و سطح کشت جو در این شرایط ۸/۸۴ میلیون ریال و ۱/۵۴ هکتار می‌باشد. در این سطح شوری با کشت چغندرقند، سود خالص و سطح کشت نسبت به کشت جو، ۹ و ۳۳درصد کاهش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که میزان سود خالص با افزایش عمق آب آبیاری، ابتدا روند صعودی و سپس روند نزولی دارد. در حالت محدودیت کمی آب، برای یک مقدار معین آب قابل دسترس، حداکثر سود خالص از کشت محصول پیاز حاصل گردید. در شرایط محدودیت زمین نیز حداکثر سود خالص مربوط به کشت پیاز می‌باشد؛ با این تفاوت که در حالت دوم نسبت به اول، سود خالص ۱۲ درصد و سطح کشت ۲۴ درصد کاهش یافت. در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب به ازای مقدار معین آب قابل دسترس، با افزایش شوری تا ۴ دسی‌زیمنس بر متر، کاهش سود خالص برای گندم، جو، پنبه و چغندرقند بسیار کم بود. در این شرایط کاهش سود خالص با افزایش شوری از ۲ به ۴ دسی‌زیمنس بر متر، برای محصولات آفتابگردان، پیاز و ذرت‌علوفه‌ای به ترتیب حدود ۱۳، ۷۵ و ۷۵درصد می‌باشد. از سطح شوری ۶ به بالا، سود خالص پیاز و ذرت‌علوفه‌ای به علت افت زیاد عملکرد، منفی بدست آمد. در سطح شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، حداکثر سود خالص برای جو و سپس چغندرقند بدست آمد.

تشکر و قدردانی

از همکاری‌های مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان و راهنمایی‌های ارزنده دکتر مجید وظیفه‌دوست تشکر می‌شود.

جدول ٦- پارامترهای تابع تولید (رابطه ۱) محصولات زراعی انتخابی برای سطوح مختلف شوری آب آبیاری

محصول	ضرایب	آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر) آب سطوح مختلف شوری					
		۱	۲	٤	٦	۸	۱۰
گندم	a_1	-۲۵۸۲/٤	-۲۵٦٦/۵	-۲۳۰٤/۱	-۱۵٤۸/۹	-٤۳۸/۲	۳۳۷/۱
	b_1	۲۷۱/٤	۲۷۰/۳	۲۵٤/۷	۲۰۹/۳	۱٤۰/٤	۹۱/۸
	c_1	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۷	-۱/٤	-۰/۸	-۰/۵
جو	a_1	-۲۱۷۱/۹	-۲۱٤۹/۰	-۲۱٤۹/۰	-۱۸۳٤/۰	-۱۵۲۵/۰	-۸۳۳/۰
	b_1	۲۲۸/٦	۲۲۷/۳	۲۲۷/۳	۲۰۷/۱	۱۸۷/۷	۱٤٤/٦
	c_1	-۱/٦	-۱/٦	-۱/٦	-۱/٤	-۱/۲	-۰/۹
پنبه	a_1	۱۱۹/۸	۱۱۹/۸	۱۱۹/۸	۱/٤	-۱۰۳/٤	۱۲٦/٤
	b_1	۵۱/۰	۵۱/۰	۵۱/۰	۵۱/٤	٤۹/۲	۳۷/٦
	c_1	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۱
چغندرقند	a_1	-۸۲٤۸/۸	-۸۲٤۳/۰	-٦۸۱۱/٤	-٤۰۱۲/۵	-۱۷٦۲/٤	-٤۰۳/۱
	b_1	۱۰۱٦/۹	۱۰۱٦/۷	۹۷۰/۰	۸۷۹/۸	۷۸۷/٤	٦۹٦/۸
	c_1	-٤/۰	-٤/۰	-۳/۸	-۳/٤	-۳/۰	-۲/٦
پیاز	a_1	-٤۱۷٦۷/۰	-۱۹۹۳۸/۰	۵۵۳٦/۰	٤٦۸۹/٤	*	*
	b_1	۳۵۳۲/۰	۲۳۵۷/۱	۹۹۰/۲	۵٤۹/۲	*	*
	c_1	-۲۱/۳	-۱۲/۷	-٤/٦	-۲/۲	*	*
آفتابگردان	a_1	۲۱۸/۰	۱٤۸/۱	۲۳٦/۹	۲٤۳/٤	۲۹٤/۸	۲۷٦/۰
	b_1	۵٤/۲	۵۳/۳	٤٦/۲	٤۱/۳	۳٤/۳	۲۷/۷
	c_1	-۰/۳	-۰/۳	-۰/۳	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۱
ذرت علوفه‌ای	a_1	-۵٤۲۷۲/۰	-٤۰۹۷۸/۰	-۱۲٤۸۷/۰	-۱۸۷۵۵/۰	-۱۹۸۰۹/۰	-۱۳٤۸۵/۰
	b_1	۳٤۲۷/۹	۲۷۲۰/٦	۱۲۷۹/۳	۱۱٦۳/۳	۱۰۲٤/۸	٦۲٤/۱
	c_1	-۲۱/۸	-۱۷/٤	-۷/۷	-٦/۹	-۵/۹	-۳/٤

جدول ۷ - حداکثر عمق آب مصرفی و عمق بهینه آبیاری در شرایط مختلف برای سطوح مختلف شوری آب آبیاری[†]

محصول	ضرایب	آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر) آب سطوح مختلف شوری					
		۱	۲	٤	٦	۸	۱۰
گندم	I_m	۷۳/۹	۷۳/۹	۷۵/۰	۷۷/۳	۸۳/٦	۸٦/۲
	I_L	۷۲/۲	۷۲/۳	۷۳/۲	۷۵/۰	۸۰/۰	۸۰/۵
	I_w	۵۱/۲	۵۱/۲	۵۱/۷	۵۲/۸	۵٦/۳	۵۹/٦
جو	I_m	۷۳/۳	۷۳/۳	۷۳/۳	۷٤/۵	۷۵/۳	۷۸/٤
	I_L	۷۰/٤	۷۰/٤	۷۰/٤	۷۱/۳	۷۱/۷	۷۳/٦
	I_w	۵۷/۸	۵۷/۸	۵۷/۸	۵۹/۲	٦۰/۵	٦٤/۸
پنبه	I_m	۱۱۸/۵	۱۱۸/۵	۱۱۸/۵	۱۲۰/٤	۱۲۲/۹	۱۳۳/۱
	I_L	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	۱۱۵/٦	۱۱۷/۸	۱۲۵/۹
	I_w	۸٦/۰	۸٦/۰	۸٦/۰	۸۹/۵	۹۵/۲	۱۰۵/۹
چغندرقند	I_m	۱۲٦/۲	۱۲٦/۳	۱۲۷/۸	۱۲۹/۷	۱۳۱/۱	۱۳۳/۰
	I_L	۱۲۲/۹	۱۲۲/۹	۱۲٤/۲	۱۲۵/۷	۱۲٦/٦	۱۲۷/۸
	I_w	۹۰/۰	۹۰/۰	۹۰/٦	۹۱/۵	۹۳/۳	۹۷/۲
پیاز	I_m	۸۲/۷	۹۳/۰	۱۰۸/۰	۱۲۵/۵	*	*
	I_L	۸۱/٦	۹۱/۲	۱۰۲/۹	۱۱٤/۹	*	*
	I_w	٦۲/٤	٦۹/۵	۸۸/۳	۱۲۹/٤	*	*
آفتابگردان	I_m	۸۳/۲	۸٦/۵	۹۱/۲	۹۲/۳	۹۵/٦	۱۰۱/۹
	I_L	۸۰/۷	۸۳/۹	۸۸/۰	۸۸/۷	۹۱/۱	۹٦/۰
	I_w	٤۸/۸	۵۲/٤	۵٤/٦	۵۷/۹	٦۲/٤	۷۲/٦
علوفه ذرت	I_m	۷۸/۸	۷۸/٤	۸۳/۳	۸٤/۹	۸٦/٦	۹۱/۷
	I_L	۷٦/٦	۷۵/۷	۷۷/۲	۷۸/۱	۷۸/۷	۸۰/۵
	I_w	٦۰/۰	٦۱/۲	٦۸/۹	۷۹/۰	۷۸/۰	۷۹/۰

[†] I_m، I_L و I_w به ترتیب روابط(۴)، (۵) و (۶)، حداکثر عمق آب مصرفی و بهینه آبیاری در شرایط محدودیت زمین و آب می‌باشد.

جدول۸- سطح کشت (هکتار) و سود خالص(ریال) در شرایط محدودیت کمی آب برای مقادیر مختلف آب در دسترس (مترمکعب)

آب در دسترس	محصول	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	پیاز	آفتابگردان	علوفه‌ای ذرت
٤۰۰۰	سطح بهینه کشت	۰/۷۸	۰/٦۹	۰/٤٦	۰/٤٤	۰/٦٤	۰/۸۲	۰/٦۷
	سود خالص × $10^٦$	۹/٤٤	٦/۲۳	۲/۵۸	۵/۳۰	۲۱/۰۵	۷/٤۹	۸/۷۰
۱۰۰۰۰	سطح بهینه کشت	۱/۹۵	۱/۷۳	۱/۱٦	۱/۱۱	۱/٦۰	۲/۰۵	۱/٦۷
	سود خالص × $10^٦$	۲۳/۵۹	۱۵/۵۷	٦/٤۵	۱۳/۲۵	۵۲/٦۲	۱۸/۷۲	۲۱/۷٦

جدول ۹- سطح کشت(هکتار) و سود خالص(ریال) در شرایط محدودیت زمین برای مقادیر مختلف آب در دسترس(مترمکعب)

آب در دسترس	محصول	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	پیاز	آفتابگردان	علوفه‌ای ذرت
٤۰۰۰	سطح بهینه کشت	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۳	۰/۳۳	۰/٤	۰/۵۰	۰/۵۲
	سود خالص × $10^٦$	۸/۰٦	۵/۵٤	۲/۲	٤/۵۹	۱۸/	٦/۰۱	۷/۷٦
۱۰۰۰۰	سطح بهینه کشت	۱/۳۹	۱/٤۲	۰/۸۸	۰/۸۱	۱/۲۲	۱/۲٤	۱/۳۰
	سود خالص × $10^٦$	۲۰/۱۵	۱۳/۸٦	۵/٦٦	۱۱/٤۸	٤٦/٤	۱۵/۰۲	۱۹/۳۹

جدول ۱۰- سطح کشت بهینه در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب (هکتار)

آب در دسترس(متر مکعب)	سطح شوری	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	پیاز	آفتابگردان	علوفه‌ای ذرت
۱۰۰۰۰	۲	۱/۹۵	۱/۷۳	۱/۱۶	۱/۱۱	۱/٤٤	۱/۹۱	۱/٦۳
	٤	۱/۹٤	۱/۷۳	۱/۱٦	۱/۱۰	۱/۱۳	۱/۸۳	۱/٤٥
	٦	۱/۸۹	۱/٦۹	۱/۱۲	۱/۰۹	۰/۷۷	۱/۷۳	۱/۲۷
	۸	۱/۷۸	۱/٦٥	۱/۰٥	۱/۰۷	*	۱/٦۰	*
	۱۰	۱/٦۸	۱/٥٤	۰/۹٤	۱/۰۳	*	۱/۳۸	*

جدول ۱۱- سود خالص در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب (میلیون ریال)

آب در دسترس(متر مکعب)	سطح شوری	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	پیاز	آفتابگردان	علوفه‌ای ذرت
۱۰۰۰۰	۲	۲۳/٤۸	۱٥/٤٦	٦/٤٥	۱۳/۲٥	۳٥/۱۱	۱۷/٤۷	۱٥/۱٤
	٤	۲۲/۳۲	۱٥/٤٦	٦/٤٥	۱۲/۷٥	۸/٥٥	۱٥/۲۲	۳/۸٤
	٦	۱۸/۳۷	۱۳/۹۰	٦/۰۲	۱۱/٦۱	-٤/۰٦	۱۲/٤۱	-۰/۳٥
	۸	۱۲/۱۱	۱۲/۲۸	٤/۸۹	۱۰/۰۱	*	۹/۲٦	*
	۱۰	٦/۸۰	۸/۸٤	۳/۰٤	۸/۰۲	*	٥/۷۱	*

منابع

۱- انصاری ح. ۱۳۸۷. تعیین عمق شاخص و بهینه آبیاری در ذرت‌های زودرس با هدف احتساب حداکثر سود. مجله آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲۲، شماره ۲، ص: ۱۱۶-۱۰۷

۲- بی نام. ۱۳۸۷. متوسط هزینه تولید محصولات کشاورزی به تفکیک مراحل مختلف کشت. جهاد کشاورزی استان اصفهان، معاونت طرح و برنامه‌ریزی اقتصادی.

۳- ذولفقاران ا. ۱۳۸۶. بررسی اثر مقدار آب آبیاری بر عملکرد گندم در شوری‌های مختلف با آبیاری بارانی. مجموعه مقالات نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه باهنر کرمان.

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

۵- عباسی ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۵۰ ص.

۶- فیضی م. ۱۳۷۸. بررسی تأثیر مدیریتهای مختلف استفاده با آب شور بر عملکرد آفتابگردان. گزارش نهایی، تحقیقات خاک وآب اصفهان.

۷- فیضی م. ۱۳۷۸. بررسی تأثیر مدیریتهای مختلف استفاده از آب شور بر عملکرد جو. گزارش نهایی، تحقیقات خاک وآب اصفهان.

۸- فیضی م. ۱۳۷۸. بررسی تأثیر مدیریتهای مختلف استفاده از آب شور بر عملکرد پنبه. گزارش نهایی، تحقیقات خاک وآب اصفهان.

۹- کیانی ع. ۱۳۸۶. استفاده از مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم. مجموعه مقالات نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه باهنر کرمان.

10- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.

11- Doherty, J., Brebber, L., Whyte, P., 1995. PEST: Model Independent Parameter Estimation. Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia .

12- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome, Italy.

13- Droogers, P., Torabi, M., 2002. Field scale scenarios for water and salinity management by simulation modeling. IAERI-IWMI Research Reports 12.

14- English, M.J., 1990. Deficit irrigation: Analitical farmework, J. ASCE, 116 (3):413-418.

15- English, M.J. and Raja, S.N. 1996. Perspective on deficit irrigation. Agri. Water Manag. 32: 1-14.

16- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield, Pudoc. Wageningen, pp.189.

17- Kroes, J.G. and J.C. Van Dam, 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wagenningen, Report1649, Availabel at: www.alterra.nl

18- Letey, J., Dinar, A. and Knapp, K.C., 1985. Crop-Water Production Function Model for Saline Irrigation Waters. Soil Science Society of America Journal Vol 49, No. 4, p 1005-1009.

19- Mass, E.V. and G.J. Hoffman, 1977, Crop salt tolerance current assessment, J.Irrigation and Drainage Division, ASCE, 103:115-134.
20- Mostafazadeh-fard, B., Mansouri, H., Mousavi, S. F. and Feyzi, M., 2009. Effects of Different Levels of Irrigation Water Salinity and Leaching on Yield and Yield Components of Wheat in an Arid Region. J. Irri. And Drai. Eng., Vol. 135, No. 1
21- Russo, D. and Bakker, D., 1987. Crop- Water Production Functions for sweet corn and cotton irrigated with saline waters. Soil Science Society of America Journal Vol 51: p 1554-1562.
22- 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, J. of Agri. Water Manag., 66: 153-162.
23- Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., P.J. Shouse, and J.A. Poss, 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. Agricultural Water Management, 86, 140-149.
24- Supit, I., Hooyer, A.A., Van Diepen, C.A., 1994. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS, vol. 1: Theory and Algorithms. EUR publication 15956, Agricultural series, Luxembourg, 146 p.
25- Vazifedoust, M., Van Dam, J.C., Feddes, R.A. and Feizi, M., 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agricultural Water Management, 95:89-102.
26- Whistler, D., White, K.,J., Wong, S., D. and Bates, D., 2004. SHAZAM econometrics software: user's reference manual. Northwest Econometrics, Ltd. Vancouver, Canada.

Journal of Water and Soil
Vol. 24, No. 3, July-Aug 2010, p. 463-475

نشریه آب و خاک
جلد ۲۴، شماره ۳، مرداد - شهریور ۱۳۸۹، ص. ۴۷۵-۴۶۳

Determination of Optimal Field Crops Irrigation Depth Using Swap Model in Salinity Condition

V. R. Verdinejad[1*] –T. Sohrabi[2]– N. Heydari[3] – SH. Araghinejad[4] – M. Feizi[5]

Abstract

In this study, seven main field crops of the Rudasht and Abshar Irrigation Networks of Esfahan (with 54,000 ha designed command area) such as Wheat, Barley, Onion, Sunflower, Fodder Mays and Sugar beet were selected and SWAP model was calibrated by inverse modeling base on field experiments results in order to determine crop water salinity production functions. Field experiments were conducted with effect of saline water with different irrigation managements on crop yield at Research Station of Drainage and Soil Reclamation of Rudasht during 1996 to 1998 and 2005 to 2007. In terms of insufficient field treatments and in order to fit proper crop yield production function, SWAP calibrated model was run for different quantity and quality levels of irrigation water. Quadratic form of crop yield production function was calculated for 6 salinity levels of irrigation water include 1, 2, 4, 6, 8 and 10 dS/m and each crop. Optimal irrigation depth in different condition include scarcity of water quantity, land quantity and water quantity and quality was calculated base on crop yield production function, cost production function and marketable price of each crop based on 2008 with respect to maximize net benefit. Results of analysis showed that in scarcity of water quantity for 10000 m^3 available water, maximum net benefit gain onion cultivation with 52.6×10^6 Rials beside with 1.16 ha of area cultivation. In land scarcity condition for specified available water, maximum net benefit gain onion cultivation, too. In scarcity of water quantity and quality condition, with increasing salinity of irrigation water, for 10000 m^3 available water salinity level of irrigation water equal 2 dS/m, maximum net benefit gain onion cultivation with 35.11×10^6 Rials beside with 1.44 ha of area cultivation, too. In salinity level equal 6 dS/m, maximum net benefit gain wheat cultivation with 18.37×10^6 Rials and next maximum net benefit barely cultivation with 13.9×10^6 Rials. Yield of Onion and Fodder Maize decreased severely so that for higher than salinity level of irrigation water equal 6 dS/m, net benefit was negative. In salinity level equal 10 dS/m, maximum net benefit gain barely and next sugar beet cultivation.

Keywords: Salinity, SWAP model, Maximum net benefit, Optimal irrigation depth, zayanderud river basin

1,2,4- Ph.D Student , Professor and Assistant professor Dept. of Irrigation and Reclamation Eng., University of Tehran, Respectively
(*-Corresponding author Email: verdinejad@ut.ac.ir)
3- Assistant professor, Iranian Agricultural Engineering Research Institute
5- Researcher, Esfahan Agricultural and Natural Resources Research Center