

تعیین عمق مناسب آبیاری و میزان حساسیت آن به قیمت آب با استفاده از تابع تولید

محمد اسماعیل کمالی^{۱*} و حسین انصاری^۲

چکیده

در این پژوهش عمق مناسب برای آبیاری کامل و کم آبیاری پرتقال تعیین و تأثیر آن بر بهره‌وری آب و درآمد بررسی شد. همچنین تغییرات این اعماق نسبت به قیمت آب آبیاری و میوه، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا تابع تولید پرتقال براساس میزان آب آبیاری و آب کاربردی به دست آمد. سپس عمق مناسب آبیاری کامل و کم آبیاری با هدف بیشترین درآمد خالص از واحد سطح باغ و بیشترین درآمد خالص از واحد آب کاربردی به روش انگلیش محاسبه شد. نتایج نشان داد که برای سطح آبیاری ۱۰۰ درصد، عمق مناسب آبیاری ۱۸۶/۵ میلی‌متر و عمق مناسب آب کاربردی ۳۱۵/۶ میلی‌متر است؛ اما عمق بهینه کم آبیاری به دو عامل میزان کمبود منابع آبی و محدودیت سطح باغ وابسته است. به طوری که اگر محدودیت آب کم باشد، عمق مناسب، عمق بهینه کم آبیاری است که هر چند موجب ۴ درصد کاهش درآمد خالص در واحد سطح باغ می‌شود، اما موجب کاهش مصرف آب آبیاری به میزان ۲۶ درصد و افزایش درآمد خالص بر واحد آب آبیاری به میزان ۱۶ درصد می‌شود. اگر محدودیت آب شدید باشد، استفاده از عمق بهینه کم آبیاری معادل، مناسب‌تر است. در این حالت، درآمد خالص بر واحد سطح باغ ۱۷ درصد کاهش می‌یابد؛ اما مصرف آب آبیاری ۴۶ درصد کمتر می‌شود. همچنین نتایج نشان داد استفاده از اعماق بهینه کم آبیاری و کم آبیاری معادل موجب افزایش بهره‌وری آب به میزان ۲۶ و ۴۴ درصد می‌شوند. از سوی دیگر، در شرایط کم آبی، اگر محدودیت زمین وجود نداشته باشد، استفاده از عمق کم آبیاری بهینه بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین را ایجاد می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که درآمد خالص و اعماق بهینه کم آبیاری نسبت به قیمت آب آبیاری حساس نیستند؛ اما به شدت به قیمت میوه حساس‌اند که باعث می‌شود میوه نسبت به آب نقش مهم‌تری را در درآمد خالص ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، پرتقال، تابع تولید، درآمد خالص، کم آبی.

ارجاع: کمالی م. ا. و انصاری ح. ۱۴۰۲. تعیین عمق مناسب آبیاری و میزان حساسیت آن به قیمت آب با استفاده از تابع تولید. ۹۶-۸۵. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2023.14134.2466>

۱- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

* نویسنده مسئول: kamalipasha@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

مقدمه

استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای برای باغات مرکبات به یک روش استاندارد تبدیل شده است. به طوری که اکثر مواقع باغات مرکبات جدید به همراه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای احداث می‌شوند. از نظر اقتصادی آبیاری قطره‌ای برای بسیاری از درختان میوه، مقرون به صرفه است. به طوری که حتی واکنش‌های متوسط به بهبود مدیریت مصرف آب، باعث افزایش درآمد می‌شود. استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای شرایط مناسبی را برای بهبود منافع شخصی (افزایش سود در سطح مزرعه) و منافع عمومی (کاهش فشار بر منابع آب و محیط زیست) فراهم می‌کند؛ اما صرفاً استفاده از این سامانه‌ها نمی‌تواند موجب بهبود بهره‌وری آب یا درآمد خالص شود و عمق مناسب آبیاری نیز باید براساس روابط عملکرد-آب و هزینه-آب تعیین شود. از طرفی دیگر آب زیرزمینی به عنوان بزرگ‌ترین منبع آب شیرین در دسترس، تحت فشارهای طبیعی و انسانی است. تغییر اقلیم و گرم‌تر شدن هوا که باعث کاهش تغذیه آب زیرزمینی می‌شود و نیز برداشت‌های بی‌رویه، این منابع آبی را با مشکلات جدی روبه‌رو کرده است. در ایران مطابق با برنامه ملی سازگاری با کم‌آبی (برنامه ملی سازگاری با کم‌آبی مصوب هیئت وزیران، ۱۴۰۰)، مقرر شد با اجرای فاز اول، میزان برداشت آب سطحی و زیرزمینی بخش کشاورزی، ۱۰/۶ میلیارد مترمکعب کاهش یابد که متناظر با کاهش مصرف آب در حد ۱۲۶۰ مترمکعب در هکتار است. یکی از روش‌های مدیریت آبیاری در زمان‌های کمبود آب در دسترس، اعمال کم‌آبیاری^۱ است که ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند بهره‌وری آب را نیز افزایش دهد (روبلس و همکاران، ۲۰۱۷). از سوی دیگر با توجه به اینکه میزان بارش به عنوان منبع اصلی تأمین آب در زمان‌های مختلف، متفاوت است، در زمان فراهم بودن آب نیز اعمال کم‌آبیاری برای حصول منابع پایدار آب ضروری است؛ اما از آنجایی که کشاورزان، کم‌آبیاری را موجب کاهش محصول می‌دانند، پذیرش این موضوع برای آن‌ها به سختی انجام می‌شود. در نتیجه ضروری است ارزیابی اقتصادی مدیریت کم‌آبیاری مخصوصاً برای محصولات با سطح زیر کشت زیاد و نیاز آبی بالا بررسی شود.

در استان مازندران سطح زیر کشت مرکبات بیش از ۱۱۰ هزار هکتار است که بیش از ۸۴ هزار هکتار آن را پرتقال تشکیل می‌دهد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). میزان نیاز آبی درختان پرتقال طبق سند ملی آب، ۴۲۷۰ تا ۵۴۵۰ مترمکعب در هکتار است. در استان مازندران سالانه ۲۷۵۶ میلیون مترمکعب (معادل ۸۱/۶ درصد از کل منابع آب) در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و آبخوان‌های استان نیز سالانه با کاهش ۶ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی مواجه هستند (سامانه شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، ۱۴۰۱)؛ بنابراین ضروری است با تعیین و اعمال عمق مناسب آبیاری، مصرف آب در بخش کشاورزی را مدیریت کرد. به طوری که در زمان‌هایی که با محدودیت آب مواجه نیستیم، انجام آبیاری مازاد مشکلات زهکشی و خالی شدن آبخوان‌ها را به وجود نیاورد و در هنگام محدودیت آب، با اعمال کم‌آبیاری بتوان مصرف آب را کاهش داد. هدف از بهینه‌سازی مصرف آب آبیاری، بیشینه کردن محصول یا درآمد خالص در شرایط محدودیت آب است. برای این منظور ابتدا باید تابع عملکرد-آب تهیه شود. سپس با بهینه‌سازی این توابع، می‌توان اعماق بهینه آبیاری را به دست آورد. یکی از روش‌های مناسب برای تعیین عمق بهینه آبیاری در شرایط مختلف محدودیت آبی، استفاده از روش انگلیش^۲ است. در این روش ابتدا توابع عملکرد-آب و هزینه-آب تعیین می‌شوند. تابع عملکرد-آب تابعی درجه دو است که میزان عملکرد را با میزان آب کاربردی در طول فصل آبیاری مرتبط می‌سازد. تابع هزینه-آب نیز تابعی درجه یک است که کل هزینه‌های تولید را با کل آب کاربردی مرتبط می‌سازد. اعماق بهینه آبیاری نیز با بهینه‌سازی این توابع با هدف حصول بیشترین درآمد خالص در واحد سطح باغ و بیشترین درآمد خالص در واحد آب کاربردی به دست می‌آیند (انگلیش، ۱۹۹۰؛ سپاسخواه و اکبری، ۲۰۰۵؛ عبادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ شعبانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ مقیمی و همکاران، ۲۰۲۲). تابع هزینه براساس سه مشخصه تعیین می‌شود که عبارت‌اند از: ۱- حد پایین که هزینه‌های ثابت را نشان می‌دهد، ۲- شیب تابع که بیانگر هزینه‌های متغیر است و ۳- حد بالا که بیانگر بیشترین ظرفیت تحویل آب توسط سیستم است. همچنین با استفاده از روش انگلیش می‌توان عمقی از آب

آن با استفاده از تجزیه و تحلیل ریاضی بررسی شد (شعبانی و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج نشان داد که استفاده از عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت آبی باعث افزایش ۱۲ درصدی درآمد خالص نسبت به آبیاری کامل شده است. در پژوهشی دیگر، اعماق بهینه آبیاری چغندر قند در شرایط محدودیت منابع آبی در اصفهان با استفاده از روش انگلیش به دست آمد (شمشیری و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج نشان داد که در شرایط کم آبی و به ازای شوری صفر دسی‌زیمنس بر متر، عمق بهینه آبیاری ۱۵۲۰ میلی‌متر است که باعث کاهش ۱۸/۷ درصدی مصرف آب و افزایش ۲۰ درصدی سطح زیر کشت می‌شود. عمق بهینه آبیاری لوبیا نیز با استفاده از روش انگلیش در لرستان به دست آمد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد که در شرایط محدودیت منابع آبی، میزان بهینه آب مصرفی ۳۹ درصد کمتر از آبیاری کامل و برابر با ۳۸۰۳ مترمکعب در هکتار است که موجب می‌شود سطح زیر کشت ۰/۶۵ هکتار افزایش یابد و بدین ترتیب درآمد خالص در واحد سطح نیز بیشینه می‌شود. با توجه به اینکه نیاز آبی ذرت تقریباً بالاست، در تحقیقی اعماق بهینه آن در شرایط محدودیت منابع آبی در کرج با استفاده از روش انگلیش به دست آمد (علیزاده و عباسی، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد که در شرایط محدودیت آب عمق بهینه آبیاری ۷۷۴ میلی‌متر است که ۲۳ درصد کمتر از آبیاری کامل است.

مواد و روش‌ها

برای تعیین اعماق بهینه آبیاری، ابتدا باید توابع عملکرد-آب و هزینه-آب تعیین شود. برای این منظور آزمایشی در یکی از باغات پرتقال شهرستان ساری انجام شد. در این شهرستان، باغات پرتقال در سال‌های زیادی مخصوصاً در ماه‌های تابستان با کمبود بارش، افت سطح آب زیرزمینی و مشکل تأمین آب مواجه هستند. درختان پرتقال در باغ مورد نظر، پرتقال تامسون ناول ۲۵ ساله با فاصله ۶×۶ متر بودند که به روش قطره‌ای آبیاری می‌شدند. اقلیم منطقه مورد نظر معتدل خزری با تابستان مرطوب و گرم و زمستان مرطوب و معتدل است. میانگین دما در منطقه مورد نظر ۱۸/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش و تبخیر سالانه به ترتیب ۷۵۰ و ۱۱۰۰ میلی‌متر بود. مدیریت تغذیه و مبارزه با آفات و بیماری‌ها برای همه درختان یکسان بود. برای به دست آوردن توابع عملکرد-آب و

آبیاری را تعیین کرد که در آن کم‌آبیاری درآمد بیشتری را نسبت به آبیاری کامل ایجاد می‌کند. علاوه بر این، روش انگلیش دارای یک چارچوب تحلیلی است که توابعی عمومی ایجاد می‌کند و از این توابع تولید می‌توان برای هر تابع تولید محصول استفاده کرد.

تحقیقات مختلفی در زمینه کم‌آبیاری و استفاده از روش انگلیش برای تعیین اعماق بهینه کم‌آبیاری انجام شده است. تحقیقی در چین نشان داد که کم‌آبیاری به میزان ۷۰ درصد آبیاری کامل، به مقدار کمی جذب نیتروژن و تولید ماده خشک را کاهش داده است (وو و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین یاسین و غزال (۲۰۲۰) استفاده از روش انگلیش را برای تعیین اعماق بهینه و مدیریت کم‌آبیاری پیشنهاد کردند. در تحقیقی دیگر در ایتالیا، عمق بهینه کم‌آبیاری مرکبات در شرایط محدودیت آب به دست آمد (کاپرا و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج نشان داد که بهترین عمق آبیاری در شرایط محدودیت آب، کاهش ۲۵/۶ درصد از آبیاری کامل است. در اسپانیا نیز با کاهش ۳۰ درصد از میزان آبیاری پرتقال، درآمد خالص به ازای واحد آب مصرفی ۴۶/۶ درصد افزایش یافت (پرز-پرز و همکاران، ۲۰۱۰). در ایران نیز تحقیقات مختلفی در زمینه کم‌آبیاری انجام شده است. در تحقیقی که توسط مقیمی و همکاران (۲۰۲۲) در شیراز انجام شد، اعماق بهینه آبیاری گندم با استفاده از روش انگلیش به دست آمد. نتایج نشان داد که استفاده از آب آبیاری بهینه برای احتمال وقوع بارندگی فصلی در سطوح اطمینان ۵۰ و ۸۰ درصد، باعث کاهش ۲۲ و ۳۰ درصدی مصرف آب و افزایش ۴۷ و ۵۰ درصدی درآمد خالص نسبت به آبیاری کامل می‌شود. در تحقیقی دیگر، عمق بهینه آبیاری چغندر قند در شرایط محدودیت آبی به دست آمد که ۴۸ درصد کمتر از آبیاری کامل بود (شعبانی و سپاسخواه، ۲۰۱۹). این میزان کم‌آبیاری باعث ۲۵ درصد کاهش عملکرد نسبت به آبیاری کامل شد؛ اما درآمد خالص را ۹۶ درصد افزایش داد. در تحقیقی که در استهبان انجام شد، اعماق بهینه آبیاری برای آبیاری تکمیلی انجیر دیم با استفاده از روش انگلیش محاسبه شد. نتایج نشان داد که با کاهش ۵۵ درصد در آب کاربردی، عملکرد انجیر ۲۸ درصد کاهش یافت؛ اما سود خالص در مقایسه با عملکرد بیشینه، دوبرابر افزایش یافت (خزایی و سپاسخواه، ۲۰۱۸). همچنین تأثیر کم‌آبیاری چغندر قند بر عملکرد

اجرای مبارزه شیمیایی با علف‌های هرز)، هرس، استهلاک تجهیزات آبیاری، حمل نهاده‌ها، برق و برداشت میوه بود. هزینه‌های ثابت نیز شامل هزینه‌های آماده‌سازی زمین، حفر چاله، کاشت نهال، خرید نهال و زمین (اجاره زمین) بود. پس از محاسبه توابع موردنظر، برای تعیین اعماق بهینه، از روش انگلیش استفاده شد. مطابق با این روش، برای حصول درآمد خالص بیشینه، مشتق تابع درآمد خالص در کل سطح باید صفر شود که به صورت معادله (۸) است.

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = A \times \frac{\partial i_1}{\partial w} + i_1 \times \frac{\partial A}{\partial w} = 0 \quad (8)$$

برای به دست آوردن عمق مناسب برای آبیاری کامل، مشتق تابع تولید باید صفر شود (معادله (۹)). در نتیجه عمق بهینه آبیاری کامل (W_m)، به صورت معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial (y(w))}{\partial w} = 0 \quad (9)$$

$$W_m = \frac{-b_1}{2c_1} \quad (10)$$

اگر با محدودیت منابع آبی مواجه بودیم، بسته به میزان محدودیت آب، می‌توان به دو حالت عمق بهینه کم‌آبیاری را محاسبه کرد. در حالت اول مشتق مساحت به صورت معادله (۱۱) و تابع بهینه درآمد خالص به صورت معادله (۱۲) محاسبه می‌شود. در نتیجه عمق بهینه کم‌آبیاری (W_w)، به صورت معادله (۱۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial A}{\partial w} = \frac{-W_t}{w^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = A \times \frac{\partial i_1}{\partial w} + i_1 \times \frac{-W_t}{w^2} = 0 \quad (12)$$

$$W_w = \sqrt{\frac{a_1 \times Pc - a_2}{Pc \times c_1}} \quad (13)$$

در حالت دوم می‌توان عمقی را به دست آورد که در آن درآمد خالص به‌ازای واحد آب مصرفی در کم‌آبیاری، برابر با درآمد خالص به‌ازای واحد آب مصرفی در شرایط آبیاری کامل باشد (معادله (۱۴)) که به آن عمق بهینه کم‌آبیاری معادل (W_{ew}) می‌گویند و به صورت معادله (۱۵) محاسبه می‌شود (انگلیش، ۱۹۹۰).

$$\frac{i_1(W_{ew})}{W_{ew}} = \frac{i_1(W_m)}{W_m} \quad (14)$$

$$W_{ew} = \frac{\left(\frac{Pc \cdot b_1^2 + Pc \cdot a_1 \cdot c_1 - Pc \cdot a_1}{2b_1} \right) + \sqrt{\left(\frac{Pc \cdot b_1^2 + Pc \cdot a_1 \cdot c_1 - Pc \cdot a_1}{2b_1} \right)^2 - 2Pc \cdot c_1 (Pc \cdot a_1 - a_2)}}{2Pc \cdot c_1} \quad (15)$$

علاوه بر اعماق بهینه برای آبیاری کامل و کم‌آبیاری، عمق آب در حالت سر به سری (W_k) را می‌توان به دست آورد که

هزینه-آب، ۴ سطح آبیاری شامل آبیاری به‌اندازه ۱۰۰، ۸۰، ۶۵ و ۵۰ درصد عمق آب آبیاری و در ۵ تکرار روی درختان اعمال شد. دور آبیاری موردنظر ۴ روز در نظر گرفته شد. برای تعیین عمق آب آبیاری، در روز موردنظر، رطوبت خاک اندازه‌گیری و با استفاده از معادلات (۱) و (۲) میزان عمق آب آبیاری (D) و حجم آبیاری (V) محاسبه شد.

$$D = (FC - \theta) \times MAD \times Z \times P_w \quad (1)$$

$$V = D \times A \quad (2)$$

در این معادلات FC، رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی که ۲۹ درصد در نظر گرفته شد، θ ، رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده خاک در هر مرحله، MAD، تخلیه مجاز رطوبتی که ۵۰ درصد در نظر گرفته شد، Z، عمق ریشه که ۱۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، P_w ، درصد خیس‌شدگی که ۲۰ درصد در نظر گرفته شد و A، مساحت مربوط به هر درخت که ۳۶ مترمربع در نظر گرفته شد، هستند. سپس توابع تولید $y(w)$ ، هزینه $c(w)$ و درآمد $i_1(w)$ به ترتیب به صورت معادلات (۳) تا (۵) محاسبه شد. درآمد خالص در کل سطح و کل سطح قابل آبیاری نیز توسط معادلات (۶) و (۷) محاسبه شدند.

$$y(w) = c_1 w^2 + b_1 w + a_1 \quad (3)$$

$$c(w) = b_2 w + a_2 \quad (4)$$

$$i_1(w) = Pc \times y(w) - c(w) \quad (5)$$

$$i_f(w) = A \times [Pc \times y(w) - c(w)] \quad (6)$$

$$A = \frac{W_t}{w} \quad (7)$$

که در آن $y(w)$ عملکرد در واحد سطح (kg/ha)، w عمق آب کاربردی (میلی‌متر)، $c(w)$ هزینه تولید در واحد سطح (ریال بر هکتار)، $i_1(w)$ درآمد خالص (سود) در واحد سطح (ریال بر هکتار)، Pc قیمت واحد وزن محصول (ریال بر کیلوگرم)، $i_f(w)$ درآمد خالص در کل سطح (ریال)، A کل سطح، W_t کل آب موجود قابل‌دسترس (میلی‌متر) و a_1 ، b_1 ، c_1 ، a_2 و b_2 ضرایب ثابت هستند. برای تعیین آب کاربردی (w) دو حالت مدنظر قرار گرفته است. در حالت اول آب کاربردی فقط شامل آب آبیاری و در حالت دوم شامل مجموع آب آبیاری و بارش بود. هزینه‌های متغیر شامل هزینه آب، کود، روغن، سم (حشره‌کش، کنه‌کش و قارچ‌کش)، علف‌کش، عملیات کودپاشی، عملیات سم‌پاشی، عملیات علف‌کش (شامل مبارزه مکانیکی و

که IUW_{w_m} و $IUW_{O_{WD}}$ درآمد خالص به‌ازای واحد حجم آب مصرفی با کاربرد اعماق کم‌آبیاری و آبیاری کامل است (ریال بر هکتار).

۶- درآمد خالص به‌ازای واحد محصول (IUY) (ریال بر کیلوگرم)

$$IUY = \frac{(i_L(w)_{O_{WD}}) \times 100}{Y_{O_{WD}}} \quad (23)$$

که در آن $i_L(w)_{O_{WD}}$ درآمد خالص به‌ازای واحد زمین و $Y_{O_{WD}}$ میزان محصول برای عمق‌های بهینه است.

۷- کاهش درآمد خالص به‌ازای واحد محصول ($IRUY$) (%)

$$IRUY = \frac{(IUY_{w_m} - IUY_{O_{WD}}) \times 100}{IUY_{w_m}} \quad (24)$$

که در آن IUY_{w_m} و $IUY_{O_{WD}}$ میزان درآمد خالص به‌ازای واحد محصول برای آبیاری کامل و کم‌آبیاری‌ها است. شایان‌ذکر است که در حالت کم‌آبیاری، مصرف آب در واحد سطح (یک هکتار) نسبت به حالت آبیاری کامل کاهش می‌یابد؛ بنابراین مساحت قابل آبیاری بیش از واحد سطح قبلی (یک هکتار) خواهد شد که این مساحت قابل آبیاری (IA)، میزان تولید معادل (EY^A)، کیلوگرم) و درصد تولید اضافه‌شده (IEY^A) با استفاده از معادلات (۲۵) تا (۲۷) به‌دست می‌آیند. همچنین نسبت افزایش درآمد خالص به‌ازای واحد زمین ($IIUL^A$) وقتی که میزان آب مصرفی معادل با W_m باشد نیز محاسبه شده است. بهره‌وری آب نیز با استفاده از معادله (۲۸) به‌دست آمد.

$$IA_{O_{WD}} = \frac{W_m}{W_{O_{WD}}} \quad (1)$$

$$EY_{O_{WD}} = IA_{O_{WD}} \times Y_{O_{WD}} \quad (25)$$

$$IEY_{O_{WD}} = \frac{(EY_{O_{WD}} - EY_{w_m}) \times 100}{EY_{w_m}} \quad (26)$$

$$WP = \frac{\text{عملکرد}}{\text{آب مصرفی}} \quad (27)$$

نتایج و بحث

حالت اول: وقتی عمق آب کاربردی برابر با عمق آب آبیاری باشد ($W=I$)

وقتی که عمق آب آبیاری به‌عنوان عمق آب کاربردی مدنظر قرار گیرد، توابع تولید و هزینه مطابق با جدول ۱ و شکل ۱ هستند. سپس اعماق بهینه آب آبیاری محاسبه

در آن درآمد ناخالص برابر با هزینه‌ها است (معادله (۱۶)) و به‌صورت معادله (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$i_l(w_k) = 0 \quad (16)$$

$$W_k = \frac{-(P_{cb_1} - b_v) + \sqrt{(P_{cb_1} - b_v)^2 - 2P_{c_1}C_1(P_{ca_1} - a_v)}}{2P_{c_1}bc_1} \quad (17)$$

با توجه به اینکه هدف از تعیین اعماق بهینه، حصول درآمد خالص بیشینه است، ارزیابی اقتصادی این اعماق با استفاده از شاخص‌های زیر انجام شد.

۱- صرفه‌جویی در مصرف آب (WS^A):

$$WS = \frac{(W_m - W_{O_{WD}}) \times 100}{W_m} \quad (18)$$

که W_m عمق آب آبیاری در حالت آبیاری کامل (میلی‌متر) است و $W_{O_{WD}}$ عمق بهینه کم‌آبیاری است.

۲- درصد کاهش عملکرد نسبت به عملکرد بیشینه (YR^A):

$$YD = \frac{(Y_{w_m} - Y_{O_{WD}}) \times 100}{Y_{w_m}} \quad (19)$$

که Y_{w_m} و $Y_{O_{WD}}$ تابع تولید به‌ترتیب به‌ازای عمق آبیاری در آبیاری کامل و عمق آبیاری در کم‌آبیاری‌ها است.

۳- درصد کاهش درآمد خالص از واحد سطح ($IRUL^A$):

$$IRUL = \frac{(i_L(w)_{w_m} - i_L(w)_{O_{WD}}) \times 100}{i_L(w)_{w_m}} \quad (20)$$

که $i_L(w)_{w_m}$ و $i_L(w)_{O_{WD}}$ به‌ترتیب درآمد خالص در واحد سطح (ریال بر هکتار) برای عمق آبیاری در آبیاری کامل و عمق آبیاری در کم‌آبیاری‌ها است.

۴- درآمد خالص به‌ازای واحد حجم آب مصرفی (IUW^A) (ریال بر مترمکعب)

$$IUW = \frac{i_L(w)_{O_{WD}}}{W_{O_{WD}}} \quad (21)$$

که در آن $i_L(w)_{O_{WD}}$ درآمد خالص در واحد سطح (ریال بر هکتار) و $W_{O_{WD}}$ مقدار آب مصرفی در واحد سطح برای عمق‌های بهینه (مترمکعب در هکتار) است.

۵- درصد افزایش درآمد خالص به‌ازای واحد حجم آب مصرفی ($IIUW^A$) (برحسب درصد):

$$IIUW = \frac{(IUW_{O_{WD}} - IUW_{w_m}) \times 100}{IUW_{w_m}} \quad (22)$$

7- Income per unit of yield
8- Income reduction per unit of yield
9- Equivalent yield
10- Increased equivalent yield
11- Income increase per unit of land

1- Water saving
2- Yield reduction
3- Income reduction per unit of land
4- Income per unit of water
5- Optimum water depth
6- Income increase per unit of water

درآمد خالص بر واحد زمین (IRUL) را ۱۵ درصد کاهش می‌دهد؛ اما در این حالت، اگر محدودیت زمین نباشد، با این مقدار آب ذخیره شده می‌توان ۳۶ درصد زمین بیشتری (IA) را آبیاری کرد که منجر به ۲۶ درصد افزایش محصول می‌شود. این شرایط، درآمد خالص بر واحد زمین (IIUL) را ۱۶ درصد افزایش می‌دهد که بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین است.

جدول ۲- اعماق بهینه آبیاری وقتی عمق آب کاربردی برابر با

عمق آب آبیاری باشد (W=I)

W_k (mm)	W_{ew} (mm)	W_w (mm)	Y_m (ton/ha)	W_m (mm)
۶۱/۱	۱۰۰/۵	۱۳۶/۹	۵۷/۴	۱۸۶/۵

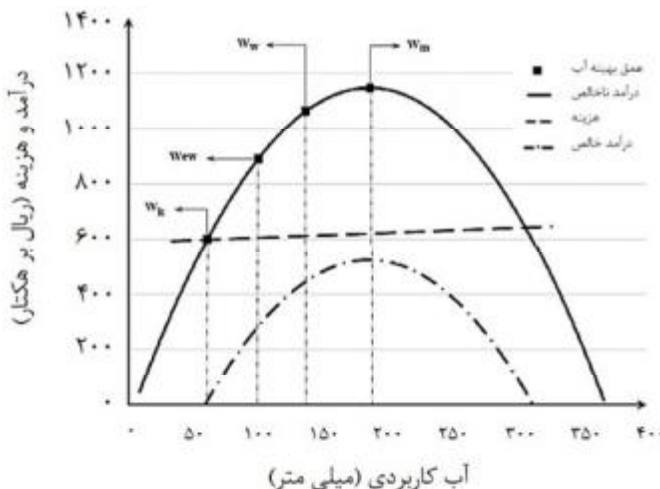
W_m = عمق بهینه آبیاری کامل، Y_m = عملکرد در حالت آبیاری کامل، W_w = عمق بهینه کم آبیاری، W_{ew} = عمق بهینه کم آبیاری معادل، W_k = عمق آب در حالت سرریز

شد که به صورت جدول ۲ است. نتایج نشان داد که در این حالت عمق بهینه برای آبیاری کامل ۱۸۶/۵ میلی‌متر است.

جدول ۱- توابع تولید و هزینه وقتی عمق آب کاربردی برابر با عمق آب آبیاری باشد (W=I)

تابع هزینه	تابع تولید
$C(w) = 179.525w + 589763, R^2=0.84$	$Y(w) = -0.00174w^2 + 0.64929w - 3.1303, R^2=0.93$

همچنین عمق بهینه کم آبیاری (W_w)، ۱۳۶/۹ میلی‌متر است که باعث کاهش مصرف آب (WS) به میزان ۲۷ درصد و افزایش درآمد خالص بر واحد آب مصرفی (IIUL) به میزان ۱۶ درصد می‌شود. اگرچه عمق آب آبیاری به میزان W_w اثرات مثبت بر بهره‌وری آب دارد،



شکل ۱- توابع درآمد و هزینه و اعماق بهینه آبیاری وقتی عمق آب کاربردی برابر با عمق آب آبیاری باشد (W=I)

جدول ۳- تجزیه و تحلیل اقتصادی اعماق بهینه آب آبیاری وقتی عمق آب کاربردی برابر با عمق آب آبیاری باشد (W=I)

W_k	W_{ew}	W_w	W_m	واحد	شاخص
۶۷/۳	۴۶/۱	۲۶/۶	--	(%)	صرفه جویی در
۴۷/۷	۲۲/۴	۷/۵	--	(%)	کاهش عملکرد (YR)
۱۰۰	۴۶/۱	۱۴/۶	--	(%)	کاهش درآمد خالص
-۱۰۰	۰	۱۶/۳	--	(%)	افزایش درآمد خالص
۱۰۰	۳۰/۵	۷/۷	--	(%)	کاهش درآمد خالص
۴۹/۲	۴۴/۳	۳۸/۸	۳۰/۸	Kg/m^3	بهره‌وری آب (WP)
۳/۰۵	۱/۸۶	۱/۳۶	--	ha	مساحت قابل آبیاری
۹۱/۷	۸۲/۷	۷۲/۴	۵۷/۴	ton/ha	تولید معادل (EY)
۵۹/۷	۴۴/۰	۲۶/۱	--	(%)	درصد تولید اضافه
-۱۰۰	۰	۱۶/۳	--	(%)	افزایش درآمد خالص

عمق بهینه کم آبیاری معادل (W_{ew}) در این حالت برابر با ۱۰۰/۵ میلی‌متر است که میزان آب آبیاری را ۴۶ درصد کاهش می‌دهد (IIUL)، اما این حالت باعث کاهش ۲۲ درصدی محصول دهی می‌شود (YR)؛ بنابراین اگرچه مصرف W_{ew} اثرات مثبت بر مصرف آب (WS)، بهره‌وری آب (WP) و درآمد خالص بر واحد آب مصرفی (IIUL) دارد، منجر به کمترین درآمد خالص بر واحد زمین (IUL) (البته غیر از عمق W_k) می‌شود (جدول ۳). شایان ذکر است که با استفاده از اعماق آبیاری W_w و W_{ew} بهره‌وری آب (WP) به ترتیب برابر با ۴۴/۳ و ۳۸/۸ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود که بیشتر از آبیاری کامل است.

جدول ۴- توابع تولید و هزینه وقتی عمق آب کاربردی برابر با مجموع عمق آب آبیاری و بارش باشد ($W=I+R$)

تابع هزینه	تابع تولید
$C(w)=179.525w+566586,$ $R^2=0.84$	$Y(w)=-0.00174w^2 +$ $1.0987w - 115.961,$ $R^2=0.93$

جدول ۵- اعماق بهینه آب آبیاری وقتی عمق آب کاربردی برابر با مجموع عمق آب آبیاری و بارش باشد ($W=I+R$)

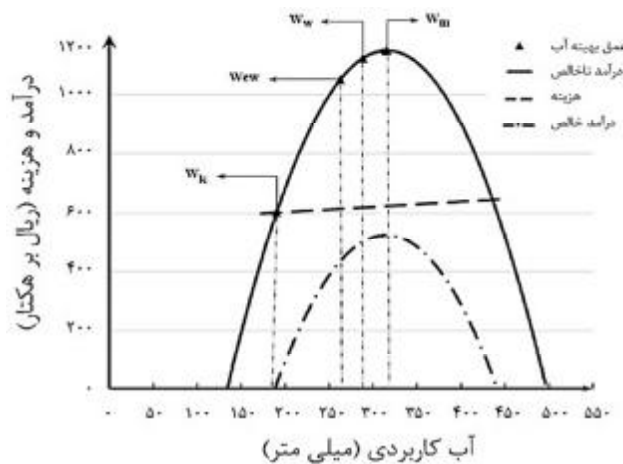
W_k (mm)	W_{ew} (mm)	W_w (mm)	Y_m (ton/ha)	W_m (mm)
۱۹۰/۲	۲۶۲/۷	۲۸۷/۹	۵۷/۴	۳۱۵/۶

W_m = عمق بهینه آبیاری کامل، Y_m = عملکرد در حالت آبیاری کامل، W_w = عمق بهینه کم آبیاری، W_{ew} = عمق بهینه کم آبیاری معادل، W_k = عمق آب در حالت سر به سر

حالت دوم: وقتی عمق آب کاربردی برابر با مجموع عمق آب آبیاری و بارش باشد ($W=I+R$)

در این حالت، عمق آب کاربردی برابر با مجموع عمق آب آبیاری و بارش مؤثر در طول فصل آبیاری است. فصل آبیاری در منطقه مورد مطالعه از فروردین تا شهریور است و بارش مؤثر در این زمان در منطقه و سال مورد مطالعه براساس روش USDA (USDA, 1967)، ۱۲۹/۱ میلی متر بوده است. شایان ذکر است که بارش های کمتر از ۵ میلی متر نیز صفر در نظر گرفته شده اند؛ بنابراین توابع تولید و هزینه با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی به دست آمد که نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۲ مشاهده می شود.

سپس اعماق بهینه آب آبیاری محاسبه شده است (جدول ۵). نتایج نشان داد که عمق بهینه آب آبیاری برای حصول حداکثر محصول ۳۱۵/۶ میلی متر بوده است.



شکل ۲- توابع درآمد و هزینه و اعماق بهینه آبیاری وقتی عمق آب کاربردی برابر با مجموع عمق آب آبیاری و بارش باشد ($W=I+R$)

افزایش می دهد و درآمد خالص بر واحد محصول (IRUY) را ۹ درصد کاهش می دهد؛ اما درآمد خالص بر واحد زمین (IIUL) تغییری نمی کند. نتایج ارائه شده نشان می دهد که با افزایش عمق آب کاربردی، درآمد خالص تا یک مقدار آستانه، افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. همچنین با انجام آبیاری کامل و استفاده از W_m ، حداکثر محصول و درآمد خالص بر واحد زمین به دست می آید؛ اما وقتی محدودیت زمین وجود ندارد، با انجام کم آبیاری و استفاده از W_w ، بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین حاصل می شود؛ زیرا با استفاده از آب ذخیره شده حاصل از کم آبیاری، زمین

در این شرایط عمق بهینه کم آبیاری (W_w) برابر با ۲۸۷/۹ میلی متر است. مطابق با تجزیه و تحلیل اقتصادی (جدول ۶)، با استفاده از W_w بهره وری آب (WP) و درآمد خالص بر واحد آب (IIUW) افزایش می یابد؛ اما میزان محصول (YR) و درآمد خالص بر واحد زمین (IRUL) کاهش می یابد. اگر محدودیت زمین نباشد، با آب ذخیره شده، ۱۰ درصد زمین بیشتری می تواند آبیاری شود (IA) که منجر به افزایش محصول (EY) و درآمد خالص بر واحد زمین (IIUL) می شود که بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین است. عمق بهینه کم آبیاری معادل (W_{ew}) برابر با ۲۶۲/۷ میلی متر است که بهره وری آب (WP) را ۱۰ درصد

آبیاری و بارش ($W=I+R$) مدنظر قرار گیرد؛ بنابراین، اگرچه مجموع آب آبیاری و بارش باید برای تعیین توابع تولید و هزینه مدنظر قرار گیرد، اما برای محاسبه سطح آبیاری شده معادل (IA) در شرایط کم آبیاری و بدون محدودیت زمین، فقط عمق آب آبیاری باید مدنظر قرار گیرد. از طرفی دیگر در شرایط بدون محدودیت زمین، جداول ۳ و ۶ فقط وقتی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند که همه آب کاربردی به وسیله آبیاری تأمین شود. ارزیابی دقیق از تأثیر اقتصادی کم آبیاری در جدول ۷ ارائه شده است.

بیشتری را می‌توان آبیاری کرد. نکته‌ای که باید مدنظر قرار گیرد مساحت زمین آبیاری شده (IA) در شرایط کم آبیاری و بدون محدودیت زمین است. در برخی مطالعات (مانند شمشیری و همکاران، ۱۳۹۸)، مساحت زمین آبیاری شده معادل (IA) در شرایط کم آبیاری و شرایط بدون محدودیت زمین در حالتی به دست آمده بود که مجموع آب آبیاری و بارش به عنوان آب کاربردی در تعیین اعماق بهینه آب آبیاری مدنظر قرار گرفته بود. در حالی که برای افزایش سطح آبیاری شده فقط آب آبیاری مورد نیاز است ($W=I$) و نیازی نیست تا مجموع آب

جدول ۶- تجزیه و تحلیل اقتصادی اعماق بهینه آب آبیاری وقتی عمق آب کاربردی برابر با عمق آب آبیاری باشد ($W=I+R$)

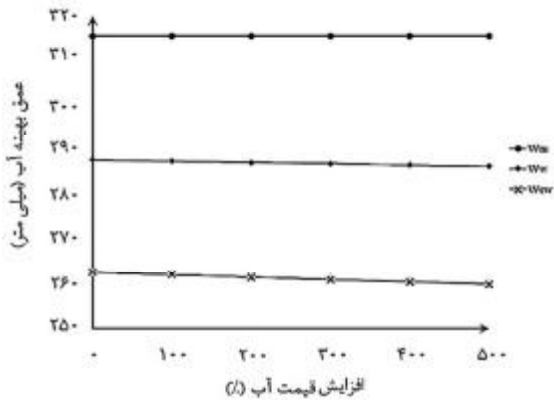
شاخص	واحد	W_m	W_w	W_{ew}	W_k
صرفه جویی در مصرف آب (WS)	(%)	--	۸/۸	۱۶/۸	۳۹/۸
کاهش عملکرد (YR)	(%)	--	۲/۳	۸/۵	۴۷/۷
کاهش درآمد خالص از واحد سطح ($IRUL$)	(%)	--	۴/۱	۱۶/۸	۱۰۰
افزایش درآمد خالص به ازای واحد حجم آب مصرفی ($IIUW$)	(%)	--	۵/۱	۰/۰	-۱۰۰
کاهش درآمد خالص به ازای واحد محصول ($IRUY$)	(%)	--	۱/۸	۹/۰	۱۰۰
بهره‌وری آب (WP)	kg/m^3	۱۸/۲	۱۹/۵	۲۰/۰	۱۵/۸
مساحت قابل آبیاری (IA)	ha	--	۱/۱۰	۱/۲۰	۱/۶۶
تولید معادل (EY)	Ton/ha	۵۷/۴	۶۱/۵	۶۳/۲	۴۹/۹
درصد تولید اضافه شده (IEY)	(%)	--	۷/۱	۱۰/۰	-۱۳/۲
افزایش درآمد خالص به ازای واحد زمین ($IIUL$)	(%)	--	۵/۱	۰/۰	-۱۰۰

جدول ۷- ارزیابی اقتصادی کم آبیاری در شرایط بدون محدودیت زمین

شاخص	واحد	W_m	W_w	W_{ew}	W_k
صرفه جویی در مصرف آب آبیاری (WS)	(%)	--	۲۶/۶	۴۶/۱	۶۷/۳
درصد کاهش عملکرد نسبت به عملکرد بیشینه (YR)	(%)	--	۲/۳	۸/۵	۴۷/۷
کاهش درآمد خالص بر واحد زمین ($IRUL$)	(%)	--	۴/۱	۱۶/۸	۱۰۰
افزایش درآمد خالص به ازای واحد آب آبیاری ($IIUW$)	(%)	--	۱۶/۳	۰/۰	-۱۰۰
بهره‌وری آب آبیاری (WP)	kg/m^3	۳۰/۸	۳۸/۸	۴۴/۳	۴۹/۲
مساحت قابل آبیاری (IA)	ha	--	۱/۳۶	۱/۸۶	--
تولید معادل (EY)	Ton/ha	۵۷/۴	۷۶/۴	۹۷/۶	--
درصد تولید اضافه شده (IEY)	(%)	--	۳۳/۱	۶۹/۹	--
افزایش درآمد خالص معادل بر واحد زمین ($IIUL$)	(%)	--	۳۰/۶	۵۰/۰	--

در شرایط محدودیت آب و زمین، عمق بهینه آب آبیاری می‌تواند W_w یا W_{ew} باشد. انتخاب W_w یا W_{ew} به این بستگی دارد که چقدر محدودیت ما بحرانی است. انتخاب زارعان و باغداران عموماً براساس بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین است که منجر به انتخاب W_w می‌شود.

براساس این نتایج، استفاده از W_w منجر به ذخیره ۲۶ درصد آب آبیاری می‌شود و درآمد خالص بر واحد زمین را ۴ درصد کاهش می‌دهد؛ علاوه بر این، استفاده از W_{ew} باعث ۴۶ درصد ذخیره آب آبیاری می‌شود و درآمد خالص بر واحد زمین را نیز ۱۷ درصد کاهش می‌دهد؛ بنابراین،

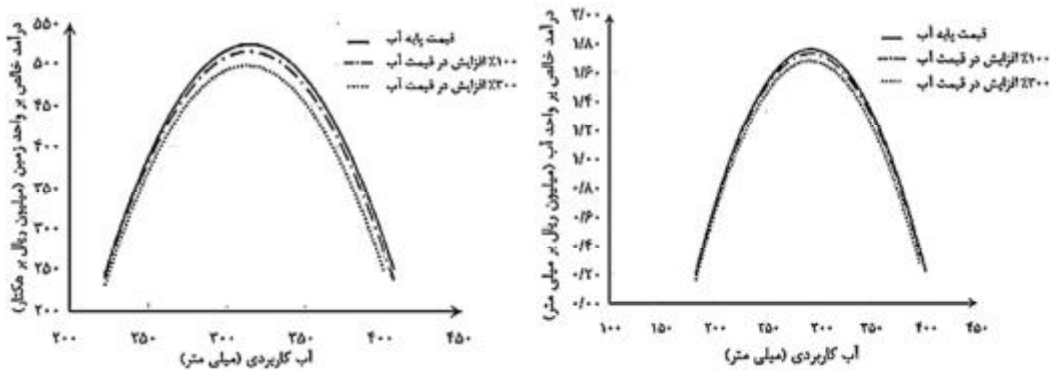


شکل ۳- تغییر اعماق بهینه آب نسبت به درصد افزایش قیمت آب آبیاری

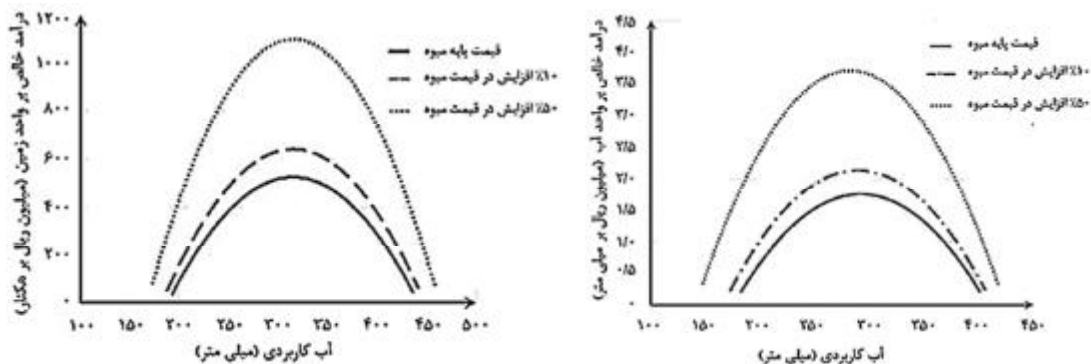
از طرفی دیگر، تغییرات در درآمد خالص نسبت به آب کاربردی در حالت افزایش ۱۰ و ۵۰ درصدی قیمت میوه نسبت به قیمت پایه میوه در شکل ۵ ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که ۵۰ درصد افزایش قیمت میوه، بیش از ۱۰۰ درصد افزایش در درآمد خالص ایجاد می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد نقش مهم‌تری را نسبت به آب در درآمد خالص بازی می‌کند. مقایسه قیمت آب و فاضلاب در ایران با کشورهای دیگر (شکل ۶) نشان می‌دهد که قیمت آب در ایران خیلی کمتر از کشورهای دیگر است. در کشورهای توسعه یافته، قیمت بالاتر آب، کشاورزان را ترغیب می‌کند تا از روش‌های پیشرفته‌تر آبیاری استفاده کنند؛ بنابراین به نظر می‌رسد قیمت آب در ایران با توجه به مقدار مصرف باید اصلاح شود.

استفاده از W_w تأثیرات سودمندتری در این شرایط دارد و بیشترین درآمد خالص بر واحد آب آبیاری را ایجاد می‌کند؛ اما اگر یک مشکل جدی در تأمین آب وجود داشته باشد یا میزان آب در دسترس به شدت محدود باشد، استفاده از W_{ew} مناسب‌تر است. شایان ذکر است که اگرچه برای به دست آوردن حداکثر محصول، ۴۶ درصد آب آبیاری بیشتری با استفاده از W_m مصرف می‌شود، اما درآمد خالص بر واحد زمین تا ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل تفاوت زیاد قیمت واحد میوه در مقایسه با قیمت واحد آب است. از یک طرف، بسیاری از اراضی با استفاده از چاه‌های غیرقانونی آبیاری می‌شوند و کشاورزان هزینه آب را پرداخت نمی‌کنند و از طرفی دیگر قیمت آب آبیاری در ایران، یارانه‌ای و براساس قیمت‌گذاری دولتی و بسیار پایین است. تغییرات در اعماق بهینه آب نسبت به درصد افزایش قیمت آب آبیاری (شکل ۳) نشان می‌دهد که با افزایش حتی تا ۵۰۰ درصد در قیمت آب آبیاری، اعماق بهینه آب تغییر معنی‌داری ندارند.

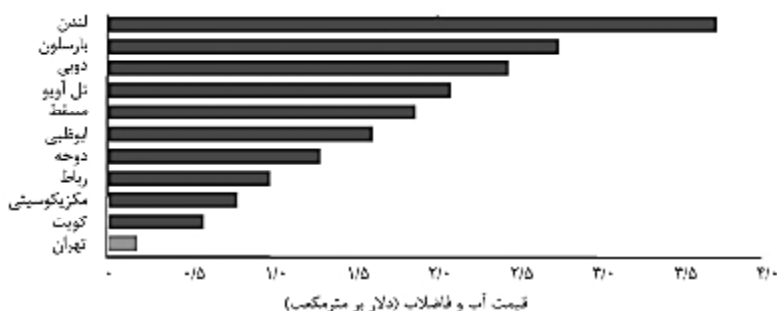
علاوه بر این، تغییرات در درآمد خالص نسبت به آب کاربردی در حالت افزایش ۱۰۰ و ۳۰۰ درصدی قیمت آب نسبت به قیمت پایه آب در شکل ۴ ترسیم شده است. مطابق با این شکل، اگرچه با افزایش قیمت آب آبیاری، آب مورد استفاده برای به دست آوردن حداکثر محصول (W_m) کاهش می‌یابد، اما این کاهش قابل توجه نیست. به عبارتی دیگر، درآمد خالص به قیمت آب آبیاری حساس نیست و با افزایش قیمت آب آبیاری حتی تا ۳۰۰ درصد، تغییر معنی‌داری در درآمد خالص ایجاد نمی‌شود.



شکل ۴- رابطه بین درآمد خالص و آب کاربردی در قیمت‌های مختلف آب



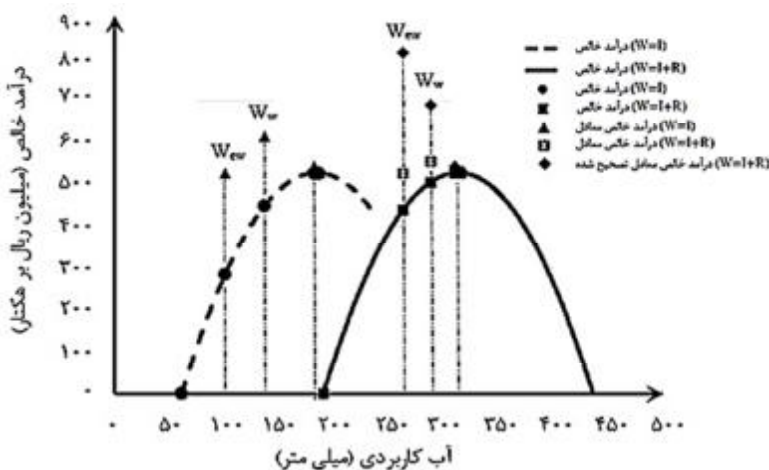
شکل ۵- رابطه بین درآمد خالص و آب کاربردی در قیمت‌های مختلف میوه



شکل ۶- قیمت آب و فاضلاب در ایران در مقایسه با کشورهای دیگر (گروه بانک جهانی، ۲۰۱۷)

شده است، وقتی که مجموع آب آبیاری و بارش برای تعیین سطح آبیاری شده معادل (IA) مدنظر قرار می‌گیرد، W_w نتایج سودمندتری می‌دهد؛ اما همان‌طور که بیان شد، فقط باید آب آبیاری مدنظر قرار گیرد و در این حالت وقتی W_{ew} استفاده می‌شود، سطح بیشتری زمین می‌تواند به وسیله آب ذخیره‌شده آبیاری شود که موجب بیشترین درآمد خالص در واحد زمین می‌شود.

وقتی که آب محدود است ولی محدودیت زمین نداریم، بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین از عمق آب آبیاری W_{ew} به دست می‌آید (۴۶ درصد کم آبیاری). در حالی که در مطالعات گذشته بیان شده بود که از عمق آب آبیاری W_w به دست می‌آید (اکسیوزیتو و بریل، ۲۰۱۶؛ مقیمی و همکاران، ۲۰۲۲؛ شعبانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ عبادی و همکاران، ۱۳۹۴). همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده



شکل ۷- درآمد خالص و درآمد خالص معادل در شرایط محدودیت آب

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در شرایطی که آب محدود نیست، استفاده از عمق بهینه آبیاری کامل (W_m) بیشترین میزان درآمد خالص بر واحد زمین را ایجاد می‌کند. در شرایط محدودیت آب و زمین، اگر محدودیت آب کم است، استفاده از عمق آب آبیاری به میزان عمق بهینه کم آبیاری (W_w) می‌تواند منجر به کاهش ۲۶ درصدی مصرف آب آبیاری شود که ۴ درصد کاهش در درآمد خالص بر واحد زمین ایجاد می‌کند؛ اما ۱۶ درصد افزایش در درآمد خالص بر واحد آب آبیاری ایجاد می‌کند. در حالی که اگر محدودیت آب شدید باشد، استفاده از عمق آب آبیاری به میزان عمق بهینه کم آبیاری معادل (W_{ew}) مفیدتر است که اگرچه ۱۷ درصد کاهش درآمد خالص بر واحد زمین ایجاد می‌کند، اما موجب ۴۶ درصد کاهش مصرف آب آبیاری می‌شود. همچنین وقتی بارش اتفاق می‌افتد، مجموع آب آبیاری و بارش باید به‌عنوان آب کاربردی مدنظر قرار گیرد و از آن برای تعیین توابع تولید و هزینه استفاده شود؛ اما برای ارزیابی تأثیر کم آبیاری، فقط آب آبیاری برای تعیین سطح آبیاری شده معادل مدنظر قرار گیرد؛ بنابراین، در شرایط محدودیت آب و بدون محدودیت زمین، استفاده از W_{ew} منجر به بیشترین درآمد خالص بر واحد زمین می‌شود. زیرا با استفاده از W_{ew} ، سطح بیشتری را می‌توان آبیاری کرد؛ علاوه بر این، بیشترین بهره‌وری آب از عمق بهینه در شرایط محدودیت آب (W_w و W_{ew}) به دست می‌آید. از طرفی دیگر، مطابق با قیمت‌های فعلی آب و میوه، درآمد خالص و اعماق بهینه آب کاربردی نسبت به قیمت آب آبیاری حساس نیستند؛ اما به شدت به قیمت میوه حساس‌اند. این موضوع به دلیل تفاوت زیاد قیمت واحد میوه نسبت به قیمت واحد آب است که باعث می‌شود محصول دهی نقش مهم‌تری را نسبت به آب در درآمد خالص ایجاد کند. روی هم رفته، استفاده از اعماق بهینه کم آبیاری در شرایط محدودیت منابع آب می‌تواند راه‌حل مناسبی برای غلبه بر مشکلات کم‌آبی در ایران باشد. همچنین برگشت سرمایه یک موضوع کلیدی به همراه تحلیل فنی است که کارشناسان باید آن را به منظور ارائه یک برنامه آبیاری قابل قبول به کشاورزان مورد توجه قرار دهند.

منابع

- احمدی ک.، عبادزاده ح.ر.، حاتمی ف.، حسین پور ر. و عبدشاه ه. ۱۳۹۹. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۸، جلد سوم: محصولات باغبانی، انتشارات وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۱۵۶ ص.
- برنامه ملی سازگاری با کم‌آبی مصوب هیئت وزیران. ۱۴۰۰. تصویب‌نامه هیئت وزیران. اردیبهشت ۱۴۰۰.
- سامانه شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، ۱۴۰۱. <https://www.mzrw.ir/st/19>
- شمشیری غ.، شعبانی ع.، سپاسیان ع.، ر. عزیزان ا. و سپاسخواه ع. ر. ۱۳۹۸. بهینه‌سازی آب مصرفی چغندر قند در شرایط شوری آب آبیاری و وابستگی قیمت به کیفیت محصول، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶ (۱۳): ۱۷۶۲-۱۷۷۳.
- عبادی ه.، رائینی سرجاز م. و غلامی سفیدکوهی م. ع. ۱۳۹۴. تعیین عمق‌های آستانه‌ای آب آبیاری برای تولید مرکبات در مناطق مرطوب ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶ (۹): ۹۱۸-۹۲۶.
- علیزاده ح. ع. و عباسی ف. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی مصرف آب و کود در کودآبیاری ذرت دانه‌ای، نشریه پژوهش آب در کشاورزی (ب)، ۳۰ (۴): ۴۴۵-۴۵۵.
- ملکی ع. اثنی‌عشری ن. و عالی‌نژادیان ا. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی حجم آب مصرفی و تعیین ضریب حساسیت لوبیا چشم‌بلبلی با سطوح مختلف آبیاری. دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران. اصفهان.
- Capra A. Consoli S and Scicolone B. 2011. Economic Analysis of Citrus Orchards under Deficit Irrigation in South Italy. P 209-215, In: Fernandez, J. E. and Ferreira, M.I. (eds), Proceeding XXVIIIth IHC - International Symposium on horticultural use of water in a changing climate, Acta Horticulture. 922, ISHS, Lisbon, Portugal.
- English M. 1990. Deficit irrigation. I: Analytical framework. Journal of irrigation and drainage engineering, 116(3): 399-411.
- Expósito A. Berbel J. 2016. Microeconomics of deficit irrigation and subjective water response function for intensive olive groves. Water 8(6): 254.
- Khozaie M. and Sepaskhah A.R. 2018. Economic analysis of the optimal level of supplemental irrigation for rain-fed figs. Iran Agricultural Research. 37(2): 17-26.

12. Moghimi M. M. Shamshiri G. Shabani A. Kamgar-Haghighi A. A. Fateh M. and Mahmoudi M. R. 2022. Determining optimum applied water and seeding rates for winter wheat by using AquaCrop and mathematicaleconomic analysis. *Irrig Drain*. 71(2): 349–364
13. Pérez-Pérez J.G. García J. Robles J.M. and Botía P. 2010. Economic analysis of navel orange cv. 'Lane late' grown on two different drought-tolerant rootstocks under deficit irrigation in South-eastern Spain. *Agricultural Water Management*. 97(1): 157-164.
14. Robles J. M. Botía P. and Pérez-Pérez J. G. 2017. Sour orange rootstock increases water productivity in deficit irrigated 'Verna'lemon trees compared with Citrus macrophylla. *Agricultural Water Management*. 186: 98–107.
15. Sepaskhah A. R. and Akbari D. 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. *Biosystems Engineering*. 92(1): 97-106.
16. Shabani A. Sepaskhah A.R. 2019. Optimal amounts of water and nitrogen applied to sugar beet when crop price depends on its sugar content. *Span J Agric Res*. 17(3): e1202
17. Shabani A. Sepaskhah A.R. and Khorramian M. 2018. Mathematical-economic analysis to determine optimal applied water in case of crop price depends on its quality. *International Journal of Plant Production*. 12: 191-202.
18. USDA. 1967. Irrigation water requirements. Tech. Release. No.21. United States Department of Agriculture, Soil management. 59: 67-75.
19. World Bank Group, The Iran Economic Monitor, Global Practice for Macroeconomics and Fiscal Management, 2017.
20. Wu W. Liu M. Wu X. Wang Z. Yang H. 2022. Effects of deficit irrigation on nitrogen uptake and soil mineral nitrogen in alfalfa grasslands of the inland arid area of China. *Agric Water Manag*. 269:107724.
21. Yasin H.I. and Ghazal E.M. 2020. Water management under deficit irrigation. *Al-Rafidain Engineering Journal*. 25(1): 32-40.