

مقایسه توابع عملکرد محصولات و تخصیص آب آبیاری بر اساس روش‌های جدید و قدیم FAO در شبکه آبیاری زاینده‌رود

مجید دلاور، سعید مرید* و مهنوش مقدسی**

* نگارنده مسئول، نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، پیام‌نگار: morid_sa@modares.ac.ir
** به‌ترتیب دانشجوی دکتری منابع آب دانشگاه تربیت مدرس؛ استاد گروه منابع آب دانشگاه تربیت مدرس و استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۸

چکیده

با توجه به کاهش منابع آبی، تخصیص بهینه آب در بخش کشاورزی بیش از پیش ضرورت پیدا می‌کند. بدین منظور، برنامه‌ریزی بهینه آبیاری و تولید توابع عملکرد با توجه به منابع آب در دسترس و مراحل رشد، رویکردی است مؤثر در بهره‌وری بهتر از آب. این رویکرد با هدف حداکثر کردن تولید محصول با استفاده از روابط ارائه شده در سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) در سال ۱۹۷۹ به کرات مورد توجه بوده است. اما همین سازمان از سال ۲۰۰۳ تغییراتی در این روابط داد که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مقایسه این دو روش در تولید توابع عملکرد و نحوه تخصیص آب، هدف این مقاله قرار داده شده است که روی چهار محصول گندم، جو، چغندر قند، و سیب‌زمینی در شبکه‌های آبیاری زاینده رود به انجام رسید. بدین منظور دو مدل بهینه‌سازی برای تهیه برنامه آبیاری محصولات فوق در طول دوره رشد و با دور زمانی ۱۰ روزه با هدف حداکثر کردن عملکرد بر اساس شرایط اقلیمی مربوط به خشکسالی سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ توسعه یافت. نتایج نشان می‌دهد که رابطه جدید FAO عملکرد کمتری را برای محصولات در شرایط تنش آبی ارائه می‌دهد. اما از طرفی توزیع آب آبیاری طی دوره رشد یکنواخت‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی

بهینه‌سازی تخصیص آب، تنش آبی، روابط FAO، زاینده‌رود، عملکرد محصولات

مقدمه

روابطی (که از این پس FAO-1979 اطلاق می‌شود) ارائه شد که اساس آن نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل و ضریب حساسیت گیاهی به تنش آبی است (Doorenbos & Kassam, 1979). این روابط تاکنون مبنای مطالعات بسیار زیادی با هدف مورد اشاره در بالا بوده‌اند که به تعدادی از آنها اشاره خواهد شد. دینار و همکاران (Dinar et al., 1982) از این روابط برای بهینه‌سازی تخصیص آب و الگوی کشت در سطح یک شبکه استفاده کردند. در تحقیقی دیگر پائودیال و داسگوپتا

با توجه به کاهش منابع آب، تغییرات اقلیمی، و افزایش تقاضای بخش صنعت و شهری، تخصیص بهینه آب کشاورزی بخصوص در شرایط کم‌آبی بسیار با اهمیت است. از آنجا که در این تخصیص، حداکثرسازی درآمد، هدف عمده مدل‌سازی‌هاست، شبیه‌سازی دقیق عملکرد محصولات زراعی کاملاً تعیین‌کننده خواهد بود. در نشریه شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات،

آبیاری گیاهان زراعی، الگوریتم ژنتیک را با برنامه‌ریزی خطی (LP) مقایسه کردند. تابع هدف حداکثر کردن عملکرد نسبی گیاهان در کل بود. در مدل این محققان جریان ورودی به مخزن، بارندگی روی سطح آبیاری شده، رقابت درون فصلی برای آب در میان گیاهان مختلف زراعی، میزان رطوبت موجود در خاک برای هر سطح کشت شده، ناهمگونی خاک‌ها، و ضریب حساسیت گیاه به کار گرفته شده است. موارد مشابه دیگری نیز در توزیع بهینه آب آبیاری قابل ذکر هستند (Sepaskhah & Parand, 2006; Sepaskhah & Akbari, 2005). مقدسی و همکاران (Moghaddasi *et al.*, 2010) نیز مطالعه‌ای به منظور تخصیص بهینه منابع آب کشاورزی از سطح سد، تا دوره رشد گیاه انجام دادند. در این مطالعه، تخصیص آب کشاورزی با استفاده از چهار مدل برای مقاصد زیر مدل‌سازی شد: بهینه‌سازی توزیع آب در طول فصل رشد گیاهان، بهینه‌سازی تخصیص آب بین محصولات شبکه‌ها، بهینه‌سازی توزیع آب بین شبکه‌های مختلف، و بهینه‌سازی سالانه سهم آب کشاورزی از سد زاینده‌رود. توابع هدف این مطالعه همگی به منظور تولید و درآمد حداکثر، و مانند سایر تحقیقات، بر مبنای رابطه FAO-1979 تعریف شدند.

اما پس از سال‌ها استفاده از روابط FAO-1979، در سال ۲۰۰۳ فائو مطالعاتی جدید به منظور بازنگری رابطه عملکرد گیاه شروع کرد و در سال ۲۰۰۷، استدیتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2007) رابطه جدیدی ارائه دادند. این روابط با تاکید بر تنش آبی ارائه شد که از آنها به منظور توسعه مدل جدید FAO تحت عنوان Aquacrop نیز استفاده می‌شود (Steduto *et al.*, 2009).

سابقه‌ای از به‌کارگیری روابط جدید FAO (که من بعد FAO-2009 اطلاق می‌شود)، در یک مدل بهینه‌سازی، حداقل بر اساس بررسی سوابق تحقیقی که

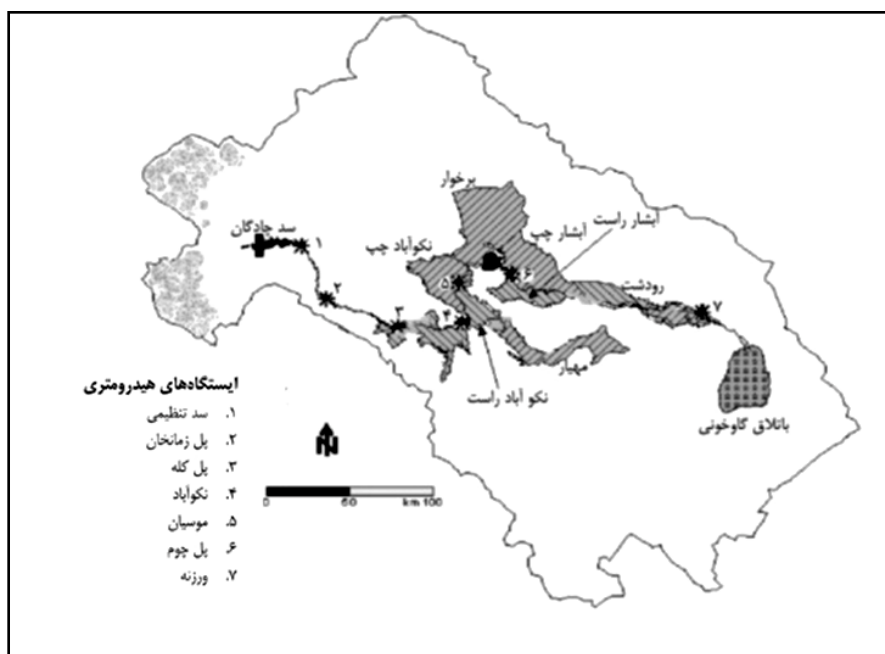
(Paudyal & Dasgupta, 1990) با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی^۱ (NLP) و با هدف حداکثرسازی درآمد، مدلی برای آبیاری بهینه تهیه کردند. آنان الگوی کشت، ظرفیت‌های طراحی تاسیسات آبیاری، و سیاست تخصیص منابع را به صورت بهینه تعیین کردند. در ادامه نیز پتانسیل آب‌های سطحی و زیرزمینی را جداگانه، مدنظر قرار دادند و بر اساس آن، میزان آب مورد نیاز در ماه‌های مختلف سال و همچنین مساحت زیرکشت هر محصول را در حالت بهینه برآورد کردند. در خصوص ارائه الگوی کشت بهینه در شرایط بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه رودخانه Tinao واقع در کشور نپال، رانا (Rana, 1993) بررسی‌هایی کرده است. مدل مورد استفاده این تحقیق در بهینه‌سازی از نوع خطی^۲ (LP) است و آب مازاد بر مصرف، سفره‌های آب زیرزمینی را تغذیه می‌کند. تابع هدف مورد نظر در این تحقیق نیز حداکثرسازی درآمد ناشی از رعایت الگوی بهینه است. برای بهینه‌سازی در مقیاس فصلی و بر اساس تابع عملکرد در ازای آب آبیاری، رانو و همکاران (Rao *et al.*, 1996) مدلی ارائه دادند که هدف آن حداکثر کردن درآمد ناشی از مصرف هر واحد آب است. مدل آنها توانایی تحلیل پیامدهای حاصل از تأثیر تغییرات ذخایر آبی، شرایط اقلیمی، توزیع آب و شرایط اقتصادی بر تولید محصول را دارد. در تحقیقی دیگر شانگوان و همکاران (Shangguan *et al.*, 2002) برای مدیریت شرایط کم‌آبی در بخش کشاورزی منطقه Yangling چین بر پایه روش کم‌آبیاری، مدلی ریاضی با سه لایه اصلی تهیه کردند که در آن نخستین لایه مربوط به توزیع بهینه آب در مراحل مختلف رشد گیاه، دومین لایه برای توزیع بهینه آب بین محصولات مختلف زراعی و سومین لایه برای توزیع بهینه آب بین نواحی مختلف منطقه در نظر گرفته شده است. کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 2006) جهت بهینه کردن عملکرد مخزن سد تک منظوره واقع در هند برای

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

رودخانه زاینده‌رود با مساحت حوزه آبریز ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع و طول ۳۵۰ کیلومتر از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و به باتلاق گاوخونی ختم می‌شود. روی این رودخانه سد مخزنی چادگان با حجم کل ۱۴۶۰ میلیون مترمکعب احداث شده است، شکل ۱، نقشه شماتیک منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

برای این مقاله به عمل آمد، یافت نشد. لذا با توجه به تازگی این روابط و نیاز به ارزیابی آنها، این مقاله به این موضوع می‌پردازد و برای این ارزیابی از اطلاعات شبکه زاینده‌رود و گیاهان اصلی آن شامل گندم، جو، چغندر قند و سیب‌زمینی، استفاده شده است و از دو سری روابط توابع عملکرد و الگوی بهینه تخصیص آب در طول دوره رشد آنها محاسبه و نتایج مقایسه شده‌اند. همچنین تلاش خواهد شد تا روش FAO-2009 حتی‌الامکان مبسوط تشریح شود تا برای سایر تحقیقات نیز مفید باشد.



شکل ۱- نقشه شماتیک منطقه مطالعاتی.

همانطور که بیان شد در این تحقیق بهینه‌سازی تخصیص آب برای چهار محصول عمده منطقه شامل گندم، جو، چغندر قند و سیب‌زمینی بررسی شد. در جدول ۱، تقویم زراعی و عملکرد حداکثر محصولات بر اساس مراجع (Farshi et al., 1995 & Alizadeh, 2001) و اطلاعات محلی آورده شده است.

در پایین دست سد و در طول این رودخانه، شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها، و روستاها از آب آن بهره‌برداری می‌کنند. شبکه‌های مهم کشاورزی به ترتیب از بالا به پایین شامل مهیار، نکوآباد راست و چپ، برخوار، آبشار راست و چپ، رودشت و تعدادی شبکه‌های کوچک هستند.

جدول ۱- تقویم زراعی و عملکرد ماکزیمم (کیلوگرم در هکتار) محصولات زراعی در حوضه زاینده‌رود

عملکرد حداکثر (کیلوگرم در هکتار)	حداکثر نیاز آبی (میلی متر بر هکتار)	تپه‌زور	بازار	بازار	اردبیل	فروزین	اسفند	نهمین	کازرون	کاشان	گندم
۹۰۰۰	۸۵۰			*	*	*	*	*	*	*	گندم
۷۰۰۰	۷۵۰			*	*	*	*	*	*	*	جو
۷۰۰۰۰	۱۸۰۰	*	*	*	*	*	*	*	*	*	چغندر
۵۰۰۰۰	۱۲۳۰	*	*	*	*	*	*	*	*	*	سیب‌زمینی

محصول c (کیلوگرم در هکتار) است (Doorenbos & Kassam, 1979).

درک بیشتر از روابط آب- خاک طی دهه‌های اخیر و تقاضای شدید برای افزایش بهره‌وری آب با استفاده از کم‌آبیاری، سازمان خوارو بار و کشاورزی ملل متحد (FAO) را به بازسازی و ارزیابی روش FAO-1979 وادار کرد که منجر به توسعه روش FAO-2009 شد. مدل‌سازی عملکرد گیاه در روش اخیر به نحو مؤثری قادر است در مراحل مختلف رشد واکنش گیاه را به تنش‌های آبی، شرایط اقلیمی، و مدیریت مزرعه شبیه‌سازی کند. این روش، رابطه ۱ را با تفکیک تبخیر و تعرق واقعی محصول (ETa) به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق از گیاه (T_r) و همچنین تفکیک عملکرد واقعی محصول (Y_{ac}) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت (HI) مورد بازنگری قرار می‌دهد. جداسازی تبخیر و تعرق به E_s و T_r منجر به حذف بخشی از مصرف آب می‌شود که برای تولید عملکرد محصول به کار نرفته است. این موضوع به ویژه در زمانی با اهمیت است که پوشش گیاهی تمام سطح مزرعه را در بر نمی‌گیرد. تفکیک عملکرد واقعی محصول به B و HI نیز شبیه‌سازی بهتر تأثیر تنش‌های آبی بر عملکرد محصول و همچنین امکان بررسی تمایز تنش‌های وارده به ماده خشک تولیدی و عملکرد محصول را فراهم می‌کند. بر این اساس، عملکرد محصول مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

آمار و اطلاعات هواشناسی مورد نیاز شامل دما (حداقل، حداکثر، و میانگین)، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، و سرعت باد از ایستگاه سینوپتیک اصفهان (دوره آماری: ۱۹۹۱-۱۹۵۳) تهیه شد.

شرح و مقایسه روش‌های FAO در مدل‌سازی عملکرد گیاه

واکنش عملکرد نسبی گیاه به آب بر اساس روابط FAO-1979 به صورت تابعی از نسبت تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق حداکثر و با اعمال ضریب حساسیت عملکرد گیاه نسبت به تنش آبی برای هر گیاه در هر مرحله رشد مطابق با رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\frac{Y_{ac}}{Y_{max\ c}} = 1 - \sum_{g=1}^n Ky_g \left(1 - \frac{ETa_{c,g}}{ET\ max_{c,g}}\right) \quad (1)$$

که در آن،

$ETa_{c,g}$ = تبخیر و تعرق واقعی محصول c در مرحله رشد g (میلی متر بر ۱۰ روز)، $ET_{max\ c,g}$ = حداکثر تبخیر و تعرق محصول c در هر مرحله رشد (میلی متر بر ۱۰ روز)؛ Ky_g = ضریب حساسیت عملکرد نسبت به تنش آبی برای هر گیاه در هر مرحله رشد؛ n = تعداد مراحل رشد؛ Y_{ac} = عملکرد واقعی محصول c؛ و $Y_{max\ c}$ = حداکثر عملکرد

مقایسه توابع عملکرد محصولات و تخصیص آب...

WP = شاخص تولیدی آب (کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر آب)؛ Tr = تعرق (میلی‌متر)؛ و N = تعداد دوره‌های مد نظر در طول فصل رشد است.

بر این اساس، میزان عملکرد تولیدی گیاه با توجه به روابط ۲ و ۳ به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$Y = B.HI = WP \cdot \sum_{n=1}^N Tr.HI \quad (4)$$

در شکل ۲، نحوه اصلاح رابطه FAO-1979 و ارتباط اجزای مختلف رابطه ۴ با رابطه ۱ نمایش داده شده است.

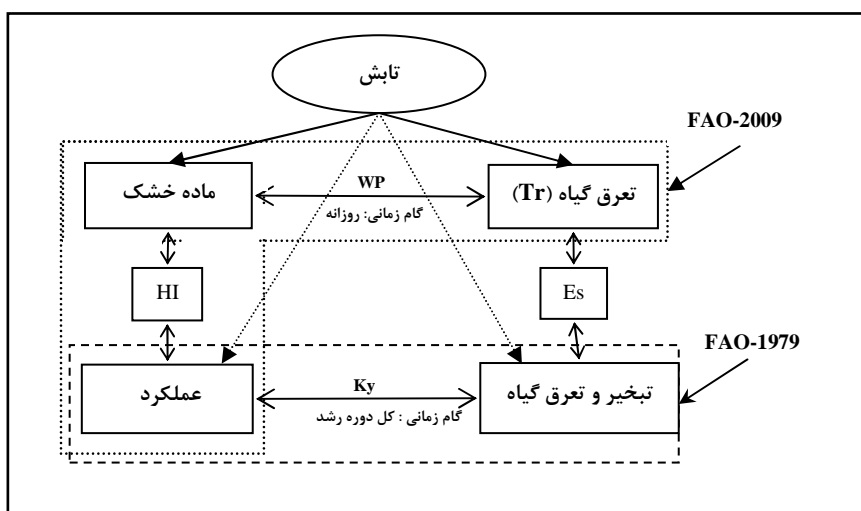
$$Y = B.HI \quad (2)$$

که در آن،

Y = عملکرد واقعی محصول (کیلوگرم بر هکتار)؛ B = مقدار ماده خشک تولیدی (کیلوگرم بر هکتار)؛ و HI = شاخص برداشت بر حسب درصد و بیانگر تغییرات نسبت عملکرد محصول به ماده خشک تولیدی در مرحله شکل‌گیری عملکرد است. ماده خشک تولیدی در رابطه ۲ در هر مرحله از رشد با استفاده از رابطه ۳ برآورد می‌شود:

$$B = WP \cdot \sum_{n=1}^N Tr \quad (3)$$

که در آن،



شکل ۲- چگونگی اصلاح رابطه FAO-1979 و ارتباط اجزای مختلف آن با رابطه FAO-2009

بیشتری را در شبیه‌سازی عملکرد محصول دخالت می‌دهد که به ویژه در دوره‌های تنش آبی بسیار مؤثرند. همچنین، روش FAO-2009 قادر است علاوه بر برآورد میزان عملکرد محصول، میزان ماده خشک تولیدی را نیز در هر مرحله از رشد و بر اساس گام زمانی روزانه برآورد کند که در مقایسه با روش قبلی (FAO-1979) که تنها قادر به برآورد نسبت عملکرد محصول به حداکثر آن در انتهای دوره رشد است، در قابلیت‌های بیشتری دارد (Steduto et al., 2007).

همانطور که مشاهده می‌شود، در روش FAO-2009، (رابطه ۴)، عملکرد محصول بر اساس میزان تعرق گیاه و شاخص‌های تولیدی آب (WP) و برداشت محصول (HI) محاسبه و بر مبنای میزان تنش آبی و مدیریت مزرعه در دوره‌های مختلف رشد اصلاح می‌شود. لذا این روش در مقایسه با روش قبلی (FAO-1979) که عملکرد تنها بر اساس میزان تبخیر و تعرق گیاه و ضریب حساسیت آن (Ky) در مراحل چهارگانه رشد محاسبه می‌شود- عوامل

جدول ۲، تفاوت‌ها و قابلیت‌های روش‌های قدیم و جدید روش جدید در بخش‌های بعدی ارائه فائو بیان شده است. همچنین نحوه محاسبه اجزای خواهد شد.

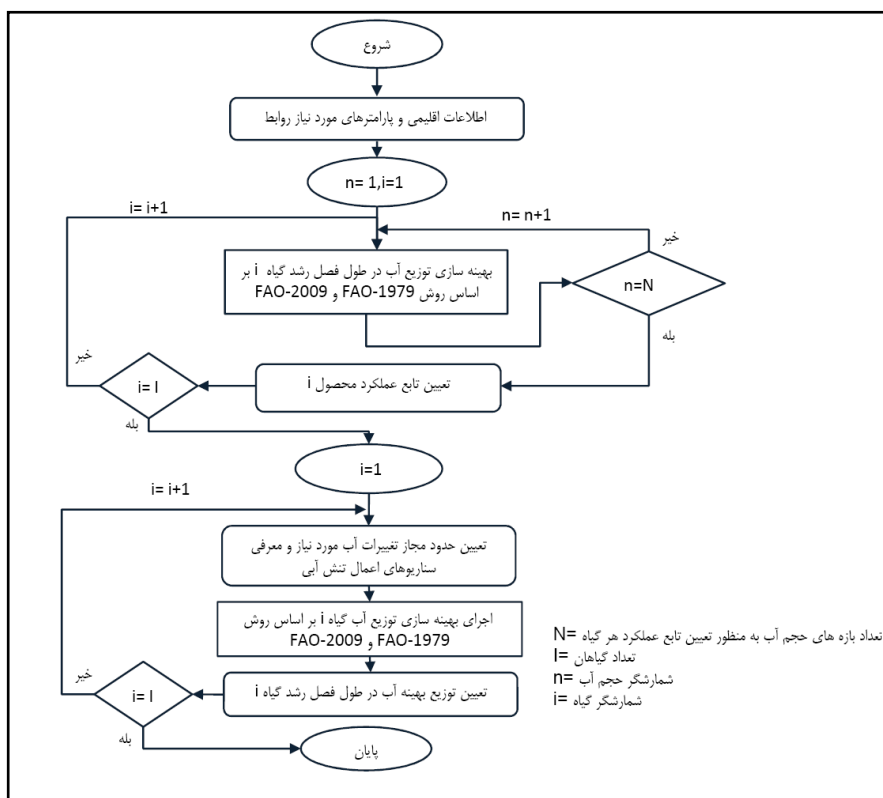
جدول ۲- تفاوت‌ها و قابلیت‌های روش‌های قدیم و جدید فائو

قابلیت	روش قدیم FAO	روش جدید FAO
برآورد عملکرد محصول	عملکرد نسبی محصول، در انتهای فصل رشد برآورد می‌شود.	در هر دوره زمانی روزانه از مرحله شکل‌گیری عملکرد، عملکرد واقعی محصول قابل برآورد است.
بررسی نقش تنش‌های آبی در هر مرحله از رشد بر میزان عملکرد	با استفاده از ضرایب حساسیت گیاهی در هر مرحله از رشد بررسی می‌شود.	با استفاده از پارامترهای شاخص تولیدی آب در هر مرحله از رشد و شاخص برداشت در مرحله تولید عملکرد بررسی می‌شود.
به‌هنگام‌سازی پارامترها و ضرایب حساسیت گیاهی بر اساس میزان تنش‌های آبی وارده در مراحل قبلی رشد	پارامترها و ضرایب حساسیت گیاهی به‌هنگام‌سازی نمی‌شود	در هر مرحله از رشد بر اساس میزان تنش‌های آبی وارده در مراحل قبلی رشد اصلاح می‌شود.
برآورد میزان ماده خشک تولیدی	برآورد نمی‌شود	در هر دوره زمانی روزانه قابل محاسبه است
بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت مزرعه (کوددهی، سمپاشی و...) بر عملکرد محصول	امکان‌پذیر نیست	امکان‌پذیر است

مدل‌سازی تخصیص بهینه آب

با توجه به اهداف این تحقیق، مدل‌سازی تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از روش‌های FAO-1979 و FAO-2009 و در قالب یک مسئله بهینه‌سازی انجام می‌شود. مسئله در محیط نرم‌افزاری Lingo بهینه‌سازی می‌شود و در آن مدل توسعه‌یافته، آب تحویلی را بر اساس راندمان موردنظر (در اینجا ۵۰ درصد) به طور بهینه و بر اساس دور آبیاری ۱۰ روزه طی دوره رشد به نحوی توزیع می‌کند که حداکثر عملکرد بدست آید. بدین منظور ابتدا مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته بر اساس دو

روش یاد شده، برای هر محصول به ازای حجم‌های مختلف اجرا و سپس با استفاده از عملکرد متناظر آنها، تابع عملکرد هر محصول محاسبه شده و سپس با توجه به تابع عملکرد، حدود مجاز تغییرات آب مورد نیاز هر محصول تعیین و با اعمال سناریوهای مختلف تنش آبی میزان بهینه توزیع آب در دوره رشد هر گیاه محاسبه خواهد شد. الگوریتم محاسبات در شکل ۳ نشان داده شده است و در ادامه نیز به شرح توابع هدف و قیود هر یک از مدل‌های بهینه‌سازی پرداخته می‌شود.



شکل ۳- الگوریتم مدل تخصیص بهینه آب در فصل رشد گیاه.

$Root$ = طول ریشه (میلی متر)، r = عمق کاشت (گندم و جو ۷، چغندر قند ۵، و سیب زمینی ۱۵ سانتیمتر)، t = دوره زمانی ۱۰ روزه (برابر با دور آبیاری)، و T = طول دوره زمانی رشد است. - تبخیر و تعرق واقعی همواره کوچکتر یا مساوی تبخیر و تعرق پتانسیل گیاهی است.

$$ETa_{c,t} \leq ET \max_{c,t} \quad (7)$$

- هر مرحله رشد، نسبت به تنش آبی حساسیتی دارد که با ضریبی به نام Ky نشان داده می شود (رابطه ۱). در واقع این ضریب نشان دهنده میزان حساسیت عملکرد گیاه نسبت به تنش آبی است. این ضرایب برای هر مرحله رشد موجود بوده است. ولی برای دوره های آبیاری واقع در مراحل رشد وجود ندارد. لذا با در نظر گرفتن اینکه

بهینه سازی توزیع آب در فصل رشد گیاهان بر اساس روش FAO-1979

در این مدل تابع هدف، حداکثر کردن نسبت عملکرد واقعی به عملکرد حداکثر محصول در هر هکتار بر اساس رابطه (۱) است:

$$MAX : \frac{Y_{ac}}{Y_{\max c}} = 1 - \sum_{g=1}^n Ky_g \left(1 - \frac{ETa_{c,g}}{ET \max_{c,g}}\right) \quad (5)$$

قیود و نکات مورد نظر در مدل سازی این بخش، شامل موارد زیر است:

- در فصل رشد، طول ریشه در هر دوره زمانی از رابطه ۶ به دست می آید (Borg & Grimes, 1986):

$$Root_{c,t} = 10.(r + Root_{\max} (0.5 + 0.5 \sin(3.03t/T - 1.47))) \quad (6)$$

که در آن،

- با در نظر گرفتن معادله بیلان آب در خاک، تبخیر و تعرق واقعی کوچکتر از نسبتی از مقدار پتانسیل آن است (Hornbuckle et al., 2000):

$$ET_{c,t} \leq \frac{ET \max_{c,t}}{(1 - P_c)(FC_c - PWP_c)} \left[SM_{c,t} - PWP + \left(\frac{IR_{c,t} - DP_{c,t}}{Root_{c,t}} \right) \right] \quad (8)$$

دائم (سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب)، و FC = ظرفیت مزرعه (سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب) است. - معادله بیلان آب در خاک و منطقه ریشه مطابق زیر تعریف شده است:

$$SM_{c,t+1} Root_{c,t+1} = SM_{c,t} Root_{c,t} + IR_{c,t} - ET_{c,t} - DP_{c,t} + SM'(Root_{c,t+1} - Root_{c,t}) \quad (10)$$

- مجموع آب آبیاری در دوره‌های درون فصلی (دوره‌های آبیاری) باید با آب در نظر گرفته شده برای کل فصل رشد $(TAW)^2$ مساوی یا از آن کمتر باشد:

$$\sum_t IR_{c,t} \leq TAW_c \quad (13)$$

- مقدار حداکثر تبخیر و تعرق گیاه (ET_{max}) در گیاهان مختلف از رابطه زیر برآورد شد:

$$ET \max_{c,t} = Kc_{c,t} \cdot ET_0 \quad (14)$$

که در آن، ET_0 = تبخیر و تعرق بالقوه گیاه مرجع، $Kc_{c,t}$ = ضریب گیاهی، و t = دوره زمانی است که در اینجا ده روزه در نظر گرفته شده است. برای برآورد، تبخیر و تعرق گیاه مرجع

دوره‌های اولیه هر مرحله از رشد نسبت به تنش آبی حساس تر هستند، این قید به صورت زیر تعریف شده است (Ghahraman & Sepaskhah, 2004):

$$\frac{ET_{t+1}}{ET \max_{t+1}} \leq \frac{ET_t}{ET \max_t} \quad (8)$$

که در آن، IR = عمق آب آبیاری (میلی‌متر)، DP = تلفات آبی (میلی‌متر)، P = کمبود مجاز رطوبتی، SM = رطوبت موجود در خاک (سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب)، PWP = نقطه پژمردگی

این متغیرها شامل رطوبت اولیه و ثانویه، آبیاری، تبخیر و تعرق واقعی، تلفات آبی، و تغییرات رطوبت در دوره رشد ریشه (SM') است. SM نیز در دوره رشد بین نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی تغییر می‌کند:

$$PWP_c \leq SM_{c,t} \leq FC_c \quad (11)$$

- تلفات آبی با توجه به راندمان آبیاری محاسبه و در صورت اعمال آب مازاد (مانند وجود بارندگی بیش از نیاز آبی)، از این حد هم بیشتر می‌شود (Ghahraman & Sepaskhah, 2004):

$$DP_{c,t} \geq IR_{c,t} (1 - Eff_c) \quad (12)$$

در رابطه بالا، Eff_c^1 نیز راندمان آبیاری است.

به روش پنمن - مانتیث (Allen *et al.*, 1998) با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک اصفهان و ضریب گیاهی با توجه به دوره‌های زمانی در هر مرحله از رشد گیاه بر اساس استاندارد FAO-24 (Doorenbos & Pruitt, 1984) و تحقیق فرشی و همکاران (Farshi *et al.*, 1995)، محاسبه شد. علاوه بر این موارد، یک سری اطلاعات از قبیل مراحل رشد، تعیین مدت هر مرحله، و حداکثر طول ریشه برای هر گیاه مورد نیاز است، (Hornbuckle *et al.*; Ghahraman & Sepaskhah, 2002) *al.*, 2000

که با استفاده از اطلاعات محلی تأمین گردید (جدول ۳). ضریب حساسیت عملکرد نسبت به تنش آبی نیز در هر مرحله با استفاده از مراجع Ghahraman & Sepaskhah (2004) و Doorenbos & Pruitt (1984) و نظر کارشناسان منطقه برای هر گیاه به دست آمد (جدول ۳). شرح بیشتر این قیود و روابط در مراجع آمده است (Hornbuckle *et al.*; Ghahraman & Sepaskhah, 2002) *al.*, 2000

جدول ۳- مدت و ضریب حساسیت (Ky) دوره‌های مختلف رشد برای محصولات زراعی غالب در حوضه زاینده‌رود

نام محصول	رویش			گلدهی			شکل‌گیری عملکرد			رسیدن		
	طول ریشه (میلی‌متر)	Ky	تاریخ	طول ریشه (میلی‌متر)	Ky	تاریخ	طول ریشه (میلی‌متر)	Ky	تاریخ	طول ریشه (میلی‌متر)	Ky	تاریخ
گندم	۱۳۰	۰/۲	۴۰	۰/۶	۳۰	۰/۵	۲۰	۰/۱	۷۰	۰/۱	۲۰	۰/۱
جو	۱۲۰	۰/۲	۳۰	۰/۶	۳۰	۰/۵	۲۰	۰/۱	۷۰	۰/۱	۲۰	۰/۱
چغندر قند	۵۰	۲	-	-	-	۱۰۰	۰/۳۶	۵۰	۰/۱۲	۷۰	۰/۱۲	۵۰
سیب‌زمینی	۷۰	۰/۸	-	-	-	۶۰	۰/۷	۲۰	۰/۲	۴۰	۰/۲	۲۰

- میزان تعرق حداکثر گیاه همواره کوچکتر از میزان تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_p) است:

$$Trx_t = Kcb_t ET_p \leq ET_p \quad (16)$$

که در آن،

$Trx_t =$ حداکثر تعرق در هر دوره رشد گیاه؛ و $Kcb_t =$ ضریب حداکثر تعرق گیاه (مطابق با جدول ۴) است.

- تعرق واقعی گیاه (Tr_t) در هر دوره از رشد برابر با ضریبی از تعرق حداکثر است:

$$Tr_t = Ks_{sto,t} Trx_t \quad (17)$$

که در آن،

بهینه‌سازی توزیع آب در فصل رشد گیاهان بر اساس روش FAO-2009

مطابق آنچه در قبل اشاره شد تابع هدف این مدل، حداکثرسازی عملکرد محصول بر اساس روش جدید FAO (رابطه ۴) می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$MAX: Y = B.HI = WP. \sum_{n=1}^N Tr.HI \quad (15)$$

در مسئله بهینه‌سازی اخیر علاوه بر مد نظر قراردادن قیود مرتبط با بیلان آب در خاک، تبخیر و تعرق، طول ریشه و نشت عمقی (معادلات ۴ تا ۱۲)، محدودیت‌های زیر نیز به منظور بررسی تأثیر تنش آبی بر عملکرد محصول در نظر گرفته می‌شود:

که در آن،
 HI_{ini} = شاخص برداشت اولیه (معادل ۰/۰۱)؛
 $HIGC$ = ضریب رشد شاخص برداشت (یک بر روز)
 (جدول ۴)؛ و t = زمان بعد از شکل گیری عملکرد (روز)
 است.

اثر تنش‌های آبی بر گیاه در دوره‌های قبل از تولید عملکرد و در مرحله شکل گیری عملکرد با هم متفاوت است و بدین منظور شاخص برداشت محصول، (HI)، در هر مرحله با اعمال ضرایبی (با توجه به تنش‌های وارده) بازنگری می‌شود. ضرایب اعمال تنش‌های آبی در دوره‌های قبل از تولید عملکرد و در مرحله شکل گیری عملکرد به ترتیب f_{post} و f_{ante} هستند که مطابق با روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شوند:

- اثر تنش‌های آبی قبل از مرحله تولید عملکرد توسط شاخص f_{ante} و مطابق با رابطه زیر در اصلاح شاخص برداشت مدنظر قرار می‌گیرد:

$Ks_{sto,t}$ = ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی است و در فاصله تغییرات رطوبتی خاک بین ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم متناسب با تغییرات رطوبتی خاک و به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Ks_{sto,t} = 1 - \frac{SM_t}{FC - PWP} \quad (18)$$

که در آن،
 SM_t = رطوبت موجود در خاک؛ PWP = نقطه پژمردگی دائم؛ و FC = ظرفیت مزرعه است. $Ks_{sto,t}$ در حالت ظرفیت مزرعه، برابر با یک و در نقطه پژمردگی دائم، برابر با صفر است.

- شاخص برداشت محصول در طول دوره شکل گیری عملکرد (HI_t)، کوچکتر یا مساوی شاخص برداشت مرجع (HI_0) (مطابق با جدول ۴) است:

$$HI_t = \frac{HI_{ini} HI_0}{HI_{ini} + (HI_0 - HI_{ini}) \exp^{-HIGC t}} \leq HI_0 \quad (19)$$

$$f_{ante} = \begin{cases} 1 + \frac{1 + \sin((1.5 - Ratio_{low}) \pi)}{2} \frac{\Delta HI_{ante}}{100}, \forall B_{rlow} < B_{rel} \leq B_{rtop} \\ 1 + \frac{1 + \sin((0.5 - Ratio_{up}) \pi)}{2} \frac{\Delta HI_{ante}}{100}, \forall B_{rtop} < B_{rel} \leq B_{rup} \end{cases} \quad (20)$$

خشک؛ و B_{rtop} = حد نسبی ماده خشک در شرایطی است که حداکثر تأثیرگذاری در تولید عملکرد را دارد. مقادیر B_{rlow} و B_{rup} با توجه به مرجع (Raes et al., 2010b) به ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۱ و B_{rtop} برابر با ۰/۸۴ ماده خشک نسبی تولیدی در شروع مرحله گلدهی در نظر گرفته می‌شود.
 - اثر تنش آبی در اصلاح شاخص برداشت و در مرحله

که در آن،
 ΔHI_{ante} = درصد مجاز افزایش شاخص برداشت در شرایط تنش آبی قبل از مرحله گلدهی؛ $Ratio_{low}$ = تغییرات نسبی حداقل ماده خشک تولیدی؛ $Ratio_{up}$ = تغییرات نسبی حداکثر ماده خشک تولیدی؛ B_{rel} = ماده خشک نسبی تولیدی در شروع مرحله گلدهی؛ B_{rlow} = حد نسبی پایین تولید ماده خشک؛ و B_{rup} = حد نسبی بالای تولید ماده

مقایسه توابع عملکرد محصولات و تخصیص آب...

و از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود؛ $a =$ ضریب حساسیت گیاه در مرحله‌ای که هنوز رشد سبزینه‌ای وجود دارد (۰/۰۵) الی (۴۰)؛ $b =$ ضریب حساسیت گیاه در دوره عملکرد (۱) الی (۲۰) و $n(\text{exp})$ طول دوره رشد سبزینه‌ای در مرحله شکل‌گیری عملکرد؛ و $n(\text{yield}) =$ طول دوره شکل‌گیری عملکرد است.

- شاخص برداشت محصول بر اساس ضرایب f_{post} و f_{ante} به صورت زیر تصحیح می‌شود:

$$HI_{\text{adj},t} = f_{\text{post}} f_{\text{ante}} HI_t \quad (24)$$

شرح بیشتر این قیود و روابط در مرجع رائز و همکاران (Raes et al., 2010a) قابل دسترس است. در این تحقیق، ضرایب شاخص تولیدی آب (WP)، ضریب حداکثر تعرق گیاه هر مرحله از رشد (Kcb_t)، شاخص برداشت مرجع (HI_0)، ضریب رشد شاخص برداشت (HIGC)، و درصد مجاز افزایش شاخص برداشت (HI_{ante}) بر اساس مقادیر توصیه شده در مرجع رائز و همکاران (Raes et al., 2010b) برای هر گیاه مطابق با جدول ۴ استخراج شد. کالیبراسیون مدل نیز با توجه اطلاعات در دسترس از میزان عملکرد حداکثر گیاهان در منطقه مطالعاتی انجام گرفت و مقادیر HI_0 (در رابطه ۱۹)، a (در رابطه ۲۲)، و b (در رابطه ۲۳) در بازه داده شده به گونه‌ای انتخاب شد که در شرایط بدون تنش آبی عملکرد محاسباتی حتی‌الامکان با عملکرد حداکثر برابر شود.

شکل‌گیری عملکرد نیز توسط شاخص f_{post} اعمال می‌شود:

$$f_{\text{post}} = \left(\frac{w_1 f_{\text{post}\uparrow} + (w_2 - w_1)}{w_2} \right) f_{\text{post}\downarrow} \quad (21)$$

که در آن،

$w_1 =$ طول دوره رشد سبزینه‌ای در مرحله شکل‌گیری عملکرد (day)؛ $w_2 =$ طول دوره شکل‌گیری عملکرد (روز) است که بر اساس جدول ۳ و مرجع (Raes et al., 2010b) تعیین شد. $f_{\text{post}\downarrow}$ و $f_{\text{post}\uparrow}$ نیز به ترتیب ضرایب اصلاح شاخص برداشت در طول دوره رشد سبزینه‌ای در مرحله شکل‌گیری عملکرد و کل دوره شکل‌گیری عملکرد است و مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{\text{post}\uparrow} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n(\text{exp})} \left(\frac{1 - K_{s,\text{exp},i}}{a} \right)}{n(\text{exp})} \quad (22)$$

$$f_{\text{post}\downarrow} = \frac{\sum_{i=1}^{n(\text{yield})} \left(\sqrt[10]{K_{s,\text{sto},i}} \left(1 - \frac{(1 - K_{s,\text{sto},i})}{b} \right) \right)}{n(\text{yield})} \quad (23)$$

که در آنها،

$K_{s,\text{exp},i} =$ ضریب تنش آبی در روز i دوره رشد سبزینه‌ای در مرحله شکل‌گیری عملکرد است و بر اساس میزان رطوبت موجود در خاک به صورت خطی بین صفر تا یک، به ترتیب برای شرایط بدون تنش آبی و تنش آبی شدید تغییر می‌کند؛ $K_{s,\text{sto},i} =$ ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی است

جدول ۴- شاخص تولیدی آب (WP)، ضریب حداکثر تعرق گیاه هر مرحله از رشد (Kcb_t)، شاخص برداشت مرجع (HI_0)، ضریب رشد شاخص برداشت (HIGC)، و درصد مجاز افزایش شاخص برداشت (ΔHI_{ante})

ΔHI_{ante} (درصد)	HIGC (یک بر روز)	HI_0	Kcb_t	WP (گرم بر مترمربع)	گیاه
ناچیز	۱۵	۴۵-۵۰	۱/۱	۱۵	گندم
ناچیز	۱۲	۴۰-۴۵	۱/۱	۱۴	جو
۰	۲۰	۶۵-۷۵	۱/۱	۱۷	چغندر قند
ناچیز	۵	۷۰-۸۵	۱/۱	۱۸-۲۰	سیبزمینی

نتایج و بحث

مقایسه توابع عملکرد محصولات بر اساس روش های FAO-1979 و FAO-2009

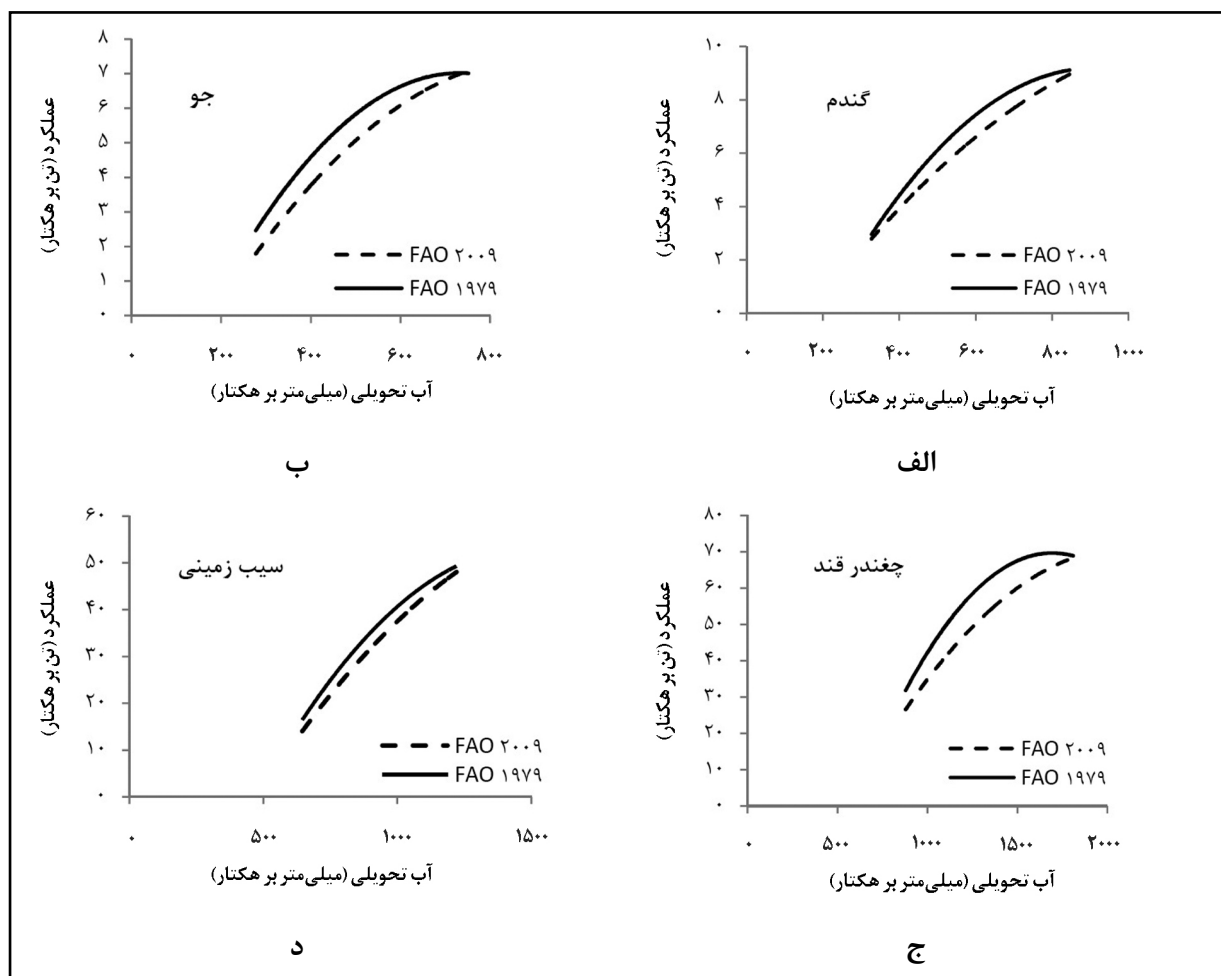
برای ارزیابی نتایج مدل‌ها، توابع عملکرد چهار محصول گندم، جو، چغندر قند و سیبزمینی که جزء محصولات راهبردی الگوی کشت منطقه است، تولید و بررسی شد. در این خصوص از اطلاعات اقلیمی سال ۱۳۷۸-۱۳۷۷ بهره‌گیری شد که خشکسالی شدیدی بر منطقه حاکم بود. ابتدا مدل بهینه‌سازی برای هر محصول به ازای حجم‌های مختلف اجرا و پس از آن با استفاده از عملکرد متناظر آنها، تابع عملکرد هر محصول محاسبه شد. نتایج این بخش برای محصولات منتخب در شکل ۴ قابل مشاهده است. در جدول ۵ نیز مقایسه ضریب همبستگی (r) عملکردی تولیدی توسط دو مدل

آورده شده است. مشاهده می‌گردد که مدل بهینه‌سازی بر اساس روش FAO-2009 نسبت به روش FAO-1979 در تمام موارد عملکرد کمتری را برای محصولات ارائه می‌دهد. این اختلاف به‌ویژه در مورد محصول چغندر قند قابل توجه‌تر است. همچنین مقایسه توابع عملکرد تولیدی توسط روش‌های یاد شده نشان می‌دهد که در شرایط بدون تنش آبی عملکرد محاسباتی با دو روش تقریباً یکسان است و اختلاف چشم‌گیری از خود نشان نمی‌دهد اما در شرایط تنش آبی تفاوت‌های قابل توجهی در عملکردهای محاسباتی مشاهده می‌شود. این مسئله حاکی از تفاوت دو روش FAO-1979 و FAO-2009 در مدل‌سازی تنش‌های آبی است (همانطور که بیان شد روش FAO-2009 با جزئیات بیشتری قادر به شبیه‌سازی عملکرد گیاه در شرایط تنش‌های آبی است).

جدول ۵- مقایسه ضریب همبستگی (r) عملکرد تولیدی دو مدل FAO-1979 و FAO-2009

نام محصول	r (درصد)
گندم	۹۶
جو	۹۷
چغندر قند	۸۶
سیبزمینی	۹۸

مقایسه توابع عملکرد محصولات و تخصیص آب...



شکل ۴- مقایسه توابع عملکرد تولیدی مدل‌های بهینه‌سازی بر اساس روش FAO-2009 و FAO-1979 محصولات (الف) گندم، (ب) جو، (ج) چغندر قند و (د) سیب زمینی.

جهت تشریح بهتر نتایج مدل بهینه‌سازی، حداکثر نیاز آبی گیاهان مختلف بدون کاهش عملکرد محصول در جدول ۶ آمده است. بر این اساس معادله FAO-2009 در تمام گیاهان، به جز جو، حجم آب بیشتری را به منظور تولید عملکرد حداکثر پیشنهاد می‌کند، اما در نهایت اختلافات چندان شدید نیست.

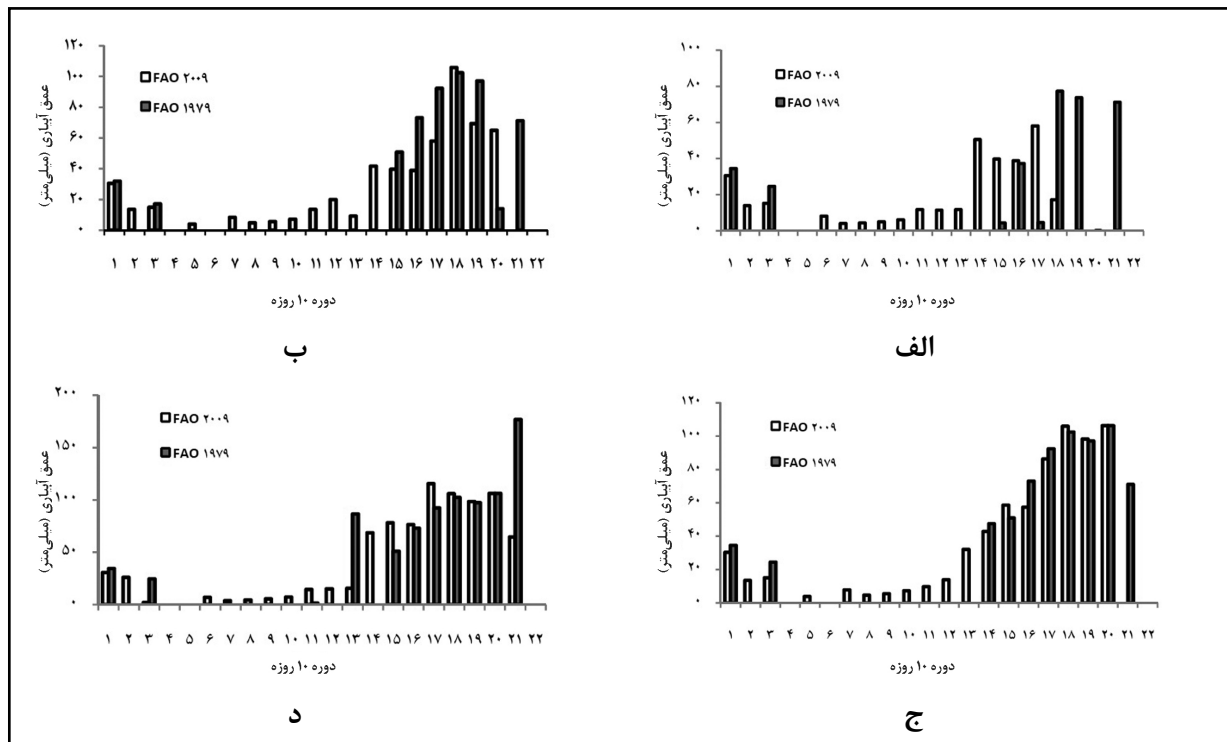
جدول ۶- مقایسه حداکثر نیاز آبی محصولات بر اساس نتایج مدل‌های بهینه‌سازی

نام محصول	حداکثر نیاز آبی (میلی‌متر) بر اساس روش FAO-1979	حداکثر نیاز آبی (میلی‌متر) بر اساس روش FAO-2009
گندم	۸۴۶	۸۴۹
جو	۷۵۲	۷۴۰
چغندر قند	۱۸۱۰	۱۸۲۷
سیب زمینی	۱۲۲۱	۱۲۳۴

مقایسه تخصیص آب طی دوره رشد بر اساس روش‌های FAO-1979 و FAO-2009

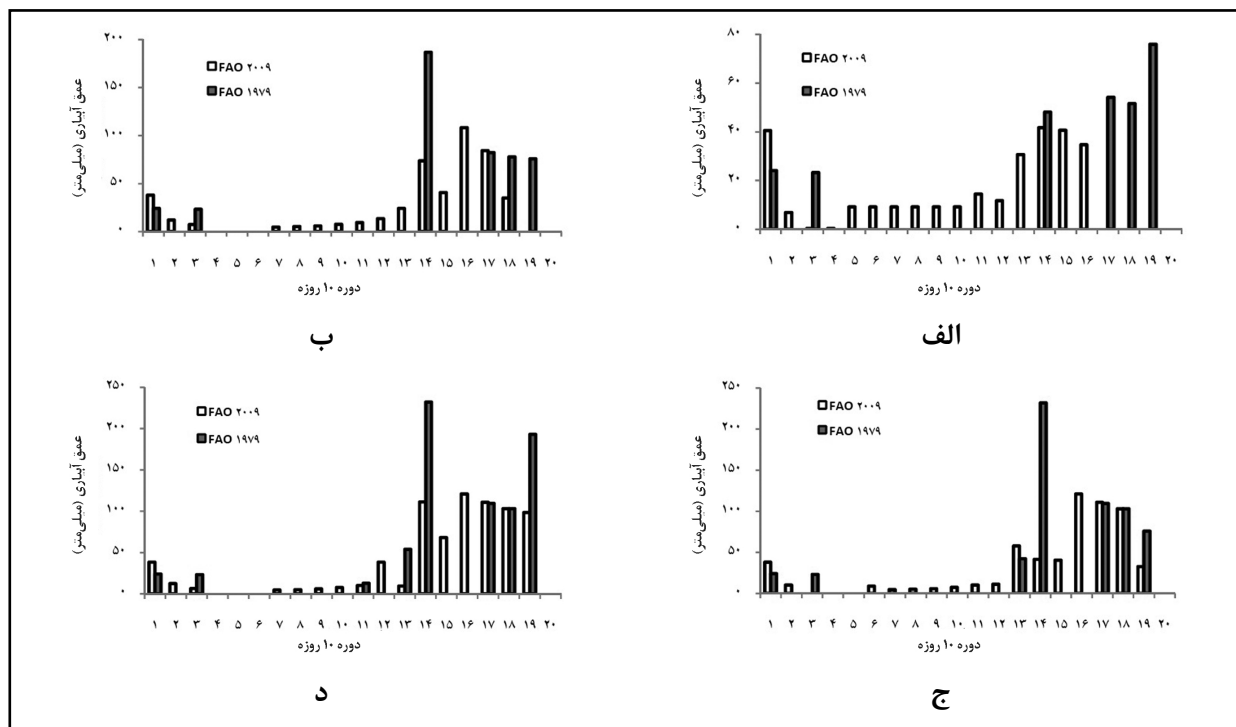
به منظور بررسی نحوه توزیع عمق آبیاری طی دوره رشد محصولات، مدل‌ها در شرایطی که ۵۰، ۸۰، ۹۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی حداکثر محصول تأمین شود، مجدداً اجرا شدند که نتایج در شکل‌های ۵ تا ۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مدل بهینه‌سازی بر اساس FAO-2009، در مقایسه با مدل بهینه‌سازی به روش FAO-1979، به منظور افزایش عملکرد گندم و جو در شرایط اعمال تنش آبی، سهم بیشتری از آب را به

دوره‌های رشد سبزینه‌ای و گلدهی گیاه اختصاص می‌دهد. در این شرایط، میزان اختلاف الگوی توزیع آب تخصیص یافته با کاهش تنش آبی نیز کمتر می‌شود (شکل‌های ۵ و ۶). در مورد سیب‌زمینی و چغندر قند تفاوت عملکرد دو مدل در تخصیص بهینه آب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در این مورد توزیع یکنواخت‌تر آب توسط مدل FAO-2009 بین دوره‌های مختلف رشد گیاه کاملاً قابل مشاهده است. همچنین میزان آب تخصیصی در دوره شکل‌گیری عملکرد بر اساس روش FAO-2009 به طور محسوسی کمتر است.

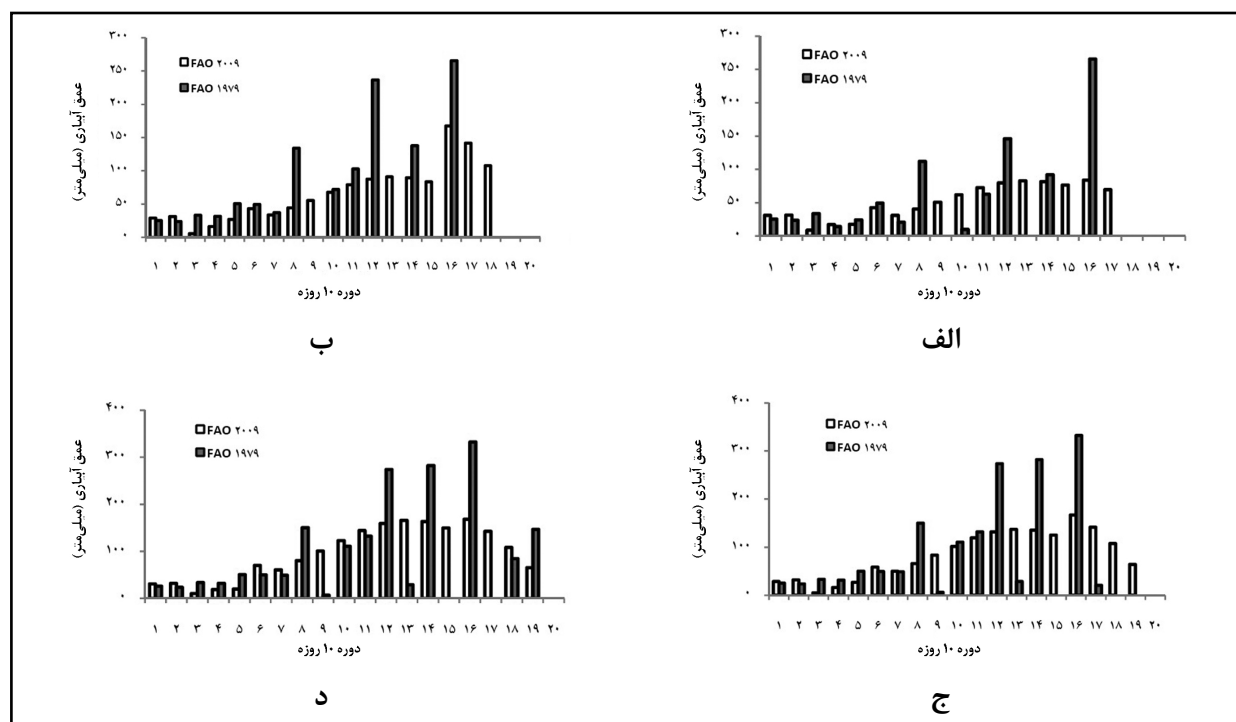


شکل ۵- مقایسه عملکرد مدل‌ها در تخصیص بهینه آب در دوره رشد گندم در شرایط تأمین (الف) ۵۰ درصد، (ب) ۸۰ درصد، (ج) ۹۵ درصد، و (د) ۱۰۰ درصد نیاز آبی.

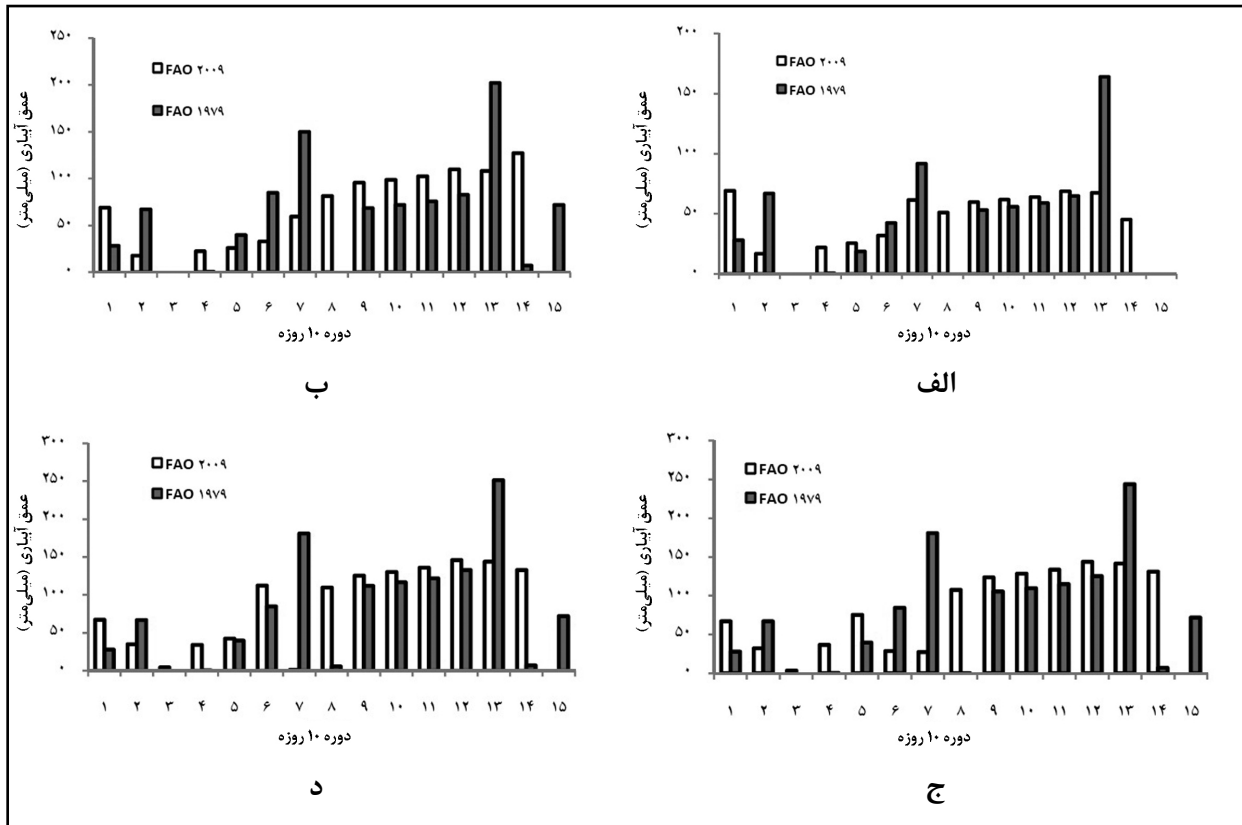
مقایسه توابع عملکرد محصولات و تخصیص آب...



شکل ۶- مقایسه عملکرد مدل‌ها در تخصیص بهینه آب در دوره رشد جو در شرایط تأمین الف) (۵۰ درصد، ب) (۸۰ درصد ج) (۹۵ درصد، و د) (۱۰۰ درصد نیاز آبی).



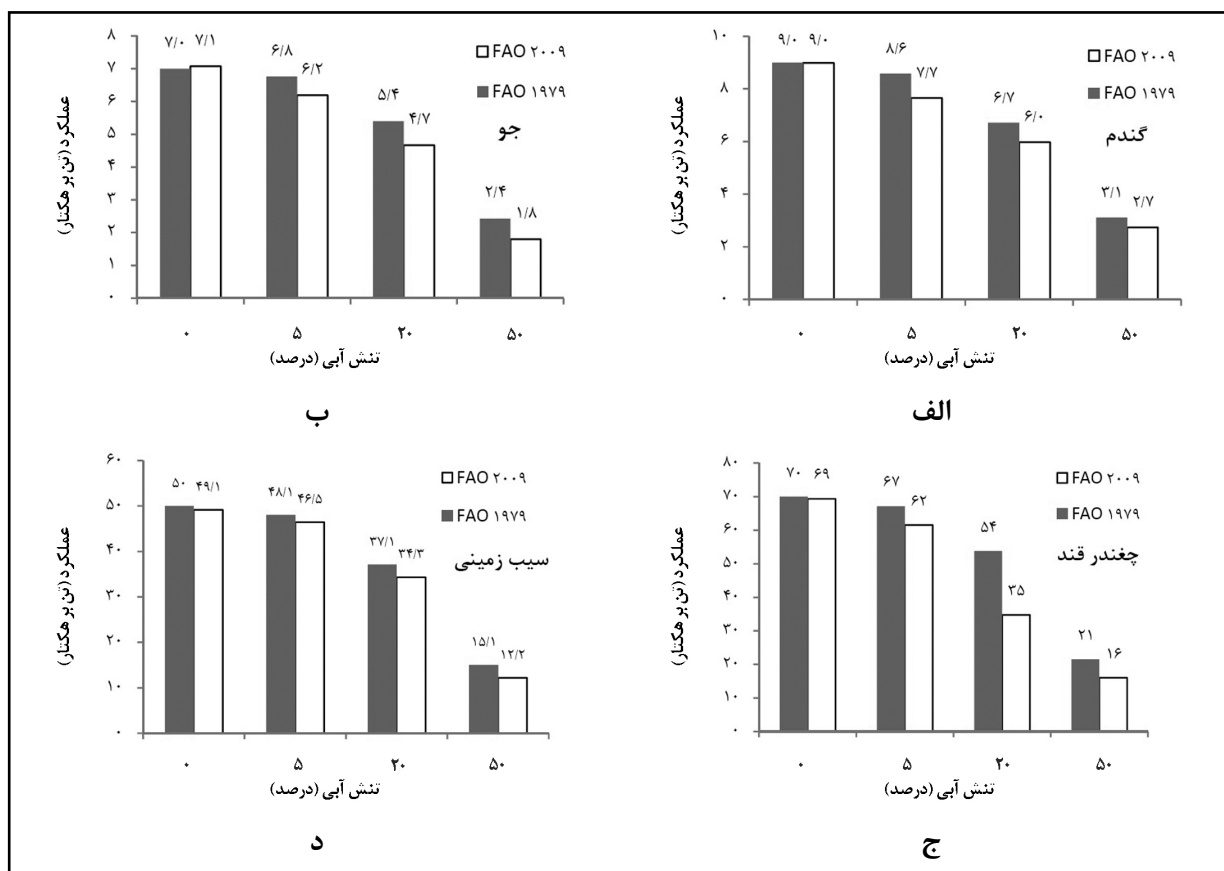
شکل ۷- مقایسه عملکرد مدل‌ها در تخصیص بهینه آب در دوره رشد چغندر قند در شرایط تأمین الف) (۵۰ درصد، ب) (۸۰ درصد، ج) (۹۵ درصد، و د) (۱۰۰ درصد نیاز آبی).



شکل ۸- مقایسه عملکرد مدل‌ها در تخصیص بهینه آب در دوره رشد سیب‌زمینی در شرایط تأمین الف) ۵۰ درصد، ب) ۸۰ درصد، ج) ۹۵ درصد، و د) ۱۰۰ درصد نیاز آبی.

نشان می‌دهند؛ سیب زمینی به طور متوسط حدود ۲ تن بر هکتار و چغندر قند حدود ۷/۷ تن بر هکتار نسبت به روش FAO-1979 کاهش دارد. همانطور که قبلاً نیز نشان داده شد در شرایط بدون تنش آبی، عملکرد دو مدل تقریباً یکسان است و دو مدل مقادیر مشابهی را نشان می‌دهند.

در شکل ۹ نیز میزان عملکرد محصولات در شرایط مختلف تنش آبی آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از روش FAO-2009 محصول تولیدی گندم و جو به طور متوسط به ترتیب حدود ۰/۷ و ۰/۵ تن بر هکتار نسبت به روش FAO-1979 کاهش دارد. در این شرایط محصولات غده‌ای مورد بررسی کاهش عملکرد بیشتری را



شکل ۹- مقایسه میزان عملکرد (الف) گندم، (ب) جو، (ج) چغندر قند، و (د) سیب زمینی در شرایط مختلف تنش آبی بر اساس نتایج مدل‌های بهینه‌سازی.

نتیجه‌گیری

عملکرد محصول بر اساس میزان تعرق گیاه و اصلاح شاخص‌های تولیدی آب و برداشت محصول در هر مرحله از رشد، محاسبه می‌شود که در مقایسه با روش قبلی (FAO-1979) که تنها بر اساس میزان تبخیر و تعرق گیاه و یک ضریب حساسیت در هر دوره رشد محاسبه می‌شود، به نحو مطلوب‌تری عمل می‌کند، هر چند متکی به پارامترهای بیشتری است.

۲- مدل بهینه‌سازی بر اساس روش FAO-2009، در مقایسه با مدل بهینه‌سازی به روش FAO-1979، به منظور افزایش عملکرد گندم و جو در شرایط اعمال تنش آبی، سهم بیشتری از آب را به دوره‌های رشد سبزینه‌ای و گلدهی گیاه اختصاص می‌دهد. در این شرایط میزان

این تحقیق تلاشی بود برای مقایسه روش‌های جدید و قدیم FAO در تولید بهینه توابع عملکرد و بررسی نحوه توزیع آب طی دوره رشد گیاهان به کمک این دو روش برای شبکه زاینده‌رود و بر اساس اطلاعات سال آبی ۷۸-۱۳۷۷. بدین منظور مدل‌سازی لازم در محیط Lingo و در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی انجام شد. از این تحقیق می‌توان نتایج زیر را ارائه داد:

۱- از قابلیت‌های مهم رابطه اخیر FAO، در مقایسه با رابطه قدیم آن در برآورد عملکرد محصولات، شبیه‌سازی و بررسی مؤثرتر تأثیر تنش‌های آبی بر عملکرد محصولات در دوره‌های مختلف رشد است. در رابطه FAO-2009،

- اختلاف الگوی آب تخصیص یافته شده با کاهش تنش آبی نیز کمتر می‌شود.
- ۳- در مورد محصولات غده‌ای نظیر سیب‌زمینی و چغندر قند، مدل بهینه‌سازی بر اساس روش جدید FAO نسبت به قبلی، آب را به صورت یکنواخت‌تر بین دوره‌های مختلف رشد گیاه تقسیم می‌کند. همچنین میزان آب تخصیصی در دوره شکل‌گیری عملکرد بر اساس روش FAO-2009 به طور محسوسی کمتر است.
- ۴- در شرایط تنش آبی مدل بهینه‌سازی به روش جدید عملکرد نسبی محصولات گندم و جو نسبت به روش قبل در مقایسه با محصولات غده‌ای کاهش کمتری را نشان می‌دهند. اما در شرایط بدون تنش آبی عملکرد دو مدل تقریباً یکسان است.
- ۵- مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته به نحوی مطلوب توانست محاسبات لازم را به انجام رساند و در کلیه موارد، جواب‌های بهینه سراسری را ارائه دهد.
- ۶- برای قضاوت بهتر در ارزیابی عملکرد این دو روش نیاز است تا این روابط در شرایط مزرعه نیز ارزیابی شوند.

مراجع

- Alizadeh, A. 2001. Optimization of Agriculture Water Consumption Pattern in Iran. Iran Meteorological Organization and Ministry of Jihad-e-Agriculture. (in Farsi)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Irrig. Drain. Paper 56. FAO. Rome. Italy.
- Borg, H. and Grimes, W. 1986. Depth development of roots with time: an empirical description. Trans. ASAE. 29(1): 194-197.
- Dinar, A., Yaron, D. and Baruchin, A. 1982. Alternative cropping systems and intensive irrigation under arid zone conditions. Agric. Sys. 38(3): 301-318.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. Irrig. Drain. Paper 33. FAO. Rome. Italy.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1984. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrig. Drain. Paper 24. FAO. Rome. Italy.
- Farshi, A., Shariati, M., Jarallahi, R., Ghasemi, M., Shahabifar, M. and Fuladi, S. M. 1995. Estimation of agriculture crop water requirement. Research Report. Soil and Water Research Institute. (in Farsi)
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A. R. 2002. Optimal allocation of water from a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping patterns. Irrig. Sci. 21, 127-137.
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A. R. 2004. Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. Irrig. Drain. 53, 39-54.
- Hornbuckle, J. W. Christen, E.W., Podger, G., White, R., Seaton, S., Perraud, J. M. and Rahman, J. M. 2000. Predicting irrigation return flows to river systems: conceptualisation and model development of an irrigation area return flow model. <http://www.mssanz.org.au>.
- Kumar, D. N., Raju K. S. and Ashok, B. 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. J. Irrig. Drain. Eng. 132(2): 123-129.
- Moghaddasi, M., Morid, S., Araghinejad, S. and Agha Alikhani, M. 2010. Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural

- drought losses: The 1999 drought in the Zayandeh Rud irrigation system (Iran). *Irrig. Drain.* 59(4): 377-387.
- Paudyal, G. and Dasgupta, A. 1990. A nonlinear chance constrained model for irrigation planning. *Agric. Water Manage.* 18(2): 87-100.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2010a. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water. Reference Manual.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2010b. AquaCrop Reference Manual (Annexes).
- Rana, J. 1993. Organization and decision making process in a large farmer managed irrigation system. In: Gill, J., Thapa, G.B. (Eds.) *The Chhattis Mauja irrigation system in Nepal. Indigenous management of natural resources in Nepal.* Winrock Int. 250-264.
- Rao, N. H., Sarma, P. B. S. and Chander, S. 1996. Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water. *Water Resource Res.* 26, 551-559.
- Sepaskhah, A. R. and Akbari, D. 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. *Bios. Eng.* 92(1): 97-106.
- Sepaskhah, A. R. and Parand, A. 2006. Effects of alternate furrow irrigation with supplemental every-furrow irrigation at different growth stages on the yield of maize (*Zea mays* L.). *Plant Prod. Sci.* 9(4): 415-421.
- Shangguan, Z., Shao, M. and Horton, R. 2002. A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. *J. Agric. Water Manage.* 52, 139-154.
- Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25, 189-207.
- Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop -The FAO crop model to simulate yield response to water. *Agronomy. J.* 101(3): 426-437



Crop Production Function and Irrigation Water Allocation Using Old and New FAO Methods in Zayandeh Rud Irrigation System

M. Delavar, S. Morid* and M. Moghadasi

* Corresponding Author: Prof. of Water Resources Dept., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
E-Mail: morid_sa@modares.ac.ir

Received: 29 February 2010, Accepted: 28 January 2012

Decreasing water resources has made optimum water allocation in agriculture essential. Planning optimum irrigation and crop production function considering accessible water and growing stage is an efficient approach to increase water productivity. Studies have applied this approach to maximize crop production using the FAO crop production method introduced in 1979. However, the FAO introduced a new method in 2003 that has been rarely studied. The objective of this study is to compare the performance of the two FAO methods in the Zayandeh Rud irrigation system using climate information from the 1998 drought in the region. Wheat, barley, sugar beets and potatoes, the region's main crops, are selected and their production function and temporal pattern of optimum irrigation water by growing stage (10 days of irrigation) are compared. The results show that the new FAO method estimates lower crop yield under water stress; however, the temporal pattern of irrigation depth is smoother and more uniform during the crop growing stages.

Keywords: FAO methods, Optimized water allocation, Water stress , Yield production, Zayandeh Rud