مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۹/ شماره ۳/پاییز ۱۳۸۷/ص ۵۲-۳۵

بهینه‌سازی مصرف آب و الگوی کشت با استفاده از تکنیک کم‌آبیاری در سطح مزرعه: مطالعه موردی شبکه آبیاری درودزن فارس

محمد کاظم شعبانی، تورج هنر* و علیرضا سپاسخواه**

* نگارنده مسئول، نشانی: شیراز، باجگاه، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، ص. پ. ۸۴۴۷۱-۷۱۹۴۶، تلفن: ۲۲۸۶۱۳۰(۰۷۱۱)، پیام‌نگار: toorajhonar@yahoo.com

** به‌ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد؛ استادیار؛ و استاد بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۲/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۳/۲۵

چکیده

با توجه به ارزش آب در کشاورزی و محدودیت این منبع مهم و حیاتی و وجود خشکسالی‌های متناوب در کشور، صرفه‌جویی در مصرف و استفادهٔ بهینه از آب موجود امری ضروری است. هدف از این تحقیق بهینه‌سازی مصرف آب و الگوی کشت به کمک تکنیک کم‌آبیاری است. در این تحقیق، اثر درصدهای مختلف کاهش آب مصرفی در دوره‌های مختلف رشد به‌عنوان سناریوهای آبیاری بر الگوی کشت غالب (گندم، جو، برنج، چغندرقند، ذرت دانه‌ای، و ذرت علوفه‌ای) در منطقهٔ درودزن استان فارس بررسی شد. پس از آن با استفاده از این اقدامات و تابع تولید، تابع هدف تعریف و در غالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی بر اساس حداکثر کردن درآمد، طرح بهینه شد. نتایج مدل نشان می‌دهد که محصول مؤثر برای کشت اول سال زراعی، گندم و در کشت دوم سال زراعی، ذرت دانه‌ای است و سایر محصولات به نسبت‌های کمتری در بهینه‌سازی مصرف آب نقش دارند. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به بررسی اثر محدودیت آب در دوره‌های مختلف رشد بر سطح زیر کشت گندم و ذرت دانه‌ای در کشت‌های اول و دوم اشاره کرد. نتایج این بررسی همچنین نشان می‌دهد که بهترین زمان جهت اعمال کم‌آبیاری برای گندم به‌ترتیب در اواخر دورهٔ رویشی، دورهٔ شکل‌گیری، و دورهٔ رسیدن و برای ذرت دانه‌ای در دورهٔ استقرار و دوره رسیدن است.

واژه‌های کلیدی

الگوی کشت، سناریوهای آبیاری، کم‌آبیاری، منابع آب سطحی

مقدمه

یکی از تنگناهای اساسی دنیای امروز، کافی نبودن آب برای مصارف گوناگون اعم از شرب، صنعت، کشاورزی، و محیط‌های طبیعی است. بررسی وضع موجود کشاورزی بیانگر آن است که با وجود پتانسیل افزایش تولید محصولات کشاورزی، به‌دلیل فقدان سیستم مدیریتی صحیح، امکان استفاده صحیح از منابع موجود (آب و خاک) میسر نشده و با وجود خشکسالی‌های مکرر و افزایش جمعیت، کاهش سهم آب در بخش کشاورزی را به دنبال داشته است. در این زمینه، انتخاب روش‌های مناسب برای بیشینه کردن محصول تولیدی به ازای مصرف هرچه کمتر آب ضروری است. امروزه تکنیک کم‌آبیاری[1] یکی از راه‌های مؤثر و عملی است که می‌تواند حداقل آب مصرفی را با عملکرد قابل قبول و اقتصادی تعیین و توجیه کند.

1- Deficit Irrigation

© 2011,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

بدین منظور لازم است قبل از شروع فصل کشت برنامه کم‌آبیاری تنظیم شود که شامل انتخاب یک الگوی کشت مناسب، تصمیم‌گیری نسبت به اینکه در هر قطعه زمین چه محصولی کاشته شود و چه مقدار آب به قطعات مختلف اختصاص یابد، انتخاب عملیات زراعی متناسب با میزان محصول قابل پیش‌بینی، و تصمیم‌گیری دربارهٔ زمان آبیاری هر قطعه زمین است (Doorenbos & Kassam, 1979). در برنامه‌ریزی فوق می‌توان گفت که الگوی کشت محصولات زراعی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی شبکه‌های آبیاری است و به‌طورکلی ارتباط مستقیمی با بهره‌وری بهتر از منابع و به تبع آن افزایش محصولات استراتژیک و بالقوه هر منطقه دارد.

در برنامه‌ریزی بهینهٔ آبیاری برای الگوی‌های مختلف کشت، تکنیک‌های بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی[1] (LP)، غیرخطی[2] (NLP)، و پویا[3] (DP) کاربرد فراوانی دارند. قهرمان و سپاسخواه (Ghahraman & Sepaskhah, 1997) در تحقیقی اثر کم‌آبیاری را بر درآمد خالص نسبی حاصل از کشت پنبه و سیب‌زمینی در دو ناحیهٔ اسفراین و دره‌گز بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که حداکثر محصول نسبی پنبه و سیب‌زمینی با ۴۰ درصد کاهش آب مصرفی ۰/۹ است و با نسبت درآمد به هزینه ۱/۶ درصد، کاهش آب مصرفی بهینه برای سیب‌زمینی در اسفراین و پنبه در اسفراین و دره‌گز را به‌ترتیب ۲۰، ۹، و ۲۰ درصد به‌دست آوردند. این محققان همچنین نشان دادند که با صرفه‌جویی مذکور می‌توان به‌ترتیب ۲۵، ۱۰، و ۲۵ درصد زمین را بیشتر کشت کرد که در آنها محصول نسبی به‌ترتیب ۹۳، ۹۷ و ۹۳ درصد و درآمد خالص نسبی نیز به‌ترتیب ۱/۰۲، ۱ و ۱/۰۲ خواهد شد. نتایج تحقیق آنها همچنین نشان می‌دهد که با نسبت درآمد به هزینه ۱/۵ یا کمتر، کم‌آبیاری سیب‌زمینی و پنبه در مناطق اسفراین و دره‌گز مقرون به صرفه نخواهد بود. کیو و همکاران (Kuo *et al.*, 2000) در تحقیقی از الگوریتم ژنتیک ژنتیک[4] (GA) برای برنامه‌ریزی آبیاری در سطح مزرعه استفاده کردند. طرح آنها در دو منطقه Delta و Utah به وسعت ۳۹۴/۶ هکتار اجرا شد به این ترتیب که با استفاده از داده‌های آب و هوایی، نیاز آبی روزانهٔ گیاه را شبیه‌سازی کردند. و عملکرد نسبی را برای هفت گیاه در دو منطقه به‌دست آوردند. سپس با استفاده از عملکرد نسبی و نیاز آبی در الگوریتم ژنتیک، تابع هدف را بر اساس حداکثر درآمد طرح بهینه کردند و درصد الگوی بهینهٔ کشت را برای مناطق مورد مطالعه به‌دست آوردند. راجو و کومار (Raju & Kumar, 2004) با به‌کارگیری الگوریتم، الگوی بهینه کشت را در شرایط استفاده از منابع آب سطحی در زیر دست یک مخزن سد چند منظوره به‌دست آوردند. کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 2006) در تحقیقی جهت بهینه‌کردن عملکرد مخزن سد یک منظورهٔ Malaprabha برای آبیاری گیاهان زراعی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. تابع هدف آنها مجموع حداکثر عملکرد نسبی برای همهٔ گیاهان در مناطق تحت آبیاری بود. در مدل آنها موارد زیر به کار گرفته شده بود: جریان ورودی به مخزن، بارندگی بر سطح آبیاری شده، رقابت درون فصلی برای آب میان گیاهان مختلف زراعی، میزان رطوبت موجود در خاک برای هر سطح کشت شده، غیریکنواختی خاک‌ها، و ضریب حساسیت گیاه. نتایج تحقیق آنها نشان داد عملکرد بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک شبیه عملکرد بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی خطی است. تحقیقات دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته که می‌توان به

1- Linear Programming
2- Nonlinear Programing
3- Dynamic Programing
4- Genetic Algorithm

(Lyle & Bordovsky, 1995; English & Raja, 1996; Sepaskhah & Kamgar-Haghighi, 1997; Sepaskhah & Ghahraman, 2004; Sepaskhah & Akbari, 2005; Sepaskhah *et al*., 2006) اشاره کرد.

در اکثر تحقیقات گذشته، تأثیر کم‌آبیاری بر الگوی کشت عموماً به‌صورت یکنواخت در تمام فصل رشد بررسی شده است و تأکید این تحقیقات بیشتر بر تغییر الگوی کشت از گیاهان پر مصرف به گیاهان کم مصرف از لحاظ نیاز آبی بوده است. درصورتی‌که کشاورزان کمتر تمایل دارند چنین تغییراتی در الگوی کشت بدهند. از این رو در تحقیق حاضر برای بررسی بهتر تأثیر کم‌آبیاری به‌صورت غیر یکنواخت در دوره‌های تفکیک شدهٔ رشد، سناریوهای مختلف آبیاری در غالب یک مدل برنامه‌ریزی آبیاری تعریف شده است که هدف آن تعیین الگوی بهینه کشت در شرایطی است که سود حداکثر و میزان آب مصرفی حداقل شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقهٔ مطالعاتی در این تحقیق اراضی زیردست شبکه‌های آبیاری سد درودزن (استان فارس) است. سد درودزن روی رودخانه کر در منطقهٔ درودزن در ۶۵ کیلومتری شهر مرودشت (استان فارس) به‌منظور جمع‌آوری سیلاب‌ها و رها کردن منظم آب در کانال‌ها جهت آبیاری و تأمین آب آشامیدنی شیراز بنا شده است. میزان اراضی خالص و ناخالص شبکهٔ آبیاری این سد به‌ترتیب ۵۶۰۰۰ و ۶۵۰۰۰ هکتار است. سد درودزن شامل یک کانال اصلی و سه کانال درجه یک شامل کانال سمت چپ اولیه، کانال سمت راست اولیه (اردیبهشت)، و کانال سمت راست ثانویه (هامون) است. این تحقیق صرفاً در منطقهٔ تحت پوشش کانال اردیبهشت سد درودزن اجرا شده است. این کانال در فاصله ۲۲ کیلومتری از سد درودزن و منشعب از آب‌پخش است که شامل ۱۰ کانال درجه ۳ نیز هست (Mohammadi & Torabi-Haghighi, 2006). آمار و اطلاعات مورد نیاز نظیر سطح زیر کشت، عملکرد محصولات، هزینهٔ تولید، هزینهٔ نهاده‌ها، قیمت محصولات، تاریخ کشت گیاهان مختلف، و میزان امکانات آبی به راه‌های مختلف از جمله تکمیل پرسشنامه توسط کشاورزان و از ادارات و سازمان‌های مربوط در استان فارس در سال ۸۳-۸۴ تهیه شد. اطلاعات مربوط به پرسشنامه نیز از نمونه‌ای مشتمل بر ۶۰ واحد زراعی حاصل شد. سطح مزرعه بهره‌برداران مختلف در زیر شبکه‌های آبیاری عمدتاً بین ۲ تا ۱۵ هکتار است که جهت بررسی تأثیر سطوح مختلف کم‌آبیاری (سناریوهای آبیاری) در سطح مزرعه از یک بهره‌بردار نماینده با وسعت اراضی ۷ هکتاری استفاده شد که در میانهٔ واحدهای مورد بررسی بود و فقط از آب سطحی استفاده می‌کرد.

طراحی مدل

در این تحقیق، جهت بهینه کردن الگوی کشت از برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزار QSB[1] استفاده شد. QSB نرم‌افزاری است که از آن برای بهینه‌کردن توابع خطی استفاده می‌شود. در طراحی مدل مورد نظر، یک سال زراعی بر اساس امکانات آبی موجود و تاریخ‌های آبیاری به‌صورت جدول ۱ تقسیم شد که در آن تاریخ کشت گیاهان مختلف (الگوی کشت غالب) در منطقه لحاظ شده است. الگوی کشت غالب منطقه در کشت اول سال زراعی گندم و جو است. این گیاهان از اول آبان تا آخر اسفند ماه نسبت به کمبود آب بسیار حساس‌اند به‌طوری‌که کم‌آبیاری در این دوره (اول آبان تا آخر

1- Quantitative System Business

اسفند) ممکن است تأثیر بسیار زیاد بر عملکرد آنها داشته باشد؛ به همین دلیل از اول آبان تا آخر اسفند به‌عنوان یک دوره و کم‌آبیاری نیز در این دوره برای این گیاهان در نظر گرفته نشد. بقیه دوره‌ها برای سهولت انطباق با دوره‌های رویشی گیاه به‌صورت ۱۰ روزه مد نظر قرار گرفته شد.

جدول ۱- دورهٔ رشد گیاهان مختلف در منطقه

نام گیاه	آبان			آذر			دی			بهمن			اسفند			فروردین			اردیبهشت			خرداد			تیر			مرداد			شهریور			مهر		
دهه	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
گندم	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓															
جو	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓																	
چغندرقند																✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ذرت دانه‌ای																									✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ذرت علوفه‌ای																									✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
برنج																									✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

در طراحی مدل، تابع هدف به‌صورت زیر تعریف شد که با توجه به بازده برنامه‌ای (درآمد خالص) به‌ازای کشت گیاهان مختلف حداکثر گردید (Kuo *et al*., 2000):

$$Z = \sum_{j=1}^{n} (P_{c_j} Y_j - C_j) A_j - P_w \sum_{j=1}^{n} IR_j \qquad (۱)$$

که در آن،

Z= تابع هدف (بر حسب ریال)؛ P_{c_j} = قیمت محصول برای گیاه jام (بر حسب ریال بر کیلوگرم)؛ Y_j = عملکرد در هکتار برای گیاه jام (بر حسب کیلوگرم بر هکتار)؛ A_j = سطح زیر کشت گیاه jام (بر حسب هکتار)؛ C_j = کل هزینه‌های متغیر به غیر از هزینه‌های آب برای گیاه jام (بر حسب ریال بر هکتار)؛ P_w = قیمت آب آبیاری (بر حسب ریال بر متر مکعب)؛ و IR_j = کل مقدار آب آبیاری گیاه jام (بر حسب متر مکعب) است. تابع تولید مورد استفاده در این تحقیق برای تعیین عملکرد واقعی محصول در هکتار (Y_j) به‌صورت زیر در نظر گرفته شد (Meyer *et al*., 1993; Rao *et al*., 1988):

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^{n} \left(1 - Ky_i \left(1 - \frac{W_a}{W_p}\right)_i\right) \qquad (۲)$$

که در آن،

Y_p = حداکثر محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبی؛ Y_a = مقدار محصول تولیدی در شرایط واقعی (شرایط تنش آبی)؛ i= مرحله مشخص از رشد؛ n= تعداد مراحل رشد؛ Ky_i = ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در مرحله رشد؛ W_{p_i} = حداکثر آب مورد نیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشد؛ و W_{a_i} = مقدار آب مورد نیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشد که مقدار آن از رابطه ۳ به‌دست می‌آید (Ghahraman & Sepaskhah, 1997):

$$W_{a_i} = (1-x)W_{p_i} \qquad (۳)$$

که در آن، x= کسر کاهش آب آبیاری است.

مراحل رشد شامل استقرار[1]، اوایل دوره رویشی[2]، اواخر دوره رویشی[3]، گلدهی[4]، شکل‌گیری عملکرد محصول[5] و رسیدن محصول[6] است. مقادیر ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در دوره‌های مختلف رشد (Ky_i) بر اساس نتایج محققان، هیل و همکاران (Hill *et al.*, 1983)، آرین و سپاسخواه (Arian & Sepaskhah, 1991)، و هنر و سپاسخواه (Honar & Sepaskhah, 1996) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در مراحل مختلف رشد

گیاه	مرحلهٔ رشد						
	استقرار	اوایل رشد رویشی	اواخر رشد رویشی	گلدهی	شکل‌گیری عملکرد محصول	رسیدن محصول	کل دورهٔ رشد
گندم	۰	۰/۱۲	۰/۱۵	۲/۱	۰/۳۳	۰/۲	
جو	۰	۰/۱۲	۰/۱۵	۱/۵	۰/۴	۰/۱۴	
ذرت	۰/۱	۱/۴۲	۱/۴۲	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۳	
چغندرقند	۰/۱۲	۲	۲	-	۰/۳۶	۰/۱۲	
برنج							۱/۳۵

برای تعیین سناریوهای آبیاری و همچنین اثر کم‌آبیاری در دوره‌های تفکیک شدهٔ رشد، از معادلهٔ ۳ استفاده شد. در واقع در این تحقیق سناریوهای آبیاری بر اساس مقادیر مختلف x تعریف می‌شوند. حداکثر مقدار کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل نیز با توجه به نتایج پژوهش، سپاسخواه و کامگار حقیقی (Sepaskhah & Kamgar-Haghighi, 1997)، سپاسخواه و پرند (Sepaskhah & Parand, 2006)، و سپاسخواه و حسینی (Sepaskhah & Hosseini, 2007) در منطقهٔ مورد مطالعه برای گیاهان مختلف مطابق جدول ۳ اعمال شد.

جدول ۳- حداکثر مقدار کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل

گیاه	کاهش آب مصرفی (درصد)
گندم	۴۰
جو	۴۰
ذرت دانه‌ای	۳۰
ذرت علوفه‌ای	۳۰
چغندرقند	۲۰

1- Establishment
2- Early Vegetation
3- Late Vegetation
4- Flowering
5- Yield Formation
6- Ripening

تابع هدف در رابطهٔ ۱ با توجه به محدودیت‌های زمین و امکانات آبی حداکثر می‌شود. این محدودیت‌ها برای کشت گیاهان مختلف به‌صورت زیر در مدل اعمال می‌شود:

$$\sum_{j=1}^{ncrop} A_j \le A_{Total} \qquad (۴)$$

$$\sum_{j=1}^{ncrop} W_{a_j} \le q_{Total}^{s} \qquad (۵)$$

که در آن، W_{p_j} از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$W_{P_j} = \frac{IN_j}{E_a} \times A_j \times 10 \qquad (۶)$$

در رابطه فوق عدد ۱۰ برای تبدیل میلی‌متر به مترمکعب در هکتار می‌باشد.

IN_J از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$IN_j = ET_{crop_j} - P_e \qquad (۷)$$

و ET_{crop_j} از رابطهٔ ۸ به‌دست می‌آید:

$$ET_{crop_j} = K_c \times ET_0 \qquad (۸)$$

پارامترهای موجود در رابطه‌های فوق به‌صورت جدول ۴ تعریف شده‌اند.

مقدار بارندگی مؤثر با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک امریکا[1] (SCS) برای ماه‌هایی تعیین شده است که در آن بارندگی اتفاق می‌افتد (Clarke, 1998). در این تحقیق، تبخیر- تعرق سطوح گیاهی مرجع به روش پنمن- فائو[2]، دورنباس و پروت (Doorenbos & Pruitt, 1977)، با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه مرجع کوشکک، پیشنهاد شده توسط سپاسخواه (Sepaskhah, 1999)، محاسبه شد و سپس با استفاده از ضرایب گیاهی فائو ارائه شده توسط آلن و همکاران (Allen *et al*., 1997 & 1998) مقادیر تبخیر- تعرق بالقوه گیاهان زراعی به دست آمد.

جدول ۴- تعریف پارامترهای به‌کار برده شده در محدودیت‌های مدل

پارامتر	تعریف
A_j	سطح زیر کشت گیاه jام (هکتار)
A_{Total}	کل سطح زمین موجود برای کشت گیاهان مختلف (هکتار)
W_{a_i}	مقدار آب آبیاری مورد نیاز گیاه jام (متر مکعب در هکتار در ۱۰ روز)
q_{Total}^{s}	حداکثر امکانات آب سطحی موجود (متر مکعب در هکتار در ۱۰ روز)
W_{p_i}	مقدار آب آبیاری مورد نیاز گیاه jام (متر مکعب در هکتار در ۱۰ روز)
IN_j	مقدار آب خالص مورد نیاز گیاه jام (میلی‌متر در ۱۰ روز)
E_a	بازده کاربرد آب در مزرعه (اعشار)
P_e	بارندگی مؤثر (میلی‌متر)
ET_{crop_i}	تبخیر- تعرق گیاه jام (میلی‌متر در ۱۰ روز)
ET_0	تبخیر- تعرق بالقوه سطوح گیاهی مرجع (میلی‌متر در ۱۰ روز)
Kc	ضریب گیاهی

1- Soil Coservation Service 2- Penman- FAO

اجرای مدل برای سناریوهای مختلف کم‌آبیاری

برای بررسی بهتر نحوهٔ اعمال کم‌آبیاری در دوره‌های مختلف رشد، غیر از حالت بهینه حاصل از مدل (حالت عمومی) در سه حالت دیگر زیر نیز مدل اجرا و نتایج آنها با هم مقایسه شد.

حالت عمومی

برای این حالت با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ برای درصدهای مختلف کاهش آب مصرفی، سناریوهای آبیاری تعریف و به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در تابع هدف (رابطهٔ ۱) وارد شد. شکل ۱ فلوچارت مدل نشان می‌دهد. مدل می‌تواند پارامترهایی مثل حداکثر عملکرد گیاهان مختلف، قیمت محصولات، قیمت آب مصرفی، هزینه کشت گیاهان مختلف در هکتار، و حداکثر موجودی آبی را در دوره‌های زمانی مختلف به‌عنوان ورودی بگیرد و الگوی بهینهٔ کشت را تخمین بزند. جدول ۵ متغیرهای تصمیم و درصد کاهش آب مصرفی را در دوره‌های مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، ۱۳۱ سناریوی آبیاری به‌عنوان متغیر تصمیم برای تابع هدف تعریف شد. برای مثال، برای گیاه گندم ۳۲ سناریوی آبیاری تعریف شده است که در $X_{۲۵}$، گندم با ۵ درصد کاهش آب مصرفی در دوره‌ای آبیاری می‌شود که Ky=۰/۲ است. و سرانجام، تابع هدف با توجه به محدودیت‌های موجود (رابطه‌های ۴ و ۵) حداکثر شد. نتایج این در جدول ۶ ارائه شده است.

حالت اول (تعیین اثر حذف سناریوهای بهینه از مدل)

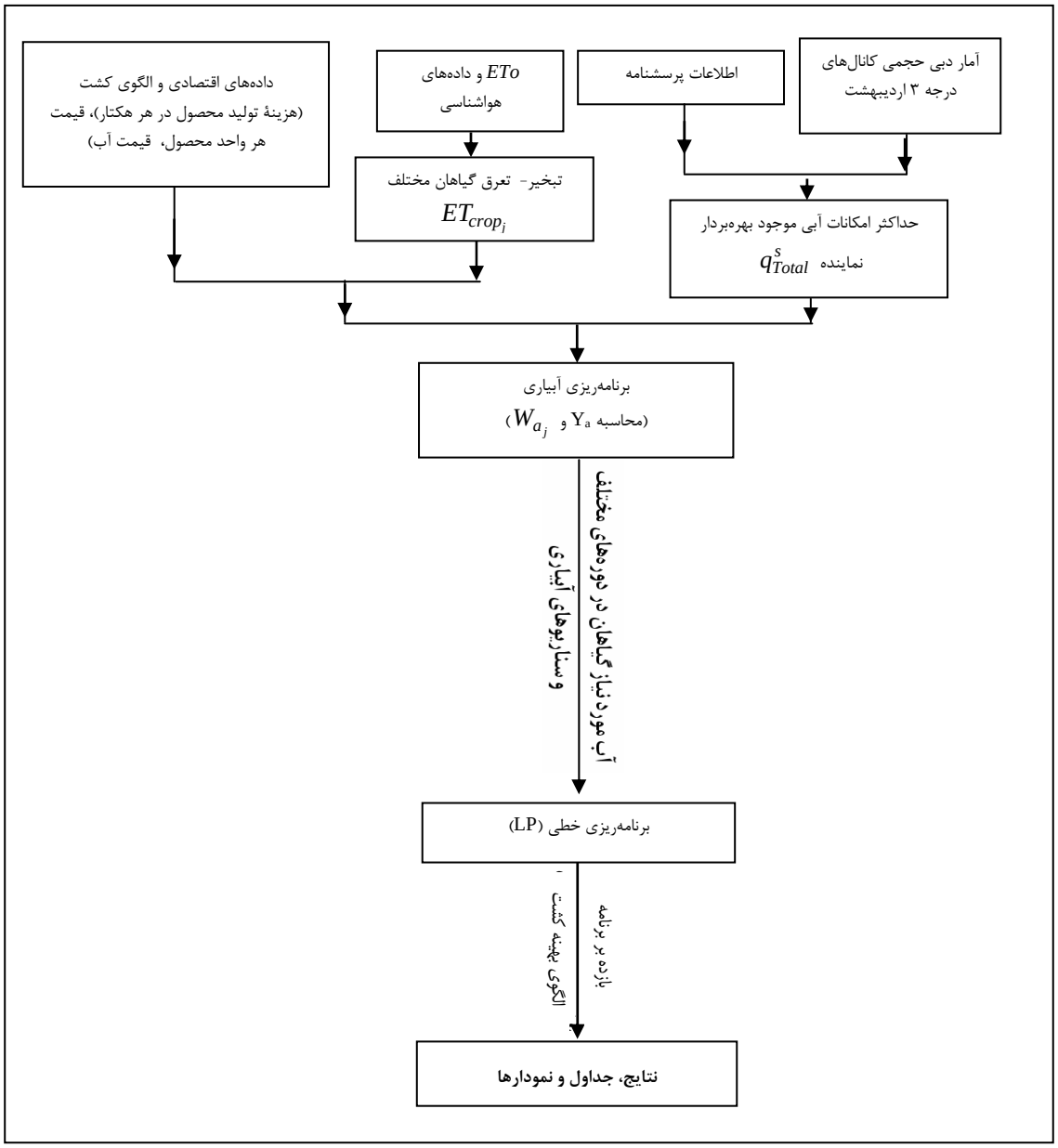
در جدول ۵ برای هر گیاه یک سناریو آبیاری کامل و تعدادی کم‌آبیاری تعریف شده است. برای اینکه مدل از آبیاری کامل به سمت کم‌آبیاری سوق پیدا کند یکی از راه‌کارها حذف سناریوهایی است که در حالت عمومی به‌عنوان سناریوهای بهینه انتخاب شده‌اند که شامل آبیاری کامل نیز هستند. بنابراین، در این حالت سناریوی بهینه که از اجرای حالت عمومی به‌دست می‌آید. از مدل حذف و به مدل اجازه داده می‌شود تا سناریوهای دیگر (کم‌آبیاری) را انتخاب کند. نتایج این حالت در جدول ۹ ارائه شده است.

حالت دوم (تعیین الگوی بهینه کشت در شرایط بدون محدودیت آب)

برای اینکه میزان آب مصرفی درحالتی‌که بهره‌بردار از سناریوهای آبیاری کامل استفاده می‌کند نسبت به‌حالتی‌که بهره‌بردار از سناریوهای کم‌آبیاری استفاده می‌کند مقایسه شود، باید الگوی بهینهٔ کشت نیز در حالتی به‌دست آورده شود که هیچگونه محدویت آب وجود ندارد. بنابراین، در این حالت فرض بر این است که تمام نیاز آبی گیاهانی تأمین شود که در حالت عمومی اجرای مدل به‌عنوان الگوی بهینه انتخاب شدند. در واقع، در این حالت مدل به‌سمت سناریوهای آبیاری کامل سوق پیدا می‌کند. بنابراین، الگوی بهینهٔ کشت در شرایط بدون محدودیت آب به‌دست می‌آید. نتایج مدل در این حالت در جدول ۱۰ ارائه شده است.

حالت سوم (تعیین اثر محدودیت بیشتر آب در دوره‌های مختلف رشد)

برای اینکه کم‌آبیاری در دوره‌های مختلف رشد مورد بررسی قرار گیرد و حساسیت این دورها نسبت به کمبود آب سنجیده شود باید میزان آب مصرفی در این دوره‌ها را کاهش داد تا مدل در این دوره‌ها به سمت سناریوهای کم‌آبیاری سوق پیدا کند. بنابراین در این حالت حداکثر آب مصرفی در سمت راست محدودیت‌ها (رابطه ۵) در دوره‌های مختلف رشد به مقدار ۱۰۰۰ مترمکعب (به‌طور تقریب معادل یک نوبت آبیاری) کاهش پیدا می‌کند (به‌جز محدودیت‌های موجود برای برنج). به‌طوری‌که این کاهش در یک دوره به‌خصوص از رشد اعمال می‌شود و در بقیه دوره‌های رشد آبیاری کامل گیاه (گندم برای کشت اول و ذرت برای کشت دوم) تأمین می‌شود. نتایج مدل در این حالت در جدول ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱- فلوچارت مدل برنامه‌ریزی آبیاری

جدول ۵- تعریف متغیرهای تصمیم و درصد کاهش آب مصرفی در دوره‌های مختلف رشد

گندم	سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲
	کسرکاهش	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
	Ky	۰/۱۵									۲/۱							۰/۳۳								۰/۲							
جو	سناریو	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰	۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹	۵۰	۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶	۵۷							
	کسرکاهش	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰							
	Ky	۱/۵									۰/۴								۰/۱۴														
ذرت دانه‌ای	سناریو	۵۸	۵۹	۶۰	۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶	۶۷	۶۸	۶۹	۷۰	۷۱	۷۲	۷۳	۷۴	۷۵	۷۶	۷۷	۷۸	۷۹	۸۰	۸۱	۸۲	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶	۸۷	۸۸	
	کسرکاهش	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	
	Ky	۰/۱							۱/۴۲						۰/۸۷						۰/۹۱				۰/۳							
ذرت علوفه‌ای	سناریو	۸۹	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵	۹۶	۹۷	۹۸	۹۹	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۲	۱۰۳	۱۰۴	۱۰۵	۱۰۶	۱۰۷	۱۰۸	۱۰۹	۱۱۰	۱۱۱	۱۱۲	۱۱۳							
	کسرکاهش	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰							
	Ky	۰/۱							۱/۴۲						۰/۸۷						۰/۹۱											
چغندر قند	سناریو	۱۱۴	۱۱۵	۱۱۶	۱۱۷	۱۱۸	۱۱۹	۱۲۰	۱۲۱	۱۲۲	۱۲۳	۱۲۴	۱۲۵	۱۲۶	۱۲۷	۱۲۸	۱۲۹	۱۳۰															
	کسرکاهش	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰															
	Ky	۰/۱۲					۲				۰/۳۶				۰/۱۲																		
برنج	سناریو	۱۳۱																															
	کسرکاهش																																
	Ky																																

نتایج و بحث

نتایج اجرای مدل در حالت عمومی

جدول ۶ الگوی بهینه کشت حاصل از اجرای عمومی مدل را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که سناریوهای X_1 با سطح ۱/۶۵ هکتار (گندم آبیاری کامل)، X_5 با سطح ۰/۵۲ هکتار (گندم با ۱۵ درصد کاهش آب مصرفی در اواخر دوره رشد رویشی)، X_{17} با سطح ۴/۱۸ هکتار (گندم با ۵ درصد کاهش آب مصرفی در مرحله پر شدن دانه)، X_{58} با سطح ۰/۷۴ هکتار (ذرت آبیاری کامل)، X_{85} با سطح ۳/۲۳ هکتار (ذرت با ۱۵ درصد کاهش آب مصرفی در مرحله رسیدن)، X_{124} با سطح ۰/۶۵ هکتار (چغندرقند با ۱۰ درصد کاهش آب مصرفی در دوره شکل‌گیری غده)، و X_{131} با سطح ۱/۲۰ هکتار (برنج آبیاری کامل) وارد الگوی کشت شده‌اند و سود خالص کل حاصل از الگوی بهینهٔ کشت ۱۵۱۰۱۲۱۰ تومان برای ۷ هکتار زمین است. یادآوری می‌شود که برنج فقط با آبیاری کامل وارد مدل شده است. زیرا این گیاه بیشتر به‌صورت کرتی کشت می‌شود و کمتر تحت تأثیر کم‌آبیاری قرار می‌گیرد ضمن آنکه ضرایب Ky در دوره‌های مختلف رشد نیز در دسترس نبود. با توجه به امکانات آبی، مشاهده می‌شود که بهره‌بردار نماینده مدل، غیر از آبیاری کامل، کم‌آبیاری را نیز در دوره‌های مختلف رشد انتخاب می‌کند. نتایج جدول ۶ نیز نشان می‌دهد که سناریوهای بهینه در کشت اول سال زراعی، گندم با سطح زیر کشت ۶/۳۵ هکتار و در کشت دوم، ذرت دانه‌ای با سطح زیر کشت ۳/۹۷ هکتار است. اضافه می‌شود که مدل، الگوی بهینه را برای دو فصل کشت در طول یک سال زراعی در سطح ۷ هکتار پیش‌بینی می‌کند.

جدول ۶- الگوی بهینه کشت در حالت عمومی

سناریو	سطح زیر کشت (هکتار)
X_1 (گندم، آبیاری کامل)	۱/۶۵
X_5 (گندم، ۱۵ درصد* کاهش آب مصرفی در اواخر دورهٔ رشد رویشی)	۰/۵۲
X_{17} (گندم، ۵ درصد کاهش آب مصرفی در مرحلهٔ پر شدن دانه)	۴/۱۸
X_{58} (ذرت دانه‌ای، آبیاری کامل)	۰/۷۴
X_{85} (ذرت دانه‌ای، ۱۵ درصد کاهش آب مصرفی در مرحلهٔ رسیدن)	۳/۲۳
X_{124} (چغندرقند، ۱۰ درصد کاهش آب مصرفی در دورهٔ شکل‌گیری غده)	۰/۶۵
X_{131} (برنج، آبیاری کامل)	۱/۲
مقدار آب مصرفی کل (متر مکعب)	۱۲۰۴۹۴
سود خالص (تومان)	۱۵۱۰۱۲۱۰

* معرف درصد کم‌آبیاری در دوره ذکر شده است.

جدول ۷ الگوی کشت فعلی بهره‌بردار نماینده را نشان می‌دهد که از پرسشنامه استخراج شده است. مشخص است که بهره‌بردار نماینده نیز قسمت اعظم زمین خود را به گندم و ذرت دانه‌ای اختصاص می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که مدل با تصمیمات کشاورزان جهت کشت گیاهان مختلف تقریباً انطباق دارد.

جدول ۷- الگوی فعلی بهره‌بردار نماینده حاصل از تکمیل پرسشنامه

گیاه	سطح زیر کشت (هکتار)
گندم	۶
ذرت دانه‌ای	۲
چغندرقند	۱
برنج	۱

در جدول ۸ تأثیر تغییر قیمت آب بر الگوی بهینهٔ کشت نشان داده شده است. با تغییر قیمت آب در دامنه‌های داده شده، الگوی کشت تغییر می‌کند بدین گونه که از سطح زیر کشت محصولات جو، ذرت علوفه‌ای، و چغندر کاسته می‌شود تا به صفر برسد و به سطح زیر کشت گندم و ذرت دانه‌ای به‌دلیل داشتن درآمد بیشتر افزوده می‌شود. همچنین، از سطح زیر کشت هر یک از محصولات نیز به‌دلیل کاهش آب مصرفی در اثر افزایش قیمت آب، کاسته می‌شود.

نتایج اجرای مدل در حالت اول

جدول ۹ الگوی بهینهٔ کشت را در این حالت (حالت اول) نشان می‌دهد. در این حالت، سود خالص کل ۱۵۰۹۱۰۱۰ تومان به‌دست آمده است؛ مقایسهٔ سود خالص این حالت با حالت عمومی نشان می‌دهد که با کاهش ۰/۰۷ درصد سود خالص، مقدار آب مصرفی ۰/۶۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان با انتخاب سناریوهای کم‌آبیاری در مصرف آب صرفه‌جویی کرد.

جدول ۸- تأثیر تغییر قیمت آب بر الگوی بهینه کشت

سطح زیر کشت (هکتار) در سناریوهای مختلف							دامنهٔ قیمت آب
برنج	چغندر قند	ذرت دانه‌ای		گندم			(تومان در مترمکعب)
$X_{۱۳۱}$	$X_{۱۲۴}$	$X_{۸۵}$	$X_{۵۸}$	$X_{۱۷}$	$X_{۵}$	$X_{۱}$	
۱/۲۰	۰/۶۵	۳/۲۳	۰/۷۴	۴/۱۸	۰/۵۲	۱/۶۵	۰-۴/۸۰
$X_{۱۳۱}$	$X_{۱۲۴}$	$X_{۸۵}$	$X_{۵۸}$	$X_{۱۷}$	$X_{۵}$	$X_{۱}$	
۱/۲۰	۰/۵۵	۳/۲۹	۰/۷۷	۵/۴۲	۱/۰۳	۰	۴/۸۰-۵/۷۸
$X_{۱۳۱}$	$X_{۱۲۴}$	$X_{۸۵}$	$X_{۵۸}$	$X_{۲۳}$	$X_{۱۷}$	$X_{۸}$	
۱/۲۰	۰/۵۱	۳/۳۱	۰/۷۸	۰/۰۲	۵/۷۷	۰/۷۰	۵/۷۸-۲۶/۹۹
$X_{۱۳۱}$	$X_{۱۲۴}$	$X_{۸۵}$	$X_{۵۸}$	$X_{۲۳}$	$X_{۱۷}$	$X_{۸}$	
۱/۲۰	۰/۵۱	۲/۷۵	۱/۳۰	۰/۰۲	۵/۷۷	۰/۷۰	۲۶/۹۹-۳۲/۱۸
$X_{۱۳۱}$	$X_{۱۲۴}$	$X_{۸۵}$	$X_{۵۸}$	$X_{۲۳}$	$X_{۱۷}$	$X_{۵}$	
۱/۲۰	۰/۵۱	۲/۷۵	۱/۳۰	۰/۱۱	۵/۱۵	۱/۲۳	۳۲/۱۸-۷۴/۰۵
$X_{۱۳۱}$	$X_{۱۲۴}$	$X_{۸۵}$	$X_{۵۸}$	$X_{۱۷}$	$X_{۵}$	$X_{۱}$	
۱/۲۰	۰	۰	۴/۰۱	۱/۹۶	۱/۲۳	۳/۳۰	۷۴/۰۵-۱۱۳/۳۲

نتایج اجرای مدل در حالت دوم

جدول ۱۰ الگوی بهینه کشت را در این حالت (حالت دوم) نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد سود خالص کل در این حالت ۱۷۶۱۸۱۸۰ تومان برای ۷ هکتار زمین در یک سال زراعی است. نتیجهٔ مقایسهٔ این حالت با حالت عمومی نشان می‌دهد که سود خالص ۱۶/۶۷ درصد و آب مصرفی نیز ۱۴/۲۰ درصد افزایش یافته است.

نتایج اجرای مدل در حالت سوم

نتایج مدل در این حالت (حالت سوم) به‌صورت جدول ۱۱ تغییر می‌یابد. مطابق این جدول، بهترین زمان برای کاهش آب مصرفی در کشت اول برای گیاه گندم دوره‌ای است که در آن Ky=۰/۱۵ باشد (در اواخر دورهٔ رویشی). از آنجا که ضریب واکنش به آب این دوره کمتر است و بازده برنامه‌ای نیز کمتر کاهش می‌یابد، مدل قادر خواهد بود سناریوهایی دیگر (غیر از آبیاری کامل) را برگزیند بدون اینکه سطح زیر کشت محصول کاهش یابد. برای گندم در کشت اول در دوره‌های Ky=۰/۳۳ (دورهٔ شکل‌گیری دانه) و Ky=۰/۲ (دورهٔ رسیدن)، کم‌آبیاری می‌تواند اجرا شود و مدل سناریوهای کم‌آبیاری را انتخاب می‌کند. اما در دورهٔ گل‌دهی، به‌دلیل اینکه ضریب واکنش به آب گیاه نسبت به کم‌آبیاری بالاست (Ky=۲/۱) مدل سناریوی آبیاری کامل را بر می‌گزیند و حتی در صورت کاهش سمت محدودیت‌ها (معادلهٔ ۵) مطابق جدول ۱۱، مدل باز هم سناریوی آبیاری کامل را بر می‌گزیند و از سطح زیر کشت گیاه کم می‌کند. برای گیاه ذرت نیز کم‌آبیاری می‌تواند در دوره‌های Ky=۰/۱ (دورهٔ استقرار) و Ky=۰/۳ (دورهٔ رسیدن) اجرا شود درحالی‌که در دوره‌های دیگر به‌دلیل بالا بودن ضرایب واکنش به آب، مدل فقط سناریوهای آبیاری کامل را انتخاب و از سطح زیر کشت گیاه نیز کم می‌کند.

جدول ۹- الگوی بهینهٔ کشت در اثر حذف سناریوهای بهینه از مدل (حالت اول)

سناریو	سطح زیر کشت (هکتار)
$X_{۲}$ (گندم، ۵ درصد* کاهش آب مصرفی در اواخر دورهٔ رشد رویشی)	۴/۰۴
$X_{۳}$ (گندم، ۱۰ درصد کاهش آب مصرفی در اواخر دورهٔ رشد رویشی)	۰/۴۷
$X_{۱۹}$ (گندم، ۱۵ درصد کاهش آب مصرفی در مرحلهٔ پر شدن دانه)	۱/۹۸
$X_{۸۳}$ (ذرت دانه‌ای، ۵ درصد کاهش آب مصرفی در مرحلهٔ رسیدن)	۲/۶۳
$X_{۸۶}$ (ذرت دانه‌ای، ۲۰ درصد کاهش آب مصرفی در مرحلهٔ رسیدن)	۱/۴۱
$X_{۱۳۰}$ (چغندرقند، ۲۰ درصد در دوره رسیدن)	۰/۵۱
$X_{۱۳۱}$ (برنج، آبیاری کامل)	۱/۲۰
مقدار آب مصرفی کل (متر مکعب)	۱۱۹۷۰۹/۶
سود خالص (تومان)	۱۵۰۹۱۰۱۰

* معرف درصد کم‌آبیاری در دوره ذکر شده است.

جدول ۱۰- الگوی بهینهٔ کشت در شرایط بدون محدودیت آب (حالت دوم)

سناریو	سطح زیر کشت (هکتار)
X_1 (گندم، آبیاری کامل)	۷/۰۰
X_{58} (ذرت دانه‌ای، آبیاری کامل)	۵/۸۰
X_{131} (برنج، آبیاری کامل)	۱/۲۰
مقدار آب مصرفی کل (متر مکعب)	۱۳۷۶۰۳/۴
سود خالص (تومان)	۱۷۶۱۸۱۸۰

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک مدل برنامه‌ریزی آبیاری ارائه شده است که الگوی بهینهٔ کشت را به‌گونه‌ای انتخاب می‌کند که در آن سود حداکثر و میزان آب مصرفی حداقل شود که از این قابلیت برای تعریف سناریوهای آبیاری برای محصولات مختلف در مدل استفاده شده است تا بتوان در شرایط محدودیت آب، که امکان تغییر در الگوی کشت نیز از لحاظ اجرایی وجود ندارد، محصولات را به سمت کم‌آبیاری سوق داد. نتایج مدل نشان می‌دهد که فعالیت‌های بهینه در کشت اول سال زراعی، گندم و در کشت دوم سال زراعی، ذرت دانه‌ای است و سایر گیاهان به نسبت‌های کمتری وارد برنامهٔ بهینه می‌شوند. مقایسهٔ الگوی بهینه کشت حاصل از مدل با الگوی کشت فعلی کشاورزان (بهره‌بردار نماینده) نیز نشان می‌دهد که آنها نیز قسمت اعظم زمین خود را در کشت اول سال زراعی به گندم و در کشت دوم سال زراعی به ذرت دانه‌ای اختصاص می‌دهند. بنابراین، مدل با تصمیمات کشاورزان جهت کشت گیاهان مختلف انطباق دارد. نتایج مدل در حالت عمومی و اول نشان می‌دهد که با حذف سناریوهای بهینه می‌توان مدل را به سمت کم‌آبیاری بیشتر سوق داد که در آن درصد کاهش سود، کمتر از کاهش آب مصرفی است این مطلب بیانگر این است که می‌توان تقاضای آب را کاهش و با صرفه‌جویی در آب مصرفی سطح زیر کشت محصولات را افزایش داد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به بررسی اثر محدودیت آب در دوره‌های مختلف رشد بر سطح زیر کشت گندم و ذرت دانه‌ای در کشت‌های اول و دوم اشاره کرد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بهترین زمان جهت اعمال کم‌آبیاری برای گندم در اواخر دورهٔ رویشی (Ky=۰/۱۵)، دورهٔ شکل‌گیری عملکرد (Ky=۰/۳۳)، دورهٔ رسیدن (Ky=۰/۲) و برای ذرت دانه‌ای در دورهٔ استقرار (Ky=۰/۱) و دورهٔ رسیدن (Ky=۰/۳) است. بنابراین، می‌توان گفت که مقادیر ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در دوره‌های مختلف رشد باید به‌عنوان شاخصی جهت اعمال کم‌آبیاری برای گیاهان مختلف نیز مد نظر قرار گیرد.

جدول ۱۱- الگوی بهینهٔ کشت و کاهش آب آبیاری در اثر کاهش سمت راست محدودیت‌ها (رابطهٔ ۴ و ۵) در دوره‌های مختلف رشد برای ۷ هکتار زمین (حالت سوم)

گیاه	دوره رشد		گندم		جو	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	چغندرقند	برنج	سود خالص (تومان)	درصد کاهش سود برنامه‌ای
گندم	اواخر دورهٔ رویشی	سناریو	X_{5}	X_{8}		X_{58}			X_{131}	۱۷۳۳۳۲۱۷	۱/۶۲
		سطح زیر کشت	۶/۳۸	۰/۶۲	۰	۵/۸۰	۰	۰	۱/۲۰		
گندم	دورهٔ گلدهی	سناریو	X_{1}			X_{58}			X_{131}	۱۶۲۲۶۰۸۰	۷/۹۰
		سطح زیر کشت	۵/۵۶		۰	۵/۸۰	۰	۰	۱/۲۰		
گندم	دورهٔ شکل‌گیری عملکرد	سناریو	X_{19}	X_{23}		X_{58}			X_{131}	۱۷۱۰۱۲۱۰	۲/۹۳
		سطح زیر کشت	۶/۰۵	۰/۹۵	۰	۵/۸۰	۰	۰	۱/۲۰		
گندم	دورهٔ رسیدن	سناریو	X_{25}	X_{31}		X_{58}			X_{131}	۱۷۲۰۴۴۴۰	۲/۳۵
		سطح زیر کشت	۲/۷۹	۴/۲۱	۰	۵/۸۰	۰	۰	۱/۲۰		
ذرت دانه‌ای	دورهٔ استقرار	سناریو	X_{1}			X_{64}			X_{131}	۱۷۱۹۷۹۴۰	۲/۳۹
		سطح زیر کشت	۷/۰۰		۰	۵/۷۳	۰	۰	۱/۲۰		
ذرت دانه‌ای	دورهٔ رویشی	سناریو	X_{1}			X_{58}			X_{131}	۱۵۷۰۵۵۷۰	۱۰/۸۶
		سطح زیر کشت	۷/۰۰		۰	۴/۴۷	۰	۰	۱/۲۰		
ذرت دانه‌ای	دورهٔ گلدهی	سناریو	X_{1}			X_{58}			X_{131}	۱۶۷۴۳۴۲۰	۴/۹۷
		سطح زیر کشت	۷/۰۰		۰	۵/۱۹	۰	۰	۱/۲۰		
ذرت دانه‌ای	دورهٔ شکل‌گیری عملکرد	سناریو	X_{1}			X_{58}			X_{131}	۱۶۵۶۹۷۰۰	۵/۹۵
		سطح زیر کشت	۷/۰۰		۰	۵/۰۷	۰	۰	۱/۲۰		
ذرت دانه‌ای	دورهٔ رسیدن	سناریو	X_{1}			X_{87}	X_{86}		X_{131}	۱۶۹۵۶۶۵۰	۳/۷۵
		سطح زیر کشت	۷/۰۰		۰	۰/۴۶	۵/۳۵	۰	۱/۲۰		

قدردانی

از مسئولان محترم سازمان آب منطقه‌ای فارس و شرکت بهره‌برداری آب به جهت مساعدت‌ها و پشتیبانی‌های همه جانبهٔ در اجرای این طرح تحقیقاتی سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Allen, R. G., Smith, H., Pereira, L. S. and Pruitt, W. D. 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating evapotranspiration. The 2nd Iranian Congress on Soil and Water Issues. Tehran. Iran. (in Farsi)

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Rome. Italy.

Arian, A. and Sepaskhah, A. R. 1991. Introduction and calibration of cropping yield simulation model (CRPSM). The 4th National Seminar on Irrigation & Evapotranspiration. University of Kerman. Kerman. Iran. (in Farsi)

Clarke, D. 1998. Cropwat for windows: User guide. University Southamton. Ver. 4.2.

Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 24. FAO. Rome. Italy.

Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome. Italy.

English, M. J. and Raja, S. N. 1996. Perspectives on deficit irrigation. J. Irrig. Drain. Eng. 108(2): 91-106.

Ghahraman, B. and Sepaskhah, A. R. 1997. Optimum deficit irrigation of cotton and potato fields in a semi-arid region. Iran. J. Sci. Technol. 21(4): 395-405.

Hill, R. W., Rayan, K. H., Buttars, R. L., Keller, A. A., Mulkary, L. M., Stewart, F. R. and Bomen, B. J. 1983. CRPSM yield simulation model. Utah State University. Logan. Utah.

Honar, T. and Sepaskhah, A. R. 1996. Calibration of CRPSM model for yield estimation and irrigation scheduling of corn. The 8th National Seminar of the Qualitative and Quantitative Management of Water Consumption. Iran. (in Farsi)

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.

Kuo, S. F., Merkley, G. P. and Liu, C. W. 2000. Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm. Agric. Water Manage. 45: 243-266.

Lyle, W. M. and Bordovsky, J. P. 1995. LEPA corn irrigation with limited water supplies. Trans. ASAE. 38(2): 455-462.

Meyer, S. J., Hubbard, K. G. and Wilhite, D. A. 1993. A crop specific drought index for corn: I, Model development and validation. J. Agron. 85, 388-395.

Mohammadi, A. and Torabi-Haghighi, A. 2006. Evaluation of water consuming in irrigation and drainage network of Doroodzan dam. Proceeding of 1st National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management. Ahwaz University. Ahwaz. Iran. (in Farsi)

Raju, K. S. and Kumar, D. N. 2004. Irrigation planing using genetic algorithms. Water Resour. Manage. 18(2): 163-176.

Rao, N. H., Sarma, P. B. S. and Chander, S. 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. Agric. Water Manage. 13, 25-32.

Sepaskhah, A. R. 1999. Study on calculating methods of evapotranspiration of agricultural crops. The 7th Seminar on Irrigation and Decrease of Evaporation. University of Kerman. Kerman. Iran. (in Farsi)

Sepaskhah, A. R. and Kamgar-Haghighi, A. A. 1997. Water use and yield of sugar beet grown under every other furrow irrigation with different irrigation intervals. Agric. Water Manage. 34, 71-79.

Sepaskhah, A. R. and Ghahraman, B. 2004. The effect of irrigation efficiency and uniformity coefficient on relative yield and profit for deficit irrigation. Bois. Eng. 87(4), 495-507.

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.

Sepaskhah, A. R. and Hosseini, S. N. 2007. Effects of alternate furrow irrigation and nitrogen application rates on winter wheat (Triticum aestivum L.) yield, water and nitrogen use efficiencies. Plant. Prod. Sci. 11(2): 250-259.

Sepaskhah, A. R. and Shaabani, M. K. 2007. Re-Evaluation of crop annual yield response factors for optimization of irrigation water allocation and cropping pattern in Doroodzan irrigation district. Integrated Water Resource Management. The Regional Workshop. Amman-Jordan.

Sepaskhah, A. R., Azizian, A. and Tavakoli, A. R. 2006. Optimal applied water and nitrogen for winter wheat under variable seasonal rainfall and planning senarios for consequent crops in a semi- arid region. Agric. Water Manage. 84, 113-122.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.9/No.3/Autumn 2008/P: **35-52**

Optimization of Water Use and Cropping Patterns Using Field Scale Deficit Irrigation: A Case Study in Doroodzan Irrigation Network, Fars Province

M. K. Shabani, T. Honar[*] and A. R. Sepaskhah

[*] Corresponding Author: Assistant Professor University of Shiraz, P. O. Box: 71946-84471, Shiraz, Iran. E-mail: toorajhonar@yahoo.com

In recognition of the value and limitations of available water resources in agriculture and the occurrence of periodic drought in Iran, water conservation and optimal usage of available water is essential. The main objective of this study was to optimize field water management and cropping patterns using deficit irrigation. The effect of reducing water consumption on different growth stages using different irrigation strategies for major crops (wheat, barley, corn, sugar beet, rice) in Doroodzan, Fars province was studied. Then, using these strategies, an objective function was defined and then optimized based on maximum net benefit using linear programming. The results of the study show that the optimal cropping pattern for the first season was mainly wheat and in the second season was corn. This study highlights the effect of water restriction in different growth stages on area cropping patterns for wheat and corn in the first and second seasons. The results show that the best time to perform deficit irrigation is in late vegetation, yield formation, and ripening stages for wheat and establishment and ripening stages for corn.

Key Words: Deficit Irrigation, Irrigation Strategies, Optimal Cropping Pattern, Surface Water Resource