نشریه دانش آب و خاک / جلد ۳۲ شماره ۱ صفحه‌های ۱ تا ۱۴/ سال ۱۴۰۱

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی سطح زیر کشت براساس حجم مخزن و شرایط کمبود آب قابل دسترس (مطالعه موردی: پایاب سد ارسباران)

فریبرز احمدزاده کلیبر*

تاریخ دریافت:۱۳۹۸/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶

استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir

چکیده

برنامه‌ریزی مناسب در استفاده از منابع محدود آب می‌تواند نقش موثری در افزایش تولیدات کشاورزی داشته‌باشد. در این تحقیق، سطح زیرکشت بهینه برمبنای حجم مخزن و شرایط کمبود آب قابل دسترس در دشت ارسباران تعیین شده‌است. ابتدا سود خالص حاصل از کشت در دوره آماری (۱۳۸۱-۹۰) با رابطه استوارت و ارزشهای اقتصادی منطقه بدست آمد. بهینه‌سازی تخصیص آب به روش برنامه‌ریزی خطی برای هر سال آماری جهت بیشینه نمودن تابع هدف (سود خالص) و با محدودیت‌های موجود اجرا گردید. بهینه‌سازی برای پنج مقدار آب آبیاری قابل دسترس (NIV) صورت گرفت و برای هرکدام، مساحت‌های زیر کشت بهینه سالیانه برای گیاهان پیشنهادی بدست آمد. با بهینه‌سازی سطوح کشت سالیانه یک فرم بهینه ثابت نیز برای منطقه استخراج گردید. نتایج نشان داد تغییرات سود خالص در واحد حجم آب با افزایش آب قابل دسترس در هر دو حالت بصورت سهمی درجه دو کاهش یافته و در تمام NIV ها سود سطح کشت متغیر به مقدار ثابت ۷٪ بیشتر می‌باشد. همچنین سود خالص کل برای سطح کشت بهینه متغیر سالیانه برای آب قابل دسترس ۸ میلیون مترمکعب، ۸٪ بیشتر از سطح کشت ثابت بوده و این مقدار برای ۱۰ تا ۱۶ میلیون مترمکعب، بترتیب از ۱۱٪ تا ۱۸٪ بصورت خطی افزایش می‌یابد که نشان از برتری نسبی سطح کشت بهینه متغیر بدون در نظر گرفتن مزایای مدیریتی حالت ثابت از قبیل طراحی، آبیاری و مکانیزاسیون می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی، تخصیص آب، سطح زیر کشت، سود خالص

Optimization of Cultivated Area Based on Reservoir Volume and Available Water Scarcity Conditions (Case Study: Arasbaran Dam Downstream)

F. Ahmadzadeh Kaleybar *

Received: June 1, 2019 Accepted: August 16, 2020
Assist. Prof., Department of Water Sciences and Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
*Corresponding Author, Email: f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir

Abstract

Suitable planning for the use of limited water resources can increase the production of agricultural crops effectively. In this research, optimal cultivation areas were determined based on reservoir volume and available water scarcity conditions in Arasbaran plain. At first, the net benefit from cultivation in the period (2002-2011) obtained using the Stewart model and the region economic values. Optimal water allocation program was run using the linear programming for each time period of year for maximizing the net benefit objective function considering the restrictions. Optimization performed for five scenarios of available irrigation water (NIV) and for each of them, optimal annual cultivated areas for the proposed plants were obtained. By optimizing the annual cultivated areas, a constant optimal form was also obtained for the region. The results showed that the net benefit changes per unit volume of water, decreased with the increase of available water in both cases as a second degree curve and in all NIVs the benefit of the variable cultivated area was 7% higher. Also, the total net benefit of the annual optimal cultivated area for available water of 8 million cubic meters was 8% more than the fixed cultivated area, and for 10 to 16 million cubic meters, this value increases linearly from 11% to 18%, that shows the relative superiority of the variable optimal cultivated area without considering the management benefits of the fixed mode such as design, irrigation and mechanization.

Keywords: Cultivated area, Liner programming, Net benefit, Optimization, Water allocation

مقدمه:

کمبود آب یکی از مشکلات اصلی برای استفاده موثر در کشاورزی است و رقابت برای دسترسی به آب به سرعت در حال افزایش است، بنابراین، داشتن درک بهتر از نیاز آبی گیاهان و مدیریت بهتر آب آبیاری موجب افزایش درآمدهای حاصله خواهد بود. زمانیکه آب آبیاری ناکافی است این مسئله بیشتر ملموس بوده و برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند میزان محصول را افزایش دهد (احمدزاده ۲۰۱۲). واکنش گیاهان به آب در طی دوره رشد یکسان نبوده و کمبود آب در یک مرحله از رشد گیاه ممکن است کاهش بیشتر محصول را نسبت به همان مقدار کمبود در مراحل دیگر در پی داشته و ضروری است تا علاوه بر تخصیص بهینه آب بین گیاهان مختلف کمبود آب در طول دوره رشد یک گیاه نیز بطور بهینه توزیع شود. زمانیکه چندین گیاه پیشنهادی در شرایط یکسان در یک سال زراعی می خواهند کشت شوند دو مولفه مهم چگونگی تخصیص آب و چگونگی تخصیص زمین باید در برنامه‌ریزی آبیاری محاسبه شوند، زیرا استراتژی صحیح تخصیص زمین و آب در هر سطحی منجر به افزایش درآمد پروژه خواهد بود (سرینیواسا و همکاران ۲۰۰۶).

با شناخت منحنی تغییرات عملکرد محصول با آب مصرفی، رابطه بین تولید محصول با میزان آب مصرفی مشخص می‌گردد (هارگریوز و سامانی ۱۹۸٤ و دورنبوس و کاسام ۱۹۷۹). در این منحنی تا نقطه معینی با افزایش آب مصرفی میزان عملکرد نیز افزایش می‌یابد. به‌ازای مصرف آب در سطوح بالاتر، منحنی شروع به برگشت می‌کند و نزولی می‌شود که نتیجه عوارض آبیاری بیش از اندازه می‌باشد. (پیری و همکاران ۱۹۷۹). اگر میزان آب مصرفی و تناوب آبیاری هر دو بالا باشد، تبخیر از سطوح خاک مرطوب نیز افزایش می‌یابد (هنکس ۱۹۷٤ و هنکس و هیل ۱۹۸۰). نتیجه اینکه، راندمان کاربرد

آب با افزایش آب مصرفی از حد مشخص، کاهش می‌یابد و کاهش تهویه محیط ریشه، آبشوئی مواد غذائی، بیماری‌ها و آفات نباتی که بیشتر در خاکهای مرطوب دیده می‌شوند نیز سبب کاهش عملکرد می‌شود (استقمن و همکاران۱۹۷۷). در این راستا، فرمول‌های زیادی (هال و باچر ۱۹٦۸، هیلر و کلارک ۱۹۷۱، جنسن ۱۹٦۸، مین هاس و همکاران ۱۹۷٤، استوارت و هاگان ۱۹۷۳) برای تخمین روابط بین عملکرد محصول و آب آبیاری پیشنهاد شده‌اند. منوچی و مکارلی (۱۹۸۸-۱۹۸۹) استفاده از فرمول استوارت (استوارت و همکاران ۱۹۷٤) به فرم حاصل‌ضربی را به منظور محاسبه تغییرات افت محصول با تغییر مراحل رشد پیشنهاد کردند. فرمول حاصل‌ضربی مشابهی نیز توسط رائس و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شده است ایشان همچنین نحوه استفاده از این فرمول را در کاشت گیاهان مزرعه‌ای توصیف کرده‌اند.

در راستای مدیریت مصرف آب مدل Budget بعنوان یک ابزار قدرتمند معرفی شده است. این مدل در سال ۲۰۰۲ در دانشکده کشاورزی و علوم بیولوژیک کاربردی و موسسه زمین و مدیریت آب در بلژیک تهیه و ارائه شد (رائس ۲۰۰۲). پس از آن به دلیل قدرت بالای مدل در شبیه‌سازی روابط آب و خاک و گیاه مورد استفاده محققان این علم قرار گرفت.

یکی از راهکارهای تشخیص حد بهینه آب مصرفی استفاده از مدل های بهینه سازی می‌باشد که تاکنون بطور وسیعی در تحلیل سیستم های منابع آب مورد استفاده قرار گرفته اند. کورتیقنانی و سورینی (۲۰۰۹) شرایط حاکم بر اراضی آبی در اتحادیه اروپا را با سه عنوان افزایش قیمت آب، کاهش آب در دسترس و تغییر قیمت محصولات تولید شده با یک مدل برنامه ریزی

ریاضی (PMP) بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل رشد گیاه FAO در منطقه مدیترانه به نتایجی دست یافتند که نشان داد افزایش قیمت آب منجر به کم آبیاری نمی-شود بلکه کشاورزان زمانی صرفه جویی در آب را پیش رو می‌گیرند که آب در دسترس کاهش یابد یا قیمت محصولات آبیاری شده بالا رود. ناگش و همکاران (۲۰۰٦) یک مدل الگوریتم ژنتیک را برای بدست آوردن تخصیص بهینه آب از یک منبع آبیاری بکار بردند. هدف آنها بیشینه کردن محصولات گیاهان در اراضی آبیاری شده بود. مدل برای یک مخزن تک منظوره در ایالت کارناتاکای هند بکار رفت. راه حل بهینه بدست آمده شبیه نتایج بدست آمده از برنامه ریزی خطی بود. نادر و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تخصیص بهینه آب سد مهاباد با استفاده از تلفیق روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی و برنامه‌ریزی آرمانی پرداختند که در نهایت گزینه تامین آب بخش کشاورزی با وزن نهایی ۰/۳٦ نسبت به دیگر گزینه‌ها از ارجحیت بیشتری برخوردار بود. افزون بر این، الگوی کشت بهینه نشان داد که سطح زیر کشت گندم در تمامی اولویت‌ها از بیشترین مقدار برخوردار است. سرینیواسا و همکاران (۲۰۰٦) مدلی را برای برنامه ریزی آبیاری بهینه برای یک مطالعه موردی در هند توسعه دادند. نیاز آبی گیاه از مدلهای تبخیر و تعرق پنمن مانتیس بدست آمد و توابع تولید از مدل تخصیصی میان فصلی گیاه واحد استخراج شد، با اجرای مدل، تخصیص بهینه آب و زمین با بیشینه کردن سود خالص سالانه با سطوح مختلف آب قابل دسترسی انجام می گرفت. نتایج زیر از تحقیق ایشان برای منطقه مورد مطالعه بدست آمد: ۱- با کم آبیاری یک افزایش اساسی در سود خالص سالانه و افزایش کل اراضی تحت کشت حاصل می‌شود بویژه زمانیکه آب در دسترس کم باشد. ۲- زمانیکه آب در دسترس کم باشد مدل بیشترین محدودیت را برای فلفل و پنبه دیکته می‌کند و اراضی اختصاص یافته به سورگوم افزایش می‌یابد. اسموت و گورانتی‌وار (۲۰۰٦) با یک مطالعه موردی در هند پتانسیل روش‌های بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و زمین را بیان کرده و برنامه‌های تخصیصی برای بهینه‌سازی

پارامترهای مختلف (تولید و یکنواختی پخش) را توسعه دادند. این عمل برای استراتژی‌های مدیریتی مختلف بر پایه فواصل آبیاری و نوع پخش آب با الگوی کشت ثابت و متغیر صورت گرفت. نتایج نشان داد که دو هدف اجرایی تولید و تساوی در پخش آب در این مورد (و موارد دیگر) مخالف هم بوده و یکنواختی پخش آب شاید کاهش ارزش تولید را در برداشته باشد. سپاسخواه و اکبری (۲۰۰۵) برنامه‌ریزی کم آبیاری را تحت بارش‌های متغیر فصلی برای دو گیاه پنبه (تابستانه) و گندم (زمستانه) بررسی کردند. یک رابطه اصلاح شده برای تخمین مقدار آب آبیاری (Ww) برای سال‌های متفاوت با بارش‌های فصلی مختلف تعریف شد. بر پایه این رابطه اصلاحی مقدار Ww با افزایش بارش فصلی کاهش می‌یابد. برای دو گیاه بارش فصلی با رابطه پیشنهادی محاسبه می‌شود، در نتیجه مقدار آب لازم آبیاری Ww بدست آمده و از کل آب آبیاری در دسترس مساحت تحت کشت استخراج می‌گردد. گورانتی‌وار و اسموت (۲۰۰۳) تحقیقی ارائه کردند که نشان داد زمانی‌که منابع آبی محدود هستند اختصاص بهینه آب به گیاهان متفاوت در یک برنامه آبیاری بسیار ارزشمند خواهد بود ضمن آنکه نوع خاک اراضی، دخالت مستقیم در این امر دارد همچنین اختصاص بهینه آب شاید منجر به استفاده از آب‌های هدر رفته برای حصول ماکزیمم محصول باشد. در تحقیق ایشان، یک روش سه مرحله ای مبتنی بر کم آبیاری با استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی معرفی شد. هاورایی و عزیز (۲۰۰۱) یک مدل برنامه ریاضی جهت الگوی کشت بهینه تحت کم آبیاری در مناطق خشک ارائه کردند. در این تحقیق گیاهان با هدف افزایش کل زمین زراعی و سود اقتصادی ممکن سنجیده شدند. مدل با سیاست کاربرد بهینه آب آبیاری برای هر مرحله رشد، اراضی و آبیاری اختصاص داده شده را به هم مربوط می‌کند. همچنین مدل الگوی کشت بهینه را برای مناطق مورد مطالعه به‌منظور تخصیص آب کافی برای گیاه محاسبه می‌نماید. انگلیش و اورلوب (۱۹۷۸) الگوریتمی برای استفاده بهینه از آب برای محصول ارائه کرده و در آن بهینه سازی را در دو حالت محدودیت آب وبدون محدودیت آب در نظر گرفتند. در این تحقیق، درآمد خالص از هر هکتار بصورت تابعی از قیمت محصول، عملکرد، هزینه‌ها و آب مصرفی تعریف شده و سطح آبیاری شده نیز بصورت تابعی از آب مصرفی بیان گردید و مقدار آب مصرفی که حداکثر عملکرد را به‌همراه داشته باشد با مشتق‌گیری از تابع تولید نسبت به آب مصرفی بدست آمد. نتایج تحقیقات نشان داد که در حالت محدودیت منابع آب با بکارگیری ۵۰ درصد حداکثر عمق آب مصرفی (۵۰ درصد آبیاری کامل) سود خالص فقط ۱۳ درصد کاهش می یابد. همچنین نتیجه گیری شد که مقایسه عملکرد در واحد سطح معیار مناسبی برای مقایسه نبوده و باید سود خالص مدنظر باشد. منوچی و مکارلی (۱۹۹٤) از یک برنامه تئوری ریاضی برای بهینه سازی کم آبیاری در منطقه آپریتبر والی در مرکز ایتالیا استفاده کردند. در این برنامه، از فرمول حاصل ضربی استوارت استفاده شده و رابطه بین میزان عملکرد محصول و مقدار آب بکار رفته برای محصولات مختلف تعیین شده است. همچنین تعدادی از محققان مانند رائو و همکاران (۱۹۹۰)، سانانتارا و رامیرز (۱۹۹۷)، پائول و همکاران (۲۰۰۰)، رکا و همکاران (۲۰۰۱)، تکسیرا و مارینو (۲۰۰۲)، اماماهش و راجو (۲۰۰۲)، تخصیص بهینه منابع آب محدود برای آبیاری در یک محیط چند کشتی را بررسی و به نتایج مطلوبی رسیده‌اند.

هدف تحقیق حاضر، استفاده از مدل بهینه‌سازی با برنامه‌ریزی ریاضی است که بتواند برای تخصیص آب محدود در دسترس سالیانه مورد استفاده قرار گرفته و سود خالص سالیانه را بیشینه نماید. در تحقیق حاضر روشی ارائه شده است که هدف آن تعریف معیارهای بهینه‌سازی برای کم‌آبیاری مزرعه است و از داده‌های مشاهداتی و محاسباتی پارامترهای مختلف موثر (بارش، تبخیر و تعرق، آب مصرفی، خصوصیات واحد آب و خاک و...) بعنوان اطلاعات پایه استفاده می‌نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه دشت ارسباران است که در شمالغرب ایران و در عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ٤٧ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد. بارش های منطقه تحت رژیم نیمه‌خشک با میانگین بارش سالانه ۲۷۸ میلی‌متر بوده و خاک منطقه عموماً برنگ قهوه‌ای تیره با بافت لومی رسی سنگین می‌باشد. میزان EC خاک در اعماق مختلف بین ۱ الی ٤ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بوده و pH آن حدود ۸ است. سیستم آبیاری استفاده شده در پای سد کلاً تحت فشار می‌باشد. محدودیت منابع آب موجود در این منطقه سبب شده است تا از محدوده ۷۳۰۰ هکتاری این دشت مستعد، فقط آبیاری ۳۰۰۰ هکتار از آن برای احداث سد ارسباران برنامه‌ریزی گردد. خشکسالی‌های پی در پی در سال‌های اخیر این فرصت را نیز از اهالی منطقه گرفت و کاهش جریان‌های ورودی به مخزن سد موجب گردید تا فقط ۱۲۰۰ هکتار اراضی پایاب سد جهت زراعت تجهیز گردیده و مجوز کشت اخذ نمایند. در مرحله نخست، مقادیر مختلف آب مصرفی برای گیاهان پیشنهادی الگوی کشت (گندم، جو، پنبه و یونجه) برای سال‌های آماری مورد مطالعه وارد مدل BUDGET که برای سال ۹۱-۹۰ این مدل برای منطقه مورد مطالعه کالیبره و صحت‌سنجی شده است (احمدزاده و همکاران ۲۰۱۲)، می گردد و برای دستیابی به حداکثر سود، مقدار آب مصرفی متناسب با بیشترین درصد عملکرد شبیه سازی شده یادداشت می‌شوند. در مدل BUDGET با ترکیب مناسبی از روابط معتبر در فرایندهای جذب آب توسط ریشه، حرکت آب در پروفیل خاک و اتمسفر استفاده شده و از فرمول FAO, KY استفاده می‌گردد (رائس و همکاران ۲۰۰۵). در مدل BUDGET کاهش نسبی محصول که در سطوح مختلف تنش آبی در مراحل مختلف دوره رشد مورد انتظار است با روش FAO,KY (دورنبوس و کاسام ۱۹۷۹) محاسبه می‌شود. در روشKY ارتباط بین تنش آبی در یک مرحله رشد خاص و محصول مورد انتظار با یک فرمول خطی به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_m}\right)=KY_i\left(1-\frac{ETact_i}{ETcrop_i}\right) \qquad [۱]$$

که در آن i مرحله رشد گیاه، Y_a عملکرد واقعی محصول (تن در هکتار)، Y_mعملکرد ماکزیمم محصول (تن در هکتار)، $ETact_i$ تبخیر و تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر)، $ETcrop_i$ تبخیر و تعرق ماکزیمم گیاه (میلی‌متر) و KY فاکتور عکس العمل گیاه می‌باشد.

نیاز به ورودی‌های سهل‌الوصول، قوی بودن مدل و توانایی لحاظ تاثیر تنش آبی در طی مراحل مختلف رشد، مدل را برای طراحی استراتژی‌های کم‌آبیاری بسیار مفید ساخته است. جزئیات بیشتر از مفاهیم، روابط و روش های استفاده برای شبیه‌سازی تولید در BUDGET را می‌توان در راهنمای مرجع بدست آورد (کنجابائو و همکاران ۲۰۱۳).

در این مطالعه، ورودی‌های آب و هوایی مدل عبارتند از تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه که باروش FAO پنمن مانتیس (آلن و همکاران ۱۹۹۸) محاسبه گردید و بارش ماهیانه که از داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی مجاور منطقه مورد مطالعه (ایستگاه اصلاندوز) اخذ شد. جهت ورود مشخصات گیاهی مانند طول دوره رشد، ضریب گیاهی(Kc)، عمق ریشه(Zr)، فاکتور تخلیه آب خاک(P)، طول دوره های حساسیت و فاکتور عکس العمل محصول(KY)، از مقادیر شاخص ارائه شده توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) و دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) و مشاهدات منطقه‌ای استفاده گردید. یک الگوی جذب آب ٤۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصدی توسط ریشه در مدل انتخاب گردید. خصوصیات خاکشناسی نیز مانند تعداد لایه ها، بافت و عمق لایه ها که از آزمایشات صحرایی حاصل شده بود، وارد مدل گردید.

در مرحله دوم، یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی (تابع هدف، محدودیت‌ها و ...) برای بهینه‌سازی استفاده از منابع آب پیشنهاد می‌گردد و در نهایت (مرحله سوم) یک راه حل بهینه با پایه سالیانه برای تعریف سطوح زیر

کشت ثابت و متغیر با حداکثر سود خالص برای منطقه مورد مطالعه استخراج می‌گردد. سود خالص هر واحد خاک –گیاه از رابطه استوارت (۱۹۹٤) طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$NB=Ps.y_a-[C_0+C_1.y_a+(C_2.V/EFI)+(C_3.V/EFI)+C_4.N] \quad [۲]$$

که در آن NB سود خالص محصول (هکتار/ریال)، Ps قیمت فروش محصول (تن/ریال)، y_a مقدار محصول واقعی (هکتار/تن)، C_0 هزینه تولید در واحد زمین (هکتار/ریال)، C_1 هزینه متغیر تولید (تن/ریال) که شامل هزینه‌هایی می‌گردد که با افزایش تولید مقدار آنها افزایش یافته و نسبت به میزان تولید متغیر می‌باشند، C_2 قیمت آب آبیاری (مترمکعب/ریال)، V حجم آب آبیاری در دسترس خالص در واحد سطح (هکتار/مترمکعب)، EFI راندمان کلی آبیاری، C_3 قیمت پخش آب آبیاری (مترمکعب/ریال) که متناسب با کل حجم آب مصرفی بوده و برای گیاهان مختلف با توجه نیاز آبی و ساعات آبیاری متفاوت می‌باشد، C_4 قیمت ثابت هر آبیاری (هکتار*N/ریال) که با توجه به عملیات مشابه در سیستم‌های یکسان آبیاری، برای هر مورد آبیاری ثابت می‌باشد و N تعداد دفعات آبیاری می‌باشد.

در این تحقیق، مقادیر هزینه و درآمد در منطقه مورد مطالعه در طول سالهای آماری(۹۰-۱۳۸۱) برای حل مسئله از طریق اطلاعات ثبت شده در وزارت جهاد کشاورزی برای استان آذربایجانشرقی و اطلاعات مرکز تحقیقات کشاورزی مغان برای محاسبه سود خالص سالانه برای هر گیاه منفرد در واحد زمین (NB) استفاده گردیده است. راندمان کاربرد (EFI) برای آبیاری بارانی منطقه مورد مطالعه برابر ۷۰٪ گرفته شده است. تابع هدف برای حل محاسبه سود کل بصورت رابطه زیر تعریف گردید:

$$Z= (NBw.Aw)+(NBb.Ab)+(NBa.Aa)+(NBc.Ac) \quad [۳]$$

برنامه‌ریزی ریاضی، تابع فوق را برای بیشینه کردن Z معرفی می نماید. که درآن Z سود کل حاصل از کاشت کل اراضی و NBw, NBb, NBc, NBa, بترتیب سود خالص مربوط به هر هکتار از گیاه گندم، جو، یونجه و پنبه که از رابطه ۲ بدست می‌آید و Ac, Ab, Aw ,Aaبترتیب مساحت اختصاص یافته به گیاه گندم، جو، یونجه و پنبه می‌باشد. با انجام این بهینه سازی خطی متغیر های تصمیم که عبارتند از مساحت بهینه زیر کشت برای هر یک از محصولات (سطوح بهینه اقتصادی) تعیین می‌گردد.

کشاورزی در هر منطقه‌ای دارای یکسری محدودیت‌های عمومی و خصوصی می‌باشد. شرایط زیر نیز بعنوان محدودیت‌های کشت در منطقه مورد مطالعه معرفی می گردد:

$$Aw+Ab+Ac+Aa =1200ha$$
$$Vw.Aw+Vb.Ab+Vc.Ac+Va.Aa =NIV$$
$$0<Aw<600ha$$
$$100<Aa<1200ha$$
$$100<Ab<1200ha$$

در نامعادلات فوق Va ,Vc ,Vb ,Vw به ترتیب مقدار آب مصرفی گیاه گندم، جو، یونجه و پنبه در هر هکتار می‌باشد. شرط اول بیانگر کل اراضی تحت کشت است که باید برابر ۱۲۰۰ هکتار باشد. شرط دوم بیان می‌کند آب مورد استفاده در ۱۲۰۰ هکتار باید برابر کل حجم خالص آب آبیاری در دسترس(NIV) باشد. شرط سوم بدلیل کاهش چشمگیر محصول در زمانیکه گندم برای دو سال متوالی در یک مزرعه کشت شود، تحمیل می‌گردد. شرط چهارم و پنجم جهت کشت حداقل ۱۰۰ هکتار یونجه و ۱۰۰ هکتار جو برای تامین نیازهای دامپروری منطقه می‌باشد. با توجه به اینکه ظرفیت کل مخزن سد ارسباران ۲۳ MCM بوده و تغذیه آن در سالهای اخیر بین ۱۰ الی ۱۲MCM در سال اتفاق افتاده‌است، مطالعات انجام یافته در این تحقیق برای ۸ الی ۱٦ میلیون مترمکعب انجام گرفت. چون تابع هدف و قیود نسبت به متغیرهای تصمیم گیری خطی هستند پس مدل برنامه ریزی خطی بعنوان بهترین مدل برای حل مسئله فوق انتخاب و برای حل آن از گزینه Solver در محیط Excel استفاده شده‌است. سطوح کشتی که از این طریق محاسبه می‌گردد برای هر سال بطور مجزا محاسبه شده و سال به سال متغیر خواهد بود لذا آنرا سطح کشت متغیر سالیانه می‌نامیم.

ناتوانی در پیش‌بینی آب و هوا در ابتدای سال زراعی و تعیین حجم آب مورد نیاز گیاهان در سال مورد نظر اجبار تعیین یک ترکیب آماری از سطوح زیر کشت متغیر سالانه و تعریف سطح کشت ثابت را بدیهی می‌سازد. این مسئله به مدیران اجازه خواهد داد تا ابزارهای تولید (مکانیزاسیون، توسعه سیستم‌های آبیاری و...) را بطور صحیح اداره نمایند. جهت رسیدن به سطح کشت ثابت منطقه، تابع جدیدی بصورت مجموع سود های خالص سالانه به شرح زیر تعریف گردید:

$$W = \sum_{i=1}^{10} NB_i \qquad [۴]$$

که در آن i عبارتست از سال های آماری مورد مطالعه (۹۰-۱۳۸۱) و NB_i سود خالص حاصل از مساحت‌های کشت متغیر سال i ام (هکتار/ریال) می‌باشد. برای بیشینه کردن تابع فوق (W) روش‌های متفاوتی از میانگین‌گیری آماری ساده گرفته تا تحلیل فرکانس وجود دارد که در این تحقیق از روش میانگین‌گیری آماری به دلیل سادگی کاربرد و ریسک پذیری پایین استفاده شده است.

نتایج و بحث

با ثبت اطلاعات ورودی در مدل BUDGET و وارد نمودن عمق آبیاری‌های متفاوت (Iw) بر مبنای حجم آب قابل دسترس در سال مربوطه، عملکرد بیشینه مورد انتظار (Ya) از گیاهان پیشنهادی الگوی کشت (گندم، جو، پنبه و یونجه) برای هر سال آماری تعیین گردید بطوریکه برای هر سال به‌ازای مقدار معین آب آبیاری که درصد محصول مورد انتظار به بیشترین مقدار خود می‌رسید این دو مقدار در جداول ۱ تا ٤ ثبت گردید. یک سیستم آبیاری فقط در حالتی دارای برنامه‌ریزی اقتصادی بهینه خواهد بود که در بیشینه کردن تفاضل هزینه-درآمد تولید با محدودیت‌های تحمیل شده به سیستم موفق باشد. با استفاده از رابطه ۲ بعنوان رابطه هزینه-درآمد تعریف شده، نتیجه محاسبات سود خالص مربوط به گیاهان الگوی کشت پیشنهادی نیز در جداول ۱ تا ٤ نشان داده شده‌است.

جدول۱- سود خالص محاسبه شده برای گندم برای سالهای ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰.

سال	سود خالص (هکتار/ هزارریال)	قیمت فروش (تن/ هزارریال)	حجم آب در دسترس (هکتار/مترمکعب)	درصد محصول مورد انتظار	محصول واقعی (هکتار/تن)
۱۳۸۱	۲۷۸٤/٦	٦٥۰	٤٥۰۰	۰/۸۸	۷/۰٤
۱۳۸۲	۳۲٦٦/٥	۸۰۰	٥۰۰۰	۰/۸۷	٦/۹٦
۱۳۸۳	٤۱۷٤/۷	۹٥۰	٦۰۰۰	۰/۹	۳/٥۰
۱۳۸٤	٦٤٦۸/۹	۱۲۰۰	۲۰۰۰	۰/۹۷	۷/۷٦
۱۳۸٥	٦۳٦۸/٥	۱٤۰۰	٦۰۰۰	۰/۹٥	۷/٦۰
۱۳۸٦	۷۰۷۰/۱	۱٦۰۰	٥۰۰۰	۰/۹۲	۷/۳٦
۱۳۸۷	٥۸٥۳/۸	۱۸۰۰	۸٥۰۰	۰/۸٥	٦/۸۰
۱۳۸۸	۹٤۲۲/۹	۲۱۰۰	۳٥۰۰	۰/۹	۷/۲۰
۱۳۸۹	۱۱۰۸٤/۷	۲٥۰۰	٥۰۰۰	۰/۹	۷/۲۰
۱۳۹۰	۱۱۹۰۳/۳	۳۰۰۰	٥٥۰۰	۰/۸۱	٦/٤۸

جدول۲- سود خالص محاسبه شده برای جو برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰.

سال	سود خالص (هکتار/ هزارریال)	قیمت فروش (تن/ هزارریال)	حجم آب در دسترس (هکتار/مترمکعب)	درصد محصول مورد انتظار	محصول واقعی (هکتار/تن)
۱۳۸۱	۲۳۳۳/۷	٥٥۰	٥٥۰۰	۰/۸۸	٦/۹۰
۱۳۸۲	۲۸۸۹/٤	۷٥۰	٥٥۰۰	۰/۸٥	٦/۸۰
۱۳۸۳	۳۲۷۸/۰	۸٥۰	٥٥۰۰	۰/۸٦	٦/۸۸
۱۳۸٤	٥۳٦٦/۹	۱۱٥۰	۲۰۰۰	۰/۹	۷/۲۰
۱۳۸٥	٦٥۷۲/۲	۱٤٥۰	٥٥۰۰	۰/۸۹	۷/۱۲
۱۳۸٦	۹۰۳۷/٦	۱۷۰۰	٤٥۰۰	۰/۹۸	۷/۸٤
۱۳۸۷	٦۸۲۱/۲	۱۸٥۰	۸٥۰۰	۰/۷۸	٦/۲٤
۱۳۸۸	۱۲۷۰۰/۸	۲۳۰۰	۳۰۰۰	۰/۹۸	۷/۸٤
۱۳۸۹	۲۲۸۱۰/۳	۳۷۰۰	٤٥۰۰	۰/۹۸	۷/۸٤
۱۳۹۰	۱۰۳۸٤/۷	۲۸۰۰	٥٥۰۰	۰/۷۷	٦/۱٦

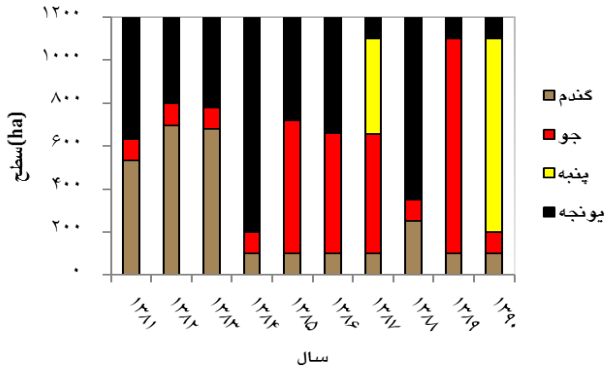
جدول۳- سود خالص محاسبه شده برای پنبه برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰.

سال	سود خالص (هکتار/ هزارریال)	قیمت فروش (تن/ هزارریال)	حجم آب در دسترس (هکتار/مترمکعب)	درصد محصول مورد انتظار	محصول واقعی (هکتار/تن)
۱۳۸۱	۲۷۱۶/۰	۲۱۰۰	۸۰۰۰	۰/۸۸	۳/۰۸
۱۳۸۲	۳۰۰۱/۸	۲۵۰۰	۱۲۰۰۰	۰/۸۷	۳/۰۵
۱۳۸۳	٤۹۱٦/۲	۲۹۵۰	۱۱۵۰۰	۰/۹۳	۳/۲٦
۱۳۸٤	۵۷۰٦/۰	۳۳۰۰	۳۰۰۰	۰/۹۷	۳/۳۹
۱۳۸۵	۵٤۹۳/۹	۳٦٤۰	۱۱۵۰۰	۰/۹۵	۳/۳۳
۱۳۸٦	٦٦۳۷/۷	٤۳۰۰	۱۰۵۰۰	۰/۹٦	۳/۳٦
۱۳۸۷	۹۷۲۷/۷	۵۵۵۰	۱٤۰۰۰	۰/۹۵	۳/۳۲
۱۳۸۸	۱۲۷۹۰/۷	٦۵۰۰	۹۰۰۰	۰/۹۷	۳/٤۰
۱۳۸۹	۱۲٦٤۹/۵	۷٤۰۰	۱۲۰۰۰	۰/۹۵	۳/۳۳
۱۳۹۰	۱٦۹۳۹/۵	۹۸۰۰	۱۱۰۰۰	۰/۸۷	۳/۰٤

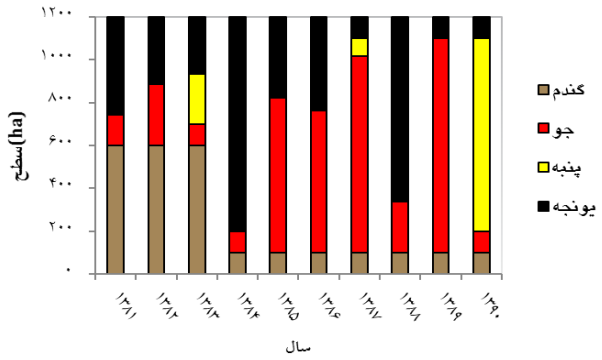
جدول۴- سود خالص محاسبه شده برای یونجه برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰.

سال	سود خالص (هکتار/ هزارریال)	قیمت فروش (تن/ هزارریال)	حجم آب در دسترس (هکتار/مترمکعب)	درصد محصول مورد انتظار	محصول واقعی (هکتار/تن)
۱۳۸۱	۷۱۵۳/٦	۱۲۰۰	۲۳۰۰۰	۰/۹۵	۸/۵۵
۱۳۸۲	٦۸۰۲/۲	۱۵۰۰	۲۳۰۰۰	۰/۸۲	۷/۳۸
۱۳۸۳	۸۲٦۷/۹	۱۷۵۰	۲۷۰۰۰	۰/۸٦	۷/۷٤
۱۳۸٤	۱۳۸٦٤/۷	۲۰۵۰	۵۵۰۰	۱.۰۰	۹/۰۰
۱۳۸۵	۱۱٤۹۲/٦	۲٤۰۰	۲۵۰۰۰	۰/۹۱	۸/۱۹
۱۳۸٦	۱٦۲۷۰/۲	۲۹۵۰	۲٤۰۰۰	۰/۹۸	۸/۸۲
۱۳۸۷	۷۵۲۱/۵	۳۳۰۰	٤۲۰۰۰	۰/۷۸	۷/۰۲
۱۳۸۸	۲۰۳٦٤/۸	۳۷۰۰	۱۵۰۰۰	۰/۹۸	۸/۸۲
۱۳۸۹	۱۹۳۷۵/۷	٤۱۰۰	۲۵۰۰۰	۰/۹۸	۸/۸۲
۱۳۹۰	۱۰۱۲۰/۲	٤۳۰۰	۲۸۰۰۰	۰/۷۷	٦/۹۳

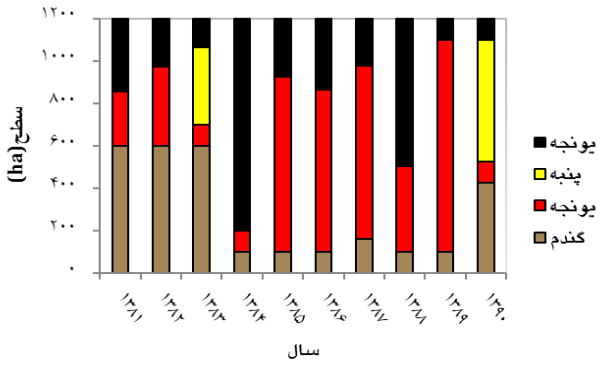
در مرحله بعد، تابع هدف ارائه شده در رابطه ۳ پس از وارد کردن مقادیر سود خالص محاسباتی (ستون دوم جداول ۱ تا ٤) و تحت محدودیت‌های موجود برای هر سال بهینه (بیشینه) می‌گردد و به این صورت مساحت‌های بهینه مربوط به هر کشت برای هر سال (سطح کشت بهینه سالیانه) بدست می‌آید. شکل ۵ بصورت گرافیکی نتایج اخذ شده از کاربرد برنامه‌ریزی خطی برای بهینه سازی تابع هدف با NIV=16 MCM که نقش آن در قید دوم مسئله بهینه‌سازی بعنوان کل آب در دسترس بیان شده‌است را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در شکل ۵ سطح کشت بهینه برای هر سال زراعی نشان داده شده است یعنی مساحت‌های زیر کشتی که حداکثر سود خالص را تولید می‌کند. در شکل های ٦ تا ۹ مساحت‌های زیر کشت بهینه برای NIV=14,12,10,8 MCM نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که تغییرات سطوح زیر کشت بهینه از سالی به سال دیگر بدلیل مولفه‌های تصادفی مسئله که مربوط به داده‌های آب و هوایی است، وجود دارد. سود خالص حاصل نیز متاثر از تغییرات سطوح کشت بوده و تغییرات عمده در آن به گیاهان انتخابی وابسته است.



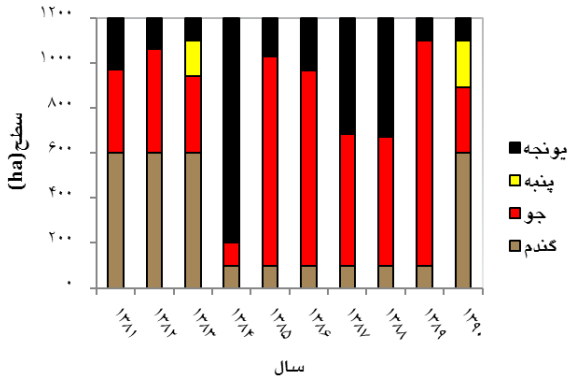
شکل۵- مساحت‌های زیر کشت بهینه سالیانه (NIV=16 MCM، ارسباران).



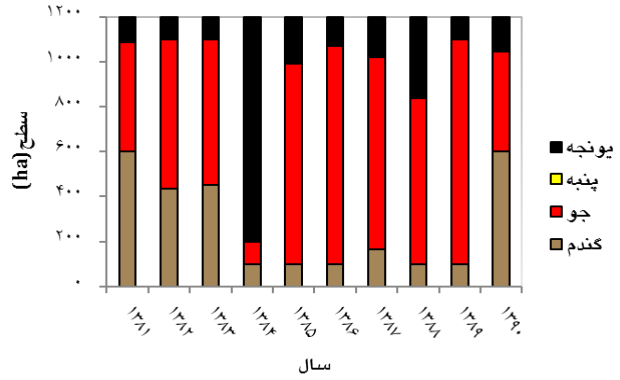
شکل۶- مساحت‌های زیر کشت بهینه سالیانه (NIV=14 MCM، ارسباران).



شکل۷- مساحت‌های زیر کشت بهینه سالیانه(NIV=12 MCM، ارسباران).

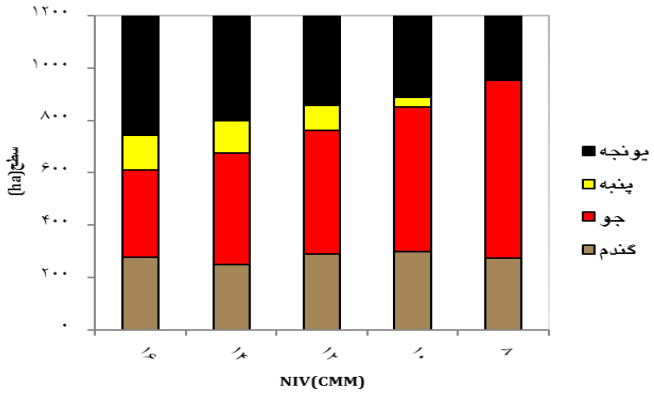


شکل۸- مساحت‌های زیر کشت بهینه سالیانه (NIV=10 MCM، ارسباران).

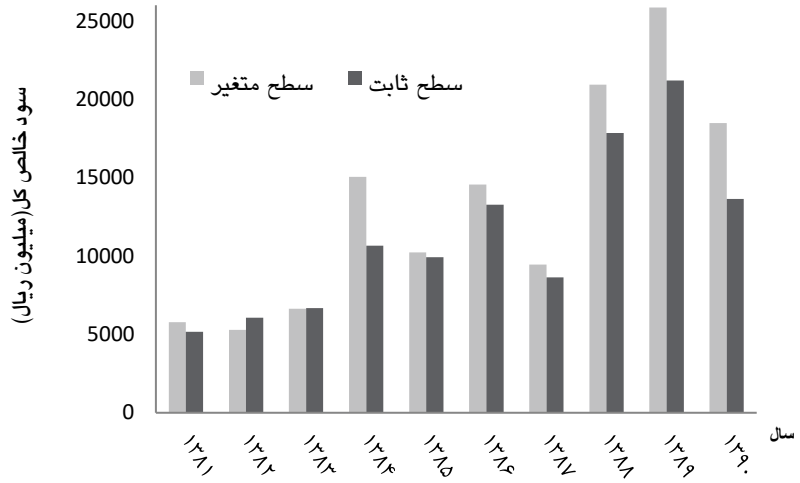


شکل۹- مساحت‌های زیر کشت بهینه سالیانه (NIV=8 MCM، ارسباران).

در مرحله بعد و برای بیشینه کردن رابطه ٤ و معرفی مساحت‌های زیر کشت ثابت برای گیاهان پیشنهادی منطقه از روش میانگین‌گیری برای مقادیر متفاوت آب در دسترس استفاده می‌گردد، به این صورت که از مساحت‌های بهینه هر NIV در طول ۱۰ سال آماری میانگین گرفته می‌شود و برای هر NIV یک سطح کشت میانگین بعنوان سطح کشت ثابت بدست می‌آید که نتیجه آن در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در مورد سطح کشت ثابت اگر حجم آب در دسترس افزایش یابد، سهم اختصاص یافته به یونجه نیز افزایش می‌یابد، یک همبستگی قوی(شکل ۱۰) بین حجم آب آبیاری و سطح زیر کشت وجود دارد. مخصوصاً اینکه افزایش NIV به حالت خطی، اراضی تحت کشت یونجه و پنبه را افزایش و اراضی جو را کاهش می‌دهد. اراضی اختصاص یافته به گندم تقریباً با افزایش و کاهش حجم آب آبیاری ثابت می‌ماند. واضح است چنین سهمی برای رضایت کامل از تامین نیازهای گندم کافی نیست اما با دید اقتصادی در رژیم کم آبیاری جایگزینی گندم با کشت یونجه یا جو خیلی سودآور است. زمانیکه حجم در دسترس آب آبیاری کاهش می‌یابد، اراضی تحت کشت پنبه کاهش می‌یابد و زمانی‌که NIV به ۸ میلیون مترمکعب می‌رسد اراضی پنبه به کلی از الگوی کشت حذف می‌گردد و کل آب برای مصرف گیاهان دیگر استفاده می‌شود.



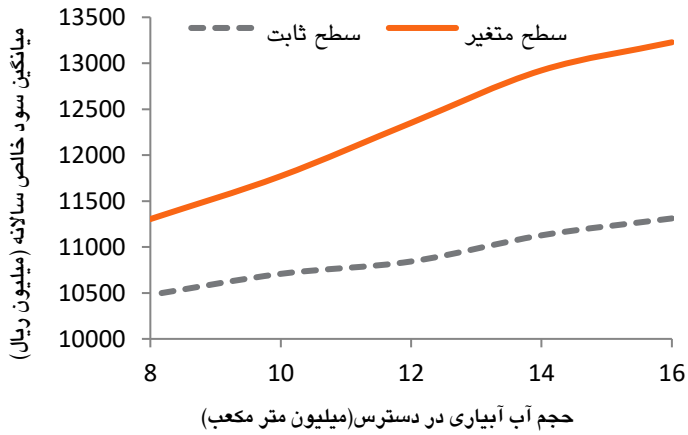
شکل ۱۰- مساحت‌های زیر کشت ثابت بهینه بصورت تابعی از NIV.



شکل۱۱- مقایسه سود خالص کل بین حل بهینه متغیر سالانه و ثابت برای کل دوره آماری (NIV=16MCM).

شکل ۱۱ مقایسه کل سود خالص بین حل بهینه متغیر سالانه و ثابت برای کل دوره آماری برای NIV=16MCM را نشان می‌دهد. براحتی قابل پیش‌بینی است درآمد سالیانه بدست آمده با حالت ثابت می‌تواند در حد بیشینه با حالت متغیر سالیانه برابر باشد ولی هرگز از حالت متغیر سالیانه تجاوز نمی‌کند.

شکل۱۲ تغییرات سود خالص با تغییر NIV را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل آن است که افزایش سود خالص با افزایش NIV هم در حالت ثابت و هم در حالت متغیر سالیانه تقریباً خطی است و با افزایش NIV اختلاف بین سود خالص بین آنها افزایش می‌یابد. همچنین سود خالص کل برای حالت کشت بهینه سالیانه برای آب در دسترس ۸ میلیون مترمکعب ۸٪ بیشتر از حالت کشت ثابت بوده و این مقدار برای ۱۰ تا ۱۶ میلیون مترمکعب بترتیب، از ۱۱٪ تا ۱۸٪ بصورت خطی افزایش می‌یابد که نشان از افزایش برتری نسبی سطح کشت متغیر بدون در نظر گرفتن مزایای مدیریتی الگوی ثابت از قبیل طراحی، آبیاری و مکانیزاسیون می‌باشد.

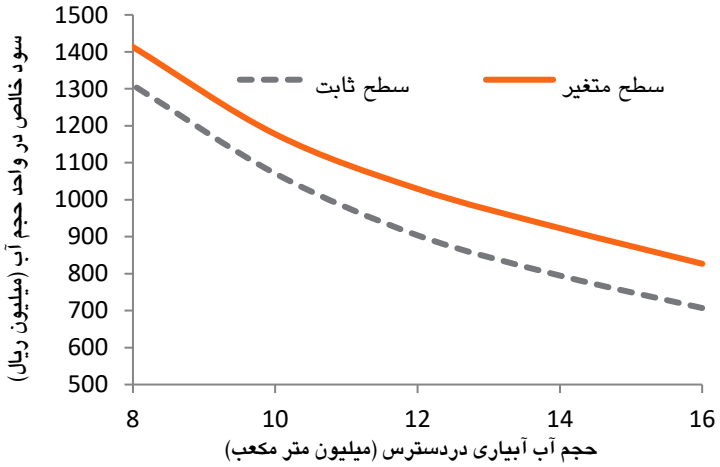


شکل۱۲- مقایسه سود خالص سالانه در برابر آب آبیاری در دسترس (NIV) برای سطح کشت ثابت و متغیر.

آخرین محاسبه مربوط به میزان سود خالص بدست آمده از واحد آب آبیاری است. شکل ۱۳ بطور کمی نشان می‌دهد که در مورد مطالعه شده، بر طبق قانون کاهش تولید (کاهش شیب منحنی عملکرد محصول با افزایش بیش از حد آب مصرفی) بالا رفتن سهم آب استفاده شده، کاهش سود خالص در واحد حجم آب را برای هر دو

الگوی بدست آمده نشان می‌دهد. همچنین منحنی‌ها برای هر دو الگوی تحت مطالعه یک شکستگی را در زمانیکه حجم آب در دسترس از ۱۰ میلیون متر مکعب عبور می‌کند نشان می‌دهند. تغییرات سود خالص در واحد حجم آب با افزایش آب در دسترس در هر دو الگو بصورت سهمی درجه دو کاهش یافته و در تمام NIV ها الگوی کشت متغیر به مقدار ثابت ۷٪ بالاتر می‌باشد.

اگر نتایج تحقیق غفاری و همکاران (۲۰۰۹) که بررسی خود را در حالت آب موجود ثابت با هدف تعیین الگوی کشت بهینه شبکه آبیاری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام داده بودند بصورت جو <گندم<پنبه <ذرت = صیفی جات<یونجه نشان داده شود، مشاهده می‌گردد که در گیاهان پیشنهادی مشترک، فقط در مقادیر آب در دسترس بالا الگوی تحقیق حاضر کمی شبیه به الگوی دشت ورامین می‌باشد که نشان از اختصاص آب زیاد برای آبیاری در این منطقه دارد. نتایج گزارش شده توسط باقریان و همکاران (۲۰۰۷) در منطقه کازرون با تحقیق حاضر همسو است بطوریکه اختلاف سود دو الگو بترتیب ۱۱/۵ و ۱۲ درصد در دو تحقیق بدست آمده و هر دو افزایش سطح زیر کشت را در حالت افزایش آب در دسترس پیشنهاد داده‌اند.



شکل۱۳- مقایسه سود خالص در واحد حجم آب در برابر آب آبیاری در دسترس (NIV) برای سطح کشت ثابت و متغیر.

با مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق سلماسی (۲۰۰۸) که برای شهرستان میانه انجام گرفته مشخص می گردد که در میانه با افزایش ۲۵ درصدی آب قابل دسترس مقدار سود خالص ۱۸ درصد افزایش یافته است ولی در تحقیق حاضر با افزایش ۵۰ درصدی آب قابل دسترس مقدار سود خالص ۱۰ درصد افزایش یافته است که نشان از ارزش بالای آب در میانه نسبت به ارسباران دارد. با مقایسه شکل ۱۲ با نتایج تحقیق منوچی و مکارلی (۱۹۹٤) مشخص می‌گردد که در تحقیق ایشان میانگین سود خالص سالانه مربوط به الگوی متغیر بالاتر از الگوی ثابت می‌باشد ولی آهنگ تغییرات در تحقیق آنها از شیب بیشتر بسوی شیب کم با افزایش آب در دسترس می‌باشد که این موضوع در تحقیق حاضر شیب تقریبا ثابتی دارد و نشانگر ارزش بالای آب در ارسباران نسبت به پروجیای ایتالیا در مقادیر زیاد آب می‌باشد. همچنین شکل کلی تغییرات سود خالص واحد حجم آب برای دو الگوی ثابت و متغیر در این دو تحقیق نزولی و شبیه هم می‌باشد ولی شیب تغییرات در تحقیق منوچی و مکارلی در ابتدا (NIV کمتر) بسیار زیاد و در NIV های بیشتر بسیار کم می‌باشد در حالیکه در تحقیق حاضر منحنی‌ها، تقریباً شیب ثابتی را طی می‌کنند که نشان از ارزش بسیار بالای واحد حجم آب تا یک مقدار مشخص در تحقیق

ایشان و کاهش یکنواخت ارزش واحد حجم آب با افزایش مقدار در دسترس آن در مطالعه حاضر دارد.

نتیجه گیری کلی

در تحقیق حاضر روشی ارائه شد که توانایی مدیریت بهینه سطح زیر کشت محصولات در شرایط تغییر منابع آب در دسترس را دارد. این روش با محاسبه پارامترهای آبیاری و عملکرد محصولات بر پایه برنامه‌ریزی ریاضی، می‌تواند برای مزارعی که دارای اطلاعات اندکی هستند نیز بکار رود زیرا فقط به ورودی‌های در دسترس و آسانی مانند بارش، تبخیر و تعرق و خصوصیات گیاه و خاک نیاز دارد. بهرحال مطالعه جنبه‌های هیدرولوژیکی، گیاهشناسی، هواشناسی و خاکشناسی نسبت به فرموله کردن مسئله مقدم‌تر است زیرا ابتدا باید محدودیت‌های مربوط به متغیرهای مسئله پیدا شوند. در نتیجه، این امکان وجود دارد که با ایجاد و تحلیل یک سری زمانی (با پایه سالانه) که دارای اطلاعات فوق باشند، به راه حل دراز مدت مسئله پرداخت. واضح است که محدودیت‌های آب در دسترس، اختصاص اراضی برای استفاده هر گیاه عضو مسئله برنامه‌ریزی را تعیین می‌کند و از این طریق سطح کشت بهینه هر گیاه محاسبه می‌گردد. مطالعه اراضی ارسباران انعطاف‌پذیری روش پیشنهادی را برای محاسبه اهداف مسئله (سطوح کشت ثابت و متغیر) که به محدودیت‌های اقتصادی و محیطی واقعی وابسته است، نشان می‌دهد و برنامه‌ریزی موثر منابع آب برای آبیاری را ممکن می سازد. انعطاف پذیری عمده مدل پیشنهادی می‌تواند با طرح یک نکته اساسی در آبیاری بدست آید و آن تغییر آبیاری برطبق تغییر مراحل مختلف رشد گیاه است. تحقیق بعدی می‌تواند استفاده از مدل پیشنهادی را برای آنالیز اراضی تحت آبیاری با مدیریت چند منظوره یک منبع آب توسعه دهد بطوریکه تاثیر محدودیت‌های واقعی (مانند محدودیت استحصال آب) برای رسیدن به راه حل بهینه بتواند محاسبه شود.

منابع مورد استفاده

Ahmadzadeh Kaleybar F, 2012. Limited water resources allocation using deficit irrigation by optimization, Ph.D thesis on Irrigation and Drainage, Agriculture Faculty, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Iran. (In Persian)

Ahmadzadeh Kaleybar F, Kaveh F, Babazadeh H and Fakheri Fard A, 2012. Optimization of limited water resources by using deficit irrigation. Journal of Archives des Sciences. 65(5):46-59.

Bagherian A. Saleh A and Peykani GH, 2007. Optimization of cropping pattern in Kazeroon region using linear programming method. 6th Iranian Agricultural Economics Conference. 30-31 October, Mashhad, Iran. (In Persian)

Cortignani R, and Severini S, 2009. Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using positive mathematical programming. Agricultural Water Management. 96(12)1785-1791.

Doorenbos J, and Kassam AH, 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

English MJ and Orlob GT, 1978. Decision Theory Applications and Irrigation Optimization. Contribution No.174, California Water Resources Center.

Ghaffari A, Montazer A and Rahimi Chamnani M, 2009. Determination of Optimal Cropping Pattern of Varamin Irrigation Network Using Analytical Hierarchy Model. Pp 207-216. Proceedings of the 12th National Congress of Iranian Irrigation and Drainage Committee. 25-26 Feb. Tehran, Iran. (In Persian)

Gorantiwar SD, and Smout IK, 2003. Allocation of scarce water resources using deficit irrigation in rotational systems.
Journal of Irrigation and Drainage Engineering 129(3) 155–163.

Hall WA and Butcher W, 1968. Optimal timing of irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Division 94(2) 267-275.

Hanks RJ, 1974. Model for predicting yield as influenced by water use. Agronomy Journal 66(5) 660-665.

Hanks RJ and Hill RW, 1980. Modelling crop responses to irrigation in relation to soils, climate and salinity. International Irrigation Information Centre, Bet Dagan, Israel, 66 pp.

Haouari M, and Azaiez MN, 2001. Optimal cropping patterns under water deficits. European Journal of Operational Research 130(1)133-146.

Hargreaves GH, and Samani ZA, 1984. Economic consideration of deficit irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Division 110(4), 343–358.

Hiller EA and Clark RN, 1971. Stress day index to characterize effects of water stress to crop yields. Transactions of the ASAE 14(4) 757-761.

Jensen ME, 1968. Water consumption by agricultural plants in Kozlowski. Water Deficits and Plant Growth vol. 2 Academic Press, New York, pp. 1-22.

Mannocchi F and Mecarelli P, 1994. Optimization analysis of deficit irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120(3) 484-503.

Minhas BS, Parikh KS and Srinivasan TN, 1974. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. Water Resources Research 10(3) 383-393.

Nader H, Sabouhi Sabouni M and Mahammadpour O, 2013. Water allocation of Mahabad multipurpose dam using integrated fuzzy analytic hierarchy process and goal programming models. Water and Soil Science-University of Tabriz 24(3): 215-229. (In Persian)

Nagesh Kumar D, Srinivasa Raju K and Ashok B, 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 123(2)123-129.

Paul S, Panda SN and Nagesh Kumar D, 2000. Optimal irrigation allocation: A multilevel approach. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 126(3) 149–156.

Peri G, Hart WE and Norum DI, 1979. Optimal irrigation depths-A method of analysis. Journal of Irrigation and Drainage Division 105(4) 341-355.

Raes D, 2002. BUDGET – A Soil Water and Salt Balance Model. Reference manual. K. U. Leuven, Department of Land Management, Leuven, Belgium.

Raes D, Geerts S, Kipkorir E, Wellens J and Sahli A, 2005. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. Agricultural Water Management 81(3)335-357.

Salmasi F, 2008. Application of linear programming for determining the pattern of cultivation in irrigation development plans. Proceedings of the 2nd Irrigation and Drainage Network Management National Conference. 20-21 January, Ahvaz University, Ahvaz, Iran. (In Persian)

Sepaskhah AR and Akbari D, 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. Biosystems Engineering 92(1) 97-106.

Smout IK and Gorantiwar SD, 2006. Productivity and equity of different irrigation schedules under limited water supply. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 132(4)349-358.

Stegman, EC, Bauer A, Zubriski JC and Bauder J, 1977. Crop curves for water balance irrigation scheduling in Southeast North Dakota. Res. Report No. 66. Fargo: Agricultural Experiment Station, North Dakota State Univ.

Stewart JI, Hagan RM, 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. Journal of Irrigation and Drainage Division 99(4) 421–439.

Stewart JI, Hagan RM and Pruitt WO, 1974. Functions to predict optimal irrigation programs. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 100(2) 179-199.

Srinivasa Prasad A, Umamahesh NV, and Viswanath GK, 2006. Optimal irrigation planning under water scarcity. Journal of Irrigation and Drainage Division 132(3) 228-237.