

## کاربرد برنامه‌ریزی خطی در بهینه‌سازی سطح زیرکشت حوزه آبخیز اهرچای در شرایط موجود و توسعه

حسام قدوسی<sup>۱\*</sup> و سمیرا سادات مرسلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان و <sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۲

### چکیده

الگوی کشت نقش به‌سزایی در مصرف بهینه از منابع آب و خاک و به تبع آن در مدیریت واحدهای زراعی دارد. پژوهش حاضر به منظور دستیابی به الگوی کشت بهینه در اراضی حوزه آبخیز اهرچای واقع در پایاب سد ستارخان انجام گرفته است. اراضی مورد مطالعه واقع در شهرستان اهر با وسعت تقریبی ۳۰۰۰ هکتار می‌باشند و در حال حاضر آبیاری در منطقه مورد مطالعه به صورت سنتی بوده و راندمان پایین این نوع آبیاری و کمبود آب از جمله مشکلات کشاورزی در این منطقه می‌باشد. به منظور تعیین الگوی کشت بهینه و ارایه راه‌کاری مناسب جهت افزایش سود خالص و بهره‌وری آب، مدل برنامه‌ریزی خطی در دو حالت، شامل شرایط موجود و شرایط بهبود سیستم آبیاری در محیط نرم‌افزار Mathematica و با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی، شبیه‌سازی شد. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها مقادیر سطح زیرکشت هر محصول در دو حالت مختلف شبیه‌سازی به منظور حداکثرسازی سود تعیین شد. نتایج نشان داد که در صورت توسعه زمین‌های کشاورزی با روش‌های مدرن آبیاری، سود حاصل از درآمد کشاورزی نسبت به حالت موجود یا سنتی از ۹۸ میلیارد ریال به ۱۲۸ میلیارد ریال یعنی معادل ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوی کشت، تحقیق در عملیات، سد ستارخان، دشت اهر، نرم‌افزار Mathematica

### مقدمه

قیمت تمام شده و... پیچیده می‌باشد و با روش‌های معمول مانند سعی و خطا نمی‌توان مطمئن شد که ترکیب کشت پیشنهادی دارای حداکثر سوددهی می‌باشد، چون در عمل باید بی‌نهایت ترکیب کشت را مورد آزمون قرار داد. برای پرهیز از محاسبات طولانی و خسته کننده یکی از راه‌حل‌ها استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> که شاخه‌ای از ریاضیات کاربردی است، می‌باشد. در زمینه بهینه‌سازی الگوی کشت با

فعالیت‌های کشاورزی از شاخص‌های مهم توسعه در کشورهایی همچون ایران محسوب می‌شود. هرگاه تخصیص منابع در سطح تولیدکنندگان و بنگاه‌های اقتصادی به حالت غیر بهینه صورت گیرد، نمی‌توان انتظار داشت که منابع در سطح کلان به صورت کارآ تخصیص یابد (Salmasi, ۲۰۰۸). در طرح‌های توسعه کشاورزی یافتن الگوی کشت زراعی بهینه با هدف کسب سود خالص حداکثر و با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند منابع آب، خاک، نیاز منطقه،

<sup>1</sup> Linear Programming

زیرکشت، الگوی کشت بهینه، حجم آب رهاسازی شده مطلوب، کاهش تبخیر و ذخیره‌سازی اولیه مورد مقایسه قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد، در بهینه‌سازی با روش احتمال محدود، توزیع احتمال مدل زمان باید جایگزین احتمال برنامه‌ریزی زمان شود. همچنین Alabdulkader و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل ریاضی را به منظور بهینه‌سازی الگوی کشت در کشور عربستان سعودی با هدف به حداکثر رساندن بازده سالانه خالص در بخش کشاورزی و اطمینان از تخصیص کارآمد منابع آب و زمین‌های زراعی در میان محصولات تدوین نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که بهینه‌سازی الگوی کشت در عربستان سعودی موجب ۵۳ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب و ۴۸ درصد کاهش سطح زیرکشت در مقایسه با سال پایه الگوی کشت می‌شود. همانگونه که ملاحظه شد، تاکنون تحقیقات مختلفی با استفاده از مدل‌های متنوع در زمینه بهینه‌سازی الگوی کشت در ایران و دیگر کشورها انجام شده است. در هرکدام از تحقیقات بسته به نوع مسئله انواع محدودیت‌ها مثل محدودیت‌های منابع آب و خاک و ... در شبیه‌سازی‌ها لحاظ و الگوی کشت بهینه تعیین شده است. اما در اغلب این تحقیقات شرایط موجود، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است، اما در این تحقیق ضمن اعمال محدودیت‌های واقعی و خاص محلی منطقه مثل محدودیت‌های معیشتی در زمینه سطح زیرکشت برخی از محصولات، بهینه‌سازی الگوی کشت برای شرایط موجود و وضعیت توسعه با در نظر گرفتن امکان استفاده از روش‌های نوین آبیاری و افزایش سطح زیرکشت انجام شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته که این مهم در تحقیقات قبل کمتر مورد توجه بوده است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** برای انجام این پژوهش و بهینه‌سازی الگوی کشت، اراضی پایاب سد ستارخان به مساحت حدود ۳۰۰۰ هکتار واقع در استان آذربایجان شرقی در حوزه آبخیز اهرچای انتخاب شد و به منظور تشکیل تابع هدف و محدودیت‌های مورد نیاز در مدل‌سازی اقدام به دریافت آمار و اطلاعات شد. برخی

استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی تاکنون تحقیقات مختلفی انجام گرفته که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. Torkamani و Sedaghat (۱۹۹۹)، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و روش تحلیل خوشه‌ای به تعیین الگوی بهینه زراعت و باغداری در استان فارس پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که رعایت الگوی کشت بهینه، موجب افزایش بازده برنامه‌ریزی بهره‌برداران می‌شود. در تحقیق دیگری نیز Ghobadian و همکاران (۲۰۰۹)، برای دستیابی به الگوی کشت بهینه در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی کرمانشاه با وسعت تقریبی ۱۰۰ هکتار و با توجه به محدودیت‌های آب و خاک و نحوه بهره‌برداری از چاه‌ها مدل برنامه‌ریزی خطی را در محیط نرم‌افزار WinQSB تهیه نمودند.

مقایسه الگوی کشت بهینه محاسبه شده به وسیله مدل با وضعیت موجود نشان داد که در صورت به کار بردن الگوی کشت بهینه مقدار سود سالیانه به اندازه ۱۲/۷۵ درصد افزایش خواهد یافت. Zhiliang و Zhenmin (۲۰۰۴)، نیز از مدل‌های خطی به منظور بهینه‌سازی پروژه آبیاری چنگای<sup>۱</sup> واقع در کشور چین استفاده نمودند. ایشان وضعیت نابسامان موجود در اراضی این منطقه را حاکی از ضعف مدیریت آبیاری، استفاده بیش از حد آب و ماندابی شدن زمین‌ها، دور آبیاری طولانی‌مدت و سود کم بیان نمودند. تابع هدف در این تحقیق حداکثر نمودن سود خالص و حداقل نمودن دور آبیاری بود و در نهایت سطوح الگوی کشت بهینه و احجام آب تخصیصی برای آبیاری تعیین شد. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد مدل بهینه‌سازی تاثیر زیادی در صرفه‌جویی آب مصرفی، افزایش راندمان تولید و آبیاری و سهولت در مدیریت علمی آبیاری دارد.

Jothiprakash و همکاران (۲۰۱۱)، نیز مدل برنامه‌ریزی خطی احتمال محدود<sup>۲</sup> را به منظور تعیین الگوی کشت بهینه و راهبردهای عملیاتی مطلوب در منطقه ساگار<sup>۳</sup> تدوین نمودند. سپس نتایج حاصل از مدل را با توجه به سود خالص، شدت آبیاری، سطح

<sup>۱</sup> Chengai

<sup>۲</sup> Chance Constrained Linear Programing

<sup>۳</sup> Sagar

و انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل ریاضی Mathematica استفاده شد. هدف از ساخت سد ستارخان و تاسیسات وابسته، تامین آب شرب شهرستان اهر، تامین آب مورد نیاز مصارف صنعتی و تامین آب مورد نیاز حدود ۱۱ هزار هکتار اراضی کشاورزی بوده و حجم ذخیره و مرده آن به ترتیب معادل ۱۲۱/۷۵ و ۸/۲۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. به‌طور متوسط حجم آب قابل استحصال برای تامین آب آبیاری اراضی و باغات پایاب سد ستارخان شامل سیستم آبیاری مدرن و سنتی ۲۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. میزان آورد رودخانه اهرچای در محل سد ۹۰ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد ( Bandab Consultant Engineering Company, ۱۹۹۵). در شکل ۱، نمایی کلی از محدوده اراضی کشاورزی دشت اهر و سد ستارخان در بالادست، ارائه شده است.

از این اطلاعات شامل سطح زیرکشت هر محصول شامل محصولات استراتژیک منطقه، تاریخ کاشت و برداشت محصولات، داده‌های هوا و اقلیم‌شناسی منطقه، نیاز آبی محصولات در دوره‌های مختلف رشد، قیمت و عملکرد محصولات، حجم منابع آب موجود و قابل استفاده و همچنین مشخصات خاک منطقه می‌باشد.

این اطلاعات پس از مراجعات مکرر به سازمان‌ها و نهادهای ذیربط و دریافت گزارشات موجود و همچنین از طریق بررسی‌های میدانی و مصاحبه‌ی حضوری با مسئولین بهره‌برداری تهیه و جمع آوری شده است. پس از دریافت این آمار و اطلاعات اقدام به توسعه معادلات و نامعادلات لازم (شامل تابع هدف و قیودات مساله) در فرمت بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی خطی شد و به‌منظور حل این معادلات با قیود مشخص



شکل ۱- موقعیت اراضی دشت اهر و سد ستارخان در بالادست

(Bandab Consultant Engineering Company, ۱۹۸۷). آب حاصل از بارندگی به‌دلیل توپوگرافی خاص این منطقه، قابل ذخیره در خاک نبوده و به صورت سیلاب از دسترس خارج می‌شود. لذا با احداث سد ستارخان، مقدار زیادی از بارندگی‌ها در مخزن سد ذخیره شده و قابل استفاده می‌شود. بنابراین اصلی‌ترین منبع آب کشاورزی در دشت اهر، مخزن سد ستارخان می‌باشد.

**وضعیت موجود زراعی در منطقه مورد پژوهش:**  
کشاورزی در دشت اهر دارای پیشینه نسبتاً طولانی

**وضعیت منابع آب منطقه مورد پژوهش:** به‌طور کلی منابع آب در دسترس دشت اهر شامل منابع آب سطحی شامل رودخانه اهرچای و زیرزمینی شامل قنات، چاه و چشمه می‌باشند. سهم منابع زیرزمینی در تامین آب مورد نیاز کشاورزی این منطقه ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. رودخانه اهرچای مهمترین منبع آب سطحی بوده و از سرشاخه‌های دره رود سرچشمه می‌گیرد.

این رودخانه از شعبات رودخانه ارس به شمار می‌رود و یکی از زیرحوضه‌های دریای خزر می‌باشد

همچنین آب‌بها تهیه شد. در جدول ۱، این مقادیر به‌همراه قیمت فروش محصولات در مزرعه و حجم آب مورد نیاز سالانه به تفکیک هر محصول ارائه شده است.

است که در آن محصولات مختلف و روش‌های کشت و کار متعدد به‌کار گرفته شده است. به‌منظور انجام این پژوهش با مراجعه به منطقه مورد مطالعه و امور آب شهر اهر متوسط عملکرد هر یک از محصولات و

جدول ۱- آمار وضعیت محصولات زراعی پایاب سد ستارخان

نام محصول	متوسط عملکرد محصول ( $\text{tonha}^{-1}$ )	قیمت فروش پای مزرعه ( $\text{Rialkg}^{-1}$ )	حجم آب آبیاری سالانه ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ )	آب‌بها ( $\text{Rialm}^{-3}$ )
لوبیا	۱/۴	۱۶۰۰۰	۱۰۸۰۰	۵۰
یونجه	۸	۲۸۰۰	۲۲۸۰۰	۵۰
ذرت علوفه‌ای	۳۵	۵۰۰	۲۲۸۰۰	۵۰
سیب زمینی	۳۵	۳۰۰۰	۴۸۰۰	۵۰
چغندر	۵۰	۹۰۰	۴۸۰۰	۵۰
گندم	۳/۶	۳۲۰۰	۴۸۰۰	۵۰
جو	۳/۲	۴۰۰۰	۴۸۰۰	۵۰
سبزی	۳۰	۲۵۰۰	۳۱۲۰۰	۵۰
صیفی	۴۰	۳۵۰۰	۱۶۸۰۰	۵۰

ریاضی لحاظ می‌شوند. مجموعه متغیرهای تصمیم یا گزینه‌های ممکن نیز فضای تصمیم را تشکیل می‌دهند. برخلاف مدل‌های شبیه‌سازی یا ذهنی که نمی‌توان ساختار ثابتی برای آن‌ها تعریف کرد، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی دارای چهار مجموعه اساسی زیر است (Karamooz, ۲۰۰۶).

الف- متغیرهای تصمیم‌گیری: مجهول‌هایی هستند که باید از نتایج مدل تعیین شوند.

ب- پارامترها: اجزایی از سیستم هستند که در طی حل مدل معمولاً تغییری نمی‌کنند.

ج- تابع هدف: معیار ارزیابی متغیرهای تصمیم‌گیری است. به‌طور کلی، جواب بهینه، زمانی به‌دست می‌آید که مقادیر متناظر متغیرهای تصمیم‌گیری، ضمن صدق کردن در همه قیودات مدل، بهترین مقدار تابع هدف را نتیجه دهد. به‌عبارتی برای رسیدن به جواب بهینه، تابع هدف مانند یک شاخص عملکرد است که باید پس از هر بار جای‌گذاری متغیرهای تصمیم، مقدار آن تعیین و با مقادیر قبلی مقایسه شود.

د- قیود و محدودیت‌ها: مدل برای به حساب آوردن محدودیت‌های فیزیکی، باید تحت تاثیر قیودی باشد که متغیرهای تصمیم‌گیری را در حد مقادیر مجاز آن‌ها

#### معرفی نرم‌افزار Mathematica: یک مدل جبری

رایج و کاربردی در علوم طبیعی، مهندسی و ریاضیات می‌باشد. این نرم‌افزار در ۲۳ ژوئن سال ۱۹۸۸ توسط مؤسسه تحقیقاتی Wolfram توسعه یافت. این مدل از سری نرم‌افزارهای موسوم به دستیار ریاضیات می‌باشد و توان محاسباتی بالا، داشتن کتابخانه‌ای از توابع، دقت زیاد (صدها رقم بعد از اعشار) و ... از ویژگی‌های مهم آن می‌باشد. توابع کتابخانه‌ای موجود در این مدل باعث شده است که در انجام بسیاری از محاسبات به‌جای برنامه‌نویسی‌های طولانی با استفاده از یک دستور، محاسبات مورد نظر انجام شود. این مدل برای کاربران با سطوح مختلف از مقدماتی تا پیشرفته، قابل استفاده بوده و مهم‌ترین قابلیت‌های آن عبارتند از:

- وجود یک سامانه رایانه‌ای قوی جبری برای بررسی نمادین (سمبلیک) معادله‌ها

- استفاده از روش‌های عددی پیشرفته در حل عددی معادلات

- وجود توابع ترسیمی و تجسمی برای رسم نمودارها بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی خطی (LP)

در روش بهینه‌سازی، گزینه‌های ممکن در تصمیم‌گیری به‌صورت متغیرهای تصمیم در مدل

شده است. در ادامه به معرفی محدودیت‌های در نظر گرفته شده پرداخته می‌شود.

- محدودیت آب در دسترس بخش کشاورزی: مجموع آب به کار گرفته شده برای کلیه محصولات بایستی کمتر و یا مساوی مقدار آب تخصیص داده شده از محل سد ستارخان برای آبیاری اراضی سنتی باشد. این مفهوم توسط قید تخصیص آب یعنی رابطه (۲)، در مساله بهینه‌سازی اعمال شده است.

$$\sum_{i=1}^{NC} A_i V_i \leq X \quad (2)$$

که در آن،  $V_i$  حجم آب آبیاری سالانه برای هر محصول (مترمکعب بر هکتار)،  $A_i$  سطح زیرکشت هر محصول (هکتار) و  $X$  حجم آب اختصاص داده شده به اراضی سنتی (مترمکعب بر هکتار) که در این پژوهش معادل ۱۲ میلیون مترمکعب می‌باشد.

- محدودیت مساحت اراضی: با توجه به محدودیت توپوگرافی و طبقه‌بندی خاک، مجموع سطح زیرکشت کلیه محصولات باید کمتر و یا مساوی مساحت کل اراضی سنتی منطقه باشد که در این پژوهش معادل ۳۰۰۰ هکتار می‌باشد. این محدودیت نیز به‌وسیله رابطه (۳) تعیین و به مدل معرفی شد.

$$\sum_{i=1}^{NC} A_i \leq A_T \quad (3)$$

که در آن،  $A_T$  سطح کل اراضی سنتی قابل کشت می‌باشد.

- محدودیت حداقل و حداکثر سطح زیرکشت محصولات: حداکثر سطح زیرکشت برخی محصولات استراتژیک مانند غلات، حبوبات، یونجه و ... با توجه به اهداف احداث سد و مصاحبه حضوری با مسئولین بهره‌برداری از شبکه آبیاری تعیین شد. همچنین با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه، کشاورزی شغل بسیاری از روستاییان حومه رودخانه اهر چای می‌باشد، کشاورزان بخشی از زمین زراعی خود را به‌منظور تامین نیازهای معیشتی خود کشت می‌کنند. بنابراین حداقل سطح زیرکشت محصولات نیز با در نظر گرفتن اقتصاد معیشتی تعیین شد و در قالب نامعادلاتی به‌صورت جدول ۲ در مدل برنامه‌ریزی خطی معرفی شدند.

محدود می‌نماید. این امر به‌وسیله توابع ریاضی مقید کننده بیان می‌شود. مجموعه قیود، فضای تصمیم‌گیری امکان‌پذیر را تشکیل می‌دهند. یکی از اولین و پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی استفاده از برنامه‌ریزی خطی می‌باشد. در این روش، باید تابع هدف و همه توابع محدودیتی از نوع خطی باشند، در غیر این صورت تحت فرضیات مشخص می‌توان مسایل غیرخطی را خطی کرده و سپس با آزمون و خطا یا روش‌های تقریبی حل نمود (Kianfar, ۲۰۱۰). برنامه‌ریزی خطی اولین بار توسط دانتریگ<sup>۱</sup> ابداع شد (Saber and Kashefi, ۲۰۰۹). وی مسائل برنامه‌ریزی خطی را با توسعه روش سیمپلکس<sup>۲</sup> حل نمود. استفاده از برنامه‌ریزی خطی به سرعت مورد توجه محققین در زمینه‌های مختلف از جمله اقتصاد، ریاضی و آمار قرار گرفت و سپس با گذشت زمان در مسائل مختلف مهندسی از جمله مدیریت منابع آب و عمران نیز مورد توجه قرار گرفت.

**مدل پیشنهادی:** در این پژوهش متغیرهای تصمیم، سطوح زیرکشت هر یک از محصولات رایج در دشت اهر بوده و تابع هدف، حداکثر نمودن سود خالص حاصل از الگوی کشت زراعی می‌باشد که در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{NC} A_i (Y_i C_i - V_i C_i) \quad (1)$$

که در آن، پارامتر  $NC$  تعداد محصولات کشت شده در منطقه مورد نظر،  $A_i$  سطح زیرکشت محصول مورد نظر (هکتار)،  $Y_i$  عملکرد متوسط محصول مورد نظر (تن در هکتار)،  $C_i$  قیمت محصول مورد نظر (ریال بر تن)،  $V_i$  حجم آب آبیاری محصول مورد نظر در طول دوره رشد (مترمکعب بر هکتار) و  $C_i$  آب‌بهای محصول مورد نظر (ریال بر مترمکعب) می‌باشد.

**محدودیت‌ها:** به‌منظور تعیین الگوی کشت بهینه محدودیت‌هایی از قبیل حجم آب قابل دسترس، سطح کل اراضی قابل کشت و درصد کشت مجاز هر یک از محصولات منطقه و همچنین لزوم کشت برخی از محصولات با سطح زیرکشت مشخص در نظر گرفته

<sup>1</sup> George B. Dantzig  
<sup>2</sup> Simplex

جدول ۲- قیود اعمال شده برای سطح زیرکشت محصولات زراعی

نام محصول	لوبیا	یونجه	ذرت علوفه‌ای	سیب زمینی	غلات	سبزی و صیفی
حداکثر درصد الگوی کشت	۱۵	۱۵	۱۰	۱۵	۳۵	۱۰
حداقل درصد الگوی کشت	۱/۵	۱/۵	۱	۱/۵	۳/۵	۳

### نتایج و بحث

به‌منظور انجام شبیه‌سازی‌ها و تعیین الگوی کشت بهینه و همچنین امکان مقایسه شرایط موجود و بهبود سیستم آبیاری منطقه مورد مطالعه، کلیه معادلات و نامعادلات مربوطه در دو حالت کدنویسی و به مدل معرفی شد. در ادامه ضمن معرفی شرایط شبیه‌سازی در هر حالت، نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل‌ها نیز ارائه و مقایسه شده است.

**الف) شبیه‌سازی در شرایط موجود (شبکه آبیاری سنتی):** همان‌گونه که قبلاً گفته شد، در حال حاضر اراضی قابل کشت پایین‌دست سد ستارخان حدود ۳۰۰۰ هکتار می‌باشد که هر ساله به‌وسیله سیستم آبیاری ثقلی به‌صورت سنتی کشت می‌شود. در این

گزینه از شبیه‌سازی، هدف حداکثر نمودن سود خالص حاصل از اجرای الگوی کشت بهینه محصولات در شرایط بهره‌برداری موجود می‌باشد. پس از شبیه‌سازی در این حالت و با توجه به محدودیت‌های اعمال شده الگوی کشت بهینه شامل سطوح زیرکشت محصولات و درصد هر کدام از آن‌ها نسبت به کل اراضی تعیین شد. نتایج شبیه‌سازی در حالت وضعیت موجود در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که به‌منظور حداکثر نمودن سود باید کمتر از ۱۰۰ درصد زمین‌های موجود یعنی در حدود ۴۷/۱ درصد زمین‌های منطقه کشت شود. در این حالت سود حاصل از اجرای الگوی کشت بهینه پیشنهادی نیز برابر ۹۸ میلیارد ریال می‌باشد.

جدول ۳- الگوی کشت بهینه در شرایط موجود

نام محصول	لوبیا	یونجه	ذرت علوفه‌ای	سیب زمینی	چغندر	گندم	جو	سبزی	صیفی	جمع
سطح زیر کشت (ha)	۴۵	۴۵	۳۰	۴۵۰	۰	۱۰۵	۴۳۷/۵	۰	۳۰۰	۱۴۱۲/۵
درصد زیر کشت	۱/۵	۱/۵	۱	۱۵	۰	۳/۵	۱۴/۶	۰	۱۰	۴۷/۱

**ب) شبیه‌سازی در شرایط بهبود (شبکه آبیاری تحت فشار):** در حال حاضر با توجه به کمبود منابع آب و راندمان پائین آبیاری سنتی، احداث سیستم‌های آبیاری تحت فشار از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. مسئولین بهره‌برداری از سد ستارخان نیز به‌منظور افزایش راندمان آبیاری و سطح زیرکشت اراضی پایین‌دست، در حال بررسی شرایط ایجاد سیستم‌های آبیاری تحت فشار می‌باشند. بدین منظور ضمن بازدید

و دریافت اطلاعات و نقشه‌های اراضی قابل توسعه، اقدام به تهیه مدل بهینه‌سازی با هدف حداکثر نمودن سود خالص حاصل از این اراضی نیز شد. در این مدل راندمان آبیاری برابر ۸۵ درصد در نظر گرفته شد که نتایج آن شامل حجم آب مورد نیاز هر محصول در طول فصل زراعی، سطح زیرکشت و درصد کشت هر محصول به‌ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- حجم آب آبیاری سالانه و آب‌بها در شبکه توسعه یافته تحت فشار

نام محصول	لوبیا	یونجه	ذرت علوفه‌ای	سیب زمینی	چغندر	گندم	جو	سبزی	صیفی
حجم آب آبیاری سالانه ( $m^3 ha^{-1}$ )	۵۶۲۵	۱۱۸۷۵	۱۱۸۷۵	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱۶۲۵۰	۸۷۵۰
آب‌بها ( $Rial m^{-3}$ )	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰

آب محدود در دسترس، سطح زیرکشت محصولات می‌تواند افزایش یابد. در جدول ۵، سطوح زیرکشت محصولات مختلف پس از بهینه‌سازی الگوی کشت با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌های بهبود سیستم آبیاری ارائه شده است.

با مقایسه جداول ۱ و ۴ از نظر حجم آب مورد نیاز هر محصول در هکتار مشاهده می‌شود که با اصلاح روش آبیاری و افزایش راندمان، حجم آب مورد نیاز جهت تامین نیاز آبی محصولات الگوی کشت کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بنابراین و با توجه به حجم

جدول ۵- الگوی کشت بهینه در شرایط بهبود سیستم آبیاری (شبکه مدرن)

نام محصول	لوبیا	یونجه	ذرت علوفه‌ای	سیب‌زمینی	چغندر	گندم	جو	سبزی	صیفی	جمع
سطح زیرکشت (ha)	۴۵۰	۴۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۰	۱۰۵	۹۵۴	۰	۳۰۰	۳۰۰۰
درصد زیرکشت	۱۵	۱۵	۱۰	۱۵	۰	۳/۵	۳۱/۵	۰	۱۰	۱۰۰

در صورت اجرای الگوی کشت بهینه، سودی برابر ۱۲۸ میلیارد ریال به دست می‌آید. لذا با تبدیل روش‌های سنتی به روش‌های تحت فشار علاوه بر افزایش ۳۰ درصد سوددهی خالص، استفاده از حداکثر اراضی قابل کشت در پایاب سد ستارخان امکان‌پذیر می‌باشد. در جدول ۶، مقایسه شبکه‌های آبیاری سنتی و بهبود یافته (مدرن) از لحاظ سطح زیرکشت و سود خالص ارائه شده است.

نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت بهینه‌سازی الگوی کشت اراضی پائین‌دست سد ستارخان با هدف حداکثر نمودن سود خالص و محدودیت منابع آب باید ۴۷/۱ درصد از اراضی را کشت نمود و در این صورت سودی برابر ۹۸ میلیارد ریال به دست خواهد آمد. اما در صورت بهبود سیستم آبیاری به روش‌های نوین، با توجه به حجم کمتر آب مورد نیاز می‌توان کل اراضی موجود را کشت نمود و

جدول ۶- مقایسه نتایج دو سناریو شبیه‌سازی شده در مدل

سناریو	نوع شبکه آبیاری	سطح زیرکشت (ha)	درصد سطح زیر کشت	سود خالص (BRial)
۱	تلفیقی	۱۴۱۲/۵	۴۷/۱	۹۸
۲	مدرن	۳۰۰۰	۱۰۰	۱۲۸

کشت بهینه موجب کاهش حجم قابل ملاحظه آب مصرفی شده که این امر با توجه به محدودیت و بحران منابع آب در کشور از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشد.

### تشکر و قدردانی

مؤلفین بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری‌ها و نقطه نظرات ارزشمند ارائه شده در این پژوهش توسط کارشناس محترم امور آب شهرستان اهر، جناب آقای مهندس مرتضی فریان تشکر و قدردانی نمایند.

با مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مشابه نظیر Ghobadian و همکاران (۲۰۰۹) که بهینه‌سازی الگوی کشت را در محیط WinQSB برای اراضی دانشگاه رازی کرمانشاه انجام دادند، مشاهده می‌شود که درصد افزایش سود خالص در این پژوهش ۱۷/۲۵ درصد بیشتر از پژوهش انجام شده در اراضی دانشگاه رازی کرمانشاه می‌باشد. همچنین از مقایسه نتایج این پژوهش از نظر کاهش حجم آب مصرفی پس از اجرای الگوی کشت با نتایج Zhenmin و Zhiliang (۲۰۰۴)، مشاهده می‌شود که در هر دو پژوهش اجرای الگوی

### منابع مورد استفاده

1. Alabdulkader, A.M., A.I. Amoud and F.S. Awad. 2014. Optimization of the cropping pattern in Saudi Arabia using a mathematical programming sector model. Agriculture Economy Czech, 58(2): 56-60.
2. Bandab Consultant Engineering Company. 1995. Report of Satarkhan Dam. 150 pages (in Persian).

3. Bandab Consultant Engineering Company. 1987. Report of meteorology and hydrology for Satarkhan Dam. 210 pages (in Persian).
4. Ghobadian, R., M. Zaree and M. Khoramivafa. 2009. Determination of optimum crop pattern in University of Kermanshah lands using linear programming. National Congress on Sustainable Development in Water Management, Iran (in Persian).
5. Jothiprakash, V.R., Arunkumara and A. Ashok Rajanb. 2011. Optimal crop planning using a chance constrained linear programming model. *Water Policy*, 13(5): 734-749.
6. Karamooz, M., S.A. Mojahedi and A. Ahmadi. 2006. Economical assessment algorithm for water conveyance projects. 2nd Water Management Congress, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
7. Kianfar, H. 2010. Optimal water allocation in Soufichai irrigation network using genetic algorithm. MSc Thesis, 178 pages.
8. Saberi, Z. and Z. Kashefi. 2009. Linear programming. Available online at: <http://www.modiryar.com>.
9. Salmasi, F. 2008. Use of linear programming for determination of crop pattern in irrigated area. 2nd Congress of Irrigation and Drainage Networks Management. Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, 25-36 (in Persian).
10. Torkamani, J. and R. Sedaghat. 1999. Determination of optimum crop pattern for conjunctive use of gardening and harvesting. *Agricultural Economics and Development*, 7(7): 28-34 (in Persian).
11. Zhiliang, W. and Z. Zhenmin. 2004. Optimization of water allocation in canal systems of Chengai irrigation area. *Nature and Science*, 2(1): 89-94.

Archive of SID