

## مدیریت توزیع آب در شبکه‌های آبیاری و تخصیص الگوی کشت به کمک سیستم اطلاعات مکانی و برنامه‌ریزی خطی (نمونه موردی: اراضی پایین دست سد آغ‌چای)

علیرضا وفائی‌نژاد<sup>۱\*</sup>، جواد یوسف‌زاده<sup>۲</sup>، حسین یوسفی<sup>۳</sup>، ناصر محمدی و رزانه<sup>۲</sup>

۱. استادیار، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی مهندسی (شهید عباسپور) دانشگاه شهید بهشتی

۲. کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی

۳. استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۰۲ - تاریخ تصویب: ۹۳/۰۶/۲۸)

### چکیده

در سیستم‌های سنتی آبیاری و بهره‌برداری از منابع آبی، به‌خصوص منابع آب ذخیره‌شده پشت سدها، مدیریت نامناسب توزیع آب، سبب ضعف عملکرد پروژه‌های آبیاری و افزایش تلفات بهره‌برداری می‌شود. در این راستا، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در کنار استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) می‌تواند موجب تقویت عملکرد پروژه‌های آبیاری شود. بر این اساس، در تحقیق حاضر از برنامه‌ریزی خطی (به‌عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی) و GIS برای تعیین مساحت‌های بهینه برای کشت هر محصول که سبب بهبود عملکرد پروژه آبیاری خواهد شد، در منطقه موردی اراضی پایین دست سد آغ‌چای، استفاده شده است. در این راستا و برای اجرای فرایند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ای در محیط نرم‌افزاری اکسل با توجه به نوع محصولات، متغیرهای تصمیم، محدودیت‌ها و تابع هدف توسعه داده شد. سپس با توجه به خروجی آن، برنامه دیگری با استفاده از قابلیت‌های ArcObject در نرم‌افزار ArcGIS توسعه داده شد و بدین‌وسیله مساحت‌های بهینه برای کشت هر محصول در زمین‌های پایین دست سد مشخص شدند. نتیجه تحقیق در منطقه مطالعه موردی، حاکی از آن است که استفاده از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و تلفیق آن با GIS، سبب بهبود ۳۰ درصدی استفاده از سطح قابل کشت و نوع محصولات در مقایسه با حالتی که محصولات به صورت سنتی انتخاب و کشت می‌شوند، شده است.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی خطی، سیستم اطلاعات مکانی، شبکه‌های آبیاری، مدیریت توزیع آب.

## مقدمه

می‌توان از توانمندی‌های GIS بهره جست. در ادامه برخی از تحقیقات در این زمینه و دستاوردهای آنها بیان شده‌اند. به‌منظور نمایش نحوه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات مکانی در مدیریت آبیاری منطقه Riotunuya در آرژانتین، در تحقیقی که چندین سال به‌طول انجامید، با توجه به سه سیاست تخصیص آب سطحی متناسب با سطح تحت آبیاری، نیازهای آبی محصول و حداکثر تأثیر، شاخص‌هایی تعریف شدند و از روی آنها بهینه‌سازی انجام گرفت و با استفاده از نرم‌افزارهای ERDAS و ArcInfo GIS مدل‌سازی‌های مورد نیاز صورت پذیرفت و در مدیریت آبیاری منطقه به‌کار گرفته شد [۹].

در تحقیق دیگری که در دانشکده کشاورزی دانشگاه تکراس A&M صورت پذیرفت، از GIS برای مدیریت آبیاری روزانه بخش‌های هشتگانه دره Rio استفاده شد. این سیستم توانایی نمایش توزیع استفاده آب در مزارع در طول هفته، ماه، سال یا دوره‌های مورد نظر را دارا بود [۷]. در تحقیقی دیگر به‌منظور مدیریت بهتر پروژه‌های آبیاری در ترکیه از سیستم اطلاعات مکانی استفاده کردند. در این تحقیق با داده‌های ورودی همچون مالکیت اراضی، توپوگرافی، خاک، شبکه راه‌ها، سیستم آبیاری، سیستم زهکشی، کاربری اراضی، تراز سطح ایستابی، داده‌های هواشناسی و داده‌های گیاهی سیستمی طراحی شد که خروجی آن امکان محاسبه مقدار آب مورد نیاز هر مزرعه پس از تعیین نیاز آبی با توجه به مقدار بارش و بازده کاربرد و انتقال آب را دارا بود [۸].

دیانی، سیستم اطلاعات مکانی شبکه آبیاری و زهکشی کوثر در جلگه خوزستان را تهیه کرد که قابلیت بهنگام‌سازی اطلاعات، ایجاد ارتباط بین اطلاعات مختلف، پرس‌وجوهای منطقی، محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم آبیاری و زهکشی، ترکیب لایه‌های مختلف و گزارش‌دهی را داشت. با استفاده از این سیستم، کاربر می‌توانست با انتخاب مزرعه، آب مورد نیاز را بسته به دور آبیاری انتخابی، الگوی کشت و درصد کشت هر گیاه مشاهده کند و نیز بازده آبیاری و ماه را تغییر دهد [۱].

همچنین صمدی بهرامی و همکاران با استفاده از توانمندی‌های GIS و پایگاه داده SQL Server و نیز محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک، ضمن اعمال

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 نبود سیستم مدیریتی صحیح، امکان استفاده بهینه از منابع موجود (آب و خاک) میسر نشده و خشکسالی‌ها و کاهش بارش جوی، کاهش مقدار آب استحصالی را در بخش کشاورزی در پی داشته است. در این راستا بررسی راهکارهای استفاده بهینه از آب، از طریق بازنگری در تخصیص منابع آب و مدیریت صحیح عرضه و تقاضا در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی (به‌ویژه در شرایط خشکسالی و البته با عنایت به الگوی کشت)، ضروری به‌نظر می‌رسد.

در این راستا، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در کنار استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) می‌تواند موجب تقویت عملکرد پروژه‌های آبیاری و زهکشی شود. بر این اساس، مقاله حاضر با استفاده از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و GIS، تخصیص بهینه آب در اراضی پایین‌دست سد آغ‌چای را مدنظر قرار داده که نتایج آن می‌تواند روند آب‌رسانی و بهره‌برداری از پروژه را تحت تأثیر قرار دهد. در این مقاله، بر پایه خطوط اصلی انتقال آب و مطابق با آرایش کانال‌های درجه دوم پایین‌دست رودخانه و سد آغ‌چای، با تأکید بر بهره‌گیری حداکثری از آب و کمترین چرخش آبیاری، دستیابی به بهترین الگوی کشت و معرفی مدلی برای تخصیص این الگو به زمین‌های پایین‌دست مورد توجه قرار گرفته است. در راستای تحقق این اهداف، از برنامه‌ریزی خطی، پارامترهای تخصیص و پیاده‌سازی آنها در بستر GIS استفاده شده است. این امر دستیابی به بهترین الگوی کشت و تخصیص بهترین مساحت‌ها را به تفکیک محصول برای زمین‌های پایین‌دست محقق ساخته است.

## پیشینه تحقیق

تاکنون مطالعات مختلفی در راستای بهینه‌سازی آبیاری و بهره‌برداری از منابع آب با استفاده از سیستم‌های حامی تصمیم‌گیری و GIS انجام پذیرفته است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که برای مدیریت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی و نیز فرایند تخصیص آب

### مواد و روش‌ها

#### مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و GIS برای مدیریت توزیع آب

در برنامه‌ریزی خطی، هدف استفاده از روش ریاضی و تشکیل معادله درجه یک برای یافتن بهترین ترکیب فعالیت‌های مورد نظر با توجه به محدودیت‌ها و شرایط حاکم بر مسئله است [۹]. مدل برنامه‌ریزی خطی شامل بخش‌های مختلفی همچون تابع هدف (که بیانگر هدف تصمیم‌گیرنده است)، قیدها و وضعیت متغیرهای تصمیم است [۶].

در این تحقیق نیز برای دسترسی به عملکرد بهتر شبکه‌های آبیاری با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و GIS، مراحل و موارد ارائه شده در شکل ۱ مدنظر مؤلفان قرار گرفته است:

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در این تحقیق ابتدا الگوریتم برنامه‌ریزی خطی اجرا شده و سپس خروجی آن وارد برنامه تخصیص مساحت‌های بهینه می‌شود. در این راستا و برای اجرای فرایند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ای در محیط نرم‌افزاری اکسل توسعه داده شد؛ سپس با عنایت به خروجی این برنامه (که مساحت‌های بهینه برای کشت هر محصول است)، برنامه دیگری در محیط دات‌نت و به زبان برنامه‌نویسی C# تهیه شد و بدین‌وسیله مساحت‌های بهینه برای کشت هر محصول به زمین‌های پایین دست کانال تخصیص یافت. البته گفتنی است که با توجه به ماهیت مکانی داده‌های ورودی، از قابلیت‌های ArcObject در محیط GIS نیز برای عمل تخصیص بهره گرفته شده است.

#### گستره منطقه مطالعاتی

نمونه موردی تحقیق، منطقه آغ‌چای است که در دشت قره ضیاءالدین، در شمال استان آذربایجان غربی واقع شده است. در این راستا شکل ۲ نمای کلی موقعیت دشت قره ضیاءالدین در استان آذربایجان غربی و شکل ۳ موقعیت کانال‌ها و قطعات زمین در منطقه مورد مطالعه بر روی تصویر ماهواره‌ای را نشان می‌دهد.

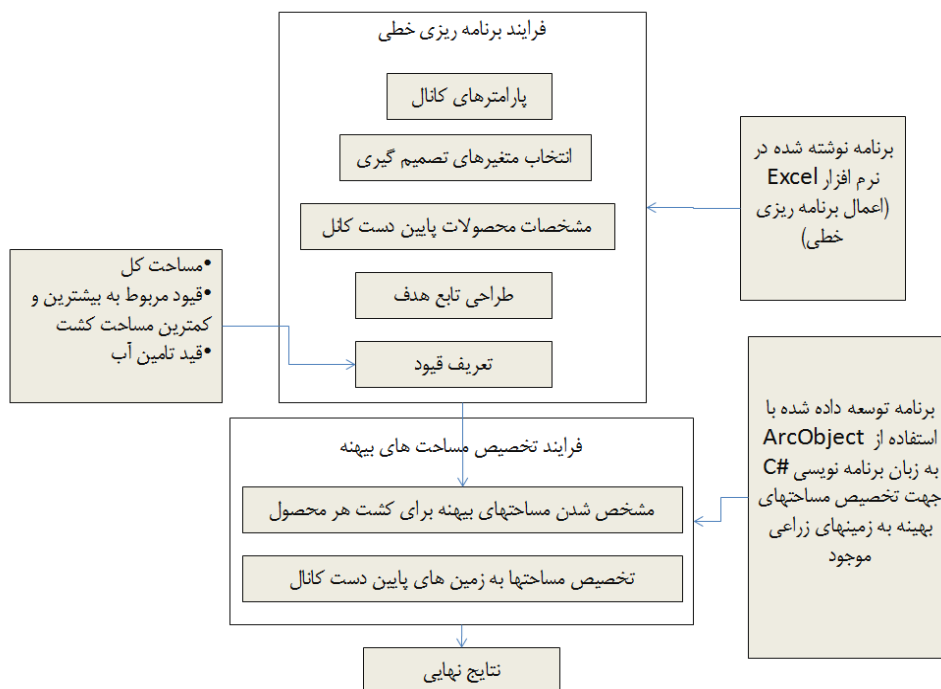
ساده‌سازی‌های منطقی در برنامه‌ریزی آبیاری، سیستم مدیریت تحویل آبی را طراحی کردند. خروجی این سیستم، برنامه تحویل آب به قطعات زراعی در کانال‌های شبکه آبیاری است [۲].

کیانی و همکاران در پژوهشی بانک اطلاعاتی شبکه‌های آبیاری و زهکشی را برای استفاده از GIS در فعالیت‌های مختلف مرتبط با بهره‌برداری و نگهداری شبکه ایجاد کردند. با این کار، هر یک از عوامل که به‌نحوی با مدیریت آب شبکه سروکار داشتند اعم از شرکت‌های بهره‌برداری، تشکل‌های آب‌بران، کشاورزان و ... می‌توانستند اطلاعات مورد نیاز خود را دریافت و از آن استفاده کنند [۳].

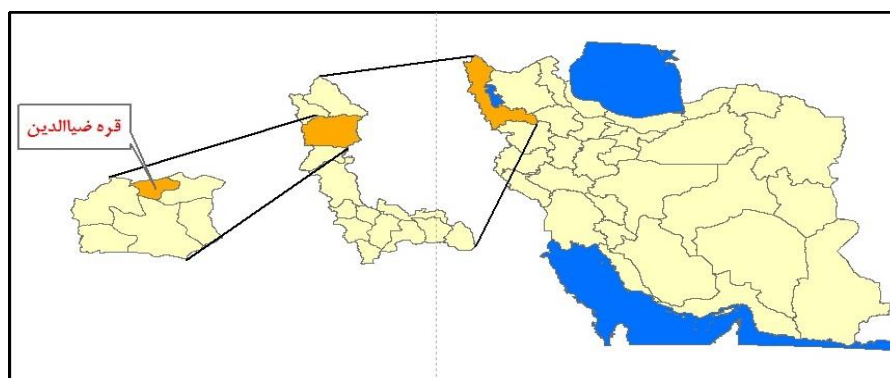
منعم و همکاران در مقاله‌ای، برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری را بررسی کردند. آنان در این تحقیق، روش ریاضی بهینه‌سازی SA و الگوریتم ژنتیک را به‌کار گرفتند و در آن حل مسائل توزیع آب در کانال‌های آبیاری را به‌صورت چندهدفی با اهداف متفاوت مدنظر قرار دادند [۴].

در مقاله دیگری، منعم و همکاران، برای توزیع و تحویل بهینه آب در شبکه‌های آبیاری از الگوریتم بهینه‌سازی PSO (رفتار جمعی اجزا) برای توزیع و تحویل بهینه آب در کانال‌های آبیاری استفاده کردند و آن را در کانال AMX از شبکه آبیاری ورامین با یازده آبگیر به‌کار بردند. نتایج این مقاله، توانایی روش PSO را در حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه توزیع آب در کانال‌های آبیاری و بالطبع توانایی زیاد مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی را در مدیریت بهتر توزیع آب در شبکه‌های آبیاری نشان می‌دهد [۵].

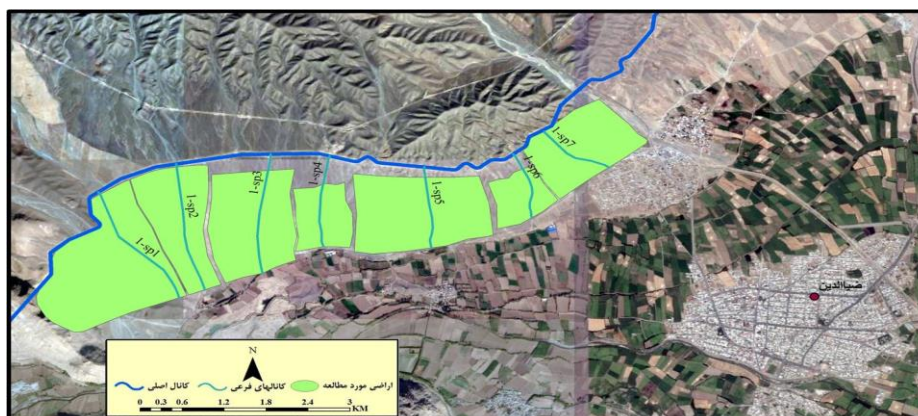
تحقیقات یادشده نشان می‌دهد با توجه به اینکه برنامه‌ریزی توزیع و تحویل آب در شبکه‌های آبیاری نوعی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، چندمتغیره و چندمحدودیتی با انواع متغیرهاست، افزون بر استفاده از توانمندی‌های GIS، باید از توانمندی‌های مدل‌های بهینه‌سازی مناسب نیز برای دستیابی به سیستم بهینه تحویل آب استفاده کرد. در واقع با استفاده از قابلیت‌های هر دو مورد یادشده، می‌توان نوعی سیستمی حامی تصمیم‌گیری را به‌منظور تخصیص و مدیریت آب و محصولات تهیه کرد.



شکل ۱. مراحل بهینه سازی و تخصیص برای الگوی کشت بیهینه



شکل ۲. نمایی از شکل و موقعیت قره ضیاءالدین



شکل ۳. موقعیت اراضی مورد مطالعه و کانال های فرعی بر روی تصویر ماهواره ای

## فرایند برنامه‌ریزی خطی

استفاده از برنامه‌ریزی خطی در این تحقیق، برای بهینه‌سازی الگو و مساحت کشت در شبکه بوده است. هدف از آن رسیدن به مساحت بهینه‌ای از مقدار زمین تخصیصی برای هر یک از محصولات زراعی، در هر انشعاب از کانال است. در این زمینه باید در ابتدا پارامترهای کانال مشخص شده و متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شوند؛ سپس با تعریف تابع هدف و محدودیت‌های مرتبط، فرایند اجرای برنامه‌ریزی خطی صورت پذیرد. در ادامه، به نحوه اجرای موارد یادشده پرداخته شده است.

## انتخاب متغیرهای تصمیم

از آنجا که این مقاله درصدد دستیابی به زمین‌هایی با مساحت بهینه برای هر محصول در پایین دست انشعابات برای آبیاری بهینه آنهاست، متغیرهای تصمیم‌گیری، مساحت محصولات مختلف آبیاری به وسیله هر انشعاب خواهد بود. در این راستا، در پایین دست کانال درجه اول  $PC_1$ ، ده نوع محصول در الگوی کشت در نظر گرفته شده که عبارتند از گندم (۱)، جو (۲)، چغندر قند (۳)، ذرت دانه‌ای (۴)، یونجه (۵)، حبوبات (۶)، سبزیجات (۷)، سویا (۸)، شبدر (۹) و توتون بهاره (۱۰). با توجه به موارد یادشده، می‌توان متغیرها را به صورت زیر تعریف کرد.

بهترین مساحت کشت از محصول  $Z_j$  در  $I$  امین انشعاب کانال  $A_{ij}$  (ha) که در آن:  $i=1,2,3,4,5,6,7$  (شمارنده انشعابات کانال) و  $j=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$  (شمارنده نوع محصولات) است. با توجه به توضیحات یادشده، برای نمونه، متغیرهای مسئله در کانال  $1-SP_1$  به ترتیب زیر خواهد بود:

$$A_{1,1} \text{ (مساحت بهینه گندم در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,2} \text{ (مساحت بهینه جو در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,3} \text{ (مساحت بهینه چغندر در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,4} \text{ (مساحت بهینه ذرت در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,5} \text{ (مساحت بهینه یونجه در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,6} \text{ (مساحت بهینه حبوبات در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,7} \text{ (مساحت بهینه سبزیجات در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,8} \text{ (مساحت بهینه سویا در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,9} \text{ (مساحت بهینه شبدر در کانال } SP_1)$$

$$A_{1,10} \text{ (مساحت بهینه توتون بهاره در کانال } SP_1)$$

به این ترتیب، برای هر کانال ده متغیر (مساحت بهینه

هر محصول) وجود خواهد داشت، که در مجموع برای هفت کانال، با هفتاد متغیر مواجه خواهیم شد که در نهایت باید پس از حل مسئله، مقدار آنها مشخص و تعیین شود.

## طراحی تابع هدف

برای رسیدن به هدف عملیات بهینه‌سازی در این تحقیق (دستیابی به بیشترین مقدار سود خالص در شبکه آبیاری)، تابع هدف به شکل فرمول ۱ در نظر گرفته شده است:

$$Max Z_i = \varepsilon \sum_{j=1}^N A_{ij} P_j \Delta dj - E \sum_{j=1}^N A_{ij} \quad (1)$$

در این رابطه،  $E$ : ضریب تأثیر انتقال؛  $P_j$ : قیمت محصول  $Z_j$ ؛  $\Delta dj$ : افزایش قیمت محصول  $Z_j$  حاصل از آبیاری مکانیزه؛  $E$ : هزینه عملیات سالیانه بر روی زمین با آبیاری ثقلی؛  $N$ : تعداد محصول در منطقه (در این تحقیق ده محصول)؛  $i$ : شماره انشعابات کانال؛ و  $j$ : شماره محصول در این مطالعه است. در این راستا، با توجه به مطالعات اولیه طرح سد آغ‌چای، استفاده از نظر کارشناسان و بررسی‌های میدانی، ضرایب تابع بالا برای خط انشعاب اول ( $1-SP_1$ ) به صورت زیر محاسبه شد.

$$Max Z_1 = 534 A_{1,1} + 656 A_{1,2} + 524 / 2 A_{1,3} + 2118 A_{1,4} + 204 / 6 A_{1,5} + 973 / 2 A_{1,6} + 1205 A_{1,7} + 546 / 2 A_{1,8} + 137 / 2 A_{1,9} + 3187 / 5$$

همچنین، با عنایت به اینکه در مقاله حاضر، هفت خط انشعاب وجود داشته و هر خط انشعاب به یک تابع هدف نیاز دارد، در مجموع، هفت تابع هدف (با منطق ارائه شده در تابع هدف انشعاب  $1-SP_1$ ) نوشته شد که با اجرای عملیات بهینه‌سازی به بیشینه کردن مقدار هر یک از این توابع پرداخته خواهد شد.

علاوه بر موارد یادشده، برای محاسبه مساحت بهینه هر محصول در پایین دست هر یک از انشعابات، در کنار بیشترین مقدار تابع هدف، باید محدودیت‌های مسئله نیز در نظر گرفته شود. این محدودیت‌ها شامل محدودیت کل اراضی، بیشترین و کمترین مقدار مساحت هر محصول و تأمین آب مورد نیاز محصولات است که در ادامه به هر یک از آنها به طور مختصر اشاره شده است.

## محدودیت‌های مسئله

## محدودیت مساحت کل

این محدودیت به این صورت تعریف شده که مجموع مساحت‌های کلیه محصولات تحت آبیاری در هر انشعاب

بر اساس روابط بالا بر مبنای ظرفیت هر کانال، حداقل و حداکثر مساحت تحت کشت محاسبه خواهد شد. برای نمونه مقادیر عددی آنها بعد از جاگذاری مساحت تحت پوشش کانال  $1-SP_1$  به صورت زیر خواهد بود:

$41/91 \geq A11 \geq 14/49$	(ha)	گندم
$21/68 \geq A12 \geq 7/227$	(ha)	جو
$21/68 \geq A13 \geq 7/227$	(ha)	چغندر قند
$18/79 \geq A14 \geq 4/34$	(ha)	ذرت دانه ای
$24/57 \geq A15 \geq 10/11$	(ha)	یونجه
$15/89 \geq A16 \geq 1/44$	(ha)	حبوبات
$23/12 \geq A17 \geq 8/67$	(ha)	سبزیجات
$20/23 \geq A18 \geq 5/78$	(ha)	سویا
$14/45 \geq (ha) A19$		شبدرد
$14/45 \geq (ha) A110$		توتون بهاره

این قید برای شش انشعاب بعدی ( $1-SP_2, 1-SP_3, \dots$ ) نیز به همین صورت محاسبه شده است.

#### محدودیت تأمین آب

با توجه به مطالعات اولیه طرح سد آغچای، استفاده از نظر کارشناسان و بررسی‌های میدانی، قید تأمین آب در مقاله حاضر، به صورت فرمول ۲ در نظر گرفته شد.

$$A_{ij} M_{k1} \leq \eta_m \eta_m \frac{Qm * Ai}{F} * d_k * 24 * 36. \quad (2)$$

که در آن؛  $M_{k1}$ : مقدار آب مورد نیاز برای محصول ۱ در  $K$  امین چرخش آبیاری ( $m^3/ha$ ) است که در آن  $K = 1, 2, 3, \dots$  است؛  $\eta_m$ : ضریب استفاده مؤثر آب در کانال اصلی؛  $\eta_{bi}$ : ضریب استفاده مؤثر آب در هر انشعاب کانال؛ و  $d_k$ : مجموع روزها در  $K$  امین چرخش آبیاری است که تمامی پارامترهای یادشده برای اجرای مدل جمع‌آوری و محاسبه شد.

شایان توجه است که تعداد و دوره چرخش آبیاری هر محصول در ماه‌های مختلف سال و همچنین نیاز آبی هر محصول در دوره‌های مختلف، در منطقه مورد مطالعه، بر مبنای جدول‌های ۲ و ۳ است.

بر مبنای ظرفیت هر کانال، باید برابر یا کوچک‌تر از مساحت کل منطقه زیر کشت به وسیله کانال باشد. بر این اساس، محدودیت مساحت برای هر یک از کانال‌ها در منطقه مورد مطالعه، به صورت زیر (جدول ۱) مشخص شد:

جدول ۱. میزان و نحوه محاسبه محدودیت مساحت تحت پوشش هر کانال

شماره کانال	ظرفیت تحت پوشش (هکتار)	قید مساحت
$1-SP_1$	۱۴۴/۵۳	$A_{11}+A_{12}+A_{13}+A_{14}+A_{15}+A_{16}+A_{17}+A_{18}+A_{19}+A_{110} \leq 144.53$
$1-SP_2$	۷۶/۸۶	$A_{21}+A_{22}+A_{23}+A_{24}+A_{25}+A_{26}+A_{27}+A_{28}+A_{29}+A_{210} \leq 76.86$
$1-SP_3$	۹۶/۵۹	$A_{31}+A_{32}+A_{33}+A_{34}+A_{35}+A_{36}+A_{37}+A_{38}+A_{39}+A_{310} \leq 96.59$
$1-SP_4$	۳۹/۰۶	$A_{41}+A_{42}+A_{43}+A_{44}+A_{45}+A_{46}+A_{47}+A_{48}+A_{49}+A_{410} \leq 39.06$
$1-SP_5$	۱۰۹/۴۸	$A_{51}+A_{52}+A_{53}+A_{54}+A_{55}+A_{56}+A_{57}+A_{58}+A_{59}+A_{510} \leq 109.48$
$1-SP_6$	۳۰/۰۳	$A_{61}+A_{62}+A_{63}+A_{64}+A_{65}+A_{66}+A_{67}+A_{68}+A_{69}+A_{610} \leq 30.03$
$1-SP_7$	۱۱۸/۱۳	$A_{71}+A_{72}+A_{73}+A_{74}+A_{75}+A_{76}+A_{77}+A_{78}+A_{79}+A_{710} \leq 118.13$

#### محدودیت‌های مربوط به بیشترین و کمترین مساحت کشت

طبق تجربیات محلی و مطالعات اولیه طرح سد آغچای و در نظر داشتن نیاز به محصولات مختلف در هر یک از کانال‌ها، محدودیت یا قیدی تحت عنوان بیشترین و کمترین مساحت کشت برای هر یک از محصولات، لحاظ می‌شود که در این تحقیق نیز شرایط مذکور به صورت زیر بیان شده است:

$A_{i,0.29} \geq A_{i,1} \geq (ha) Ai 0.21$	گندم
$A_{i,0.15} \geq A_{i,2} \geq (ha) Ai 0.05$	جو
$A_{i,0.15} \geq A_{i,3} \geq (ha) Ai 0.05$	چغندر قند
$A_{i,0.13} \geq A_{i,4} \geq (ha) Ai 0.03$	ذرت دانه‌ای
$A_{i,0.17} \geq A_{i,5} \geq (ha) Ai 0.07$	یونجه
$A_{i,0.11} \geq A_{i,6} \geq (ha) Ai 0.01$	حبوبات
$A_{i,0.16} \geq A_{i,7} \geq (ha) Ai 0.06$	سبزیجات
$A_{i,0.14} \geq A_{i,8} \geq (ha) Ai 0.04$	سویا
$A_{i,0.1} \geq A_{i,9} \geq (ha) Ai 0$	شبدرد
$A_{i,0.1} \geq A_{i,10} \geq (ha) Ai 0$	توتون

جدول ۲. تعداد و دورهٔ چرخش آبیاری هر محصول در ماه‌های مختلف سال

ردیف	محصول	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر
۱	گندم		۱۵.۳۰	۲۰	۲			۱۰.۲۰
۲	جو		۲۲	۱۲				۱۰.۲۲
۳	چغندر قند		۱	۱۲.۲۶	۹.۱۶.۳۰	۶.۱۳.۲۷	۱۰.۲۴	
۴	ذرت دانه‌ای		۱.۲۲		۲.۹.۲۳.۳۰	۱۳.۲۰	۳	
۵	یونجه	۱	۵.۲۶	۱۶.۳۰	۱۳.۲۷	۳.۱۷.۳۱	۲۱	۱۱
۶	حبوبات		۱	۵.۲۶	۹.۱۶.۳۰	۶.۲۰		
۷	سبزیجات		۱.۲۹	۲۶	۹.۱۶.۳۰	۶.۲۰.۲۷	۱۰	
۸	سویا		۱.۲۹		۲.۱۶.۲۳	۶.۱۳.۲۷	۱۰	
۹	شبدر	۱.۲۹	۲۶	۹.۳۰	۶.۲۰	۳	۲۸	
۱۰	توتون بهاره			۱.۲۹	۱۲.۲۹	۲.۱۶.۲۳	۶	

جدول ۳. نیاز آبی محصولات دشت آغ‌چای در طول دورهٔ رشد در ماه‌های مختلف سال (متر مکعب در هر هکتار)

محصول	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
گندم	۰	۰	۰	۰	۳۱/۴۸	۲۳۶/۷۰	۰	۰	۲۸۷/۲۱	۵۸۶/۲۳	۲۷۵/۴۱	۰
جو	۰	۰	۰	۰	۱۳/۱۱	۹۸/۳۶	۰	۰	۸/۲	۱۸۳/۶۱	۱۱۸/۰۳	۰
چغندر قند	۰	۰	۰	۰	۰	۶۵/۵۷	۲۵۲/۴۶	۳۴۲/۶۲	۳۳۹/۳۴	۱۸۵/۲۵	۳/۲۸	۰
ذرت دانه‌ای	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۵/۹	۲۷۰/۶۱	۲۵۷/۵۰	۶۱/۶۴	۶۵/۵۷	۰
یونجه	۰	۰	۰	۰	۵۵/۰.۸	۱۲۹/۸۴	۲۵۳/۷۷	۳۲۶/۵۶	۳۲۲/۶۲	۲۵۱/۸	۱۸۸/۸۵	۷۰/۸۲
حبوبات	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱/۸	۱۶۱/۳۱	۲۰۵/۵۷	۱۰۵/۲۵	۴۹/۱۸	۰
سبزیجات	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۶۱	۲۳۹/۸۴	۳۷۶/۸۹	۳۵/۲۵	۱۶۰/۴۹	۱۰۰/۹۸	۰
سویا	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶۰/۸۲	۲۹۵/۰.۸	۲۷۴/۴۳	۱۰۴/۷۵	۷۳/۷۷	۰
شبدر	۱/۶۱	۰	۰	۰	۲۳/۷۷	۳۶/۸۹	۶۲/۳	۰	۱۵۴/۱	۱۱۳/۹۳	۸۳/۶۱	۴۵/۰.۸
توتون بهاره	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۶۴	۱۰۹/۰.۲	۱۶۳/۹۳	۱۲۹/۵۱	۶۸/۰.۳	۰	۰

### یافته‌ها

برای هر محصول به تفکیک کانال‌های مختلف، مساحت تحت پوشش هر کانال به صورت جدول ۴ محاسبه شد.

### اجرای بهینه‌سازی

پس از مشخص شدن و تعریف متغیرهای تصمیم، محدودیت‌های مسئله و تابع هدف، اجرای عملیات بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی در دستور کار قرار گرفت. در این زمینه، تمام محاسبات با استفاده از ماژول Solver در نرم‌افزار Excel و نیز نوشتن کدهای کامپیوتری لازم، صورت پذیرفت.

### تعیین اولویت دوری و نزدیکی کشت و تهیهٔ نقشهٔ الگوی کشت محصولات

بعد از اینکه مساحت بهینهٔ هر یک از محصولات در پایین دست کانال‌ها استخراج شد، برای تخصیص این مساحت‌ها در اراضی پایین دست، پارامترهایی برای اولویت بندی تقدم و تأخر کشت با عنایت به موارد زیر مدنظر قرار گرفت (این موارد از مشورت با کارشناسان ذیصلاح به دست آمده‌اند که می‌توانند از منطقه‌ای به منطقهٔ دیگر متفاوت باشند). در واقع در این مرحله مبحث مکانی مدنظر قرار دارد و هدف مشخص شدن ترتیب کشت هر محصول به تفکیک میزان و مکان است که برای دستیابی به

با معرفی پارامترها و محدودیت‌های محاسبه شده در مراحل قبل، این سامانه با بررسی این پارامترها بهترین مساحت مربوط به هر محصول در پایین دست هر انشعاب (کانال) را متناسب با کل مساحت زمین تحت پوشش محاسبه می‌کند. در این راستا، پس از اجرای بهینه‌سازی

دستیابی به این مهم، برنامه‌ای با استفاده از اشیای ArcObject به زبان برنامه‌نویسی C# نوشته شد. رابط گرافیکی مورد نیاز نیز با استفاده از اشیای ArcEngine تهیه شد.

این برنامه، داده‌های حاصل از اجرای مرحله بهینه‌سازی خطی (ماژول Solver در بستر نرم‌افزاری Excel) را می‌گیرد و سپس براساس مساحت‌های مطرح‌شده در مرحله قبل، اولویت دوری و نزدیکی کشت محصولات مناسب برای هر ترتیب و اولویت را مشخص می‌کند.

در واقع این سامانه، اولویت کشت محصولات به تفکیک کانال‌های آبرسانی مختلف را به صورت جدولی ارائه کرده (جدول ۵) و بر مبنای این اولویت کشت و میزان مساحت تخصیص داده شده براساس جدول ۴، نقشه الگوی کشت محصولات مختلف (شکل ۴) را آماده و عرضه می‌کند.

این هدف، مطابق پارامترهای زیر تصمیم‌گیری صورت گرفت:

(الف) زمین‌ها یا محصولاتی که بیشترین دوره آبیاری را دارند در محدوده نزدیک به ابتدای کانال قرار گیرند؛

(ب) محصولاتی که به آب بیشتری نیاز دارند در نواحی نزدیک به انشعاب (کانال) قرار گیرند و محصولاتی که نیاز آبی آنها کمتر است، در نواحی دورتر از کانال انتقال آب قرار گیرند؛

(ج) زمین‌هایی با مساحت زیاد و دور آبیاری زیاد که به آب بیشتری نسبت به زمین‌های دیگر نیاز دارند، در ابتدای کانال یا نزدیک به آن واقع شوند.

حال برای دستیابی به هدف یادشده بر مبنای شرایط مشخص شده، نتایج حاصل از بهینه‌سازی خطی بر روی اراضی پایین دست هر یک از کانال‌ها اعمال می‌شود. برای

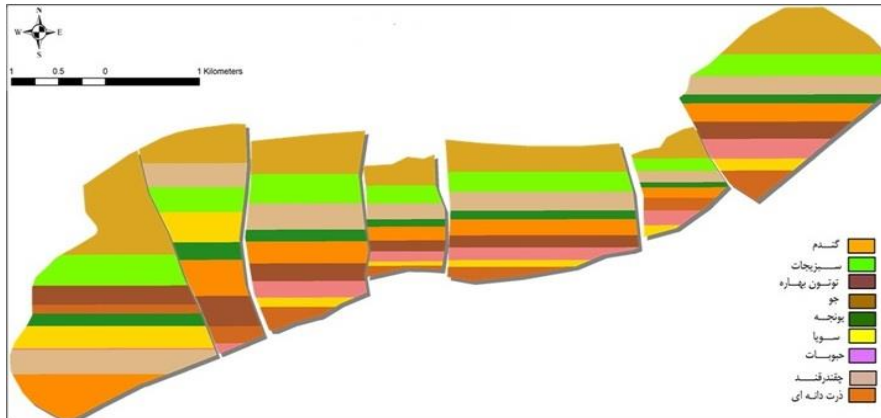
جدول ۴. مساحت بهینه‌شده محصولات در اراضی پایین دست هر یک از خطوط لوله‌ها (هکتار)

لوله اول	لوله دوم	لوله سوم	لوله چهارم	لوله پنجم	لوله ششم	لوله هفتم	
۳۰/۳۵	۱۶/۱۴	۲۰/۲۸	۱۱/۳۲	۲۲/۹۹	۶/۳۰	۲۴/۸۰	گندم
۷/۲۲	۳/۸۴	۴/۸۲	۵/۸۵	۵/۴۷	۳/۹۰	۵/۹۰	جو
۲۱/۶۷	۱۱/۵۲	۱۴/۴۸	۵/۵۸	۱۶/۴۲	۴/۵۰	۱۷/۷۱	چغندر قند
۱۸/۷۸	۹/۹۹	۱۲/۵۵	۵/۰۷	۱۴/۲۳	۳/۹۰	۱۵/۳۵	ذرت دانه‌ای
۱۰/۱۱	۵/۳۸	۶/۷۶	۴/۶۴	۷/۶۶	۲/۱۰	۸/۲۶۱	یونجه
۱/۴۴	۰/۷۶	۸/۶۹	۴/۲۹	۹/۸۵	۳/۳۰	۱۰/۶۳	حبوبات
۲۰/۲۳	۱۰/۷۶	۱۵/۴۵	۶/۲۴	۱۷/۵۱	۴/۸۰	۱۸/۹۰	سبزیجات
۲۰/۲۳	۱۰/۷۶	۱۳/۵۲	۵/۴۶	۴/۳۷	۱/۲۰	۴/۷۲	سویا
۱۴/۴۵	۷/۶۸	۹/۶۵	۳/۹۰	۱۰/۹۴	.	۱۱/۸۱	توتون بهاره
.	.	.	.	.	.	.	شبدر

جدول ۵. تعیین اولویت محصولات در اراضی پایین دست هر یک از خطوط لوله‌ها (هکتار)

شماره خط لوله	1-sp1	1-sp2	1-sp3	1-sp4	1-sp5	1-sp6	1-sp7
محصول اول	گندم	گندم	گندم	گندم	گندم	گندم	گندم
محصول دوم	سبزیجات	چغندر قند	سبزیجات	سبزیجات	سبزیجات	سبزیجات	سبزیجات
محصول سوم	توتون بهاره	سبزیجات	چغندر قند	چغندر قند	چغندر قند	چغندر قند	چغندر قند
محصول چهارم	جو	سویا	یونجه	یونجه	یونجه	یونجه	یونجه
محصول پنجم	یونجه	یونجه	ذرت دانه‌ای	ذرت دانه‌ای	ذرت دانه‌ای	ذرت دانه‌ای	ذرت دانه‌ای
محصول ششم	سویا	ذرت دانه‌ای	توتون بهاره	توتون بهاره	توتون بهاره	جو	توتون بهاره
محصول هفتم	حبوبات	توتون بهاره	حبوبات	حبوبات	حبوبات	حبوبات	حبوبات
محصول هشتم	چغندر قند	جو	سویا	سویا	سویا	سویا	سویا
محصول نهم	شبدر	شبدر	جو	جو	جو	شبدر	جو
محصول دهم	ذرت دانه‌ای	حبوبات	شبدر	شبدر	شبدر	توتون بهاره	شبدر





شکل ۴. ارائه الگوی کشت در هر قطعه از اراضی مورد مطالعه

با محاسبه و اجرای فرایند بهینه‌سازی این میزان کشت حدود ۳۰ هکتار برآورد شده است. این تفاوت برای سایر محصولات نیز وجود دارد و می‌توان گفت با این بهینه‌سازی، حدود ۳۰ درصد میزان کشت محصولات افزایش یافته است. این میزان بیانگر آن است که اگر کشاورزان کشت محصولات را با مطالعه و بر مبنای این روش انجام دهند، می‌توانند به افزایش سود و محصول مناسبی دست یابند.

در راستای تکمیل این تحقیق، موارد زیر به‌عنوان پیشنهادها آتی، به سایر محققان و علاقه‌مندان توصیه می‌شود.

- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بهبود بخشیدن به نحوه چرخش کانال‌های درجه ۲ و ۳ و نیز نحوه باز و بسته شدن آنها از بالادست به پایین دست (یا برعکس)؛
- لحاظ برنامه‌های زمان‌بندی برای باز و بسته شدن دریچه‌ها؛
- تهیه و ورود بانک اطلاعاتی اقتصادی شبکه (از قبیل هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، درآمدهای حاصل از فروش آب، حقوق و دستمزد میراب‌ها و ...) به GIS، با توجه به اهمیت در نظر داشتن مدیریت مالی شبکه‌های آبیاری و زهکشی در فرایند تخصیص مساحت زمین به محصول یا محصول به زمین؛
- استفاده از GIS برای اعمال روش‌های مختلف مدیریت بحران در شبکه‌های آبیاری از جمله در مواقع خشکسالی، سیلاب و دوره‌های کاهش کیفیت و کمبود آب آبیاری.

### بحث و نتیجه‌گیری

در سیستم‌های سنتی آبیاری و بهره‌برداری از منابع آبی به‌خصوص منابع آب ذخیره‌شده پشت سدها، به‌طور معمول برنامه منظم و منسجمی برای مدیریت منابع آبی وجود ندارد. در این راستا، پژوهش حاضر بر پایه خطوط اصلی انتقال آب و مطابق با آرایش کانال‌های درجه دوم پایین دست رودخانه و سد آغ‌چای، با توجه به بهره‌گیری حداکثری از آب و کمترین چرخش آبیاری، دستیابی به بهترین الگوی کشت و معرفی مدلی برای تخصیص این الگو به زمین‌های پایین دست را مورد توجه قرار داده است. در راستای تحقق اهداف یادشده، مقاله حاضر استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی و سیستم اطلاعات مکانی (GIS) را مدنظر قرار داد که این امر، دستیابی به الگوی کشت مناسب و تخصیص بهینه مساحت‌های حاصل‌شده برای محصولات مختلف به زمین‌های پایین دست را محقق ساخت. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که استفاده از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و تلفیق آن با سیستم اطلاعات مکانی، تأثیر مثبتی در استفاده بهینه از آب آبیاری و تخصیص مساحت کشت مناسب دارد و سبب بهبود تولیدات کشاورزی در منطقه می‌شود و به تسهیل مدیریت آبیاری اراضی کمک می‌کند.

در واقع مساحت تحت کشت در هر کانال آبرسانی قبل از بهینه‌سازی، به‌صورت تجربی انتخاب می‌شدند که این انتخاب مساحت، به‌منظور کاهش ریسک و مشکلات آبرسانی، اغلب به‌صورت کمینه بوده است. برای نمونه، محصول گندم در کانال ۱ اغلب به‌طور متوسط در مساحتی حدود ۲۳ هکتار کشت می‌شده است، درحالی که

## منابع

۱. دیانی، شادی، ۱۳۸۱، کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در مدیریت بهینه آب مصرفی شبکه آبیاری و زهکشی کوثر خوزستان، کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی.
۲. صمدی بهرامی، رقیه، کرمی، وحید. حسین‌زاده دلیر، حسین. ۱۳۸۵، مدیریت تحویل آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اردیبهشت ماه، اهواز، ایران.
۳. کیانی، قاسم‌علی. موسوی‌زاده، محمدحسن. محمدی، کوروش. ۱۳۸۵، کاربرد سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مدیریت بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اردیبهشت ماه، اهواز، ایران.
۴. منعم، محمدجواد. نجفی، محمدرضا. خوش‌نواز، صائب. ۱۳۸۶، برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مجله تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۳، شماره ۱: ۱-۱۱.
۵. منعم، محمدجواد. نوری، محمدعلی. ۱۳۸۹، کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی PSO در توزیع و تحویل بهینه آب در شبکه‌های آبیاری، مجله آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۴، شماره ۱: ۸۲-۷۳.
۶. کارآموز، محمد. احمدی، آزاده. فلاحی، مهدیس. ۱۳۸۵. مهندسی سیستم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
7. Fipp, G., and leigh, E., 2000, GIS Based management system for irrigation District, Proceeding of international conference on challenge facing irrigation and drainage in the New Millennium, USCID, Fort Collins, U.S.A.
8. Gundogdu, K.S., Degirmenci, H. and Demirtas, C., 2002, Creation of GIS Supported Data Base in Irrigation Project Management, International Conference of AGROENVIRON, Cairo, Egypt.
9. Menenti, M., Azzali, S., and D'urso, G., 1995, Management of irrigation schemes in arid countries. In: Use of Remote Sensing Techniques in Irrigation and Drainage, proceedings of the expert consultation, Montpellier, France.