نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه ۵۵ تا ۶۵، آذر ماه ۱۴۰۲ – مقاله پژوهشی

# استفاده از هوش جمعی در بهبود کشت گیاهان کشاورزی با بهره‌گیری از محاسبات آب مجازی

**ناصر محمدی ورزنه [۱]، علیرضا وفایی‌نژاد [*۲]، علی‌اصغر آل‌شیخ [۳]، زهرا عزیزی [۴]، امیرهومن حمصی [۵]**

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه علوم و تحقیقات آزاد اسلامی
naser.ut.mohammadi@gmail.com

[۲] دانشیار، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی
a_vafaei@sbu.ac.ir

[۳] استاد، دانشکده نقشه‌برداری و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیر طوسی
alesheikh@kntu.ac.ir

[۴] استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه علوم و تحقیقات آزاد اسلامی
zazizi@srbiau.ac.ir

[۵] استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه علوم و تحقیقات آزاد اسلامی
h_hemmasi@srbiau.ac.ir

(تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۲، تاریخ تصویب: مهر ۱۴۰۲)

## چکیده

یکی از دلایل اساسی که افراد و جوامع را به سوی بهینه‌سازی کشت محصولات سوق می‌دهد، کمبود و محدودیت آب شرب و حتی آب مصرفی در بسیاری از کشورهای کم آب جهان از جمله ایران است؛ که به یک مسئله مهم و حیاتی بدل شده‌است. یکی از راهکارهای مناسب در کشورهایی مانند ایران که در حوزه کشاورزی نیز فعال است، این است که با توجه به نیاز به آب در بخش کشاورزی، مدیریت بهینه کشت محصولات زراعی است. بر همین اساس ضروری است که روش‌های مختلف تحلیل، تصمیم و برنامه‌ریزی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، مورد دیگری که امروزه در بهبود الگوی کشت و کاهش میزان آب مصرفی نقش به سزایی می‌تواند ایفا نماید، در نظرگیری و محاسبه آب مجازی می‌باشد؛ از این رو بهینه‌سازی الگوی کشت با بهره‌گیری از محاسبات آب مجازی می‌تواند بسیار مفید واقع گردد. استفاده و بهره‌گیری از سامانه اطلاعات مکانی جهت ایجاد سیستم‌های تصمیم‌گیری، سبب مدیریتی منسجم و تصمیم‌گیری درست در امور مختلف می‌شود و نیز در نظرگیری آب مجازی منجر به بهبود الگوی گشت و کاهش مصرف آب خواهد بود. در نتیجه در پژوهش حاضر، با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری‌ای که با قابلیت‌های GIS و هوش جمعی ایجاد گردید، به همراه محاسبات آب مجازی برخی گیاهان زراعی، به ایجاد و ارائه راهکاری نوین جهت تخصیص بهینه الگوی کشت و در نتیجه استفاده‌ی صحیح از آب در اراضی کشاورزی بخش بن‌رود در توابع شهرستان ورزنه، واقع در جنوب شرق استان اصفهان، پرداخته شده‌است. بدین منظور، پس از بررسی روش‌های بهینه‌یابی در تصمیم‌سازی با استفاده از پارامترهای محیطی، به استفاده الگوریتم هوش جمعی جامعه مورچگان (ACO) در ترکیب با سامانه اطلاعات مکانی، در فرآیند تخصیص زمین با در نظرگیری آب مجازی کشت و نمو گیاهان در شبکه‌های آبیاری اراضی کشاورزی بخش مذکور دست یافته شد. در نهایت نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پس از بهینه‌سازی تخصیص زمین جهت کشت محصولات مشخص آن محدوده، بر اساس آب مجازی محصولات، میزان آب مصرفی می‌تواند به میزان ۳۷٪ مقدار اولیه کاهش یابد.

**واژگان کلیدی:** هوش جمعی، الگوریتم جامعه مورچگان (ACO)، آب مجازی، سامانه اطلاعات مکانی (GIS)، الگوی کشت، بهینه‌سازی.

* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی در چند سال گذشته و مواجه کشور با بحران بی آبی، مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی مصرف آن در بخش کشاورزی را به یک دغدغه ملی و فراگیر تبدیل کرده‌است. از آنجا که قسمت عمده منابع آبی کشور در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد، یافتن راهکارهایی برای مدیریت منابع آب از ضرورت و اهمیت خاصی برخوردار است. بهینه‌سازی الگوی کشت در کنار توجه به میزان آب‌بَری محصولات کشاورزی (آب مجازی) یکی از راهکارهای مهم برای مدیریت منابع آب در کشور محسوب می‌شود.

به دلیل ارزش و اهمیت بکارگیری بهینه آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، استفاده از روش‌ها و تکنیک-های جدید برای مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، تاثیر مناسب و رو به رشدی را در بهره‌برداری از شبکه خواهد داشت. در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، به دلیل پراکندگی مزارع، تنوع کشت و مسافت بین محل استحصال تا نقطه تحویل آب[1]، مدیریت بهره‌برداری و نگهداری بدون در نظر گرفتن تاثیر متقابل عوامل فوق میسر نمی‌شود.

علاوه بر آن، در شبکه‌های آبیاری، داده‌های توصیفی با حجم زیادی به صورت روزانه تولید می‌گردد که نیاز به ساماندهی، تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری دارد. تلفیق بهینه‌سازی الگوی کشت هم راستا با آب مجازی و به دست آوردن یک مدل با استفاده از قابلیت‌های GIS می‌تواند مجموعه گسترده‌ای از دستگاه‌های اجرایی در کشور را برای مطلوبیت‌بخشی به آب موجود در بخش کشاورزی منتفع سازد.

در دهه‌های اخیر، GIS به عنوان یک فن‌آوری پویا و کم‌نظیر با هدف مدیریت بهینه داده‌های مکانی و مکانی-زمانی، در دسترس کاربران علوم و فنون مختلف قرار گرفته‌است و به یکی از ابزارهای مهم و موثر در روند تصمیم‌گیری و مدیریت بهینه به شمار می‌روند. امروزه، استفاده از سامانه‌های اطلاعات مکانی و هوش مصنوعی در روند تصمیم‌سازی، نیازی ضروری و اجتناب ناپذیر گشته‌است. از این‌رو به بررسی مطالعات مختلفی در راستای بهینه‌سازی آبیاری و بهره‌برداری از منابع آب انجام پذیرفته‌است که این تحقیق از تجربیات آن‌ها جهت بهره‌برداری در مدل پیشنهادی استفاده شده‌است، پرداخته می‌شود.

مهدی کلاهی و همکاران در سال ۲۰۲۳ با هدف تعیین الگوی بهینه کشت بر اساس مفهوم آب مجازی و با در نظر گرفتن به حداقل رساندن مصرف آب مجازی و حداکثرسازی سود اقتصادی محصولات پژوهشی را در دشت عمرانی گناباد انجام دادند. ابتدا با تعریف معادلات هدف مناسب و محدودیت‌های مختلف مانند آب موجود یا سیاست‌های محلی و منطقه‌ای، سپس با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و چندهدفه در نرم افزار متلب الگوی کشت مناسب تعیین شد و در نهایت با استفاده از GIS، محصولات بهینه به اراضی کشاورزی مختلف منطقه تخصیص داده شدند. نتایج نشان داد که بهترین سیاست ترکیبی از دو هدف شامل به حداقل رساندن آب مجازی و حداکثر کردن سود اقتصادی است و در این صورت میزان مصرف آب مجازی در منطقه بیش از ۵۷ درصد کاهش یافت که قابل توجه است. همچنین با این مصرف آب مجازی نیز در صورت تغییر الگوی کشت، سود اقتصادی بالاتری حاصل می‌شود [۱].

سامان معروف‌پور و همکاران در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی تحت عنوان "جریان آب مجازی بهینه برای بهبود امنیت غذایی در کشورهای کم‌آب" به منظور بهبود امنیت غذایی در کشورهای کم آب روشی را برای پیوند شبکه‌های تجاری درون کشوری، امنیت غذایی و ردپای کل آب (WFs) برای بهبود امنیت غذایی ایجاد نمودند. این روش در ایران که کشوری کم آب است استفاده شده و نشان می‌دهد که با ایجاد یک شبکه تجاری می‌توان ۱۰۶×۷۸۱ متر مکعب آب را ذخیره نمود. نتایج از شبکه تجارت متعادل ورودی به یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای بهبود الگوهای کشت بر اساس اهداف دستیابی به امنیت غذایی و جلوگیری از بحران‌های آبی حاصل شده‌است. این روش با در نظر گرفتن ۵۱ محصول اصلی در ایران، نتایج طیف وسیعی از بهبود ۱۹ الی ۴۵٪ در امنیت غذایی و کاهش ۲ الی ۳٪ WFs را نشان می‌دهد [۲].

احسان قاسمی‌پور و همکاران در سال ۲۰۲۰، از یک چارچوب ورودی- خروجی چند منطقه‌ای (MRIO) برای ارزیابی جریان آب مجازی در ایران استفاده نموده‌اند. همچنین، ردپای آب داخلی و خارجی مناطق را در مقایسه با در دسترس بودن آب آن‌ها تخمین زده و نتایج نشان

---

۱ Water delivery

می‌دهد که شمال کشور بدون کم‌آبی، آب مجازی را از طریق تجارت کالا و خدمات وارد می‌کند، در حالی که مناطق شدیدا کم‌آب صادرکننده خالص آب مجازی بوده‌اند. ایران سالانه ۱۸۱۱ میلیون متر مکعب صادرات خالص داشته‌است. در حالی که منابع آبی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) ۹۲,۲ درصد از ردپای آب ملی را تشکیل می‌دهند. ۸۹,۱ درصد از کل صادرات مربوط به بخش کشاورزی است که تنها ۱۰,۵ درصد از درآمد ملی را شامل می‌شود [۳]. بهرامی و همکاران در سال ۲۰۲۰، طی پژوهشی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت بهینه‌سازی محدوده‌های آبی و ساختاردهی مناسب آن‌ها نمودند [۴].

احسان قاسمی‌پور و علی عباسی طی پژوهشی در سال ۲۰۱۹ به عنوان "ارزیابی پایداری منابع آب کشاورزی در مناطق خشک با استفاده از مفهوم آب مجازی: مورد استان خراسان جنوبی، ایران" با در نظرگیری شش شاخص برای طبقه‌بندی ۳۷ محصول زراعی بر اساس طبقه‌بندی مرکزی محصولات (CPC)، داده‌های ۱۰ ساله مربوطه به سال‌های ۱۳۸۴تا ۱۳۹۳ که از سازمان کشاورزی استان خراسان جنوبی به دست آمده‌است، مفهوم ردپای آب به همراه برخی از شاخص‌های اقتصادی برای ارزیابی کارایی مصرف آب استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که کشت سبزیجات را می‌توان جایگزین مناسبی برای سایر محصولات پرمصرف آب، مانند میوه‌ها، در سطح استان افزایش داد، نه تنها به دلیل TVW پایین آن‌ها، بلکه به دلیل بازده مالی بالاتر [۵]. بهرامی و همکاران طی پژوهشی در سال ۲۰۱۹ اقدام به استفاده از GIS و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در راستای انجام تخصیص بهره جسته‌اند [۶].

کوانلیانگ[۱] و همکارانش در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی تحت عنوان " تخصیص بهینه‌ی منابع آب موجود با توجه به تجارت آب مجازی در مناطق کم آب پکن" به این نتیجه دست یافته‌اند که آب مجازی یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین مولفه‌های تاثیرگذار در مدیریت مسائل آبی چین در آینده خواهد بود. بر این اساس، نویسندگان مقاله مذکور پیشبینی کرده‌اند که از میان ۱۶ محصول تولیدی در نواحی مختلف پکن، ۷ محصول با توجه به شاخص‌های آب مجازی و سناریوهای استمرار یا افزایش کم آبی در این شهر، از نظر منابع و سودرسانی اقتصادی به صرفه نخواهد بود. داده‌های این تحقیق با استفاده از GIS و مدل بهینه‌سازی چند منظوره[۲] تحلیل شده‌است [۷].

وانگ[۳] و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی تحت عنوان "صادرات آب مجازی در نواحی کشاورزی چین" به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به سناریوهای کاهش بارش و احتمال وجود کم آبی در این کشور، نزدیک به ۳۰ تا ۴۰ درصد از محصولات کشاورزی حال حاضر چین برای ۱۰ سال آینده با توجه به میزان آب‌بری آن در بخش صنعت و کشاورزی، به صرفه نخواهد بود. این مطالعه که تحلیل‌های خود را با مدلCCM [۴] انجام داده‌است، آب مجازی را مهمترین مولفه برای مدیریت منابع آب و اقتصاد کشاورزی دانسته‌است [۸].

اسپوز[۵] و راندی[۶] در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی به بررسی ضرورت‌های مدیریت منابع آب در شرق برزیل با توجه به آب مجازی پرداخته‌اند. در این مقاله، نویسندگان با بررسی توزیع مکانی مهم‌ترین محصولات کشاورزی در برزیل با استفاده از GISو با توجه به حجم آب مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی و نیز وضعیت فعلی و آینده منابع آب در شرق برزیل، به این نتیجه دست یافته‌اند که تولید محصولات کشاورزی با توجه به آب مجازی باید توزیع مکانی مجدد شود و تولید مرکبات در شرق برزیل ممنوع اعلام شود [۹].

با توجه به مطالعه پژوهش‌های صورت پذیرفته در سطح بین‌الملل که برخی از آن‌ها ذکر گردید، ضرورت پرداختن به پژوهش حاضر مشهود می‌شود، زیرا در آن‌ها به در نظرگیری توامان آب مجازی و استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و هوشمندسازی حل موضوع مورد مطالعه این پژوهش پرداخته نشده‌است. در ادامه مقاله به بیان ادبیات پژوهش، روش اجرا و پیاده‌سازی و بیان نتایج حاصل از این پژوهش، پرداخته می‌شود.

## ۲- ادبیات پژوهش

در این بخش تعریفی از اصطلاحات اساسی این پژوهش بیان می‌شود.

۱ Quanliang

۲ Multi-objective optimization model

۳ Wang

۴ Compensation Coupling Model

۵ Spoze

۶ Randee

## ۲-۱- هوش مصنوعی

هوش مصنوعی شبیه‌سازی فرآیندهای هوش موجودات زنده توسط ماشین‌ها به ویژه سیستم‌های کامپیوتری است. کاربردهای خاص هوش مصنوعی شامل سیستم‌های خبره، پردازش زبان طبیعی، تشخیص گفتار و بینایی ماشین و برخی روش‌های بهینه‌سازی است [۱۰].

### ۲-۱-۱- بهینه‌سازی

بهینه‌سازی به یافتن مناسب‌ترین راه حل از بین همه راه حل‌های امکان پذیر اشاره دارد. استفاده از بهینه سازی برای حل مسائل می‌تواند راه حل‌ها را به بهترین شکل ممکن مقایسه کند و شامل اطلاعاتی در مورد تابع هدف، محدودیت‌ها و قوانین مسئله است. دامنه مسئله با محدودیت هایی مانند محدوده مقادیر ممکن برای یک تابع مشخص می‌شود. برای یافتن راه حل بهینه باید از انواع الگوریتم ارزیابی عملکرد انجام شود و در نهایت راه حل بهینه دارای حداقل خطا خواهد بود. سه عنصر اصلی برای حل یک نوع الگوریتم بهینه‌سازی وجود دارد: هدف، متغیرها و محدودیت ها. هر متغیر می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد و هدف یافتن مقدار بهینه برای هر یک از آن‌ها و در نهایت مقدار محاسبه شده برای تابع هدف است.

الگوریتم‌های فراابتکاری، فراتکاملی و فرااکتشافی نوعی الگوریتم‌های تصادفی هستند که برای یافتن پاسخ بهینه بکار می‌روند. روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته‌ی الگوریتم‌های دقیق [۱] و الگوریتم‌های تقریبی [۲] تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند، اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی کافی را ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی، قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری [۳] و فراابتکاری [۴] و فوق ابتکاری [۵] بخش‌بندی می‌شوند [۱۱].

۱ Exact algorithms
۲ Approximate algorithms
۳ Heuristic
۴ Meta-heuristic
۵ Hyper heuristic

## ۲-۲- الگوی کشت

الگوی کشت محصولات کشاورزی به معنی نسبتی از زمین که زیر کشت محصولات مختلف در مقاطع زمانی مختلف می‌باشد، اشاره دارد. الگوی کشت نشان دهنده مدت زمانیست که یک محصول در حال کشت است و همچنین ترتیب کشت محصولات گوناگون در یک زمین با ابعاد مشخص است که با رعایت اصول اکوفیزیولوژیک تولید محصولات کشاورزی در راستای حفظ محیط زیست و افزایش بهره‌وری تولید باهم لحاظ شوند.

هر گونه تغییر در الگوی کشت می‌تواند باعث موارد زیر شود:

- تغییر در نسبتی از زمین که زیر کشت محصولات مختلف است
- تغییر در توالی مکانی و زمانی محصولات مختلف زیر کشت

شایان ذکر است که الگوی کشت محصولات کشاورزی بر اساس میزان بارندگی، دما، آب و هوا، تکنولوژی و نوع خاک تعیین می‌شود. با توجه به گستردگی پهنه‌ی مرزی کشور و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون رسیدن به الگوی کشت مناسبی که از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهادهای تولید به ویژه عامل محدود کننده‌ی آب به‌دست آورد ضرورتی انکار ناپذیر است. برای به دست آوردن حداکثر بهره‌وری از زمین ، الگوهای کشت مختلف انجام می‌شود [۱۲].

## ۲-۳- شاخص‌های ضروری طراحی الگوی کشت

- شاخص‌های اقتصادی: شاخص‌های اقتصادی در الگوی کشت باید به‌گونه‌ای تعیین شوند تا با انتخاب نوع محصول همراه با افزایش بهره‌وری از منابع موجود (آب و خاک و غیره)، حداکثر درآمد را برای کشاورزان و تولید کنندگان به همراه داشته باشد و کشاورزان بتوانند با افزایش درآمد و سود حاصل از فروش تولیدات، نسبت به سرمایه‌گذاری و توسعه‌ی فعالیت‌های خود اقدام کنند.
- جایگاه محصولات اساسی در الگوی کشت: در طراحی الگوی کشت باید محصولات اساسی و استراتژیک از جمله گندم، برنج، دانه‌های روغنی و ذرت به صورت ویژه مورد توجه قرار گیرند تا امنیت غذایی کشور به شکل

مطلوب و اطمینان بخش تامین شود و خودکفایی در محصولات مهم و مورد نیاز کشور حاصل شود.

- مزیت نسبی: آن گروه از محصولات کشاورزی همانند پسته، زعفران و تولیدات گلخانه‌ای که از مزیت نسبی بالاتر و مطلوبیت اقتصادی بیشتری برخوردارند می‌بایست پس از محصولات اساسی با اولویت در الگوی کشت قرار گیرند.
- حفاظت از منابع پایه و محیط زیست: به منظور پایداری در تولید محصولات کشاورزی، حفاظت منابع پایه (آب و خاک و...) و محیط‌زیست بایستی به صورت ویژه در طراحی الگوی کشت مورد نظر باشد.
- مصرف بهینه آب: با توجه به قرار گرفتن کشورما در کمربند خشک و نیمه خشک دنیا، الگوی کشت بایستی با محوریت بهره‌وری بهینه از منابع آب تدوین شود [۱۳].

### ۲-۴- آب مجازی

مقدار آبی که در طول مراحل تولید محصولات کشاورزی استفاده می‌شود، آب مجازی گفته می‌شود. زمانی که تجارت کالاها به صورت جهانی انجام می‌شود، آب مجازی محصولات نیز خرید و فروش می‌شود که سبب به وجود آمدن یک جریان مجازی از آب بین کشورهای مختلف خواهد شد. کشور ما از نظر منابع آب در وضعیت خطرناکی قرار دارد، و در نظر گرفتن این موضوع از اهمیت خاصی برخوردار است. آب به عنوان مهم ترین عامل محدود کننده در نقاط خشک و نیمه خشک دنیا به خصوص ایران به حساب میاید و اصلی‌ترین عامل در مقدار بهره‌وری دیگر منابع به حساب می‌آید.

اکنون کمبود منابع آب یکی از اضطراری‌ترین مشکلات جهان است. در سال های گذشته دلایل متفاوتی مانند رشد جمعیت، رشد اقتصادی، تغییر اقلیم و اب و هوا و خشک سالی های متعدد، برای رسیدن به منابع آب شیرین در کشورهای مختلف رقابت ایجاد شده‌است که سبب کاهش منابع آب شیرین در مناطق مختلف شده و به مشکل کم آبی در کشورهای مختلف افزوده‌است. آب مجازی، آب نهفته در محصولات است و میزان آب مورد نیاز برای تولید محصولات است [۱۴، ۱۵]

### ۲-۵- سامانه اطلاعات مکانی در بهبود کشت

این سیستم با شبیه‌سازی شرایط مسئله حاضر و پیاده‌سازی مدل ریاضی مدنظر شرایط کارآمدتری را فراهم می‌نماید و با مدلسازی، نمایش و به‌هنگام‌سازی اطلاعات جهت مدیریت بهینه مناسب‌تر است. [۱۶، ۱۷].

## ۳- روش اجرا

### ۳-۱- الگوریتم جامعه مورچگان

برخی از روش‌های فراابتکاری بر پایه مطالعات شکل گرفته بر روی رفتار حشرات اجتماعی ایجاد شده‌اند. در بین رفتارهای مختلف حشرات، رفتار جستجوی غذا یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد این‌گونه سیستم‌های مصنوعی بوده‌است. الگوریتم مورچه، با الگوی تصادفی خود ضمن اجرای الگوریتم می‌تواند از جواب‌های قبلی برای هدایت جستجو و ایجاد جواب‌های جدید بهره گیرد. معروف‌ترین رفتار گروهی مورچه‌ها که به صورت گسترده در مسائل مختلف بهینه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته‌است، نحوه‌ی عملکرد آن‌ها در جست‌وجوی غذا می‌باشد. مورچه‌ها قادرند کوتاهترین مسیر بین لانه و منبع غذایی را با کارایی بسیار بالایی پیدا کنند.

مورچه‌های واقعی در حین حرکت، ماده‌ای شیمیایی به نام فرامان بر روی مسیر خود به جای می‌گذارند. در مسیرهای کوتاه‌تر، مورچه‌ها راحت‌تر و سریع‌تر به غذا می‌رسند، در نتیجه در این مسیرها فرامان بیشتری ریخته شده و به دلیل حساسیت مورچه‌ها نسبت به فرامان، بیشتر جذب این مسیرها می‌گردند و مسیرهای مناسب‌تر شناسایی می‌شوند. رفتار دیگر مورچه‌ها، ساخت قبرستان و مراقبت از کودکان است که در این دو رفتار اجتماعی و عملکرد مورچه‌ها، مفهوم خوشه‌بندی و دسته‌بندی را نشان می‌دهد. در این روش‌ها جهت شبیه‌سازی رفتار مورچه‌های واقعی، مورچه‌های مصنوعی تعریف می‌شود. برخی از مطرح‌ترین الگوریتم مورچه‌ها سیستم مورچه نخبه[۱]، سیستم مورچه ماکسیموم–مینیمم[۲]، سیستم کلونی مورچه[۳] می‌باشند.

۱ Ant-System
۲ Min-Max Ant System
۳ Ant Colony System

یکی از مواردی که قبل از اجرای الگوریتم باید مشخص باشد، تعداد مورچه‌ها است. در مرحله ابتدایی اجرای الگوریتم مورچه‌ها به طور تصادفی در فضای پاسخ قرار می‌گیرند. برای تنظیم فرومون اولیه می‌توان از یک مقدار تصادفی در بازه $[0,\tau_0]$ استفاده نمود. حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، شاخص دیگری است که قبل از شروع الگوریتم باید تنظیم شود. در هر تکرار مورچه‌ها برای انتقال از موقعیت کنونی به موقعیت بعدی از یک تابع احتمال بر اساس رابطه (۱) استفاده می‌کنند.

$$P_{ij}^{k}(t) = \tau_{ij}^{\alpha}(t) * \eta_{ij}^{\beta}(t) \qquad (۱)$$

در این رابطه $P_{ij}^{k}(t)$ احتمال انتقال مورچه $k$ ام در زمان $t$ از موقعیت $i$ به موقعیت $j$ می‌باشد. $\tau_{ij}$ چگالی فرومون متناظر حرکت از $i$ به $j$ است. $\eta_{ij}$ میزان مطلوبیت حرکت از $i$ به $j$. از $\alpha$ جهت تنوع بخشی به پاسخ‌ها و $\beta$ به عنوان نرخ یادگیری استفاده می‌شود. موقعیت‌های قبلی که توسط مورچه بررسی شده در لیستی قرار می‌گیرد تا مجددا به عنوان پاسخ مناسب انتخاب نشود. در نهایت کل پاسخ-های انتخاب شده با استفاده از تابع هدف (در بخش قبلی بیان شده است) بررسی شده و اگر بهینه‌تر از مجموعه پاسخ تکرار قبلی الگوریتم بود، به عنوان پاسخ مناسب جایگزین آخرین پاسخ بهینه می‌شود [۱۸].

### ۳-۲- طراحی تابع هدف

تابع هدف برای بهینه سازی الگوی کشت گیاهان کشاورزی شامل ارزن، پنبه، جو، گندم و یونجه با در نظر گرفتن آب مجازی به صورت زیر قابل فرمول بندی است [۱۹]:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} (V_i * Y_i) \qquad (۲)$$

$$\sum (X_i) = 1 \qquad (۳)$$

$$\sum (Y_i) \le A \qquad (۴)$$

$$\sum (W_i * Y_i) \le B \qquad (۵)$$

$$Y_i \ge 0, for = 1,2,3,4,5 \qquad (۶)$$

بیان مفهوم هر یک از پارامترهای ذکر شده در بالا:

$Z$ = کل ردپای آب مجازی الگوی کشت (مترمکعب در هکتار)

$V_i$ = ردپای آب مجازی محصول i ام (متر مکعب در تن)

$Y_i$ = مساحت (در هکتار) اختصاص داده شده به محصول i ام

$X_i$ = نسبت زمین اختصاص داده شده به محصول i ام

$A$ = کل سطح قابل کشت (بر حسب هکتار)

$W_i$ = نیاز آبی (بر حسب متر مکعب در هکتار) محصول i ام

$B$ = حداکثر ردپای مجاز آب مجازی (متر مکعب در هکتار)

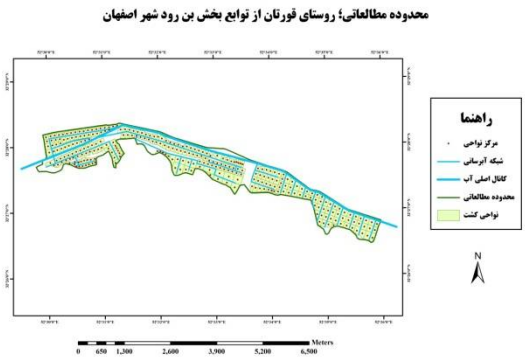
تابع هدف با بهینه‌سازی تخصیص زمین به محصولات مختلف، ردپای کل آب مجازی الگوی کشت را به حداقل می‌رساند. محدودیت اول تضمین می‌کند که نسبت زمین تخصیص یافته به هر محصول به ۱ می‌رسد. محدودیت دوم کل سطح زیر کشت را به زمین موجود محدود می‌کند. محدودیت سوم کل ردپای آب مجازی الگوی کشت را به حداکثر مقدار مجاز محدود می‌نماید. آخرین محدودیت تضمین می‌کند که مساحت اختصاص داده شده به هر محصول غیرمنفی است.

## ۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

### ۴-۱- منطقه مطالعاتی و محصولات مورد کشت

روستای قورتان مرکز دهستان گاوخونی، از توابع بخش بُن‌رود شهرستان اصفهان، در موقعیت جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۳ دقیقه‌ی طول شرقی و ۳۲ درجه و ۲۷ دقیقه‌ی عرض شمالی، در فاصله‌ی ۱۹ کیلومتری جنوب شرقی هرند و ۱۱۰ کیلومتری شرق اصفهان و در ۳۵ کیلومتری تالاب گاوخونی واقع شده‌است. ارتفاع روستای قورتان از سطح دریا ۱۴۸۰ متر و آب و هوای آن نیمه خشک است. فاصله‌ی این روستا تا شهر ورزنه (مرکز بخش بن‌رود) حدود ۱۲ کیلومتر و تا تالاب گاو خونی، ۳۵ کیلومتر می‌باشد.

زمین‌های کشاورزی این روستا نیز در بخش‌های شرقی و غربی روستا متمرکز شده‌است. زمین‌های کشاورزی به صورت خطی و مستقیم و هم‌عرض با جریان رودخانه‌ی زاینده رود می‌باشد. در این زمین‌ها محصولات متنوعی کشت می‌شود که از میان مهمترین آن‌ها می‌توان به پنبه، یونجه، ذرت، ارزن، جو و گندم اشاره نمود. در زیر (نقشه شماره ۱) نقشه محدوده مطالعاتی نمایش داده شده است.




نقشه ۱- نقشه موقعیت، شرایط آبی و تقسیمات اراضی مورد مطالعه

## ۴-۲- تهیه و آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز

### ۴-۲-۱- میزان نیاز آبی محصولات (بر حسب هکتار)

مقدار آب مورد نیاز گیاهان مختلف به عوامل مختلفی از جمله نوع خاک، آب و هوا و مرحله رشد بستگی دارد. در زیر برخی برآوردهای کلی از نیاز آبی برای گیاهان ارزن، پنبه، جو، گندم و یونجه آورده شده‌است بر اساس دستورالعمل های کلی است و ممکن است بسته به شرایط خاص منطقه در حال رشد متفاوت باشد [۱۹]:

۱. ارزن: ارزن گیاهی مقاوم به خشکی است که در طول فصل رشد به حدود ۳۵۰-۴۰۰ میلی متر آب نیاز دارد. می‌تواند با آب کمتر زنده بماند اما ممکن است بازدهی کمتری داشته باشد.

۲. پنبه: پنبه به آب زیادی نیاز دارد و از محصولات پر مصرف آب محسوب می‌شود. در طول فصل رشد به حدود۵۰۰-۶۰۰ میلی‌متر آب نیاز دارد. اما با مدیریت صحیح آبیاری می‌توان نیاز آبی را کاهش داد.

۳. جو: جو یک محصول فصل سرد است که در طول فصل رشد به حدود ۳۵۰-۴۰۰ میلی متر آب نیاز دارد. می‌تواند مقداری خشکی را تحمل کند اما با رطوبت کافی بهترین عملکرد را دارد.

۴. گندم: گندم در طول فصل رشد به حدود ۴۰۰-۵۰۰ میلی‌متر آب نیاز دارد. می‌تواند مقداری خشکی را تحمل کند اما بارطوبت کافی بهترین عملکرد را دارد.

۵. یونجه: یونجه یک گیاه چند ساله ریشه‌دار است که به آب زیادی نیاز دارد. در طول فصل رشد به حدود ۶۰۰-۸۰۰ میلی‌متر آب نیاز دارد. می‌تواند با آب کمتر زنده بماند اما ممکن است بازدهی کمتری داشته باشد.

### ۴-۲-۲- برآورد میزان آب مجازی محصولات (متر مکعب بر تن)

مقدار آب مجازی برای گیاهان ارزن، پنبه، جو، گندم و یونجه می‌تواند بسته به عوامل مختلفی مانند مکان، شرایط رشد و شیوه های کشاورزی متفاوت باشد. پایگاه داده شبکه Water Footprint مقادیر متوسطی را برای مصرف آب مجازی به ازای هر تن محصول تولید شده ارائه می‌دهد. از سال ۲۰۲۱، پایگاه داده مقادیر زیر را گزارش داده‌است [۱۹]:

جدول ۱- مقادیر آب مجازی محصولات

| محصول | مقدار آب مجازی (مترمکعب در تن) |
|---|---|
| ارزن | ۱۲۰۰ |
| پنبه | ۱۰۰۰۰ |
| جو | ۱۳۰۰ |
| گندم | ۱۵۰۰ |
| یونجه | ۲۷۰۰ |

توجه به این نکته مهم است که این مقادیر میانگین هستند و ممکن است مصرف آب مجازی برای یک محصول خاص را که در یک مکان خاص رشد می‌کند به صورت دقیق منعکس ننماید.

## ۴-۳- اجرای بهینه‌سازی و نمایش نتایج

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان الگوی کشت محصولات بهینه شده‌است. به این صورت که داده‌های جمع‌آوری شده جهت آب موجود، آب مورد نیاز کشت محصولات، آب مجازی برای محصولاتی که در آن منطقه کشت می‌شوند، مساحت قطعه زمین‌ها جهت کشت محصولات همراه با تابعی که به عنوان تابع هدف جهت بهینه‌سازی الگوی کشت با پارامترهای بیان شده در قسمت قبل ذکر گردیده‌است (رابطه ۲) و هدف به حداقل رسانیدن این تابع می‌باشد. علاوه با پارامترهای های مهم و ضروری بهینه‌سازی الگوی کشت پارامترهایی نیز برای الگوریتم جامعه مورچگان وجود دارد که انتخاب مقدار مناسب برای آن‌ها هم تاثیر مثبت در نتایج و اجرای الگوریتم خواهد داشت و هم از ضروریات پیاده‌سازی الگوریتم مذکور می‌باشد که در ادامه مقادیر آن‌ها در جدول شماره ۲ بیان می‌گردد.

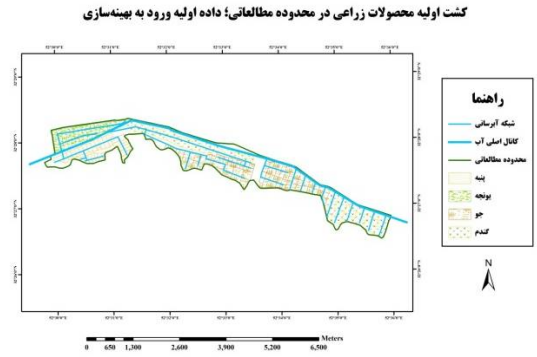
در استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان، مورد اولی که قبل از اجرای الگوریتم باید مشخص باشد، تعداد مورچه‌ها است. حدود ۲۰ عدد برای تعداد مورچه‌ها تعدادی است که در حالت بهینه‌تر و مناسب‌تری برای مسئله ما به پاسخ می‌رسد؛ در نتیجه تعداد مورچه‌ها را ۲۰ عدد در نظر می‌گیریم. در ابتدا اجرای الگوریتم مورچه‌ها به طور تصادفی در فضای پاسخ قرار می‌گیرند. برای تنظیم فرومون اولیه می‌توان از یک مقدار تصادفی در بازه $[0,\tau_0]$ استفاده نمود که در جدول زیر مقدار آن در این پژوهش مشخص شده‌است. حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، شاخص دیگری است که قبل از شروع الگوریتم باید تنظیم شود که در این پژوهش با بررسی حالت‌های مختلف ۱۰۰ در نظر گرفته شد؛ زیرا منجر به نتیجه بهتری گردید و از آن مقدار به بعد نتایج ثابت ماند. اجرای این الگوریتم به این صورت است که در هر تکرار مورچه‌ها برای انتقال از موقعیت کنونی به موقعیت بعدی از یک تابع احتمال بر اساس رابطه (۱) استفاده می‌کنند.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای اساسی الگوریتم جامعه مورچگان

| پارامتر | مقدار در این پژوهش |
|---|---|
| تعداد مورچه‌ها | $Number\ of\ Ants = 20$ |
| تعداد تکرار | $Iteration = 100$ |
| نرخ تنوع‌بخشی | $\alpha = 1$ |
| نرخ یادگیری | $\beta = 1$ |
| $\tau_0$ | 1 |
| $\tau$ | $\tau = \tau_0 * Ones\ Matrix$ |
| $\eta$ | $\eta = 1/\sum(V_i * Y_i)$ |
| نرخ تبخیر فرومون | $\rho = 0.05$ |
| نرخ افزایش فرومون | $1/Cost(ant_i)$ |

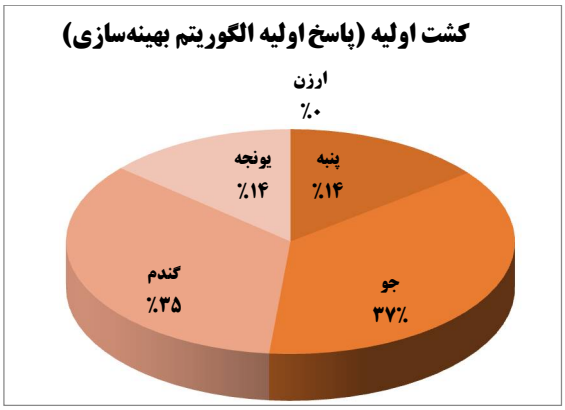
با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و ArcGIS جهت ایجاد و استفاده از پایگاه‌های داده تمامی داده‌های شرح داده شده، کدنویسی و اجرای الگوریتم جامعه مورچگان، اجرا و پیاده‌سازی بهینه‌سازی و نتایج آن و ارائه یک الگوی کشت بهینه با توجه به شرایط اثرگذار در محدوده قورتان استان اصفهان استفاده شد و در نهایت نقشه زیر جهت پیاده‌سازی الگوی کشت مناسب و بهینه آن منطقه ارائه گردید.

الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان نیاز به پاسخ اولیه ندارد و خودش قادر است پاسخ اولیه مورد نیاز اجرای الگوریتم را ایجاد نماید؛ اما به جهت در نظرگیری تجربه خبرگان آن محیط که کشاورزان آن خطه بشمار می‌آیند، الگوی کشت سنتی انجام شده در محدوده مطالعاتی به عنوان پاسخ اولیه وارد الگوریتم بهینه‌سازی می‌شود. در نقشه شماره ۲ کشت اولیه سنتی محدوده که توسط کشاورزان همه ساله انجام می‌پذیرد نمایش داده شده است.



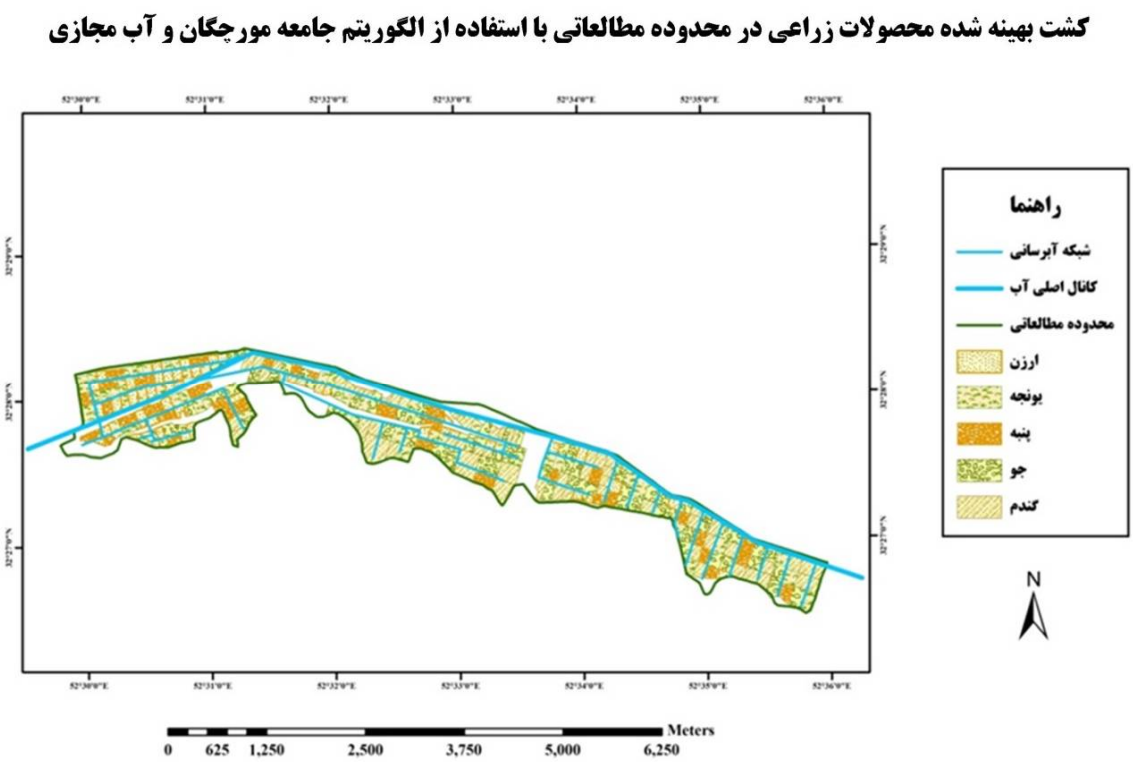

نقشه ۲- الگوی کشت اولیه و سنتی محدوده مطالعاتی بدون در نظرگیری آب مجازی

در زیر میزان و نوع محصولات کشت شده به روش سنتی در محدوده مطالعاتی به صورت درصدی از مساحت کل محدوده به صورت نموداری نمایش داده شده است.




نمودار ۱- نوع و میزان محصولات کشت اولیه و به روش سنتی (بر حسب درصد نسبت به مساحت کشت کل محدوده)

نقشه شماره ۳، نتیجه بهینه‌سازی کشت در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.




نقشه ۳- الگوی کشت بهینه شده با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان و در نظرگیری آب مجازی

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۵-۱- نتیجه‌گیری

با بررسی نوع پارامترها و معیارهای اساسی در تخصیص و همچنین بررسی روش‌های بهینه‌سازی، اقدام به بهینه‌سازی توزیع الگوی کشت در اراضی کشاورزی با بهره‌گیری از آب مجازی نموده و با روش بهینه‌سازی جامعه مورچگان مشخص شد و این روش، توانست الگوی کشت بهینه‌ای را ارائه دهد. علاوه بر برنامه ذکر شده، نیاز بود که نوع، میزان و مکان محصول مورد نظر نیز مشخص شود. این امر با استفاده از قابلیت‌های مکانی GIS انجام شد و با سفارشی‌سازی این قابلیت‌ها و تلفیق آن‌ها با توابع تخصیص الگوی کشت به تولید نقشه تخصیص قطعات زمین برای هر یک از قطعات و محصولات در طبقه بندی‌های مشخص شده در نقشه ۱ منجر شد.

در واقع، این نقشه بیانگر کشت بهینه محولات است با توجه به میزان آب در دسترس، آب مجازی و میزان آب مورد نیاز. پس از تهیه نقشه الگوی کشت بهینه شده، مشخص شد که میزان کمبود آن از ۴۱۳۷۵۳ مترمکعب در حالت غیر بهینه به ۱۱۳۰۳۵ مترمکعب در حالت بهینه کاهش یافته‌است و به میزان ۳۷ ٪ مقدار اولیه کمبود آب در حالت کشت سنتی می‌باشد. به عبارت دیگر، با استفاده از این روش می‌توان با ثابت نگه داشتن میزان کمبود آب قابل جبران، نسبت به افزایش سطح کشت محصولات اقدام و به سودآوری دست یافت.

### ۵-۲- پیشنهادات

با توجه بررسی‌ها و نتایج به دست آمده در این تحقیق و با توجه به اینکه این تحقیق بیشتر به دنبال تاکید نقش سیستم اطلاعات جغرافیایی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در نظرگیری زمان و مکان به صورت توامان در حل مسائل، در زمینه تخصیص آب است و به نوعی با تکیه بر توانایی‌ها و قابلیت‌های کلیدی این دو سامانه، یک روش بهینه آبیاری را معرفی نموده‌است، پیشنهاد می‌شود از پارامترهایی نظیر میزان هدررفت آب، میزان رطوبت خاک، شوری خاک، نفوذپذیری خاک نیز استفاده و بررسی گردد.

# مراجع


[۱] Mahdi Kolahi, Farhad Hosseinali, Mojtaba Karimaei Tabarestani, (2023). Determining the optimal cultivation pattern by considering the concept of virtual water and economic benefits (Case Study: Omrani Plain in Khorasan Razavi), Iranian Journal of Irrigation and Drainage, Volume 16, Issue 6 - Serial Number 96, March and April 2023, Pages 1221-1232

[۲] Maroufpoor, Saman; Bozorg-Haddad, Omid; Maroufpoor, Eisa; Gerbens-Leenes, P. Winnie; Loáiciga, Hugo A; Savic, Dragan; Singh, Vijay P. (2021). Optimal virtual water flows for improved food security in water-scarce countries. Scientific Reports, 11 (1), 21027.

[۳] Qasemipour, Ehsan., Tarahomi, Farhad., Pahlow, Markus., Malek Sadati, Seyed Saeed., Abbasi, Ali., (2020). Assessment of Virtual Water Flows in Iran Using a Multi-Regional Input-Output Analysis. Sustainability 2020, 12(18), 7424; https://doi.org/10.3390/su12187424

[۴] Bahrami, Nahid, Kiavarz, Majid, Argany, Meysam. (2020) "The Fusing of Satellite Images and Using Particle Swarm Optimization Algorithm to Improving Evaluation of Water Body, Focusing on Monitoring and Identifying Flood." Journal of Environmental Studies 46.2: 431–446.

[۵] Qasemipour, Ehsan., Abbasi, Ali., (2019). Assessment of Agricultural Water Resources Sustainability in Arid Regions Using Virtual Water Concept: Case of South Khorasan Province, Iran. Water 2019, 11(3), 449; https://doi.org/10.3390/w11030449

[۶] Bahrami, N., Vafaeinejad, A.R., Alesheikh, A.A., (2019). "Designing a spatio-temporal Decision Support System for tasks allocation planning to relief workers after the earthquake", *Journal of Environmental Science and Technology*, December 2019, Doi: 10.22034/JEST.2019.31884.4003

[۷] White, C. Davina, Lewis, M. Megan (2011). A new approach to monitoring spatial distribution and dynamics of wetlands and associated flows of Australian Great Artesian Basin springs using QuickBird satellite imagery, Journal of Hydrology, 408 (2011) 140-152

[۸] Yingchun Ge, Xin Li, Chunlin Huang, Zhuotong Nan (2013). A Decision Support System for irrigation water allocation along the middle reaches of the Heihe River Basin, Northwest China, Environmental Modelling & Software 47(2013) 182-192

[۹] Yong Zeng, Yanpeng Cai, Peng Jia, Hoogkee Jee (2012). Development of a web-based decision support system for supporting integrated water resources management in Daegu city, South Korea, Expert Systems with Applications, 39(2012) 10091-10102

[۱۰] Bahrami, N., Argany, M., Samani, NN., Vafaei Nejad, AR., (2019). "Designing a context-aware recommender system in the optimization of the relief and rescue", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 42, Pages 171-177.

[۱۱] Akhwan-Kazemzadeh, M., Yamani, M. (2016). Meta-heuristic optimization algorithms. Publisher: Jihad University, branch of Amirkabir University of Technology, 428 pages, 10-digit reference number: 9642100789, 13-digit reference number: 9789642100781.

[۱۲] Alizadeh, A. (2002). Principles of applied hydrology. Imam Reza University Publications.

[۱۳] Rangzen, K. (2005). The use of remote sensing in improving the management and optimal use of agriculture in the irrigation network. Seminar on the application of geographic information system - remote sensing, Ahvaz Sugarcane Planting and By-Industries Company, pp. 5-3

[۱۴] Virtual Water in Agriculture, https://palayeshcood.com

[۱۵] Virtual Water, Country Water and Wastewater Company, https://www.nww.ir

[۱۶] Bahrami, N., (2019). "Using Tabu Search Algorithm and Geospatial Information System for Managing of the Relief and Rescue Teams", *Journal of Geomatics Science and Technology*, Volume 8, Issue 3, Pages 179-188.

[۱۷] Bahrami, Nahid., Meysam Argany, Meysam., Jelokhani Neyaraki, Mohammadreza ., Vafaeinezhad, Alireza., (2019). "Providing a spatial approach in the rescue and relief management after the earthquake", Environmental Management Hazards, Volume 6, Issue 2, Pages 117-129.

[۱۸] Bahrami, N., Argany, M., Neysani Samani, N., Vafaei Nejad, AR., (2021), "Designing a Context-aware Recommender System in the Optimization of the Relief and Rescue by Ant Colony Optimization Algorithm and Geospatial Information System", *Journal of Geomatics Science and Technology*, Volume 11, Issue 2, Pages 153-162.

[۱۹] Water Footprint, (2021). Water Footprint Network, https://www.waterfootprint.org