

## مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره و طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ در کاهش زمان انجام عملیات کشاورزی با محدودیت منابع انجام عملیات کشاورزی با محدودیت منابع

مهران صالحی<sup>۱</sup> عادل طاهری حاجیوند<sup>۲</sup>، کیمیا شیرینی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول) رایانامه: a.taheri@tabrizu.ac.ir

۳- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

## Digital Twin and natural hazard management

Abolfazl Jaafari

Assistant Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: jaafari@rifr-ac.ir

### Abstract

This article introduces the capabilities and applications of digital twin technology in natural hazard management. A digital twin is a virtual, dynamic, and interactive representation of physical objects, processes, or environments that, through the integration of the Internet of Things, artificial intelligence, and big data, enables accurate simulation and prediction of system conditions and behaviors. Originating from NASA's Apollo program in ۱۹۶۹, this technology has found novel applications in recent years across various domains, particularly in natural hazard management. Adopting a descriptive approach, the article examines key applications such as critical scenario modeling, early warning systems, real-time monitoring of vital infrastructure, emergency resource management, and immersive training. It also introduces commonly used platforms and explains the role of the Digital Twin Definition Language (DTDLD) in standardizing digital twin structures and behaviors. The article further highlights existing technical and operational challenges and underscores the importance of developing supportive infrastructure, unified standards, and interdisciplinary research for the sustainable adoption of this technology. Within the Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), digital twins can enhance natural hazard management through scenario-based research, interactive training in disaster response, and the promotion of innovative, resilient agricultural models.

**Keywords:** Drought, crisis management, flood, landslide, Digital Twin, simulation, wildfire.

### چکیده

با توجه به محدودیت منابع در بخش کشاورزی و برای افزایش بهره‌وری و کاهش اتلاف منابع، مدیریت بهینه زمان‌بندی فعالیت‌های زراعی اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، برای کاهش زمان انجام فرآیندهای کشاورزی، از الگوریتم‌های فرالبتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره<sup>۱</sup> و طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک<sup>۲</sup> برای بهینه‌سازی تخصیص منابع استفاده شده است. روش پژوهش، توصیفی است و برای تحلیل داده‌ها از ابزارهای ریاضی و الگوسازی استفاده شده است. از آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (آنوا) در نرم‌افزار مطلب، برای ارزیابی عملکرد الگوی پیشنهادی استفاده شده است. نتایج کمی نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره براساس شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل<sup>۳</sup> با مقدار میانگین ۷۵۰، در مقایسه با مقدار ۱۰۰۰ الگوریتم طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک<sup>۲</sup>، عملکرد بهتری دارد. به عبارت دیگر، راه‌حل‌های به دست آمده به مرز پارتو نزدیک‌تر و بهینه‌تر هستند. ازسوی دیگر، الگوریتم طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک<sup>۲</sup> در معیار شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب با میانگین ۰.۲۵ نسبت به ۰.۱۸ بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره عملکرد بهتری ارائه داد که نشان‌دهنده تنوع و پراکندگی بیشتر راه‌حل‌هاست. الگوی ارائه‌شده توانسته است تخصیص منابع به فعالیت‌های کلیدی کشاورزی شامل خاک‌ورزی، داشت، کاشت و برداشت را با کارایی بالا انجام دهد و زمان‌بندی مناسبی برای اجرای این عملیات فراهم کند. براساس الگو، زمان‌بندی فعالیت‌ها برای محصولات گندم، کلزا و جو به‌گون‌های تعیین شده است که هر مرحله، از بازه‌های زمانی بهترین زمان، زمان نیمه‌مناسب و زمان اضطراری تشکیل شده است؛ به‌طوری‌که خاک‌ورزی بین روزهای ۱ تا ۲۰، داشت بین روزهای ۳۰ تا ۹۰، کاشت بین روزهای ۵ تا ۳۰ و برداشت بین روزهای ۸۰ تا ۱۲۰ انجام می‌شود. این برنامه زمان‌بندی با دقت بالا احتمال انجام به‌موقع عملیات را افزایش داده و مدیریت بهینه منابع را ممکن می‌سازد.

**کلیدواژه‌ها:** دشت مغان، فرآیندهای کشاورزی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره، الگوریتم طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲، محدودیت منابع.

1. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)  
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)  
3. Mean Ideal Distance (MID)

## مقدمه

خاک‌ورزی، کاشت، داشت و برداشت، فرآیندهای عملیات کشاورزی هستند که اجرای هر یک از این مراحل در بازه‌های زمانی مناسب، نقش حیاتی در افزایش بهره‌وری و عملکرد محصول دارد. در صورتی که عملیات کشاورزی خارج از این محدوده زمانی انجام شود، میزان عملکرد محصول کاهش یافته و بهره‌وری آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با این حال، کشاورزان معمولاً این افت عملکرد را به عواملی مانند کاهش حاصلخیزی خاک، شیوع آفات، کیفیت پایین بذر و پراکنش نامناسب نزولات جوی نسبت می‌دهند، زیرا اثرات ناشی از تأخیر در عملیات به‌راحتی قابل تشخیص نیست (طاهری حاجیوند و همکاران، ۱۴۰۲).

برای کاهش هزینه‌های ناشی از تأخیر در عملیات کشاورزی، باید در پروژه‌های خودکارسازی کشاورزی، همانند پروژه‌های صنعتی، براساس مدیریت علمی و کنترل پروژه برنامه‌ریزی شود. چنین رویکردی باعث افزایش کارایی، تخصیص بهینه منابع و اجرای عملیات در بازه زمانی مناسب خواهد شد (حداد و همکاران، ۲۰۱۳).

چنانچه عملیات کاشت، داشت و برداشت در زمان مقرر انجام نشود، کاهش تولید اجتناب‌ناپذیر بوده و این کاهش محصول می‌تواند با کاهش کیفیت بذر، خسارت ناشی از آفات و بیماری‌ها و ناهماهنگی در توزیع نزولات جوی همراه باشد. این مسئله، تفکیک اثرات تأخیر در عملیات از سایر عوامل را دشوار می‌کند، اما بررسی‌های علمی نشان داده‌اند که اجرای عملیات در زمان مناسب می‌تواند به‌طور مستقیم میزان عملکرد محصول را افزایش دهد (تارانتیلیس و کیرانودیس، ۲۰۲۱).

مدیریت زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها است که باید با نظمی مشخص و در بازه زمانی معین اجرا شوند. اگر این فعالیت‌ها به موقع انجام نشوند، عملکرد کمی و کیفی محصول و در نتیجه درآمد کشاورزان کاهش خواهد یافت. علاوه بر این، منابع مورداستفاده در کشاورزی اغلب محدود

هستند و تخصیص نیافتن بهینه این منابع به فعالیت‌ها، احتمال تأخیر در اجرای به موقع عملیات را افزایش می‌دهد (شیرینی و طاهری حاجیوند، ۱۴۰۲).

مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع<sup>۱</sup> یکی از مسائل سخت محاسباتی (ان پی سخت<sup>۲</sup>) است که به دلیل پیچیدگی بالا، حل آن با روش‌های دقیق محاسباتی کارآمد نیست. در مقابل، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری قابلیت بیشتری برای حل این نوع مسائل دارند. در این الگو، هر پروژه شامل تعدادی فعالیت با منابع محدود و اولویت‌های اجرایی است که ممکن است به صورت متوالی یا همپوشانی زمانی اجرا شوند (فرد مرادی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۷). علاوه بر زمان، محدودیت‌های منابع نیز نقش مهمی در اجرای عملیات کشاورزی دارند، زیرا در بسیاری از موارد، چندین فعالیت به‌طور هم‌زمان به یک منبع خاص نیاز دارند که این امر می‌تواند باعث تأخیر در اجرای عملیات شود.

در سال‌های اخیر، در زمینه بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. این مطالعات نشان داده‌اند که روش‌های هوشمند مبتنی بر بهینه‌سازی فراابتکاری می‌توانند در مدیریت منابع، کاهش زمان انجام عملیات و افزایش بهره‌وری کشاورزی نقش مؤثری داشته باشند. طاهری حاجیوند و همکاران (۱۴۰۲) برای حل مسئله تخصیص منابع محدود در پروژه‌های خودکارسازی کشاورزی، یک الگوریتم فرامکاشفه‌ای ارائه کردند که هدف آن ایجاد تعادل میان زمان و هزینه بود. در این پژوهش، از الگوریتم رقابت استعماری برای زمان‌بندی پروژه‌های خودکارسازی دو محصول غالب در کشت و صنعت مغان استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی توانسته است منابع را به‌صورت بهینه تخصیص داده و زمان‌بندی فعالیت‌ها را بهبود بخشد. دانشگری و همکاران (۱۴۰۱) یک الگوی زمان‌بندی پروژه برای تخصیص و تسطیح منابع محدود در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. در

1. Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)
2. Np hard

می‌دهد و در عین حال، کران پایین بهتری برای مسیر بحرانی به‌دست می‌آورد.

مطالعات انجام‌شده نشان داد که روش‌های فراابتکاری و هوش مصنوعی در حل مسائل زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی با محدودیت منابع، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارند. در این پژوهش و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، کاهش زمان انجام فرآیندهای کشاورزی، با توجه به محدودیت منابع آن، بررسی می‌شود. هدف این پژوهش ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری است که بتواند با بهینه‌سازی زمان‌بندی عملیات کشاورزی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، احتمال انجام به‌موقع فعالیت‌ها را افزایش دهد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (آنوا) در نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. این آزمون، براساس شاخص‌های کلیدی ارزیابی عملکرد، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی را مقایسه می‌کند.

مطالعات انجام شده نشان داد که روش‌های فراابتکاری و هوش مصنوعی در حل مسائل زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی با محدودیت منابع، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارند. در این پژوهش و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، کاهش زمان انجام فرآیندهای کشاورزی، با توجه به محدودیت منابع آن، بررسی می‌شود. هدف این پژوهش ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری است که بتواند با بهینه‌سازی زمان‌بندی عملیات کشاورزی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، احتمال انجام به‌موقع فعالیت‌ها را افزایش دهد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (آنوا) در نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. این آزمون، براساس شاخص‌های کلیدی ارزیابی عملکرد، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی را مقایسه می‌کند.

با توجه به ماهیت پیچیده و چندهدفه بودن مسئله، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره

این پژوهش، از روش‌های فراابتکاری الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تبرید شبیه‌سازی شده در کنار روش دقیق سیپلکس استفاده شد. نتایج حاصل از مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی نشان داد که الگوریتم ژنتیک دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. سراج و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ترکیبی رقابت استعماری-ژنتیک، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع دوهدفه را حل کردند. در این پژوهش، یک الگوریتم ترکیبی جدید ارائه شد که عملکرد آن با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره<sup>۱</sup> مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره<sup>۱</sup>، عملکرد بهتری در حل مسئله ارائه داده است.

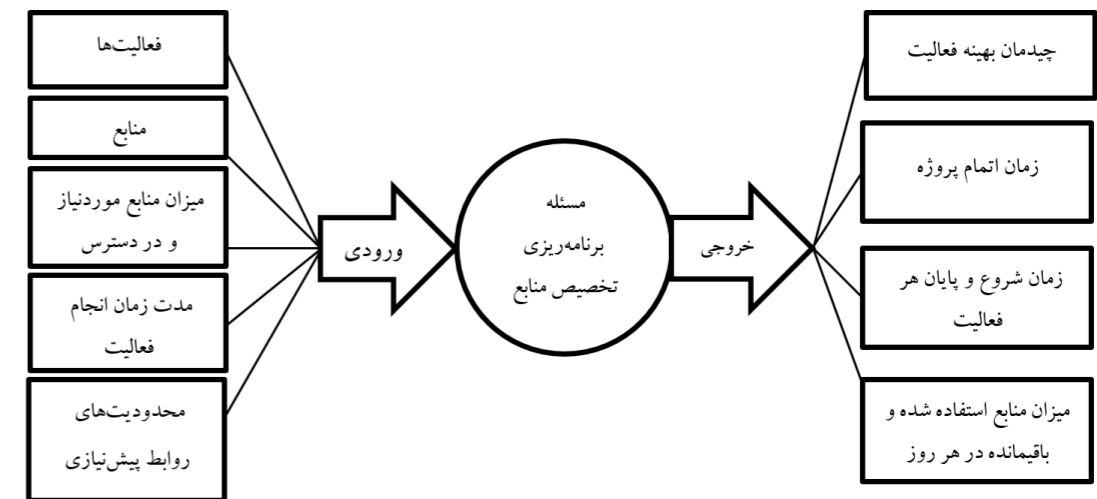
یانگ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از الگوریتم ترکیبی طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک<sup>۲</sup> و الگوریتم یادگیری کیو<sup>۳</sup>، زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالتی را بررسی کردند. در این روش، الگوریتم طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک<sup>۲</sup>، ترکیبی از حالت‌های مختلف را تولید کرد و تابع تناسب آن با استفاده از الگوریتم یادگیری کیو بهینه‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کلاسیک طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک<sup>۲</sup>، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها عملکرد بهتری دارد. گلاب و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد یک شبکه عصبی مصنوعی را برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع) بررسی کردند. در این پژوهش، یک شبکه عصبی پیشخور آموزش داده شد که می‌توانست به صورت خودکار، قوانین اولویت‌بندی مناسب را برای پالایش فعالیت‌های برنامه‌ریزی‌نشده انتخاب کرده و زمان‌بندی پروژه را بهینه‌سازی کند. نتایج نشان داد که این الگو می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک زمان‌بندی ارائه دهد. لیو و همکاران (۲۰۲۰) یک روش جستجوی درختی را برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع پیشنهاد دادند.

آزمایش‌های محاسباتی نشان داد که این روش، نسبت به روش‌های موجود، به طور متوسط ۹۱٫۳ درصد زمان محاسباتی را کاهش

1. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
3. Q-Learning

و طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ برای حل این الگو پیشنهاد شده‌است. این الگوریتم‌ها با جستجوی هوشمندانه در فضای راه‌حل‌ها، بهینه‌ترین تخصیص منابع و زمان‌بندی ممکن را ارائه

می‌دهند. الگوی پیشنهادی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در شکل ۱ نمایش داده شده است که نحوه ارتباط ورودی‌ها، پردازش الگو و خروجی‌های بهینه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله برنامه‌ریزی تخصیص منابع محدود (طاهری حاجیوند و همکاران، ۱۴۰۳)

میزان شکست کار در این نمودار براساس ماهیت کار بوده است. طبق نمودار ساختار شکست وظیفه‌ای، فعالیت‌های لازم برای تولید هر یک از محصولات حداکثر ۴۸ فعالیت است. در شکل ۳ ساختار کار نهایی پروژه ۴ محصول کشت و صنعت

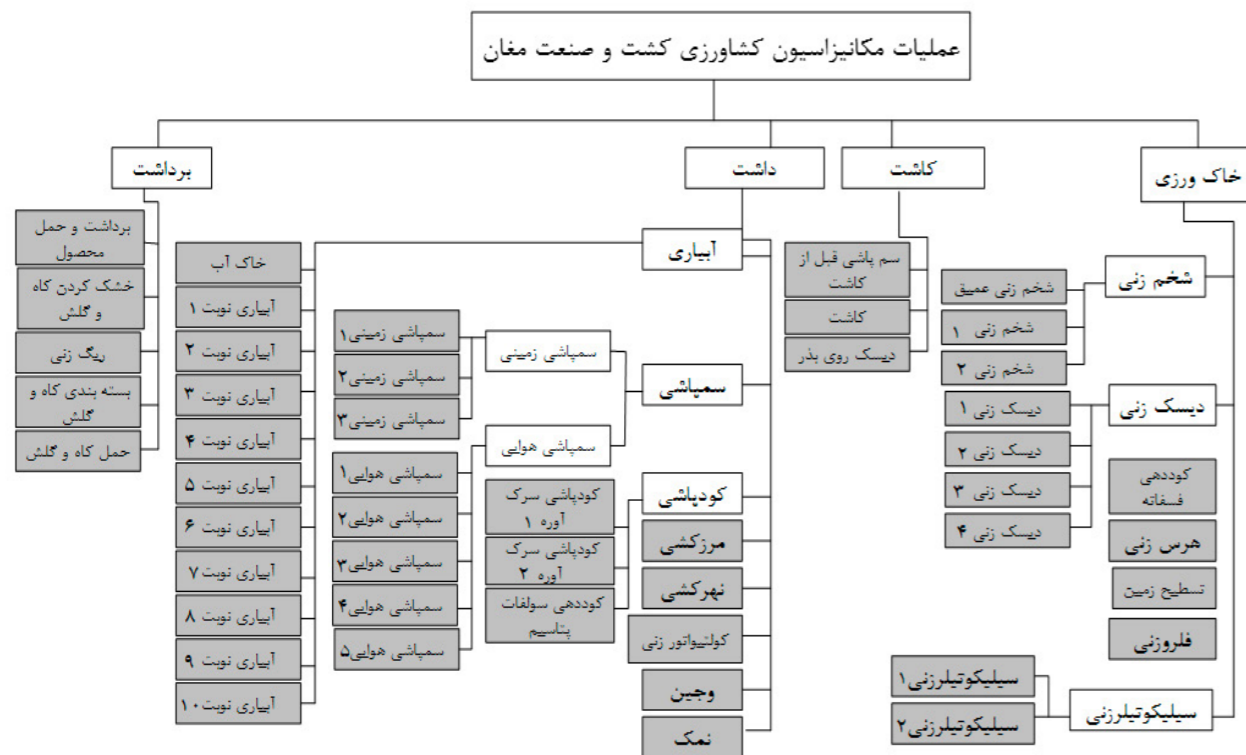
محصولات تولیدی در دشت مغان شامل ۷ محصول اصلی گندم، جو، کلزا، یونجه، چغندر قند و ذرت است (شکل ۲). در گام دوم و براساس شکل ۲، نمودار ساختار شکست وظیفه‌ای<sup>۱</sup> که نمایشگر عملیات پروژه‌های خودکارسازی است رسم شد.



شکل ۲. نمودار ساختار شکست کار محصولات زراعی تولیدی کشت و صنعت مغان

۱. Functional Breakdown Structure (FBS)

مغان نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار ساختار شکست وظیفه‌ای ساختار شکست عملیات پروژه خودکارسازی کشاورزی کشت و صنعت مغان

در این پژوهش، برای ارزیابی و مقایسه کیفیت جواب‌های ارائه شده در الگوریتم‌های طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره، از سه شاخص عملکردی مهم استفاده شد که هرکدام ابعاد متفاوتی از عملکرد الگوریتم‌ها را بررسی می‌کنند. این شاخص‌ها عبارتند از:

- شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب<sup>۱</sup>. این شاخص میزان پراکندگی و گسترده‌گی راه‌حل‌های غیرمغلوب را در فضای هدف نشان می‌دهد. هدف از استفاده از شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب، سنجش تنوع جواب‌های بهینه است طوری که الگوریتم بتواند مجموعه‌ای گسترده و متنوع از راه‌حل‌ها را ارائه دهد تا گزینه‌های متنوعی برای تصمیم‌گیرنده فراهم شود. مقدار بالاتر شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب، نشان‌دهنده تنوع بیشتر جواب‌ها است.
- شاخص حداکثر گستره<sup>۲</sup>. شاخص حداکثر گستره نشان‌دهنده بیش‌ترین فاصله بین راه‌حل‌های غیرمغلوب در فضای اهداف

و بیانگر دامنه پوشش راه‌حل‌ها است. این شاخص، گسترده‌گی کلی جواب‌ها را می‌سنجد و هرچه مقدار آن بیش‌تر باشد، بیانگر تنوع و پوشش بهتر فضای اهداف در الگوریتم است. • شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل. شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل، میانگین فاصله راه‌حل‌های غیرمغلوب تا نقطه ایده‌آل در فضای هدف را نشان می‌دهد. نقطه ایده‌آل به‌ترکیبی از بهترین مقادیر هرهدف گفته می‌شود که ممکن است همزمان قابل دستیابی نباشد. مقدار کمتر شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل نشان‌دهنده نزدیکی راه‌حل‌ها به بهینه مطلق و کیفیت بالاتر پاسخ‌ها است.

۱. Spread of Non-dominated Solutions (SNS)  
2. Max-Spread

یافته‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از حل ۲۲ مسئله پیشنهادی<sup>۱</sup> حاصل از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره ارائه شده است. نتایج حاصل بر اساس

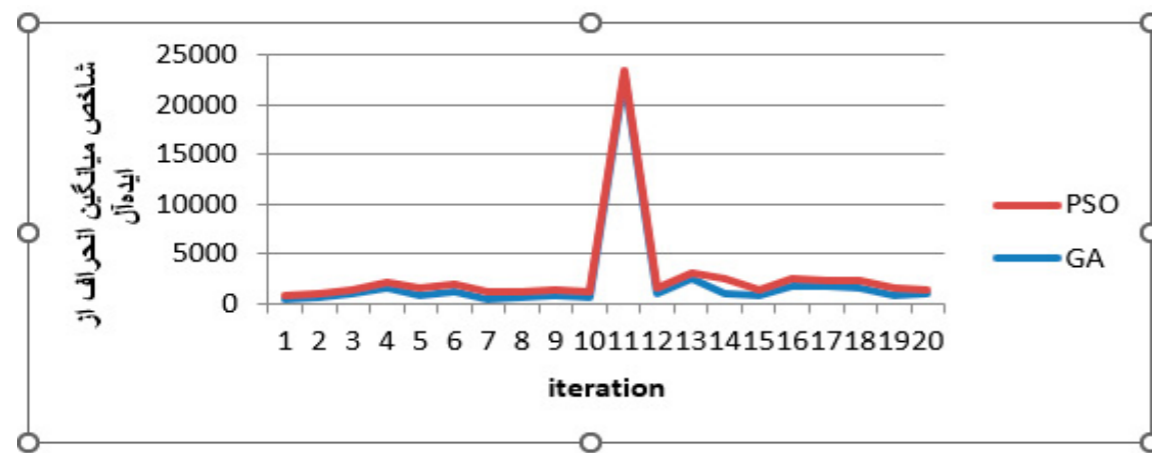
شاخص‌هایی که در قسمت قبل توضیح داده شد، ارائه شده‌اند. در ادامه، عملکرد الگوریتم‌ها نقد، بررسی و تحلیل آماری شده است.

• نتایج آماری به دست آمده از انجام آزمون t برابری

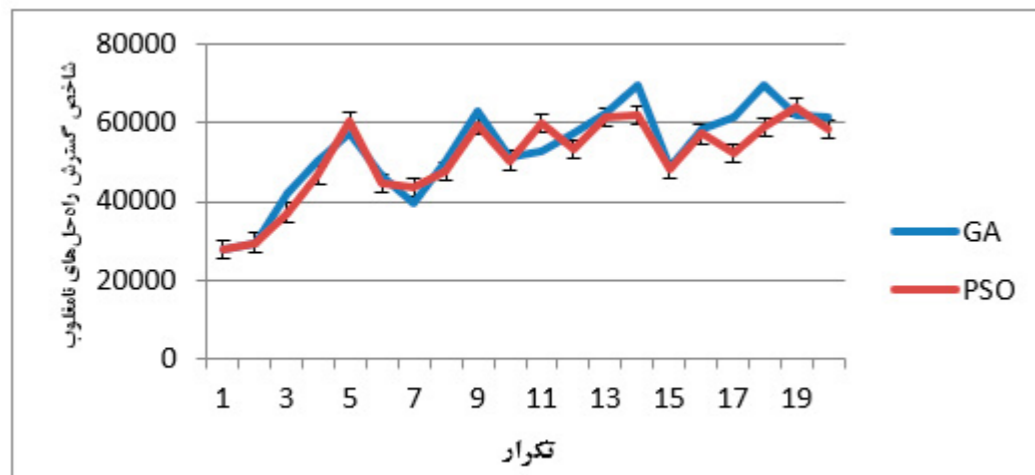
جدول ۲. مقایسه شاخص‌های عملکردی حاصل از الگوریتم‌های طبقه بندی نامغلوب ژنتیک ۲ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره

شماره مشکل	طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲		بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره	
	شاخص میانگین انحراف آل ایده‌آل	شاخص حد اکثر گستره	شاخص حد اکثر گستره	شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب
مشکل ۱	۴۰۱.۷۸۱۸	۱۱۶۳۴.۵۷	۱۱۶۳۴.۵۶۶۱۴	۲۷۸۵۴.۳۳
مشکل ۲	۵۱۶۵.۰۸۴	۸۱۶۰.۳۳	۸۱۶۰.۳۲۹۸۷۹	۲۹۵۰۰.۷۶
مشکل ۳	۹۲۹.۴۴۰۶	۶۱۱۱.۱۵	۱۶۳۴۹.۴۴۱۴۹	۳۷۲۰۸.۱۵
مشکل ۴	۱۴۹۹.۱۲۲	۳۷۹۷.۳۹۶	۱۶۵۸۱.۰۴۷۳۶	۴۶۷۳۵.۲۵
مشکل ۵	۶۹۰.۰۸۱۸	۱۹۱۲۳.۱۴	۱۴۵۶۷.۹۱۲۷۱	۶۰۲۰۷.۸۱
مشکل ۶	۱۲۰۹.۸۴۷	۴۶۶۷.۲۴۳	۱۲۴۱۲.۸۱۰۸۴	۴۴۵۶۴.۳۴
مشکل ۷	۳۸۶.۶۴۱۹	۲۳۲۶۷.۷۹	۸۴۰۹.۳۶۵۶۸۳	۴۳۵۴۷.۲۱
مشکل ۸	۵۸۷.۷۶۸۷	۱۹۵۵۲.۸۳	۱۹۵۶۶.۸۶۸۳۶	۴۷۸۰۷.۲۵
مشکل ۹	۸۷۴.۷۸۸۶	۱۵۶۴۹.۹۲	۳۳۴۹۶.۲۶۲۸۸	۵۹۶۳۱.۶۶
مشکل ۱۰	۵۱۵.۵۴۷۳	۲۴۰۰۹.۷	۱۹۶۴۹.۷۸۰۴۶	۵۰۴۵۲.۹۴
مشکل ۱۱	۲۲۷۸۶.۳۸	۳۳.۶۰۷۹۲	۲۶۲۹۹.۵۵۴۳۲	۶۰۱۱۸.۶۴
مشکل ۱۲	۱۰۳۴.۶۶۶	۹۵۵۴.۸۱۲	۲۸۹۰۳.۸۲۲۲۳	۵۳۴۷۴.۸۵
مشکل ۱۳	۲۳۹۳.۶۱۴	۲۳۹۵.۰۵۳	۱۹۴۰۶.۱۳۳۳۲	۶۱۵۸۵.۱۹
مشکل ۱۴	۱۴۲۸۸۸۴	۷۰۴۱.۷۵۸	۱۳۰۵۵.۳۶۷۰۱	۶۲۰۷۹.۹۲
مشکل ۱۵	۸۰۶.۲۷۸۴	۱۱۶۸۷.۸۳	۲۲۵۹۷.۶۷۲۳۳	۴۸۲۱۰.۵۶
مشکل ۱۶	۱۷۸۱.۰۴۶	۴۰۲۵.۵۷۶	۱۷۹۲۸.۳۶۴۲۵	۵۷۱۵۴.۶۱
مشکل ۱۷	۱۶۶۵.۸۹۳	۴۸۱۶.۲۷	۱۹۷۶۳.۶۹۸۸۳	۵۲۲۹۹.۷۸
مشکل ۱۸	۱۵۶۰.۴۹۵	۵۲۷۳.۴۲۳	۱۷۷۴۱.۵۶۷۶۹	۵۸۷۶۰.۵۸
مشکل ۱۹	۷۰۱.۶۰۷۹	۲۱۳۶۱.۷	۲۰۲۶۲.۶۷۹۰۵	۶۳۸۶۸.۸۱
مشکل ۲۰	۹۶۵.۶۶۷	۱۲۹۹۸.۸۶	۲۰۹۳۵.۴۸۶۳۱	۵۸۵۵۷.۸۶
مشکل ۲۱	۵۸۷.۷۶۸۷	۴۶۶۷.۲۴۳	۱۴۵۶۷.۹۱۲۷۴	۴۶۷۳۵.۲۸
مشکل ۲۲	۸۷۴.۷۸۸۶	۲۳۲۶۷.۷۹	۱۲۴۱۲.۸۱۰۸۴	۶۰۲۰۷.۸۵

1. PSPLIB



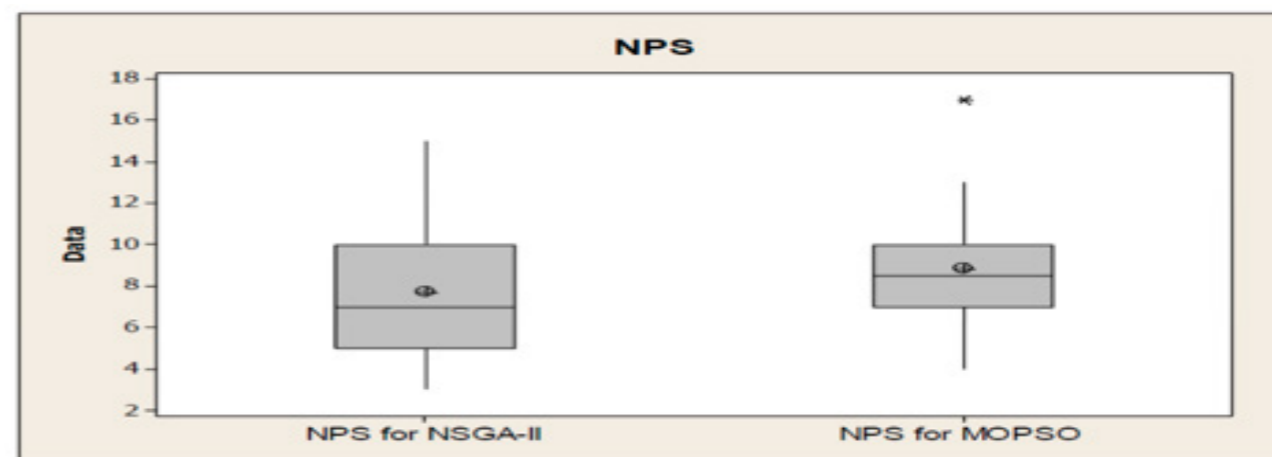
شکل ۴. مقایسه شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل مسائل حل شده با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی



شکل ۵. مقایسه شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب مسائل حل شده با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی

جدول ۳. نتایج آماری حاصل از آزمون t برابری میانگین‌های شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب به دست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی

SNS				
	N	Mean	St Dev.	SE Mean
SNS for NSGA-I	22	53068	11710	2618
SNS for MOPSO	22	51171	10572	2364
	22	1897	4259	952
95% CI for mean difference: (-97, 3890)				
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1.99 P-Value = 0.061				



شکل ۶. نمودار Box Plot مربوط به آزمون برابری مقادیر SPN به دست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی پیشنهادی

میانگین‌های شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی در جدول ۴ و شکل ۷ نشان داده شده است:

- همان‌طور که از جدول ۴ استنباط می‌شود، مقدار آماره آزمون در داخل بازه اطمینان ۹۵ درصدی قرار می‌گیرد و این بازه مقدار صفر را نیز دربر دارد. لذا دلیلی بر رد فرض صفر وجود

جدول ۴. نتایج آماری حاصل از آزمون t برابری میانگین‌های شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی

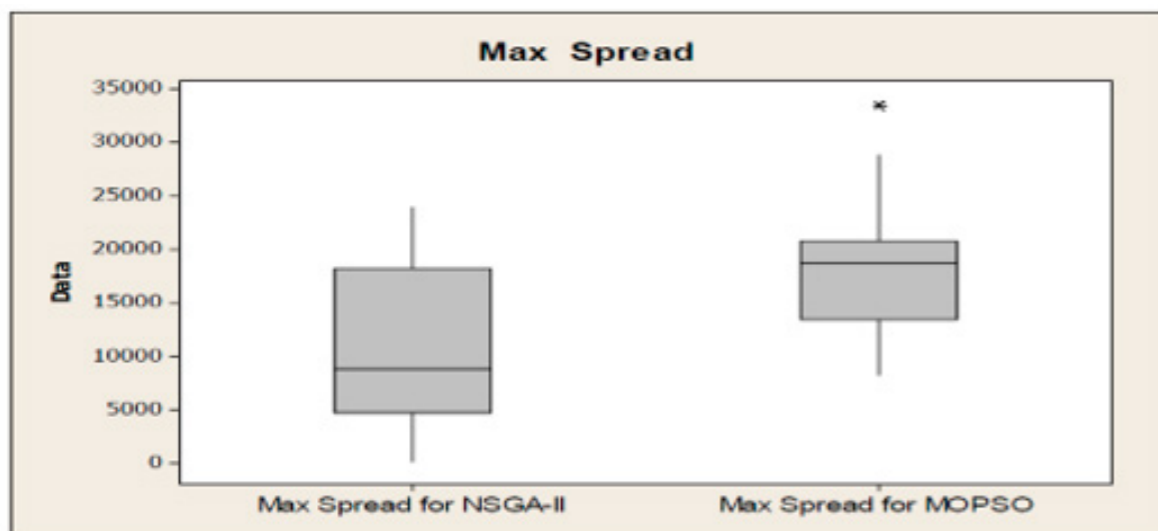
MID				
	N	Mean	St Dev.	SE Mean
MID for NSGA-II	22	2137	4889	1093
MID for MOPSO	22	647	152	34
	22	1490	4893	1094
95% CI for mean difference: (-800, 3780)				
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1.36 P-Value = 0.189				

ندارد. هم‌چنین نمودار Box Plot نیز این موضوع را به وضوح تایید می‌کند.

#### دستاوردها

● پروژه‌های زمان‌بندی در کشاورزی مجموعه‌ای از عملیات و فعالیت‌های وابسته هستند که باید توالی مشخص و در بازه زمانی معینی اجرا شوند. بهینه‌سازی زمان انجام این فعالیت‌ها با وجود محدودیت منابع، تأثیر زیادی روی بهبود بهره‌وری کشاورزی دارد. این فعالیت‌ها شامل کاشت، داشت، برداشت و سایر عملیات مرتبط‌اند که باید با توجه به محدودیت‌هایی مثل تعداد ماشین‌آلات، نیروی انسانی و شرایط آب و هوایی برنامه‌ریزی شوند.

● در این پژوهش، عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام



شکل ۷. نمودار Box Plot مربوط به آزمون برابری مقادیر شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل به دست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی

راه‌حل‌ها (شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب) عملکرد بهتری نشان داد. مثلاً، در مسئله شماره ۷ شاخص گسترش راه‌حل‌های نامغلوب برای طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ مقدار ۳۹۷۱۳،۵۱ است در حالی که برای بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره این مقدار ۴۳۵۴۷،۲۱ بود. این تفاوت نشان می‌دهد که طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ توانسته تنوع و پراکندگی بهتری از راه‌حل‌ها را فراهم کند. این ویژگی در شرایط کشاورزی با عدم قطعیت بالا و نیاز به سناریوهای مختلف تخصیص منابع، بسیار مفید است و به تصمیم‌گیرندگان گزینه‌های گسترده‌تری را برای انتخاب ارائه می‌دهد. برخلاف پروژه‌های عمرانی که کاهش مدت زمان کل پروژه اهمیت دارد، در کشاورزی زمان دقیق اجرای هر فعالیت بسیار مهم‌تر است. به عنوان مثال، کاشت و برداشت باید در بازه‌های زمانی مشخص و مناسب آب و هوایی انجام شود تا از آسیب دیدن محصول جلوگیری شود.

● نتایج حاصل از این پژوهش به روشنی نشان داد که انتخاب الگوریتم مناسب، نه تنها می‌تواند کیفیت زمان‌بندی فعالیت‌های کشاورزی را بهبود بخشد، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تأخیرات عملیاتی و جلوگیری از اتلاف منابع دارد. بنابراین، مطلوب‌ترین برنامه زمان‌بندی کشاورزی، برنامه‌ای است که تضمین کند فعالیت‌ها در زمان مناسب خود انجام شوند، حتی

ذرات چندمنظوره و طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی مقایسه شدند. نتایج کمی حاصل از ۲۲ مسئله نمونه نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره در شاخص نزدیکی به مرز پارتو (شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل) به‌طور میانگین مقدار بهتری نسبت به طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ دارد. به‌عنوان مثال، در مسئله شماره ۱ مقدار شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل برای بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره برابر ۴۰۱،۷۸ و برای طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ نیز همین مقدار بود. اما در مسائل پیچیده‌تر مانند مسئله شماره ۱۱، شاخص میانگین انحراف از ایده‌آل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره ۶۱۸،۱۳ بود درحالی‌که برای طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ مقدار بسیار بالاتر ۲۲۷۸۶،۳۸ مشاهده شد که نشان‌دهنده فاصله بیشتر راه‌حل‌ها از مرز بهینه است. این موضوع نشان می‌دهد که راه‌حل‌های ارائه شده با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندمنظوره به مرز پارتو نزدیک‌تر بوده و زمان‌بندی دقیق‌تر و بهینه‌تری فراهم کرده است. این نکته اهمیت زیادی دارد زیرا اجرای به موقع عملیات کشاورزی مثل کاشت و برداشت، مستقیماً کیفیت و کمیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ازسوی دیگر، الگوریتم طبقه‌بندی نامغلوب ژنتیک ۲ در شاخص پراکندگی و تنوع

اگر این موضوع منجر به افزایش نسبی مدت زمان کل پروژه شود. الگوی پیشنهادی در این پژوهش، همراه با الگوریتم‌های فراابتکاری، در تخصیص منابع محدود به فعالیت‌های کشاورزی عملکرد مناسبی داشت به گونه‌ای که احتمال انجام به‌موقع عملیات کاشت و برداشت افزایش یافت و از اتلاف منابع جلوگیری شد. همچنین، این روش‌ها باعث شدند سامانه کارایی بهتری داشته باشد و زمان‌بندی فعالیت‌ها بهینه‌تر و مطابق با شرایط محیطی تنظیم شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از الگوهای شبکه‌ای مانند PERT برای تخمین دقیق‌تر زمان اجرای فعالیت‌ها استفاده شود. همچنین، ترکیب الگوی فعلی با مسائل چندهدفه دیگر شامل موازنه زمان، هزینه و کیفیت می‌تواند به توسعه الگوی جامع‌تر و کاربردی‌تر منجر شود. علاوه بر این، آزمایش الگوریتم‌های ترکیبی الگوریتم کلونی مورچه‌ها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی، می‌تواند چشم‌اندازهای نوینی را در این حوزه بگشاید. همچنین پیشنهاد می‌شود الگوی پیشنهادی در بخش‌های مختلف کشاورزی مانند زمان‌بندی آبیاری، مدیریت ماشین‌آلات و توزیع نهاده‌های زراعی نیز ارزیابی شده و توسعه یابند تا راهکارهای بهینه‌تری برای مدیریت منابع ارائه شود. این پژوهش نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نقش کلیدی در بهینه‌سازی زمان و تخصیص منابع محدود در خودکارسازی کشاورزی دارد و توسعه الگوهای دقیق‌تر و کارآمدتر می‌تواند بهره‌وری را افزایش داده و به مدیریت بهتر منابع کشاورزی بیانجامد.

#### منابع

Afzal, A., Buradi, A., Jilte, R., Shaik, S., Kaladgi, A. R., Arıcı, M., ... & Nižetić, S. (2023). Optimizing the thermal performance of solar energy devices using meta-heuristic algorithms: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 112903.

Akbarpour, A., Zeynali, M. J., & Nazeri Tahroudi, M. (2020). Locating optimal position of pumping Wells in

- aquifer using meta-heuristic algorithms and finite element method. *Water Resources Management*, 34, 21-34.
- Breman, H., Groot, J. R., & van Keulen, H. (2001). Resource limitations in Sahelian agriculture. *Global Environmental Change*, 11(1), 59-68.
- Choopan, Y., & Emami, S. (2020). An approach to reduce water consumption by optimizing and determining of crop cultivation pattern using meta-heuristic algorithms: A case study on Moghan plain. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(1), 48-56.
- Davis, K. F., Gephart, J. A., Emery, K. A., Leach, A. M., Galloway, J. N., & D'Odorico, P. (2016). Meeting future food demand with current agricultural resources. *Global Environmental Change*, 39, 125-132.
- Daneshgari, N., Imani, D. M., & Nouri, S. (2022). Project scheduling model for allocating and leveling limited resources under uncertainty with a meta-heuristic algorithm approach. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*. 4 (12)2016
- Gharehveran, S. S., Shirini, K., & Abdolahi, A. (2025). Optimizing Energy Storage Solutions for Grid Resilience: A Comprehensive Overview. From: <https://www.intechopen.com/chapters/1192415>
- Golab, A., Gooya, E. S., Al Falou, A., & Cabon, M. (2022, May). Investigating the performance of an artificial neural network for solving the resource constrained project scheduling problem (RCPSP). In *Pattern Recognition and Tracking XXXIII* (Vol. 12101, pp. 78-83). SPIE.
- Haddad, O. B., Tabari, M. M. R., Fallah-Mehdipour, E., & Mariño, M. A. (2013). Groundwater model calibration by meta-heuristic algorithms. *Water Resources Management*, 27, 2515-2529.
- Jafari, M., & Rezaei-Nik, A. (2017). Modeling and solving multi-objective MRCPSP using NSGA and MOSO meta-heuristic algorithms with a case study. *10th International Conference of the Iranian Operations Research Society*, Babolsar.
- Jalalat Ata'Allah, F., Asadi Gangaraj, A., & Emami, S. (2020). Development of scheduling models in agricultural harvesting operations. *13th International Conference of the Iranian Operations Research Society*, Shahrood.
- Khalid, Q. S., Azim, S., Abas, M., Babar, A. R., & Ahmad,

- Solano, N. E. C., Llinás, G. A. G., & Montoya-Torres, J. R. (2022). Operational model for minimizing costs in agricultural production systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106932.
- Taheri Hajivand, A., Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2023). Presenting a meta-heuristic optimization algorithm for solving the problem of allocating limited resources to agricultural mechanization projects by creating a balance between time and cost goals: *A case study of Moghan Plain. Agricultural Machinery*.
- Taherihajivand, A., Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2024). An overview of product performance prediction using artificial algorithms. *Agricultural Mechanization*, 9(3), 1-14.
- Taherihajivand, A., Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2024). Weed detection in fields using convolutional neural network based on deep learning. *Agricultural Engineering*, 47(1), 129-142.
- Taherihajivand, A., Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2024). An overview of product performance prediction using artificial algorithms. *Agricultural Mechanization*, 9(3), 1-14.
- Zaki Dizaji, H., Shirini, K., Taheri Hajivand, A., & Monjezi, N. (2025). Modeling variables affecting the yield of sugarcane fields using deep recurrent neural network. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*.
- Sprecher, A., & Kolisch, R. (1996). PSPLIB-a project scheduling problem library. *European journal of operational research*, 96, 205-216.
- I. (2021). Modified particle swarm algorithm for scheduling agricultural products. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 24(3), 818-828.
- Liu, Y., Zhou, J., Lim, A., & Hu, Q. (2023). A tree search heuristic for the resource constrained project scheduling problem with transfer times. *European Journal of Operational Research*, 304(3), 939-951.
- Memmah, M. M., Lescourret, F., Yao, X., & Lavigne, C. (2015). Metaheuristics for agricultural land use optimization. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 975-998.
- Saeidian, B., Mesgari, M. S., Pradhan, B., & Alamri, A. M. (2019). Irrigation water allocation at farm level based on temporal cultivation-related data using meta-heuristic optimisation algorithms. *Water*, 11(12), 2611.
- Seraj, Y., & Kavousi Davoudi, S. M. (2020). Solving the bi-objective RCPSP model using a hybrid imperialist competitive-genetic meta-heuristic algorithm. 1st International Conference on New Challenges and Solutions in Industrial Engineering, *Management and Accounting*, Sari.
- Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2024). Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2).
- Shirini, K., Aghdasi, H. S., & Saeedvand, S. (2024). A comprehensive survey on multiple-runway aircraft landing optimization problem. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 25(4), 1574-1602.
- Shirini, K., Aghdasi, H. S., & Saeedvand, S. (2024). Modified imperialist competitive algorithm for aircraft landing scheduling problem. *The Journal of Supercomputing*, 80(10), 13782-13812.
- Shirini, K., Kordan, M. B., & Gharehveran, S. S. (2025). Impact of learning rate and epochs on lstm model performance: a study of chlorophyll-a concentrations in the Marmara Sea. *The Journal of Supercomputing*, 81(1), 1-18.
- Shirini, K., Taherihajivand, A., & Samadi Gharehveran, S. (2023). A review of algorithms for solving the project scheduling problem with resource-constrained considering agricultural problems. *Agricultural Mechanization*, 8(1), 1-14.
- Siarry P. and others, "Metaheuristics for Hard Optimizations", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2006.

## Comparison of Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithms and Genetic Undominated Classification 2 in Reducing Agricultural Operation Time with Resource Constraints

Mehran Salehi<sup>1</sup>, Adel Taheri Hajivand<sup>2</sup>, Kimia Shirini<sup>3</sup>

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran (Corresponding author).  
Email: a.taheri@tabrizu.ac.ir

3. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

### Abstract

Due to resource constraints in the agricultural sector and to increase productivity and reduce resource waste, optimal management of agricultural activity scheduling is of great importance. In this study, to reduce the time of agricultural processes, metaheuristic algorithms of multi-objective particle swarm optimization and genetic nondominated classification 2 have been used to optimize resource allocation. The research method is descriptive and mathematical tools and modeling have been used for data analysis. One-way analysis of variance (ANOVA) test in Matlab software has been used to evaluate the performance of the proposed model. Quantitative results showed that the multi-objective particle swarm optimization algorithm based on the average deviation index from the ideal with a mean value of 750 has a better performance compared to the value of 1000 of the genetic nondominated classification algorithm 2. In other words, the obtained solutions are closer to the Pareto frontier and more optimal. On the other hand, the Genetic Undominated Classification Algorithm 2 performed better in the measure of the Undominated Solution Expansion Index with an average of 0.25 compared to 0.18 of the Multi-Objective Particle Swarm Optimization, which indicates greater diversity and dispersion of solutions. The presented model has been able to allocate resources to key agricultural activities including tillage, tillage, planting, and harvesting with high efficiency and provide appropriate scheduling for the implementation of these operations. Based on the model, the scheduling of activities for wheat, rapeseed, and barley crops has been determined in such a way that each stage consists of the best time, semi-optimal time, and emergency time intervals; so that tillage is performed between days 1 and 20, tillage between days 30 and 90, planting between days 5 and 30, and harvesting between days 80 and 120. This highly accurate scheduling program increases the probability of timely operations and enables optimal resource management.

**Keywords:** Moghan Plain, agricultural processes, multi-objective particle swarm optimization algorithm, Genetic Undominated Classification Algorithm 2, resource constraints.