

A multi-objective optimization to determine the optimal patterns of sustainable agricultural mechanization using NSGA-II algorithm

Mohammad Ali Hormozi¹, Hassan Zaki Dizaji*², Houshang Bahrami³ and Nasim Monjezi⁴

1- PhD Student in Agricultural Mechanization, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2* - Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Email: hzakid@scu.ac.ir (Corresponding Author). ORCID iD: [0000-0002-8891-5031](https://orcid.org/0000-0002-8891-5031)

3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Introduction The development of mechanization and machine technology have positive and negative consequences regarding the economic, social and environmental conditions of each region. Conflicts in these dimensions complicate the selection and allocation of sustainable mechanization systems. Therefore, one of the basic questions in the selection of sustainable agricultural mechanization is how and with what methodology it is possible to propose the closest mechanization model to sustainability goals and to overcome the simultaneous contradictions of the three pillars of sustainability, considering the natural and technical limitations in agricultural production. What is the appropriate approach to consider its economic, environmental and social dimensions? The current research aims to provide a framework in which the optimal mechanization model can be achieved in order to achieve the goals of agricultural sustainability, so that it can be implemented and applied in a practical way, and it is possible to provide a model that addresses all the conflicting economic, social and environmental aspects. Quantitatively optimize the leveling of mechanization systems.

Materials and Methods In this study, a framework is applied whereby contradictory goals of agricultural sustainability can be achieved. After selecting the indices and data collection, by combining Shannon entropy and TOPSIS, the similarity index was obtained for dimensions with two or more indices. The similarity indices and the values of Benefit-Cost Ratio calculated for each system, were considered as coefficients of three objective functions (economic, social and environmental) in multi-objective optimization. A multi-objective optimization model was applied to achieve sustainable agricultural mechanization patterns and solved using NSGA-II algorithm. In order to validate the framework, mechanization systems in paddy production of Ramhormoz region located in southwestern Iran were analyzed with constraints namely land, water and machine. The five mechanization systems of paddy production included Puddled Transplanted, Un-puddled Transplanted, Water Seeded, Dry Seeded, and No-Till.

Results and Discussion

Pareto-optimal solutions of different scenarios with water and machine constraints showed that by using the framework, not only can sustainable goals be met to identify the optimal allocation of mechanization systems, but also the possibility of examining the effect of different scenarios under different constraints. The contradictions of the sustainability goals in the system of no-tillage and planting with paddling are highly visible. The no-tillage system with the highest score in the environmental dimension has the lowest score in the social and economic dimension. This modern system, which has been developed in Ramhormoz for three years, has faced technical, economic and social challenges. The cultivated area of this system in 2019 was 43 hectares. This system, despite the speed and ease of planting and its direct environmental benefits, due to the presence of wheat residues from previous cultivation and the warm and humid environment of cultivation, the possibility of mushroom development has increased, and due to periodic irrigation, weed outbreaks have greatly affected the satisfaction and profitability of this system. This point has also weakened the environmental indicators so that the highest consumption of poisons has been recorded in this system. The results of multi-objective optimization of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz city showed that the total surface area of optimal point systems is in the range of 2700 to 3200, which is close to the area under rice cultivation in Ramhormoz, which is 3310 hectares, and it indicates that the output of the model according to the restrictions applied are close to reality. The limitation of machine and water has made the two planting systems without paddling and dry farming to have higher levels than other systems. Now, if the machine restriction is removed, despite the water restriction, the area under rice cultivation can be increased

by about 700 hectares. This means that the requirement for the development of sustainable rice cultivation in Ramhormoz is to strengthen and support modern mechanized systems of no-tillage, drying and planting with paddling, and they need to focus on systems with less water consumption, which are systems with a higher level of mechanization and the use of mechanized methods. If there is no water limitation and the model is subject to the current machine limitations, the optimal mechanization points with more levels rely on non-peddling plating and transplanting systems.

Conclusions One of the most fundamental challenges in the development of mechanization is to identify the systems that establish the best balance between economic, social and environmental dimensions and bring the least environmental damage while achieving the most economic and social benefits. Using the framework of sustainable mechanization can not only provide sustainable goals in identifying the best leveling of mechanization systems, but also allows the researchers and implementers of the agricultural sector to examine the effect of different scenarios under different constraints. This framework can be used to find the optimal model of mechanization of all stages of tillage, planting, harvesting and post-harvest in different geographical areas.

Keywords: agricultural mechanization, sustainability, optimal pattern, multi-objective optimization

بهینه سازی چند هدفه جهت تعیین الگوهای بهینه‌ی عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک با استفاده از

الگوریتم NSGA-II

محمد علی هرمزی^۱، حسن ذکی دیزجی^{۲*}، هوشنگ بهرامی^۳ و نسیم منجزی^۴

۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران

اهواز، اهواز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

توسعه مکانیزاسیون و فناوری ماشینی پیامدهای مثبت و نامطلوب بسیاری را با توجه به شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هر منطقه در پی خواهد داشت. تعارضات به‌وجود آمده در این ابعاد، انتخاب و سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار را بحث‌برانگیز و مشکل می‌کند. هدف از این مطالعه، مدلسازی چند هدفه جهت تعیین الگوهای بهینه‌ی عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک و ارائه چارچوبی جهت تخصیص مکانیزاسیون به اهداف متناقض پایداری کشاورزی است. بر این اساس، پس از انتخاب شاخص‌ها و جمع‌آوری داده، با ترکیب روش‌های وزن‌دهی آنتروپی شانون و TOPSIS، شاخص شباهت برای ابعاد چند شاخصه محاسبه شد و این شاخص شباهت به همراه مقادیر شاخص‌ها به عنوان ضرایب توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شد. مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از الگوریتم NSGA-II ارائه شد. جهت اعتبارسنجی این چارچوب، پنج سیستم مکانیزاسیون (خاک‌ورزی و کاشت) در تولید شلتوک شهرستان رامهرمز با محدودیت‌های زمین، آب و ماشین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در صورت عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی آب‌کاری و نشاکاری بدون پدینگ بهینه هستند و در شرایط خشکسالی و محدودیت شدید آب سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری، بی‌خاک‌ورزی (با عملکرد مطلوب) و نشاکاری با پدینگ به عنوان سیستم‌های بهینه پایدار خواهند بود. جواب‌های بهینه پارتو تحت سناریوهای مختلف در محدودیت‌های آب و ماشین نشان داد با به‌کارگیری این چارچوب، نه‌تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف نیز وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مکانیزاسیون کشاورزی، پایداری، الگوی بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه.

مقدمه

مکانیزاسیون تمام سطوح فناوری‌های تولید و فرآوری از ابزاردستی ساده تا تجهیزات موتوری و پیچیده را شامل می‌شود که باعث کاهش سختی کار، برطرف شدن مشکل کمبود کارگر، بهبود بهره‌وری و انجام به‌موقع عملیات کشاورزی، بهبود استفاده مؤثر از منابع، دسترسی بهتر به

بازار و مشارکت در کاهش خطرات تغییر اقلیم می‌گردد. مکانیزاسیون پایدار هنگام مشارکت در توسعه پایدار بخش غذا و کشاورزی، جنبه‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فرهنگی را در نظر می‌گیرد (FAO, 2022).

بدین منظور در قالب چارچوب توسعه پایدار، در تحلیل مکانیزاسیون کشاورزی سه جنبه باید دیده شود. جنبه اقتصادی که به افزایش عملکرد، ارزش افزوده و درآمد بالاتر اشاره دارد. جنبه اجتماعی که می‌بایست مکانیزاسیون در بستر اجتماعی دیده شود و به منافع مانند کاهش سختی کار و افزایش زمان فراغت و اشتغال توجه کند. جنبه زیست‌محیطی که به نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند تخریب منابع طبیعی رسیدگی می‌کند (Sims *et al.*, 2016; Mishra and Satapathy, 2022). برای توسعه پایدار و پایداری تولید محصول، می‌بایست مفهوم پایداری در مکانیزاسیون را تبیین کرد. مکانیزاسیون کشاورزی پایدار را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: مکانیزاسیونی که از نظر اقتصادی ممکن^۱، از نظر زیست‌محیطی حساس^۲ و از نظر اجتماعی مقبول^۳ باشد (Sims and Kienzle, 2016).

در اصول اولیه انتخاب سیستم‌های مکانیزه کشاورزی روابط، روش‌ها و مدل‌های بسیاری ارائه شده است که عمده تمرکز مطالعات انجام‌گرفته بر تحلیل فنی و اقتصادی بوده است. در این زمینه، می‌توان در انتخاب تراکتور و توان مورد نیاز و در انتخاب تجهیزات مناسب بر اساس توان در دسترس تراکتور یا زمان مورد نیاز اشاره کرد (Bochtis *et al.*, 2014; Bochtis *et al.*, 2019). Cupiał & Kowalczyk (2020) نیز جهت کمینه‌سازی^۴ هزینه‌ها و بهترین ترکیب ماشین‌ها در مزرعه یک پلتفرم را طراحی کردند.

در برخی پژوهش‌ها از برنامه‌ریزی ریاضی^۵ و تحلیل سلسله‌مراتبی^۶ برای انتخاب و مدیریت ماشین‌ها استفاده شده است که در آن‌ها گاهی عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در نظر گرفته شده است. با این وجود، در زمینه کاربرد مکانیزاسیون حداقل یک بعد از ابعاد پایداری مغفول مانده است. Camarena *et al.* (2004) برای کمینه‌سازی هزینه سالیانه مکانیزاسیون مدلی را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی^۷ برای سیستم‌های مزارع چند کشتی ارائه کردند؛ که بر اساس آن اندازه ماشین‌ها محاسبه گردید. García-Alcaraz *et al.* (2016) برای تعیین دیدگاه‌های مهم در انتخاب تراکتورهای کشاورزی یک تکنیک ترکیبی از AHP و TOPSIS^۸ ارائه کردند. Keshvari & Marzban (2019) نیز توان تراکتوری موردنیاز شهرستان‌های استان خوزستان را در زمان اوج عملیات کشاورزی با استفاده از روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی محاسبه نمودند. Zhou *et al.* (2011) به دنبال بهینه‌سازی انتخاب ماشین‌های کشاورزی بوده‌اند و با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی و فازی روشی برای پیدا کردن بهترین ماشین از منظر زیست‌محیطی ارائه کردند. Koritz (2014) با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و ارزیابی چرخه حیات^۹ ماشین‌های کشاورزی با کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی بهترین گزینه‌های ماشین‌ها را به دست آورد. Emami *et al.* (2018) جهت

¹ feasible

² sensitive

³ acceptable

⁴ minimization

⁵ Mathematical Programing

⁶ Analytical Hierarchy Analysis

⁷ Linear Programing

⁸ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

⁹ life cycle assessment

اولویت‌بندی سیاست‌گذاری توسعه مکانیزاسیون کشاورزی با توجه به امنیت غذایی در ایران از تحلیل SWOT به کمک روش‌های TOPSIS و AHP استفاده کردند.

برخی تحقیقات به ارزیابی پایداری در طراحی و ساخت ماشین‌های کشاورزی پرداخته‌اند. (Banerjee & Punekar (2020) رهیافت‌های طراحی پایداری محور^۱ را مورد آزمایش قرار دادند و طی فرایند طراحی، توسعه، ساخت، فروش، کاربرد، تعمیر و نگهداری و اسقاط کردن هر سه بعد پایداری را به طور یکپارچه مورد ارزیابی قرار دادند. (Bezruk et al. (2014) ارزیابی پایداری با استفاده از نظرات کشاورزان در مراحل طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری ماشین‌های کشاورزی و (Corti et al. (2013) مدل‌های تجاری را برای سازندگان ماشین‌های کشاورزی برای بهبود پایداری مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین (Gathorne-Hardy (2016) یک ارزیابی پایداری مقایسه‌ای سیستم‌های تراکتوری و حیوانی را انجام دادند. (Romanelli & Milan (2012) کاربرد و مدیریت ماشین‌های کشاورزی را با استفاده از جریان مواد مورد ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی قرار داده است.

با این حال، تعداد مطالعاتی که از شناسایی اثرات مخرب مکانیزاسیون کشاورزی و خدمات اکوسیستم^۲ مربوط به آن بر روی پایداری زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی صورت پذیرفته بسیار کم هستند (Banerjee and Punekar, 2020; Kiani et al., 2022). این در حالی است که پیوندهایی بین شیوه‌های مکانیزه و پایداری کشاورزی، به‌ویژه در رابطه با عملکرد زیست‌محیطی وجود دارد. (Leiva & Morris (2001) با ارائه ۹ مجموعه شاخص شامل: انرژی، آلودگی هوا، فشرده‌گی خاک، آبشویی نیترات، آبشویی آفت‌کش، مواد آلی خاک، ایمنی و سلامت در مزرعه، اشتغال و عملکرد مالی، این ارتباطات را نشان داده‌اند. این پژوهشگران اعلام کرده‌اند که گرچه امکان شناسایی میزان شاخص‌های مرتبط با مکانیزاسیون وجود دارد اما تعریف مقادیر بحرانی برای این شاخص‌ها به‌منظور تعیین این که آیا شیوه‌های مکانیزه، کاملاً پایدار هستند، امکان‌پذیر نیست.

از این رو یکی از سؤالات اساسی در انتخاب مکانیزاسیون کشاورزی پایدار این است که چگونه می‌توان با توجه به محدودیت‌های طبیعی و فنی، نزدیک‌ترین الگوی^۳ مکانیزاسیون به اهداف پایداری را پیشنهاد داده و به تناقضات هم‌زمان سه بعد - اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی - پایداری رسیدگی کرد؟

پژوهش حاضر درصدد است چارچوبی را ارائه دهد که بتوان در قالب آن به الگوی مکانیزاسیون بهینه جهت دستیابی به اهداف پایداری کشاورزی دست یافت به طوری که به شکل عملی قابل اجرا و کاربرد باشد و بتوان مدلی را ارائه داد که سطوح بهینه سیستم‌های مکانیزه را ارائه نماید. برای اعتبارسنجی این چارچوب نیز مطالعه موردی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی - کاشت) در منطقه رامهرمز صورت می‌گیرد.

¹ sustarnobity – orienthing design

² Service ecosystem

³ الگو به معنای آرایش و روش انجام کار است که در مقاله بررسی توسعه مکانیزاسیون کشاورزی در کشورهای مختلف دنیا، تعریف آن با شکل انتخاب و توزیع منابع

توان کشاورزی و سیستم‌های مکانیزه نشان داده شده است (Kienzie et al. 2013).

چارچوب کلی اجرای مطالعه

جهت رسیدگی به مسئله مکانیزاسیون کشاورزی پایدار و حل آن با در نظر گرفتن تعارضات و تناقضات هم‌زمان ابعاد پایداری چارچوبی ارائه می‌گردد که به وسیله داده‌هایی که بر مبنای سیستم‌های تولید برنج (خاک‌ورزی و کاشت) برداشت شده است به حل آن می‌پردازد. سطوح بهینه سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک در منطقه رامهرمز در استان خوزستان طبق چارچوب کلی نشان داده شده در شکل (۱) با ترکیب روش‌های آنتروپی شانون، TOPSIS و الگوریتم NSGA-II انجام شده است. بر این اساس، شاخص‌های منتخب در هر بعد با استفاده از روش آنتروپی شانون وزن‌دهی می‌شوند. با استفاده از روش TOPSIS، شاخص شباهت برای سیستم‌های مکانیزاسیون و به همراه مقادیر به دست آمده برای ابعاد تک شاخصه به عنوان ضرایب تابع هدف در مدل در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی چند هدفه اقتصادی-اجتماعی-زیست‌محیطی ارائه و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی، سطوح عملیات هر سیستم را که بهترین شرایط ابعاد سه‌گانه پایداری را داشته باشند نشان می‌دهند.

منطقه مورد مطالعه

داده‌برداری، از سطح شهرستان رامهرمز در شرق استان خوزستان با بلندی از سطح دریا ۱۶۰ متر صورت گرفت. آب‌وهوای رامهرمز گرم بوده و رودخانه اعلاء از رامهرمز می‌گذرد. بر اساس گزارش شفاهی کارشناسان جهادکشاورزی شهرستان رامهرمز، در سال زراعی ۹۹ سطح زیر کشت تابستانه ۵۶۴۲ هکتار بوده است به طوری که سطح زیر کشت برنج ۳۳۱۰ هکتار بوده است.

سیستم‌های مکانیزاسیون تولید شلتوک شهرستان رامهرمز منتج از ترکیب روش‌های متنوعی است که در مدیریت بقایا در مراحل خاک‌ورزی، کاشت و آبیاری به کار می‌روند. در سیستم «نشاکاری بدون پدلینگ» زمین اصلی قبل از نشاکاری دستی، خاک‌ورزی و مرزبندی شده و پس از غرقاب شدن کرت‌ها، مرزها توسط کارگرها محکم و سطح کرت‌ها صاف می‌شود. در مقابل، سیستم «نشاکاری با پدلینگ»، تولید نشاکاری یک تغییر مهم در تهیه زمین با به‌کارگیری پادلر ۱ در شهرستان رامهرمز رخ داده است. خاک‌ورزی در سیستم «آب‌کاری» مشابه نشاکاری بدون پدلینگ است، اما روش کاشت آن به صورت مستقیم و با بذپاشی دستی صورت می‌گیرد. در سیستم «خشکه‌کاری»، بذور خشک در بستر خشک، به شکل مستقیم و مکانیزه به وسیله خطی کار کاشته می‌شوند. آبیاری به صورت تناوبی انجام می‌شود. جدیدترین سیستم در منطقه، «بی‌خاک‌ورزی» است که مشابه خشکه‌کاری است. در این سیستم، بذور توسط کارنده ویژه بی‌خاک‌ورزی در بستر خشک خاک در بین بقایای محصول قبل (غالباً گندم) کاشت می‌شود (Hormozi et al., 2012; Hormozi et al., 2016).

مطالعه و تحلیل روابط مکانیزاسیون و پایداری کشاورزی و بررسی داده‌های قابل اندازه‌گیری یا جمع‌آوری
study and analysis of relationship between mechanization and agricultural sustainability

تعیین شاخص‌ها
Determination of the indices

سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک: نشاکاری با پدینگ، نشاکاری بدون پدینگ، آبیاری، خشک‌کاری، بی‌خاک‌ورزی
Paddy production systems: transplanting with paddling, transplanting without paddling, watering, drying, no-tillage



وزن دهی معیارها: Entropy
Weight assignment: entropy

رتبه‌بندی گزینه‌ها (محاسبه شاخص شباهت هر سیستم): TOPSIS
Ranking of Alternatives (calculation of relative closeness for each system: TOPSIS)

شاخص شباهت زیست محیطی (E_i) Environmental relative closeness
شاخص شباهت اجتماعی (S_i) Social relative closeness
نسبت سود به هزینه (C_i) Benefit-Cost Ratio
برای هر سیستم (A_i) For each mechanization system

تعریف توابع هدف: Determination of Objective Functions

$$\max Z_1 = \sum S_i A_i$$
$$\max Z_2 = \sum E_i A_i$$
$$\max Z_3 = \sum C_i A_i$$

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA II) Non-dominated sorting genetic algorithm II

الگوهای بهینه مکانیزاسیون تولید برنج optimal agricultural mechanization patterns

شکل ۱ - چارچوب مکانیزاسیون پایدار بهینه تولید برنج در منطقه رامهرمز

Fig.1. Optimal sustainable mechanization framework of rice production in Ramhormoz region

جمع آوری و اندازه گیری شاخص ها

بررسی وضعیت برنج کاری و جمع آوری داده های آماری کشت برنج و وضعیت تأمین آب کشاورزی با مراجعه به اداره امور آب شمال شرق و اداره جهاد کشاورزی شهرستان رامهرمز جمع آوری شدند. تکمیل پرسشنامه ها از طریق جلسات حضوری و تلفنی با کشاورزان و ماشین داران انجام شد که به ترتیب ۱۱۷ و ۲۴ پرسشنامه مربوطه تکمیل شد. جهت ارزیابی قابلیت اعتماد پرسشنامه در این تحقیق از آزمون آلفای کرونباخ^۱ استفاده شد که مقدار آن ۰/۷۳ به دست آمد.

شاخص های مورد بررسی

در تحلیل بعد اقتصادی، یکی از شاخص های مهم نسبت فایده به هزینه^۲ است که از تقسیم ارزش فعلی فواید به ارزش فعلی هزینه ها حاصل می شود (Lotfalipour and Eslami Gisaki, 2007). در بهینه سازی سیستم های تولید (خاک ورزی و کاشت) شلتوک به دنبال حداکثرسازی این نسبت هستیم.

دو شاخص کمی نیروی انسانی به کاررفته در بخش ماشینی و غیر ماشینی و سه شاخص کیفی رضایت، سهولت کار و سلامتی و ایمنی به عنوان شاخص های اجتماعی منظور شدند. مقادیر این شاخص ها، با استفاده از تکمیل پرسشنامه کشاورزان با نمره دهی ۱ تا ۱۰ جمع آوری شد و میانگین آن منظور گردید.

برای انتخاب شاخص ها در بعد زیست محیطی، شش شاخص در مدل قرار داده شدند.

* مقدار مصرف سوخت دیزل: یکی از شاخص های منفی کاربرد سیستم های مکانیزاسیون است که به صورت لیتر در هکتار از روش (Fleming, 2003; Askin and Askin, 2012) و با تصحیح بر گزارش مرکز توسعه مکانیزاسیون کشاورزی و Safari et al. (2014) و Rostami et al. (2018) در خصوص میانگین مصرف سوخت ماشین های کشاورزی محاسبه شد.

* مقدار مصرف سموم: با توجه به تفاوت سیستم های کشت و بالطبع آن مدیریت آفات، مقدار مصرف سموم شیمیایی متغیر بوده است. این شاخص به صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

* مقدار مصرف کود ازته: مقدار مصرف کود ازته نیز به علت تفاوت در مدیریت و نگهداری بقایای کشت قبل از برنج تفاوت داشته. این شاخص به صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

* ضریب انتشار گاز متان^۱: پتانسیل گرمایش جهانی^۲ (GWP) در تولید (خاک ورزی و کاشت) شلتوک با انتخاب سیستم تولید دچار تغییر می شود. این انتشار، تأثیر زیادی بر پتانسیل گرمایش جهانی می گذارد (Hang et al., 2014). انتشار متان به دو عامل کربن در دسترس خاک و

¹ Cronbach's alpha

² Benefit- Cost Ratio

وضعیت رطوبت خاک بستگی دارد و از آنجایی که تفاوت بین سیستم‌های تولید شلتوک در این دو عامل است لذا ضریب انتشار این گاز بر اساس فرا تحلیل (Sanchis et al., 2012) انجام شد. این شاخص به صورت کیلوگرم متان در هکتار در سال محاسبه شد.

* ضریب انتشار ناشی از سوزاندن بقایا: در منطقه رامهرمز، سوزاندن بقایای کشت قبل (غالباً گندم) و کاه برنج ریخته شده از پشت کمباین همچنان مرسوم است. ضریب انتشار معادل سمی^۳ (TEQ) به مقدار ۵.۰ نانوگرم برای هر کیلو بقایای سوخته توسط Gullett & Touati (2003) محاسبه و در این مطالعه استفاده شده است.

* شدت بار مزرعه^۴: به عنوان شاخصی برای فشردگی خاک به کار رفته است (Leiva and Morris, 2001). این شاخص بر اساس وزن ماشین‌ها و مدت زمان عملیات زراعی به صورت تن ساعت بر هکتار محاسبه و در ماتریس تصمیم‌گیری قرار داده شد.

وزن دهی و رتبه‌بندی

برای وزن دهی شاخص‌ها از روش آنتروپی شانون^۵ استفاده شد. روش آنتروپی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن معیارها می‌باشد. این روش نیازمند به ماتریس معیار-گزینه است. مفهوم این روش در سال ۱۹۴۸ توسط شانون ارائه شد (Shannon, 1948). آنتروپی بیان کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (Lu et al., 2022).

رتبه‌بندی شاخص‌ها و محاسبه شاخص شباهت برای هر سیستم به کمک روش TOPSIS انجام می‌شود (Sen & Yang, 2012). با استفاده از وزن هر شاخص که در مرحله قبلی محاسبه شد به دست می‌آید. منطق زیربنایی این روش، راه‌حل ایده‌آل (مثبت) و راه‌حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی دارد (Thakkar, 2021). شاخص شباهت^۶ هر سیستم مکانیزاسیون محاسبه و به عنوان ضریب تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

مدل بهینه‌سازی چندهدفه

در فرایند بهینه‌سازی، هدف یافتن بهترین جواب از میان چند جواب ممکن برای مسئله است. لذا نیاز است که معیاری برای ارزیابی هر جواب در دسترس باشد. این معیار همان تابع هدف مسئله می‌باشد. متغیرهای تصمیم‌گیری مجموعه پارامترهای ورودی به یک سیستم هستند که با تغییر آن‌ها می‌توان عملکرد آن سیستم را کنترل کرد. کلیه مسائل بهینه‌سازی با محدودیت‌هایی روبرو هستند که ناشی از عوامل مختلفی می‌باشند و قیود مسئله محسوب می‌شوند. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به شکل کلی زیر تعریف نمود:

$$\text{Maximize|Minimize (max|min)} \quad (1)$$

$$f_m(x) \quad \forall m \in M$$

¹ Emission Factors for methane

² Global warming potential

³ toxic equivalence emission factor

⁴ Field load intensity

⁵ Shannon's Entropy

⁶ Similarity index

Subject to (s.t.):

$$g_i(X) \geq 0 \quad \forall j \in J$$

$$h_k(X) = 0 \quad \forall k \in K$$

$$x_i \in X \quad \forall i \in n$$

که در آن $X \in R^n$ بردار شامل n متغیر تصمیم‌گیری برای مسئله موردنظر می‌باشد. پاسخ‌هایی که کلیه قیود مسئله را ارضاء نمایند فضای تصمیم امکان‌پذیر مسئله $S \subset R^n$ را تشکیل می‌دهند.

در مطالعه حاضر مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^۱ (NSGA-II) ارائه شد (Deb et al., 2002). توابع هدف تحت مدل NSGA-II در نرم‌افزار (R2019b) MATLAB برنامه‌نویسی شده و بهینه‌سازی چندهدفه انجام گرفت. خروجی آن بهینه پارتو سطوح الگوهای مکانیزاسیون هستند که از منظر پایداری و توابع هدف تعریف شده برتری نسبت به هم ندارند. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را ارائه می‌دهد که با نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. این الگوریتم یک روش کارآمد به‌منظور حل مسائل با چند تابع هدف است (Mishra et al., 2022). ولی به‌منظور انتخاب ذره‌های غالب و پیچیدگی محاسباتی، دارای ضعف‌هایی است. به همین منظور، نسخه دوم الگوریتم NSGA با نام NSGA-II در سال ۲۰۰۰ معرفی شد (Deb et al., 2002). گام‌های این الگوریتم به‌طور کلی عبارتند از: ۱. تولید جمعیت اولیه بر مبنای مقیاس و قیود مسئله؛ ۲. ارزیابی جمعیت تولیدشده با توجه به توابع هدف؛ ۳. اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب؛ ۴. محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله ازدحامی؛ ۵. انتخاب جمعیت والدین برای تولیدمثل؛ ۶. انجام عملگر تقاطع و جهش. لازم به ذکر است که جهت پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ کروموزوم در نظر گرفته شده است. جمعیت شرکت‌کننده در تقاطع^۲ برابر ۰/۸ جمعیت اولیه، نرخ جهش^۳ ۰/۲ تعیین شده است.

نتایج و بحث

نتایج جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و همچنین وزن‌دهی به شاخص‌های اجتماعی و زیست‌محیطی با روش آنتروپی شانون برای هر بعد به‌صورت دو ماتریس جداگانه در جدول ۱ نمایش داده شده است. تناقضات اهداف پایداری در سیستم بی‌خاک‌ورزی و نشاکاری با پدینگ به‌شدت نمایان است. سیستم بی‌خاک‌ورزی با بالاترین امتیاز بعد زیست‌محیطی، پایین‌ترین امتیاز بعد اجتماعی و اقتصادی را دارد. این سیستم مدرن که سه سال است در رامهرمز توسعه پیدا کرده است با چالش‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی روبرو شده است. سطح زیر کشت این سیستم در سال ۱۳۹۹، ۴۳ هکتار بوده است. این سیستم با وجود سرعت و سهولت کاشت و مزایای زیست‌محیطی مستقیم آن، به علت حضور بقایای گندم کشت قبل و محیط گرم و مرطوب کشت، احتمال

¹Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

² Crossover

³ Mutation

توسعه قارچ بالا رفته، همچنین به علت آبیاری تناوبی، طغیان علف‌های هرز رضایت و سوددهی این سیستم را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. این نکته باعث تضعیف شاخص‌های زیست‌محیطی نیز شده است به طوری که بیشترین مصرف سموم در این سیستم ثبت شده است (جدول ۱).

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های پایداری و وزن محاسبه‌شده شاخص‌ها در آنتروپی شانون

Table 1- Values of stability indices and the calculated weight of the indices in Shannon entropy

اقتصادی Economical	زیست‌محیطی Environmentally						اجتماعی Socially				بعد پایداری Sustainability dimension	
سود به هزینه (بدون واحد) Benefit-Cost Ratio (Dimensionless)	شدت بار مزرعه (تن ساعت بر هکتار) Farm load intensity (ton h/ha)	انتشار معادل سمی (نانوگرم) Toxic Equivalence emission Factor (10 ⁻⁹ gram)	انتشار متان (کیلوگرم در هکتار در سال) Emission Factors for methane (kg CH ₄ /ha/year)	مقدار سموم (کیلوگرم در هکتار) Pesticide consumption (kg/ha)	مقدار ازت (کیلوگرم در هکتار) Nitrogen fertilizer (kg/ha)	سوخت (لیتر در هکتار) Fuel (l/ha)	اشتغال ماشینی (نفر ساعت در هکتار) Workers in mechanization (man-h/ha)	نیروی کاری کل (نفر روز در هکتار) Total Labor (man-day/ha)	سلامتی و ایمنی (بدون واحد) Health & Safety (Dimensionless)	سهولت کار (بدون واحد) Convenience (Dimensionless)	رضایت (بدون واحد) Satisfaction (Dimensionless)	سیستم کاشت Planting system
2.170	24.31	900	160	1.29	97	47.2	5.9	67.5	8	5.5	8.4	نشاکاری بدون پدلینگ transplanting without paddling
1.935	42.96	900	160	1.26	95	87.2	10.9	55	7.2	6.1	9	نشاکاری با پدلینگ transplanting with paddling
2.292	30.76	900	82.9	2.28	102	59.2	7.4	43.4	8.1	7.5	8.2	خشکه کاری drying
2.807	24.31	900	160	1.52	100	47.2	5.9	36	9.6	8	9.5	آب‌کاری watering
0.714	11.625	400	145.3	2.96	128	25	2.5	48	8.3	8.4	5.8	بی‌خاک‌ورزی no-tillage
-	0.272	0.133	0.091	0.217	0.023	0.264	0.633	0.158	0.031	0.088	0.090	وزن شاخص Index weight

بیشترین وزن محاسبه شده شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون در جدول ۱ در بین شاخص‌های اجتماعی مربوط به اشتغال ماشینی با مقدار ۰/۶۳۳ است و بعد از آن نیروی انسانی با ۰/۱۵۸ بیشترین مقدار را نشان داده است. این اوزان اهمیت نیروی انسانی به کار رفته را در بین شاخص‌های اجتماعی نشان می‌دهد.

در بین شاخص‌های زیست‌محیطی، شدت بار مزرعه و مصرف سوخت بالاترین اوزان به ترتیب ۰/۲۷۲ و ۰/۲۶۴ را نشان دادند که به طور مستقیم ناشی از کاربرد نهاده ماشین در مزرعه بوده است.

همان‌طور که در جدول ۱ قابل مشاهده است نسبت سود به هزینه سیستم بی‌خاک‌ورزی کمتر از ۱ است و حتی اصولاً یک سیستم غیراقتصادی به شمار می‌رود. بنابراین با توجه به حساسیت‌های فنی این سیستم توسعه آن نیازمند مشاوره و حمایت فنی دقیق است.

رتبه‌بندی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج در شهرستان رامهرمز انجام شد. نتایج شاخص شباهت برای هر سیستم در دو بعد اجتماعی و زیست‌محیطی به همراه نسبت فایده به هزینه در جدول ۲ قرار داده شده است. در سیستم‌های خشکه‌کاری و آب‌کاری کاشت به شکل مستقیم انجام می‌شود، اما روش کاشت و آبیاری متفاوتی دارند. این دو سیستم بهترین رتبه اقتصادی را نسبت به سایر سیستم‌ها دارند (جدول ۲). مجموع سطح زیر کشت این سیستم‌ها در سال ۹۹ در رامهرمز، ۴۰۱ هکتار گزارش شده است.

جدول ۲- امتیاز رتبه‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون برنج رامهرمز

Table 2- Ramhormoz rice mechanization systems rating score

اقتصادی Economic	زیست‌محیطی Environmentally	اجتماعی Socially	بعد پایداری Sustainability dimension	
سود به هزینه Benefit-Cost Ratio	شاخص شباهت Similarity index	شاخص شباهت Similarity index	متغیر سیستم System variable	سیستم کاشت Planting system
2.170	0.631	0.416	A1	نشاکاری بدون پدلینگ transplanting without paddling
1.935	0.306	0.939	A2	نشاکاری با پدلینگ transplanting with paddling
2.292	0.413	0.577	A3	خشکه‌کاری drying
2.807	0.618	0.404	A4	آب‌کاری watering
0.714	0.689	0.066	A5	بی‌خاک‌ورزی no-tillage

در سیستم خشکه‌کاری کاشت به صورت مکانیزه به وسیله خطی کار صورت می‌گیرد و آبیاری به صورت تناوبی انجام می‌شود و نسبت به سایر سیستم‌ها کمترین مصرف آب را در حدود ۲۰/۳ هزار مترمکعب دارد (Hormozi et al., 2016). بزرگ‌ترین چالش این سیستم کنترل علف‌های هرز است که باعث شده مصرف سموم کشاورزی افزایش یابد. در مقابل، به علت مصرف کم آب، مکانیزه بودن عملیات کاشت و بازدهی مطلوب توانسته مورد توجه کشاورزان قرار گیرد. در نقطه مقابل آن، سیستم آب‌کاری به علت اینکه از ابتدای کاشت زمین به صورت دائم غرقاب است، بالاترین مصرف آب را در حدود ۳۷ هزار مترمکعب در هکتار دارد. عملکرد مطلوب، رضایت و سهولت انجام این سیستم قابل توجه است و نیاز به نیروی کارگری کمی دارد. کاهش هزینه‌های کارگری و ماشینی باعث شده این سیستم بالاترین نسبت سود به هزینه را بین سایر سیستم‌ها داشته باشد (جدول ۲).

سیستم‌های نشاکاری بیشترین سطح زیر کشت برنج را در منطقه با ۲۸۶۶ هکتار در سال ۱۳۹۹ دارا هستند. سیستم نشاکاری بدون پدلینگ مرسوم‌ترین سیستم تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج در منطقه است. این سیستم به علت استفاده کم از ماشین‌آلات و سموم از امتیاز بالایی در شاخص‌های زیست‌محیطی به دست آورده است (جدول ۲)، البته یکی از دلایل عدم رضایت کشاورزان از این سیستم کارگر بر بودن آن و هزینه‌های بالای کارگری آن است که همگی به صورت نقدی پرداخت می‌شود. در تهیه زمین تغییرات زیادی در شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی

و زیست‌محیطی سیستم نشاکاری رخ داده است، که با ورود پادله شکل گرفته است. تناقضات پایداری سیستم نشاکاری با پدلینگ را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود. این سیستم با بهترین امتیاز بعد اجتماعی، بدترین رتبه را از نظر زیست‌محیطی نشان داد. در این نوع سیستم گرچه پدلینگ باعث می‌شود مرحله تهیه زمین و نشاکاری با سرعت و رضایت بیشتری انجام شود ولی به‌کارگیری مفرط تراکتور در پدلینگ شاخص‌های زیست‌محیطی به‌ویژه مصرف سوخت و فشردگی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است (جدول ۱).

مدل بهینه‌سازی چندهدفه و محدودیت‌ها

بر اساس امتیازهای رتبه‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون برنج رامهرمز (جدول ۲)، توابع هدف سه بعد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی به شکل زیر تعریف گردیدند. به علت اینکه حل مسئله به روش NSGA II با حداقل‌سازی صورت می‌گیرد و ضرایب محاسبه شده در TIPSIS مثبت هستند، ضرایب به صورت منفی در توابع نوشته شده‌اند.

$$Z1 = -(0.416) * A1 - (0.939) * A2 - (0.577) * A3 - (0.404) * A4 - (0.066) * A5 \quad (2)$$

$$Z2 = -(0.631) * A1 - (0.306) * A2 - (0.413) * A3 - (0.618) * A4 - (0.689) * A5 \quad (3)$$

$$Z3 = -2.170 * A1 - 1.935 * A2 - 2.292 * A3 - 2.807 * A4 - 0.714 * A5 \quad (4)$$

محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی مکانیزاسیون برنج پایدار در منطقه رامهرمز، شامل زمین، آب و ماشین‌های کشاورزی هستند (پارامترها در

جدول ۱ تشریح شدند). در سال ۱۳۹۹ مجموعاً ۵۶۴۲ هکتار سطح اراضی کشت تابستانه منطقه رامهرمز بوده، بنابراین حداکثر سطح زیر کشت برنج ۵۶۴۲ به شکل زیر در مدل وارد شد:

$$A1 + A2 + A3 + A4 + A5 \leq 5642 \quad (5)$$

در سال ۱۳۹۹ برنامه و محدودیت رهاسازی آب برای کشت برنج در شهرستان رامهرمز در مجموع ۸۳ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. در عین حال با برآورد مقدار مصرف سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج نشاکاری بدون پدلینگ، خشکه‌کاری، آب‌کاری و بی‌خاک‌ورزی که به ترتیب ۳۰/۵، ۲۴/۳، ۲۰/۳، ۳۷ و ۲۳/۶ هزار مترمکعب بوده است (Hormozi et al., 2016)، معادله زیر به‌عنوان معادله محدودیت مصرف آب در مدل وارد شد:

$$30500 * A1 + 24300 * A2 + 20300 * A3 + 37000 * A4 + 23600 * A5 \leq 83000000 \quad (6)$$

برخی ماشین‌های کشاورزی مانند خطی‌کار غلات، کارنده بی‌خاک‌ورزی و پادله به علت تعداد محدودی که در منطقه وجود دارند به‌عنوان محدودیت ظاهر می‌شوند. توان اجرایی ماشینی یک شاخص سنجش ظرفیت اجرایی میزان عملیات مکانیزه بوده که به صورت هکتار برای هر ماشین یا برای مجموعه ماشین‌ها بیان می‌شود (Almassi et al., 2008). بر این اساس، محدودیت توان اجرایی ماشین‌ها محاسبه شدند و به شکل $A5 \leq 64$ و $A3 \leq 1440$ ، $A2 \leq 600$ منظور شد.

نتایج بهینه‌سازی

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج شهرستان رامهرمز در جدول ۳ نمایش داده شده است. مجموع سطح سیستم‌های نقاط بهینه در بازه ۲۷۰۰ تا ۳۲۰۰ قرار دارند که این مقدار با سطح زیر کشت برنج در رامهرمز که ۳۳۱۰ هکتار است نزدیک بوده و نشان‌دهنده این است که خروجی مدل با توجه به محدودیت‌های اعمال شده نزدیک به واقعیت است. محدودیت ماشین و آب باعث شده است که دو سیستم نشاکاری بدون پدلینگ و خشکه‌کاری از سطوح بالاتری نسبت به سایر سیستم‌ها برخوردار باشند.

جدول ۳- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با همه محدودیت‌ها

Table 3- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with all restrictions

نشاکاری بدون پدلینگ (هکتار) transplanting without paddling (ha)	نشاکاری با پدلینگ (هکتار) transplanting with paddling(ha)	خشکه‌کاری (هکتار)(ha) drying	آب‌کاری (هکتار) watering(ha)	بی‌خاک‌ورزی (هکتار)-no tillage(ha)	سطح زیر کشت (هکتار) Area under cultivation(ha)	مصرف آب (مترمکعب) Water consumption (m ³)
1886	166	899	78	12	3041	82962373
1351	316	1275	213	13	3169	82994714
2698	0	1	12	10	2721	82999997
1264	340	1336	235	14	3190	82999995
2527	15	237	12	11	2802	82961626
1276	539	1177	184	13	3188	82999997
2712	0	1	0	11	2724	82999997
2094	65	788	33	12	2992	82952086
1643	237	1057	145	13	3094	82980004
1264	340	1336	235	14	3190	83000000
1618	340	1014	121	12	3106	82979981
1276	539	1177	184	13	3188	82999996
2221	41	629	31	12	2934	82934402
1968	308	712	16	11	3015	82826449
1834	180	935	91	12	3053	82965469
2710	1	1	0	11	2724	82980670
2427	24	364	18	12	2845	82954600
2009	117	813	56	12	3006	82959032

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ

۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری

۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی

600 hectares of power of planting machine with paddling

1440 hectares of operational power of drying machines

64 hectares of operational power of no-tillage machines

محدودیت‌ها:

۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت

۸۳ میلیون مترمکعب آب

Limitations: 5642 hectares of cultivated area

83 million cubic meters of water

در صورتی که محدودیت آب نباشد و مدل تحت محدودیت‌های ماشینی فعلی قرار داشته باشد (جدول ۴)، نقاط بهینه مکانیزاسیون با سطوح بیشتر بر سیستم‌های آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ تکیه دارند. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که در شرایط پرآبی و عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی کشت برنج در رامهرمز مطلوب خواهد بود و بالاترین سطح پایداری را خواهند داشت. تحت سیستم‌های آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ، کاربرد نیروی کارگری بیشتر از سایر سیستم‌ها است و تولید محصول بر توان ماهیچه‌ای تکیه دارد. این سیستم‌ها دارای چالش‌های مدیریتی کمتری هستند و کشاورزان بر روش‌های کنترل آفات و آبیاری تسلط بیشتری دارند.

جدول ۴- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با محدودیت ماشین

Table 4- - Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with machine restriction

نشاکاری بدون پدلینگ transplanting (هکتار) without paddling (ha)	نشاکاری با پدلینگ (هکتار) transplanting with paddling(ha)	خشکه‌کاری (هکتار) (ha) drying	آب‌کاری (هکتار) watering(ha)	بی‌خاک‌ورزی no-(هکتار) tillage(ha)	سطح زیر کشت Area (هکتار) under cultivation(ha)	مصرف آب (مترمکعب) Water consumption (m ³)
0	0	0	5642	0	5642	208749362
1222	76	82	4259	3	5642	198425726
4572	283	306	469	12	5642	170166224
4470	59	64	1045	5	5642	177823206
4547	0	0	1092	3	5642	179159195
3419	219	237	1749	10	5635	179380325
3500	264	290	1536	10	5600	176107325
1476	222	240	3645	10	5593	190400514
2813	215	134	2472	8	5641	185374613
598	45	49	4943	2	5638	203290491
2318	146	159	3004	6	5633	188763438
2421	276	258	2585	11	5551	181679059
1720	66	71	3781	3	5642	195499081
5466	49	29	62	5	5611	170895987
0	0	0	5641	1	5642	208744350
5639	0	0	0	3	5642	172058983
2095	130	140	3271	6	5642	191060368
4119	259	282	954	11	5626	173227704

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ

۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری

۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی

محدودیت‌ها:

۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت

600 hectares of power of planting machine with paddling

1440 hectares of operational power of drying machines

64 hectares of operational power of no-tillage machines

Limitations: 5642 hectares of cultivated area

در شرایط کم‌آبی، با در نظر گرفتن ۲۰ میلیون مترمکعب آب (جدول ۵) سیستم‌های بهینه مطلقاً خشکه‌کاری و نشاکاری با پدلینگ را نشان می‌دهند. علت اصلی اینکه در این مدل، سیستم بی‌خاک‌ورزی با وجود مصرف آب کم، در بهینه پارتو سهمی ندارند پایین بودن ضریب سیستم بی‌خاک‌ورزی در تابع هدف اقتصادی (۰/۷۱۴) است. این مسئله با پایین بودن نسبت فایده به هزینه کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. زیرا سیستمی که این نسبت در آن کمتر از یک باشد اقتصادی نیست. البته به علت جدید بودن سیستم و اینکه غالب کشاورزان اولین تجربه آن را داشتند و با حساسیت‌ها و ملاحظات آن آشنایی نداشته‌اند کشت با موفقیت صورت نگرفته و میانگین عملکرد پایینی داشته است. با این حال، در صورتی که نسبت فایده به هزینه بر اساس عملکرد کشاورزان موفق سیستم بی‌خاک‌ورزی (۱/۹۶۷) با محدودیت‌های فعلی در مدل وارد شود، سطوح عمده بهینه، سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی و خشکه‌کاری خواهند بود.

این بدان معنی است لازمه توسعه کشت پایدار برنج در رامهرمز، تقویت و حمایت سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری و نشاکاری با پدلینگ بوده و نیازمند تمرکز بر سیستم‌های با مصرف آب کمتر هستند که این سیستم‌ها با درجات مکانیزاسیون بالاتر و با کاربرد روش‌های مکانیزه صورت می‌گیرند. در عین حال حمایت از طرح‌های کارشناسی در جهت رفع چالش‌های مدیریت آفات و بیماری‌های سیستم بی‌خاک‌ورزی می‌تواند این سیستم پایدار را در منطقه ترویج دهد.

جدول ۵- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با همه محدودیت‌ها (خشک‌سالی)

Table 5- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz - with all restrictions (drought)

نشاکاری بدون پدلینگ (هکتار) transplanting without paddling (ha)	نشاکاری با پدلینگ (هکتار) transplanting with paddling(ha)	خشکه‌کاری (هکتار)(ha) drying	آب‌کاری (هکتار) watering(ha)	بی‌خاک‌ورزی (هکتار) - no-tillage(ha)	سطح زیر کشت (هکتار) Area under cultivation(ha)	مصرف آب (مترمکعب) Water consumption (m ³)
0	270	662	0	0	932	19999989
0	171	779	0	1	951	19997295
0	148	806	0	1	955	19985138
0	14	966	0	1	981	19988213
0	59	911	0	2	972	19980398
0	182	766	0	1	949	19999967
0	0	982	0	3	985	19999993
0	0	984	0	0	985	19999994
0	212	731	0	0	943	19993736
0	118	843	0	0	961	19995990
0	34	944	0	0	978	19999990
0	134	823	0	1	958	19939460
0	160	793	0	0	953	19990671
0	69	902	0	0	971	19997817
0	235	703	0	0	939	19998322
0	89	876	0	2	967	19999552

0	38	938	0	1	977	19989284
0	269	663	0	0	932	19992559
600 hectares of power of planting machine with paddling 1440 hectares of operational power of drying machines 64 hectares of operational power of no-tillage machines			محدودیت‌ها: ۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت ۲۰ میلیون مترمکعب آب Limitations: 5642 hectares of cultivated area 20 million cubic meters of water			

نتیجه گیری

یکی از اساسی‌ترین چالش‌های توسعه مکانیزاسیون شناسایی سیستم‌هایی هست که بهترین تعادل را بین ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی برقرار کرده و در عین دستیابی به بیشترین منافع اقتصادی و اجتماعی، کمترین خسارت زیست‌محیطی را به همراه داشته باشند. به‌کارگیری چارچوب مکانیزاسیون پایدار، نه تنها می‌تواند اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کند بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف را نیز به محققان و مجریان بخش کشاورزی می‌دهد. این چارچوب برای پیدا کردن مدل بهینه مکانیزاسیون تمام مراحل خاک‌ورزی، کاشت، داشت، برداشت و پس از برداشت در نواحی جغرافیایی مختلف قابل استفاده است. در چارچوب ارائه شده شاخص‌های منتخب در سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مطالعه موردی سیستم‌های مکانیزاسیون تولید شلتوک شهرستان رامهرمز مورد بررسی قرار گرفت. وزن شاخص‌ها با استفاده از آنتروپی شانون محاسبه و شاخص شباهت هر سیستم در هر بعد پایداری از روش TOPSIS به دست آمد. این شاخص به عنوان ضرایب توابع هدف سه‌گانه در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب NSGA-II به کار رفت. نتایج نشان داد مجموع سطوح نقاط بهینه، با سطح زیر کشت واقعی ۳۳۱۰ هکتار برنج در رامهرمز همخوانی دارد. در صورت عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی آب‌کاری و نشاکاری بدون پدینگ بهینه هستند و در شرایط خشکسالی و محدودیت شدید آب سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری، بی‌خاک‌ورزی (با عملکرد مطلوب) و نشاکاری با پدینگ به عنوان سیستم‌های بهینه پایدار خواهند بود. بررسی بهینه پارتو تحت سناریوهای مختلف در محدودیت‌های آب و ماشین نشان داد با به‌کارگیری این چارچوب، نه تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف نیز وجود دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.AA99.585) و از آقای دکتر مهدی شریف یزدی، عضو هیات علمی مدرسه بازرگانی نروژ بابت همکاری در تحلیل نتایج تشکر و قدردانی می‌کنند.

- Almassi, M., Kiani, S., and N., Loveimi. 2008. Principles of agricultural mechanization. Jungle Publication, Tehran, Iran, 308 p. (In Persian)
- Askin, D., and V., Askin. 2012. Financial budget manual 2012. Lincoln University. Faculty of Commerce, p.
- Banerjee, S., and R.M., Puneekar. 2020. A sustainability-oriented design approach for agricultural machinery and its associated service ecosystem development. *Journal of Cleaner Production*, 121642.
- Bezruk, Y., Lavèn, P., Hoffmann, C., and R., Doluschitz. 2014. Sustainability in agricultural machinery production-an empirical study among farmers. *Landtechnik*, 69:84-89.
- Bochtis, D., Sørensen, C.A.G., and D., Kateris. 2019. Choosing a Machinery System. In: Bochtis, D., Sørensen, C.A.G., Kateris, D. (Eds.), *Operations Management in Agriculture*. Academic Press, pp. 117-158.
- Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., P., Busato. 2014. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems engineering*, 126: 69-81.
- Camarena, E., Gracia, C., and J.C., Sixto. 2004. A mixed integer linear programming machinery selection model for multifarm systems. *Biosystems Engineering*, 87: 145-154.
- Corti, D., Granados, M.H., Macchi, M., and L., Canetta. 2013. Service-oriented business models for agricultural machinery manufacturers: Looking forward to improving sustainability. In: (Eds.), *Proceeding of International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE) & IEEE International Technology Management Conference*, pp. 1-8.
- Cupiał, M., and Z., Kowalczyk. 2020. Optimization of Selection of the Machinery Park in Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12:1380.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and T., Meyarivan. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6: 182-197.
- Emami, M., Almassi, M., and H., Bakhoda. 2018. Agricultural mechanization, a key to food security in developing countries: strategy formulating for Iran. *Agriculture & Food Security*, 7: 24.
- FAO, Sustainable Agricultural Mechanization, <http://www.fao.org/sustainable-agricultural-mechanization>.
- Fleming, P.H., 2022. Farm technical manual.
- García-Alcaraz, J., Maldonado-Macías, A., Hernández-Arellano, J., Blanco-Fernández, J., Jiménez-Macías, E., and J., Sáenz-Díez Muro. 2016. Agricultural tractor selection: a hybrid and multi-attribute approach. *Sustainability*, 8: 157.
- Gathorne-Hardy, A. 2016. The sustainability of changes in agricultural technology: The carbon, economic and labour implications of mechanisation and synthetic fertiliser use. *Ambio*, 45: 885-894.
- Gullett, B., and A., Touati. 2003. PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue. *Atmospheric Environment*, 37: 4893-4899.
- Hang, X., Zhang, X., Song, C., Jiang, Y., Deng, A., He, R., Lu, M., and W., Zhang. 2014. Differences in rice yield and CH₄ and N₂O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China. *Soil and Tillage Research*, 144: 205-210.
- Hormozi, M., Abdeslahi, A., Asoodar, M., Baruah, D., 2016. Energy use pattern of paddy production systems in khuzestan province, Iran. *Iran Agricultural Research*, 35: 47-56. (In Persian)
- Hormozi, M.A., Asoodar, M.A., and A., Abdeslahi. 2012. Impact of mechanization on technical efficiency: A case study of rice farmers in Iran. *Procedia Economics and Finance*, 1: 176-185.
- Keshvari, A., Marzban, A., 2019. Prioritizing the Power Arrival in Khuzestan Province Agriculture using FAHP and FTOPSIS. *Journal of Agricultural Machinery*, 9: 235-251.
- Kiani, F., Randazzo, G., Yelmen, I., Seyyedabbasi, A., Nematzadeh, S., Anka, F.A., Erenel, F., Zontul, M., Lanza S., and A., Muzirafuti. 2022. A Smart and Mechanized Agricultural Application: From Cultivation to Harvest. *Applied Sciences*. 12 DOI: 10.3390/app12126021.
- Kienzle, J., Ashburner, J. E., and B., Sims. 2013. Mechanization for rural development: a review of patterns and progress from around the world. *Integrated Crop Management*, vol. 20.
- Koritz, K., 2014. Optimization in a system of systems: Minimizing a farm's environmental impact through operational efficiency. Master Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Leiva, F., and J., Morris. 2001. PH—Postharvest Technology: Mechanization and Sustainability in Arable Farming in England. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79: 81-90.
- Lotfalipour, M.R., and S.,Eslami Gisaki. 2007. Evaluation of Cost- Benefit and Sensitivity Analysis of Sarcheshmeh Copper Complex. *Journal of Quantitative Economics*, 4: 83-99. (in Persian).

- Lu, H., Zhao, Y., Zhou, X., and Z., Wei. 2022. Selection of agricultural machinery based on improved CRITIC-entropy weight and GRA-TOPSIS method. *Processes*, 10(2), 266.
- Mishra, D. and S., Satapathy. 2022. Sustainability-assessment for farm-machinery. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
- Mishra, D., Satapathy, S., and Chatterjee, P. 2022. Soft Computing and Optimization Techniques for Sustainable Agriculture. In *Soft Computing and Optimization Techniques for Sustainable Agriculture*. De Gruyter.
- Romanelli, T.L., and M., Milan. 2012. Machinery management as an environmental tool-material embodiment in agriculture. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14: 63-73.
- Rostami, S., Lotfalian, M., and B., Hosseinzadeh Samani. 2018. Assessment and Comparison of Conventional and Straw Walker Combines Harvesting Losses in Fars Province. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 19: 85-96.
- Safari, M., Alizadeh, M.R., and K., Gerami. 2014. Comparison of Three Conventional Rice Combine Harvesters in Mazandaran, Iran. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 14: 73-86.
- Sanchis, E., Ferrer, M., Torres, A.G., Cambra-López, M., and S., Calvet. 2012. Effect of Water and Straw Management Practices on Methane Emissions from Rice Fields: A Review Through a Meta-Analysis. *Environmental Engineering Science*, 29: 1053-1062.
- Sen, P., and J. B. Yang. 2012. Multiple criteria decision support in engineering design. *Springer Science & Business Media*, 207 p.
- Shannon, C.E.. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27: 379-423.
- Sims, B., Hilmi, M., and J., Kienzle. 2016. Agricultural mechanization: a key input for sub-Saharan Africa smallholders. *Integrated Crop Management (FAO) eng v. 23 (2016)*.
- Sims, B., and J., Kienzle. 2016. Making mechanization accessible to smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Environments*, 3: 11-37.
- Thakkar, J.J. 2021. *Multi-Criteria Decision Making (Vol. 336, pp. 1-365)*. Springer.
- Zhou, Q., Lou, J., Xie, F., and Q., Liu. 2011. The method research on optimum selection of agricultural machinery. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 5: 337-334.