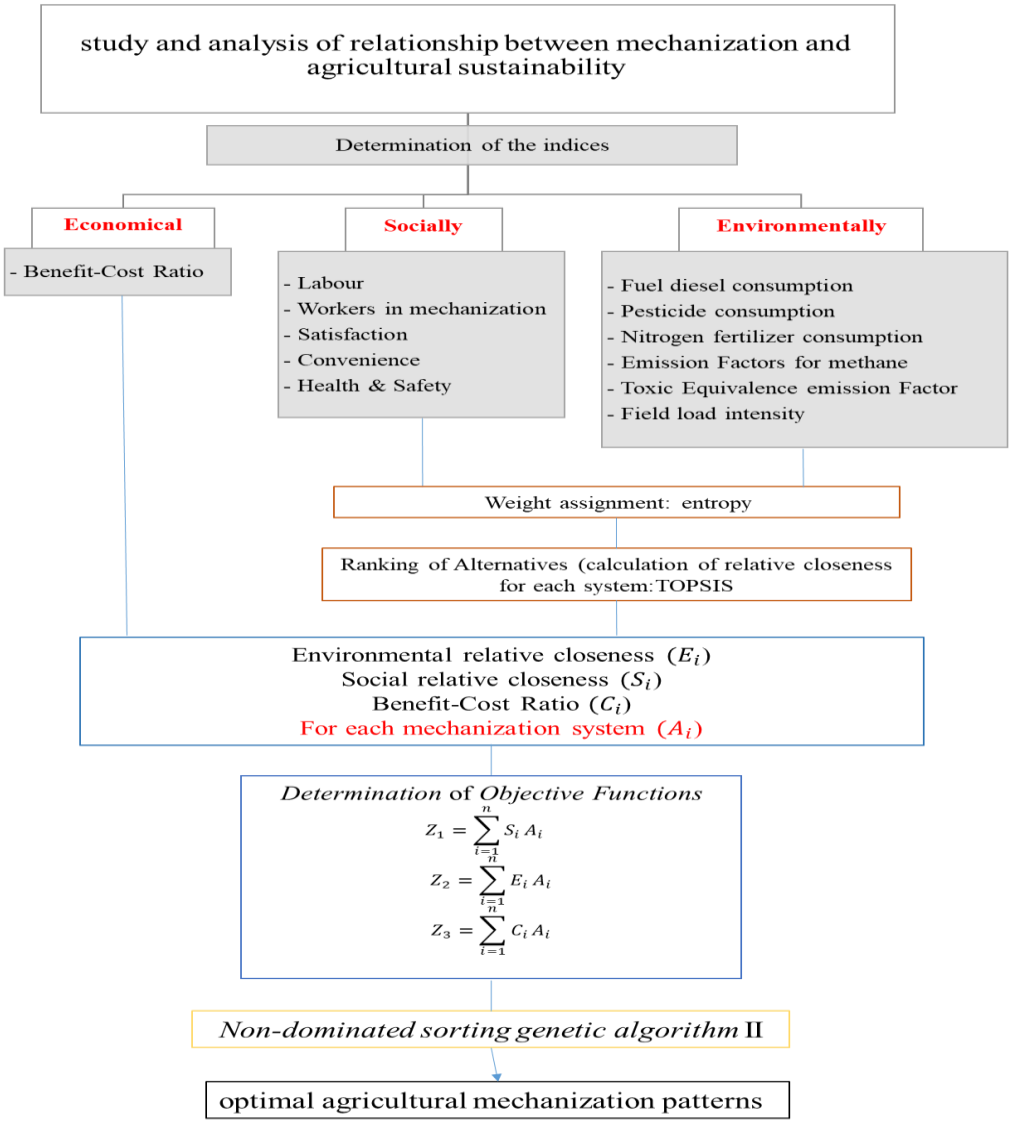
مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱ (ص۳۷۸- ۳۵۷)
(علمی پژوهشی)

Multi-objective optimization of allocating sustainable mechanization for spraying and harvesting systems in paddy fields

Mohammad Ali Hormozi[1], Hassan Zaki Dizaji[2]✉, Houshang Bahrami[3], Mehdi Sharifyazdi[4], Nasim Monjezi[5]

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.a.hormozi@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: hzakid@scu.ac.ir
3. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. E-mail: bahrami16@gmail.com
4. Department of Accounting and Operations Management, BI Norwegian Business School- Oslo campus, Norway. Email: mehdi.sharifyazdi@bi.no
5. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: n.monjezi@scu.ac.ir

(Received: Aug. 11, 2022- Revised: March 11, 2023- Accepted: March 15, 2023)



ABSTRACT: Applying agricultural operations under different mechanization systems has different economic, social, and environmental consequences. Conflicts among these dimensions complicate the selection and allocation of sustainable mechanization systems. In this study, a method was used to allocate optimal patterns of spraying and harvesting systems in the Ramhormoz region to achieve agricultural sustainability. Indices included satisfaction, ease of work, health and safety, employment in the machine sector, labor force, diesel fuel consumption, pesticide consumption, farm load intensity, and operating costs. Three spraying systems namely backpack, tractor, and unmanned aerial vehicle (UAV), and three harvesting systems namely two-stage (harvesting and manual feeding to grain combine), direct harvesting with a grain combine harvester, and harvesting with rice combine harvester were included in the model. Combining AHP and TOPSIS methods, the similarity index for social and environmental dimensions was calculated and this value along with the cost of each system was used as coefficients of objective functions. The multi-objective optimization model to achieve sustainable agricultural mechanization was analyzed using a genetic algorithm. Pareto optimal results showed that in the absence of existing machine constraints, the development of the operational capacity of modern systems like spraying with UAV up to 2000 hectares and direct harvesting with rice harvesters up to 1000 hectares will be optimal scenarios for agricultural sustainability. Using the proposed method, not only can sustainable goals be achieved in identifying the best patterns of mechanization systems, but it is also possible to examine the effect of different scenarios under different constraints.

Keywords: mechanization, sustainability, optimization, spraying, harvesting.

بهینه‌سازی چند هدفه تخصیص مکانیزاسیون پایدار در سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت محصول برنج

محمد علی هرمزی[۱]، حسن ذکی دیزجی[۲]✉، هوشنگ بهرامی[۳]، مهدی شریف یزدی[۴]، نسیم منجزی[۵]

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: hzakid@scu.ac.ir

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

۴. گروه حسابداری و مدیریت عملیات، مدرسه بازرگانی نروژ، نروژ.

۵. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۲۰- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰- تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴)

چکیده: انجام عملیات کشاورزی تحت سامانه‌های مختلف مکانیزاسیون، اثرات متفاوت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را بر جای می‌گذارد. تعارضات به‌وجود آمده در این ابعاد، انتخاب و سطح‌بندی سامانه‌های مکانیزاسیون پایدار را بحث‌برانگیز و مشکل می‌کند. در این مطالعه، روشی در دستیابی به سطوح بهینه سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت شلتوک در شهرستان رامهرمز به کار رفته است تا به وسیله آن بتوان به کاربرد مکانیزاسیون در راستای پایداری کشاورزی دست یافت. شاخص‌ها شامل رضایت، سهولت کار، سلامتی و ایمنی، اشتغال در بخش ماشینی، نیروی کارگری، مصرف سوخت دیزل، مصرف سموم، شدت بار مزرعه و هزینه‌های عملیاتی در نظر گرفته شدند. سه سامانه محلول‌پاشی با سمپاش پشتی، تراکتوری و پهپاد و سه سامانه برداشت دومرحله‌ای (درو و تغذیه دستی به کمباین غلات)، برداشت مستقیم با کمباین غلات و برداشت مستقیم با کمباین برنج در مدل قرار گرفتند. با ترکیب روش‌های AHP و TOPSIS شاخص شباهت برای ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی محاسبه شد. همچنین هزینه هر سامانه به عنوان ضرایب توابع هدف در بهینه‌سازی چندهدفه منظور شدند. بر اساس چارچوب ارائه شده، ترکیب‌های مکانیزاسیون بهینه سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت شلتوک شهرستان رامهرمز ارائه گردیدند. نتایج بهینه پارتو نشان داد در صورت نبود محدودیت‌های ماشینی موجود، توسعه توان اجرایی سامانه‌های نوین محلول‌پاشی با پهپاد تا ۲۰۰۰ هکتار و برداشت مستقیم با کمباین برنج تا ۱۰۰۰ هکتار به عنوان سناریوهای بهینه در راستای پایداری کشاورزی خواهند بود. با به‌کارگیری چارچوب ارائه شده، نه‌تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سامانه‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف نیز وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مکانیزاسیون، پایداری، بهینه‌سازی، محلول‌پاشی، برداشت.

مقدمه

انجام عملیات کشاورزی تحت سامانه[1]های مختلف مکانیزاسیون، اثرات متفاوت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را بر جای می‌گذارد. مکانیزاسیون توانسته است با کاهش نیاز بخش کشاورزی به توان ماهیچه‌ای[2] فرآیند تولید محصولات کشاورزی را سهولت بخشیده و انجام به‌موقع عملیات، کاهش چشمگیر هزینه‌ها و افزایش درآمد را در پی داشته باشد (Almassi *et al.*, 2008). این کاهش هزینه‌ها با صرفه‌جویی در مصرف کودها، بذور و نیروی کارگری و با کاهش افت‌های پس از برداشت به دست می‌آید (Pandey, 2008). یکی دیگر از مزایای مکانیزاسیون ایجاد رغبت و جذابیت برای انجام کار کشاورزی است که این کار از طریق کاهش سختی کار صورت گرفته است. این عامل حتی در کیفیت و دقت عملیات و نیز بازده کار تأثیر بسزایی دارد. همچنین افزایش زمان فراغت موجب افزایش رضایتمندی از کسب‌وکار و کیفیت زندگی می‌شود. البته یکی از عوارض اشاره شده توسعه مکانیزاسیون، بیکاری است (Mrema *et al.*, 2014). مکانیزاسیون باعث کاهش نیروی کارگری به‌عنوان منبع توان در مزرعه می‌گردد، اما درعین‌حال باعث شکل‌گیری برخی مشاغل در بخش خدمات مکانیزاسیون، ساخت و تعمیر ماشین‌های کشاورزی و همچنین فعالیت‌های دیگر در عملیات پس از برداشت می‌شود (Almassi *et al.*, 2008). در مورد آلودگی‌ها، می‌توان اثرات مکانیزاسیون را در زیر بخش‌های آلودگی هوا، آب، خاک و محصول تحلیل نمود. مکانیزاسیون با به‌کارگیری عمده سوخت فسیلی یکی از عوامل آلودگی هوا و ایجاد گازهای گلخانه‌ای است. لازمه توسعه کاربرد سموم و کودهای کشاورزی، کاربرد سطوح بیشتر مکانیزاسیون است. مکانیزاسیون به‌جز نشت مستقیم سوخت و روغن، نقش مستقیم کمتری در آلودگی‌های آب و خاک دارد. در مقابل، با کاهش مصرف نهاده‌ها و جایگذاری و پخش دقیق آن‌ها نقش کنترل‌کننده هم ایفا کرده است. این فناوری، با کاشت دقیق‌تر نه‌تنها باعث کاهش مصرف بذور می‌شود، بلکه بالطبع کاربرد قارچکش‌ها جهت بذرمال کردن نیز کاهش می‌یابد.

این تعارضات، انتخاب و سطح‌بندی سامانه‌های مکانیزاسیون پایدار را بحث‌برانگیز و مشکل می‌کند و به این نکته اشاره دارد که توسعه مکانیزاسیون به هر شکلی نتایج مثبت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در پی نخواهد داشت و در مواردی بهبود یک بعد باعث آسیب به یک بعد یا ابعاد دیگر می‌شود. ازاین‌رو بسیاری از محققان و مجریان تأکید کرده‌اند که در تحلیل مکانیزاسیون و ارائه توصیه‌های مربوطه می‌بایست همه جنبه‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در نظر گرفت (FAO, 2019).

در اصول اولیه انتخاب سامانه‌های مکانیزه کشاورزی روابط، روش‌ها و مدل‌های بسیاری ارائه شده است که عمده تمرکز مطالعات انجام‌گرفته بر تحلیل فنی، هزینه‌ای و اقتصادی بوده است. در این زمینه، می‌توان در انتخاب تراکتور و توان موردنیاز (Hahn & Rosentreter, 1988; Bochtis *et al.*, 2019; Bochtis *et al.*, 2014) و در انتخاب تجهیزات مناسب بر اساس توان در دسترس تراکتور یا زمان موردنیاز (Bochtis *et al.*, 2019; Witney 1988; Landers 2000; Bochtis *et al.*, 2014; Hahn & Rosentreter 1988) اشاره کرد. Cupiał & Kowalczyk (2020) نیز جهت کمینه‌سازی[3] هزینه‌ها و بهترین ترکیب ماشین‌ها در مزرعه یک نرم‌افزار را طراحی کردند. ایشان در نرم‌افزار ORT-7 هزینه‌های ماشینی، نیروی کارگری و سایر نهاده‌های مصرفی کشت هر محصول و دام را در تابع هدف هزینه وارد کردند. با این کار، بالاترین سود ناشی از روش‌های بهینه کشت و فناوری مکانیزاسیون در

1 System
2 Muscle power
3 Minimization

مزرعه ارائه شد. در پژوهش‌های اشاره شده، ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی مورد بحث و بررسی قرار نگرفتند. لذا روش‌های انتخاب ترکیب‌های مکانیزاسیون فوق را نمی‌توان در راستای دستیابی به پایداری دانست. این در حلی است که پیوندهایی بین شیوه‌های مکانیزه و پایداری کشاورزی، به‌ویژه در رابطه با عملکرد زیست‌محیطی وجود دارد.(2001) Leiva & Morris با ارائه ۹ مجموعه شاخص شامل: انرژی، آلودگی هوا، فشردگی خاک، آبشویی نیترات، آبشویی آفت‌کش، مواد آلی خاک، ایمنی و سلامت در مزرعه، اشتغال و عملکرد مالی، این ارتباطات را نشان دادند. این پژوهشگران اعلام کردند که گرچه امکان شناسایی میزان شاخص‌های مرتبط با مکانیزاسیون وجود دارد اما تعریف مقادیر بحرانی برای این شاخص‌ها به‌منظور تعیین این‌که آیا شیوه‌های مکانیزه، کاملاً پایدار هستند، امکان‌پذیر نیست.

در برنامه‌ریزی ظرفیت ماشین‌های کشاورزی عوامل متغیر مربوط به رشد محصول، آب‌وهوا و غیره وجود دارند که در برخی تحقیقات به آن توجه شده است. Sørensen (2003) مدل‌هایی را جهت محاسبه بهترین اندازه ماشین‌های برداشت با استفاده از الگوی رطوبت محصول کرد. Søgaard & Sørensen (2004) مدلی بهینه‌سازی را ارائه کردند که بر اساس اندازه مزرعه و برنامه‌ریزی کشت محصولات، هزینه‌های ثابت و متغیر (شامل هزینه‌های به‌موقع انجام نشدن کار) کمینه شدند. خروجی این مدل، اندازه ماشین‌های کشاورزی و همچنین توان تراکتور و تعداد تراکتورهای موردنیاز را ارائه می‌کرد. به‌طور خاص در مورد خاک‌ورزی، Sahu & Raheman (2008) یک سامانه پشتیبان تصمیم[1] را بر اساس شرایط فیزیکی خاک جهت تطبیق ادوات خاک‌ورزی با تراکتورها و پیش‌بینی عملکرد سامانه توسعه دادند. در رابطه با برنامه‌ریزی ظرفیت مبتنی بر هزینه‌های به‌موقع انجام نشدن کار، De Toro *et al.* (2012) اندازه مناسب کمباین غلات را بر اساس رطوبت و هزینه‌های کمی مورد ارزیابی قرار دادند. Gunnarsson *et al.* (2009) بر اساس عملکرد ماده خشک و ارزش غذایی علوفه (ویژه گاوهای شیری)، انتخاب ماشین برداشت علوفه سیلویی را مورد بررسی قرار دادند. Sopegno *et al.* (2016) نیز مدلی برای پیش‌بینی هزینه عملیات حمل‌ونقل درون مزرعه را برای مزارع چند محصولی ارائه کردند. Li & Zheng (2017) علاوه بر فاکتورهای فنی و هزینه‌ای، احتمال خرابی‌ها را نیز در توزیع بهینه ماشین‌ها در نظر گرفتند. همچنین Romanelli & Milan (2012) کاربرد و مدیریت ماشین‌های کشاورزی را با استفاده از جریان مواد مورد ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی قرار دادند. در مجموع، بهینه‌سازی صورت گرفته در تحقیقات ذکر شده در راستای سودآوری و فاکتورهای بیوفیزیکی بوده و خلاً بررسی سایر ابعاد پایداری در آنها دیده می‌شود.

در برخی پژوهش‌ها از برنامه‌ریزی ریاضی[2] و تحلیل سلسه مراتبی[3] برای انتخاب و مدیریت ماشین‌ها استفاده شده است که در آن‌ها گاهی عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در نظر گرفته شده است. بااین‌وجود، 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[4] برای سامانه‌های 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 ارائه کردند. آن‌ها ۱۸ نگرش کمی و کیفی را در فرآیند ارزیابی فروشندگان ماشین‌های کشاورزی و کشاورزان بکار بردند که مسائل هزینه‌ای، خدمات پس از فروش، بازاریابی،

1 Decision Support System
2 Mathematical Programing
3 Analytical Hierarchy Analysis
4 Linear Programing

ارگونومی و فنی و... را در برداشت. García-Alcaraz *et al*. (2017) نیز با استفاده از TOPSIS کار مشابهی انجام دادند. Keshvari & Marzban (2019) نیز توان تراکتوری موردنیاز شهرستان‌های استان خوزستان را در زمان اوج عملیات کشاورزی محاسبه نمودند و با استفاده از روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی فازی، اولویت‌بندی ورود توان در استان را ارائه دادند. Zhou *et al*. (2011) به دنبال بهینه‌سازی انتخاب ماشین‌های کشاورزی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و فازی روشی برای پیدا کردن بهترین ماشین از منظر زیست‌محیطی را ارائه کردند. این محققان، با به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات[1] و ماشین بردار پشتیبان[2] نواقص روش‌های سلسله مراتبی و فازی را مرتفع کردند. در این پژوهش چهار لایه اصلی شاخص‌ها شامل مصرف انرژی، اثرات زیست‌محیطی، کیفیت ماشین، کیفیت فرآوری برنج بوده است. Koritz (2014) با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و ارزیابی چرخه حیات[3] ماشین‌های کشاورزی با کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی بهترین گزینه‌های ماشین‌ها را به دست آورد. Emami *et al*. (2018) جهت اولویت‌بندی سیاست‌گذاری توسعه مکانیزاسیون کشاورزی با توجه به امنیت غذایی در ایران از تحلیل SWOT به کمک روش‌های TOPSIS و AHP استفاده کردند. در این تحقیقات، کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری یا بهینه‌سازی در انتخاب ماشین‌ها و سامانه‌های مکانیزه تنها از منظر یک یا دو بعد پایداری صورت گرفته است. این نقیصه به عنوان یکی از نکات مهمی است که مرتباً در اجرای تخصیص مکانیزاسیون به آن اشاره می‌شود.

برخی تحقیقات به ارزیابی پایداری در طراحی و ساخت ماشین‌های کشاورزی پرداخته و بررسی ابعاد پایداری ماشین‌ها در خارج از مزرعه صورت گرفته است. Banerjee & Punekar (2020) رهیافت‌های طراحی پایداری محور[4] 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 دارند. Bezruk *et al*. (2014) ارزیابی پایداری را با استفاده از نظرات کشاورزان در مراحل طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری ماشین‌های کشاورزی انجام دادند. Corti *et al*. (2013) نیز مدل‌های تجاری را برای سازندگان ماشین‌های کشاورزی برای بهبود پایداری مورد بررسی قرار دادند. پژوهش‌های ذکر شده گرچه ارزیابی همه ابعاد پایداری را پوشش داده‌اند اما به صورت مقایسه‌ای در حیطه ساخت و تعمیر بررسی شده و انتخاب یا تخصیص مکانیزاسیون پایدار در محیط مزرعه صورت نگرفته است. Gathorne-Hardy (2016) یک ارزیابی پایداری مقایسه‌ای سامانه‌های خاک‌ورزی تراکتوری و حیوانی (گاو) را انجام دادند. در این مطالعه در بعد زیست‌محیطی، با استفاده از تحلیل چرخه حیات، انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در بعد اجتماعی و اقتصادی به ترتیب دو شاخص کارگر مور نیاز و هزینه عملیات شخم کشت برنج بررسی شدند. در نتیجه آن، صرفاً به ضعف‌ها و قوت‌های هر سامانه در هر بعد اشاره شده است.

بررسی مطالعات نشان داده است در انتخاب یا تخصیص ماشین‌ها یا سامانه‌های مکانیزاسیون یا همه ابعاد پایداری لحاظ نشده و یا اگر انجام شده به صورت ارزیابی یا مقایسه‌ای بوده است. با این حال، در هر منطقه جغرافیایی معمولاً سامانه‌های مختلفی توسط کشاورزان به کار برده می‌شود و برخی سامانه‌ها نیز توسط سازمان‌های کشاورزی ترویج می‌شوند. با توجه به پیامدهای تشریح شده بالقوه مثبت و منفی مکانیزاسیون، میزان توسعه و تخصیص پایدار هر سامانه مکانیزاسیون مورد پرسش است.

پژوهش حاضر با هدف ارائه چارچوبی جهت

1 Particle Swarm Optimization
2 Support Vector Machine
3 Life cycle assessment
4 Sustarnobity – orienthing design

دستیابی به سطوح بهینه سامانه‌های مکانیزاسیون انجام می‌شود. از این طریق با توجه به محدودیت‌های طبیعی و فنی در تولید کشاورزی، نزدیک‌ترین الگوی مکانیزاسیون به اهداف پایداری پیشنهاد شده و تمام تناقضات هم‌زمان سه ستون پایداری در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، به شکل قابل‌اجرا و کاربردی می‌توان اثرات مخرب زیست‌محیطی کاربرد مکانیزاسیون را به حداقل رساند و در عین حال با شناسایی بهترین گزینه‌ها به مزیت‌های اقتصادی و اجتماعی توسعه آن دست یافت.

مواد و روش‌ها

چارچوب اجرای مطالعه

در این مطالعه با استفاده از چارچوب ارائه شده جهت دستیابی به مکانیزاسیون پایدار، سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت شلتوک مورد بررسی قرار گرفتند. سطوح بهینه این سامانه‌ها در منطقه رامهرمز در استان خوزستان طبق چارچوب (شکل ۱)، با ترکیب روش‌های AHP، TOPSIS و الگوریتم NSGA II انجام شده است. بر اساس این چارچوب، شاخص‌های منتخب در هر بعد اگر بیش از یک عدد باشند، بر مبنای نظر کارشناسان با استفاده از روش AHP وزن‌دهی شدند. با استفاده از روش TOPSIS ، شاخص شباهت برای سامانه‌های مکانیزاسیون در ابعاد با بیش از یک شاخص محاسبه شده 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 شد. نتایج بهینه‌سازی، سطوح عملیات هر سامانه است، به‌طوری‌که بهترین شرایط ابعاد سه‌گانه پایداری حاصل شود. لازم به ذکر است این فرآیند برای سامانه‌های محلول پاشی و برداشت به صورت جداگانه اجرا گردید.

منطقه مورد مطالعه

داده‌برداری، تحلیل و مدل‌سازی از سطح یکی از شهرستان‌های استان خوزستان با برخورداری از تنوع زیاد سامانه‌های تولید برنج انجام شد. شهرستان رامهرمز با ۳۲۵۷ کیلومترمربع مساحت در شرق استان خوزستان، جنوب غربی ایران واقع شده. آب‌وهوای رامهرمز گرم بوده و رودخانه اعلاء از رامهرمز می‌گذرد. در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ سطح زیر کشت اراضی آبی و دیم شهرستان رامهرمز به ترتیب ۳۰۲۱۷ و ۲۸۳۸۴ هکتار بود، که از این مقدار ۵۶۴۲ هکتار مربوط به کشت تابستانه (همه به صورت آبی) بوده است. این منطقه از مراکز تولید برنج استان خوزستان محسوب می‌شود به‌طوری‌که سطح زیر کشت برنج ۳۳۱۰ هکتار گزارش شده است.

سامانه‌های مکانیزاسیون

سامانه‌های مکانیزاسیون متنوعی در مراحل محلول‌پاشی و برداشت شلتوک شهرستان رامهرمز به کار می‌روند. این سامانه‌ها می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر وضعیت سه ستون پایداری کشاورزی بگذارند. این سامانه‌ها به شرح زیر هستند (Hormozi *et al.*, 2012; Hormozi *et al.*, 2016).

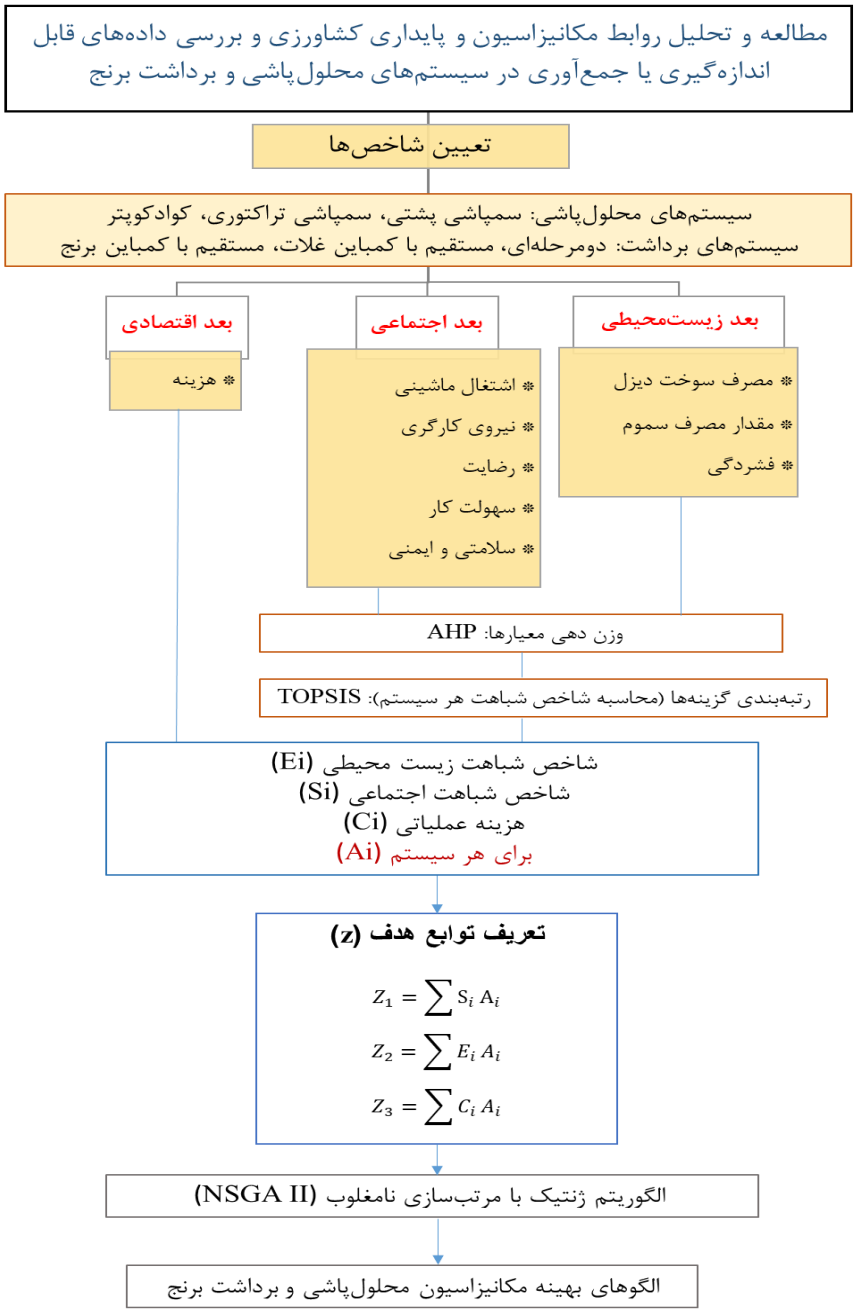
سامانه‌های محلول‌پاشی

سه سامانه محلول‌پاشی شامل سمپاشی پشتی، سمپاشی تراکتوری و سمپاشی با پهپاد[1] در کشت شلتوک منطقه رامهرمز مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲). هر سامانه محاسن و معایبی دارند که در جدول ۱ مختصراً اشاره شده است.

سامانه‌های برداشت شلتوک

سه سامانه برداشت شلتوک شامل برداشت دو مرحله‌ای (درو و تغذیه دستی به کمباین غلات با هد ویژه، برداشت مستقیم با کمباین غلات و برداشت مستقیم با کمباین برنج در منطقه رامهرمز مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳). ضعف‌ها و قوت‌های هر سامانه در جدول ۲ مختصراً تشریح شده است.

1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)



AHP: تحلیل سلسه مراتبی، TOPSIS: روش ترجیح براساس مشابهت به راه حل ایده‌آل، Ei: شاخص شباهت زیست محیطی، Si: شاخص شباهت اجتماعی، Ci: هزینه عملیاتی، Ai: برای هر سیستم، Zi: توابع هدف، NSGA II: الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب

شکل ۱- چارچوب بهینه مکانیزاسیون محلول‌پاشی و برداشت محصول برنج در منطقه رامهرمز

Figure 1. Optimal framework of mechanization of spraying solution and harvesting of rice crop in Ramhormoz region

جدول ۱- سامانه‌های محلول‌پاشی مزارع برنج منطقه رامهرمز

Table 1. spraying systems for rice field in Ramhormoz region

سامانه	محاسن	معایب
سمپاشی پشتی	هزینه ماشینی پایین، سمپاشی دقیق	سختی کار بیشتر، ظرفیت کاری پایین
سمپاشی تراکتوری	ظرفیت کاری نسبتاً بالا	نیاز به نفرات جهت حمل شیلنگ، مجاورت زیاد افراد با پاشش محلول،
سمپاشی با پهپاد	ظرفیت کاری بالا، مصرف سم کم، عدم مجاورت انسان با مسیر پاشش سم، عدم نیاز به ورود به داخل مزرعه	دسترسی محدود به پهپاد، کارایی نسبتاً پایین در کاربرد علف‌کش

شکل ۲- سامانه‌های محلول‌پاشی در مزارع برنج از بالا به پایین: سمپاشی پشتی، تراکتوری و با بهپاد

Figure 2. spraying systems for rice field from up: backpack, tractor, and UAV

جدول ۲- سامانه‌های برداشت شلتوک منطقه رامهرمز

Table 2. Rice harvesting systems in Ramhormoz region

سامانه	محاسن	معایب
برداشت دومرحله‌ای	افت کمتر به‌ویژه در ارقام محلی و در حالت خوابیده	هزینه بالای نیروی کارگری جهت درو و تغذیه دستی، زمان‌بر بودن
برداشت مستقیم با کمباین غلات	ظرفیت کاری بالا	افت بالا به ویژه در شرایط خوابیدگی محصول، عدم امکان کار در شرایط رطوبت بالای خاک، عدم امکان ورود ماشین در زمین‌های تراسبندی شده
برداشت مستقیم با کمباین برنج	ظرفیت مطلوب، افت کم،	افت بیشتر در ارقام محلی و در حالت خوابیده

شکل ۳- سامانه‌های برداشت شلتوک (بالا: برداشت دو مرحله‌ای، پایین راست: برداشت مستقیم با کمباین برنج، پایین چپ: برداشت مستقیم با کمباین غلات)

Figure 3. Harvesting systems of rice crop (Up right and left: two-stage, down and right: direct harvesting with rice combine harvester and down and left: direct harvesting with grain combine harvester)

جمع‌آوری و اندازه‌گیری شاخص‌ها

داده‌های مورد استفاده در پژوهش به سه دسته تقسیم می‌شوند: داده‌های مربوط به تولید، داده‌های مربوط به متغیرهای کیفی و داده‌های آماری. بررسی وضعیت برنج‌کاری و سامانه‌های تولید برنج در شهرستان رامهرمز و داده‌های آماری آن، با بحث و تبادل‌نظر و اطلاعات با کارشناسان مکانیزاسیون، زراعت و آب‌وخاک جهادکشاورزی شهرستان رامهرمز صورت گرفت. با همکاری اداره جهادکشاورزی به‌ویژه بخش ترویج، برنج‌کاران و شاغلین این بخش معرفی شدند که به‌منظور تکمیل پرسشنامه‌ها جلسات حضوری و تلفنی با کشاورزان و ماشین‌داران انجام شد که به ترتیب ۱۱۷ و ۲۴ پرسشنامه مربوطه تکمیل شد. جهت ارزیابی قابلیت اعتماد پرسشنامه در این تحقیق از آزمون آلفای کرونباخ[1] استفاده شد که مقدار آن ۰/۷۳ به دست آمد. داده‌های پرسشنامه‌ها در نرم‌افزار Excel وارد شدند و پس از دسته‌بندی، مرتب‌سازی و فرمول نویسی، میانگین شاخص‌ها محاسبه گردید. درنهایت ماتریس مقادیر هر شاخص برای هر سامانه به دست آمده است. به‌منظور انجام فرایند سلسله مراتبی تحلیلی[2] (AHP) و تعیین وزن هر یک از شاخص های اجتماعی، پرسشنامه مقایسه زوجی تهیه و توسط ۱۵ کارشناس تکمیل شد.

شاخص‌های مورد بررسی

با تحلیل هزینه‌های عملیاتی، هزینه هر سامانه محاسبه و به عنوان ضریب تابع هدف اقتصادی در نظر گرفته شد. در هزینه‌های برداشت، افت متوسط سامانه برداشت منظور گردید. میانگین افت سامانه برداشت دومرحله‌ای (درو و تغذیه دستی به کمباین غلات مجهز به هد برنج) ۱/۹۷ درصد (Alizadeh, 2003; Hasan Jani *et al.*, 2007; Loveimi *et al.*, 2008; Rahmati *et al.*, 2014; Alizadeh & Haghtalab, 2019)، میانگین افت

1 Cronbach's alpha

2 Analytic Hierarchy Process

برداشت مستقیم با کمباین غلات ۲/۸۱ (Rahmati *et al.*, 2014; Safari *et al.*, 2014) و میانگین افت برداشت مستقیم با کمباین برنج ۲/۰۷ درصد است (Loveimi *et al.*,2008, Rahmati *et al.*,2014).

دو شاخص کمی نیروی انسانی به‌کار رفته در بخش ماشینی و غیرماشینی به‌عنوان شاخص‌های اجتماعی منظور شدند. نیروی انسانی که به‌عنوان مالک ماشین، اپراتور و کارگر بخش ماشینی در سامانه مکانیزاسیون مشغول به کار شده است به‌صورت ساعت در هکتار محاسبه شد. همچنین با توجه به اثرات مکانیزاسیون بر کاهش نیروی کارگری، نیروی کارگری در بخش غیر ماشینی مانند درو به‌عنوان شاخص مثبت به‌صورت نفر روز در هکتار محاسبه و درماتریس تصمیم‌گیری قرار داده شد. سه شاخص کیفی رضایت، سهولت کار و سلامتی و ایمنی با استفاده از تکمیل پرسشنامه کشاورزان و امتیازدهی از ۱ تا ۱۰ برای هر شاخص به هر سامانه جمع‌آوری شد و میانگین آن منظور گردید. شاخص رضایت به عنوان کیفیت فنی سامانه در نظر گرفته شد و از کشاورزان جنبه فنی آن مورد پرسش قرار گرفت. سهولت کار به عنوان شاخص عدم سختی بوده و هر چه این شاخص مثبت، کمتر باشد سختی و زحمت کار بیشتر است. در مورد شاخص سلامتی و ایمنی نیز ذهنیت کشاورزان از تماس با مواد شیمیایی و خطرات احتمالی در تصادف با ماشین‌آلات کشاورزی بوده است.

برای انتخاب شاخص‌ها در بعد زیست‌محیطی، سه شاخص در مدل قرار داده شدند.

* مقدار مصرف سوخت دیزل: یکی از شاخص‌های منفی کاربرد مکانیزاسیون است که به‌صورت لیتر در هکتار از روش (Fleming, 2003; Askin & Askin, 2012) و بر اساس گزارش مرکز توسعه مکانیزاسیون کشاورزی و (Safari *et al.*, 2014) و (Rostami *et al.*, 2018) تصحیح و محاسبه شد.

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

* شدت بار مزرعه[1] : به‌عنوان شاخصی برای فشردگی خاک به کار رفته است (Leiva & Morris, 2001). این شاخص بر اساس وزن ماشین‌ها و مدت‌زمان عملیات زراعی به‌صورت تن ساعت بر هکتار محاسبه و در ماتریس تصمیم‌گیری قرار داده شد.

وزن‌دهی

برای وزن‌دهی شاخص‌ها از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با استفاده از نظر کارشناسان استفاده شد. این روش یکی از روش‌های پرکاربرد برای رتبه‌بندی و تعیین اهمیت عوامل است که با استفاده از مقایسات زوجی گزینه‌ها به اولویت بندی هر یک از معیارها پرداخته می‌شود (Saaty, 1988).

رتبه‌بندی و محاسبه امتیاز هر سامانه

رتبه‌بندی شاخص‌ها و محاسبه شاخص شباهت برای هر سامانه به کمک روش TOPSIS[2] انجام شد (Sen & Yang, 2012). با استفاده از وزن هر شاخص که در مرحله قبلی محاسبه شد و مقادیر شاخص‌ها برای هر سامانه، شاخص شباهت هر سامانه مکانیزاسیون محاسبه و به عنوان ضریب تابع هدف در نظر گرفته شد. شاخص شباهت نشان‌دهنده امتیاز هر سامانه است و بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید، هرچقدر این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان از برتری آن گزینه می‌دهد. (رابطه ۱)

$$CL_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

d_i^+ و d_i^- به ترتیب عبارت است از فاصله اقلیدوسی از ایده‌ال مثبت و ایده‌ال منفی. افزایش شاخص‌های مثبت باعث بهبود در سامانه می‌شود، مثل میزان اشتغال یک سامانه که این شاخص از نوع مثبت است و حل

1 Field load intensity
2 Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

ایده‌ال آن برابر با بزرگ‌ترین درایه ستون شاخص و ایده‌ال منفی برابر است با کوچک‌ترین درایه سلول برای معیارهای منفی و بالعکس.

بهینه‌سازی چندهدفه

بر اساس تعریف Abraham & Jain (2005) بهینه‌سازی عبارت از کمینه یا بیشینه نمودن یک یا چند هدف، با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از محدودیت‌ها می‌باشد. اجزای تشکیل‌دهنده مسائل بهینه‌سازی شامل تابع هدف، متغیرهای تصمیم‌گیری[1]، و محدودیت‌های (قیود)[2] مسئله می‌باشند.

هنگامی‌که مسئله‌ای از بیش از یک هدف تشکیل‌شده باشد، باید از روش بهینه‌سازی چندهدفه[3] استفاده کرد. شکل کلی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت زیر می‌باشد:

(رابطه ۲)

$$\begin{aligned} &\text{Maximize|Minimize } (\max|\min) \\ &\quad f_i(x) \qquad i = 1,2,3,\ldots,M \\ &Subject\ to: \\ &h_l(X) = 0 \qquad l = 1,2,3,\ldots,E_1 \\ &\quad g_k(x) \leq 0 \qquad k = 1,2,3,\ldots,E_2 \end{aligned}$$

به‌طوری‌که x بردار جواب، $f_i(x)$ تابع هدف iام، M، E_1 و E_2 به ترتیب تعداد اهداف، تعداد محدودیت‌های مساوی و تعداد محدودیت‌های نامساوی می‌باشند.

مدل بهینه‌سازی چندهدفه

در مطالعه حاضر مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[4] (NSGA-II) ارائه شد. مدل NSGA یک روش بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک، مشتمل بر سه عملکرد اساسی انتخاب، ازدواج و جهش است (Deb *et al.*, 2002).

روش دستیابی ضرایب توابع زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی الگوهای مختلف در سطور قبل تشریح شد. توابع هدف به‌صورت زیر تحت مدل NSGA-II در نرم‌افزار MATLAB (R2019b) 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.

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 تحلیل سلسله مراتبی برای هر بعد به‌صورت دو ماتریس جداگانه مربوط به سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت در جدول ۳ نمایش داده شده است.

با توجه به مقادیر شاخص‌های اجتماعی به دست آمده در سامانه‌های محلول‌پاشی، پایین‌ترین میزان رضایت و اشتغال ماشینی مربوط به سامانه محلول پاشی با پهپاد است. در کاربرد پهپاد در نظر داشتن شرایط آب و هوایی در کارایی محلول‌پاشی بسیار مهم است(Radoglou-Grammatikis *et al.*, 2020). اجرای درست سامانه سمپاشی با پهپاد به مقدار سم، شرایط آب و هوایی، سرعت و جهت باد وابسته است که در بسیاری از مواقع در نظر گرفته نمی‌شود. این مسأله باعث عدم سمپاشی بعضی نقاط و خسارت مالی می‌شود (Faiçal *et al.*, 2017)

در مقابل، سمپاشی تراکتوری شاخص‌های اجتماعی بالایی را نشان می دهد، اما مصرف سوخت بیشتر و سم بیشتر نسبت به سمپاشی با پهپاد، بدترین عملکرد شاخص زیست‌محیطی را بین سامانه‌های محلولپاشی با مقدار ۰/۱۳۲ نشان داده و یک مسئله با ابعاد متعارض را به وجود آورد (جدول ۳). سامانه پهپاد

1 Decision Variable
2 Constraint
3 Multi-objective optimization
4Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

کاهش معنی‌دار در خطرات پاشش سموم شیمیایی بر سلامت انسان می‌گذارد (Rahman *et al.*, 2021)، در عین حال، پهپاد یکنواختی پاشش بیشتری نسبت به سمپاشی تراکتوری دارد و پوشش سم مناسب‌تری را ایجاد می‌کند (Safari & Sheikhi Garjan 2020).

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های پایداری و وزن محاسبه‌شده شاخص‌ها در AHP مربوط به سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت محصول برنج در منطقه رامهرمز

Table 3. Values of stability indicators and calculated weight of indicators in AHP related to rice spraying and harvesting systems in Ramhormoz region

بعد پایداری	اجتماعی					زیست‌محیطی			اقتصادی
شاخص	رضایت	سهولت کار	سلامتی و ایمنی	نیروی کارگری (نفر روز بر هکتار)	اشتغال ماشینی (نفر ساعت بر هکتار)	سوخت (لیتر بر هکتار)	شدت بار مزرعه (تن ساعت بر هکتار)	مقدار سموم (کیلوگرم بر هکتار)	هزینه (هزار تومان بر هکتار)
سامانه محلول‌پاشی									
سمپاش پشتی	۹/۲	۶/۹	۸	–	۵/۵	۰	–	۱/۱۵	۴۳۷
سمپاش تراکتوری	۹/۵	۸/۴	۶/۷	–	۹	۱۴/۴	–	۱	۳۸۳
پهپاد	۸/۱	۹/۶	۹/۵	–	۰/۳	۰	–	۰/۸	۳۹۰
وزن شاخص AHP	۰/۲۹۱	۰/۲۶۴	۰/۲۱۱	–	۰/۲۳۴	۰/۳۶	–	۰/۶۴	-
سامانه برداشت									
مستقیم با کمباین برنج	۹/۷	۹/۸	۸/۳	۱/۵	۱۰/۸	۳۷/۸	۱۴/۸۵	-	۴۷۵۴
مستقیم با کمباین غلات	۸/۸	۹/۶	۸	۰/۸	۱۰/۵	۳۱/۵	۳۱/۶۸	-	۴۶۶۱
دو مرحله‌ای	۷	۶/۵	۶/۷	۱۹/۵	۶	۱۸	۱۸/۱	-	۵۴۴۲
وزن شاخص AHP	۰/۲۳۳	۰/۲۱۵	۰/۱۶۹	۰/۱۸۷	۰/۱۹۶	۰/۴۵	۰/۵۵	-	-

AHP: Analytic Hierarchy Process

نتایج تحلیل سلسله مراتبی، شاخص رضایت در سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت را به ترتیب با ۰/۲۹۱ و ۰/۲۳۳ بیشترین مقدار و بعد از آن سهولت کار را نشان می‌دهد (جدول ۳). وضعیت بهتر شاخص‌های اجتماعی در سمپاشی تراکتوری با بالاترین اشتغال ماشینی (۹ نفر ساعت در هکتار) و رضایت (۹/۶)، باعث شده شاخص شباهت آن با مقدار ۰/۸۰۶ بالاترین ضریب تابع هدف اجتماعی را به دست آورد (جدول ۴). این در حالی است که سرعت سمپاشی با پهپاد بیش از سه برابر سمپاشی تراکتوری است و این عملیات با زحمت کمتری توسط پهپاد انجام می‌شود (Safari & Sheikhi Garjan 2020). بالاترین مقدار شاخص سهولت کار (۹/۶) نیز با نتایج این پژوهشگران همخوانی دارد.

رتبه‌بندی سامانه‌های محلول‌پاشی در تولید برنج شهرستان رامهرمز انجام شد. نتایج شاخص شباهت برای هر سامانه در دو بعد اجتماعی و زیست‌محیطی با استفاده از روش TOPSIS محاسبه شد و به همراه هزینه هر سامانه در جدول ۴ قرار گرفت. همچنین محاسبات جهت رتبه بندی سامانه‌های برداشت شلتوک در همین جدول نمایش داده شده است.

عدم مصرف سوخت و کاهش مصرف سموم تا ۰/۸، در سامانه سمپاشی با پهپاد باعث شد شاخص شباهت زیست محیطی برای این سامانه به مقدار ۱ به دست آید (جدول ۴). همچنین هزینه سامانه سمپاشی با پهپاد (۳۹۰ هزار تومان) در حدود سمپاشی تراکتوری بوده و از این نظر نیز قابل رقابت است. هزینه‌های سمپاشی با پهپاد (بدون در نظر گرفتن هزینه‌های به موقع انجام نشدن کار و آلودگی‌های زیست‌محیطی) کمتر از سمپاشی تراکتوری است (Safari & Sheikhi Garjan 2020). از نظر فنی و اقتصادی سمپاشی با پهپاد ارجحیت دارد (Safari & Sheikhi Garjan 2020; Rahman *et al.*, 2021).

جدول ۴– امتیاز رتبه‌بندی سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت محصول برنج در منطقه رامهرمز

Table 4. The ranking score of rice spraying and harvesting systems in Ramhormoz region

بعد پایداری		اجتماعی	زیست‌محیطی	اقتصادی
	متغیر سیستم	شاخص شباهت	شاخص شباهت	هزینه (هزار تومان بر هکتار
سامانه محلولپاشی				
سمپاشی پشتی	A_1	۰/۵۵۶	۰/۷۳۴	۴۳۷
سمپاشی تراکتوری	A_2	۰/۸۰۶	۰/۱۳۲	۳۸۳
سمپاشی با پهپاد	A_3	۰/۲۴۹	۱	۳۹۰
سامانه برداشت				
مستقیم با کمباین برنج	A_4	۰/۳۳۹	۰/۵۸	۴۷۵۴
مستقیم با کمباین غلات	A_5	۰/۳۰۱	۰/۱۷۱	۴۶۶۱
دو مرحله‌ای	A_6	۰/۶۷۰	۰/۸۴۹	۵۴۴۲

شاخص‌های به دست آمده از سامانه برداشت دو مرحله‌ای برنج نشان دادند که همه این شاخص‌ها به‌جز نیروی کارگری کمتر از بقیه شاخص‌ها است. در این سامانه با مقدار بسیار بالای ۱۹/۵ نفر روز که برای درو و تغذیه دستی محصول به کمباین به کار می‌رود (جدول ۳). سامانه برداشت دو مرحله‌ای زمان‌بر و هزینه‌بر است (Alizadeh, 2003; Rahmati *et al.*, 2014). این پژوهشگران ظرفیت سامانه برداشت دو مرحله‌ای را یک‌سوم سامانه کمباین غلات و Rahmati *et al.* (2014) حدود یک‌پنجم سامانه کمباین برنج اعلام کردند. این ظرفیت پایین احتمال تداخل برداشت با شرایط نامساعد آب و هوایی و شروع بارندگی‌های اوایل پاییز را فراهم می‌کند. سختی کار برداشت به وسیله این سامانه و رضایت کشاورزان از آن، در نتایج شاخص‌ها مشاهده می‌شود (جدول ۳). با این حال، مقدار قابل توجه نیروی کارگری مورد نیاز که به عنوان مزیت اجتماعی و مثبت لحاظ شده است، باعث گردید شاخص شباهت یا همان ضریب تابع هدف اجتماعی برای سامانه دو مرحله‌ای با ۰/۶۷ بیشتر از دو برابر از سایر سامانه‌ها به دست بیاید (جدول ۴).

سامانه برداشت دو مرحله‌ای با کمترین مصرف سوخت و شدت بار مزرعه پایین توانست بالاترین ضریب تابع هدف زیست محیطی ۰/۸۴۹ را به دست آورد. فشردگی خاک با افزایش وزن ماشین و و رطوبت خاک تشدید می‌شود (Almassi *et al.*, 2008). این شرایط با ورود کمباین غلات در شالیزارها در سامانه‌های دو مرحله‌ای و مستقیم نسبت به کمباین برنج شدیدتر است (جدول ۳). در بعضی مواقع به دلیل رطوبت بالای خاک حتی امکان برداشت مستقیم با کمباین غلات وجود ندارد (Rahmati *et al.*, 2014). در مقابل، در برداشت مستقیم با کمباین برنج با کاهش شدید در شاخص شدت بار مزرعه (۱۴/۸۵) و بالاترین مصرف سوخت (۳۷/۸)، نسبت به سامانه برداشت مستقیم با غلات، مقدار ضریب تابع هدف زیست‌محیطی سامانه برداشت

مستقیم با کمباین برنج به مقدار ۰/۵۸ حاصل شد (جدول ۴).

با در نظر گرفتن مقدار افت متوسط برداشت، سامانه برداشت دومرحله‌ای بالاترین هزینه برداشت۵/۴۴۲ میلیون تومان در هکتار را نیز نشان داد. Rahmati *et al.* (2014) نیز بیشترین هزینه برداشت را با سامانه دو مرحله‌ای اعلام کردند و آن را ناشی از نیروی کارگری بسیار زیاد نسبت به سامانه‌های برداشت مستقیم دانستند. سامانه برداشت مستقیم با کمباین برنج، هزینه برداشت کمتری (۴/۷۵۴) نسبت به دو مرحله‌ای داشته (جدول ۴) و یکی از دلایل محبوبیت آن سرعت عملیات و ظرفیت کاری مطلوب در شرایط نامساعد رطوبت خاک و آب و هوا است (Hasan Jani *et al.*, 2007; Loveimi *et al.*, 2008).

مدل بهینه‌سازی چندهدفه مکانیزاسیون محلول‌پاشی و برداشت شلتوک

بر اساس امتیازهای رتبه‌بندی سامانه‌های محلول‌پاشی برنج رامهرمز توابع هدف سه بعد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی به شکل زیر تعریف گردیدند:

(رابطه ۳)

$$Z_1=-(0.556)*A_1-(0.806)*A_2-(0.249)*A_3$$

(رابطه ۴)

$$Z_2=-(0.734)*A_1-(0.132)*A_2-A_3$$

(رابطه ۵)

$$Z_3=437*A_1+383*A_2+390*A_3$$

همچنین با در نظرگرفتن امتیازهای رتبه‌بندی سامانه‌های برداشت شلتوک رامهرمز، توابع هدف سه بعد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی به شکل زیر تعریف می‌شوند:

(رابطه ۶)

$$Z_4=-(0.339)*A_4-(0.301)*A_5-(0.670)*A_6$$

(رابطه ۷)

$$Z_5=-(0.580)*A_4-(0.171)*A_5-(0.849)*A_6$$

(رابطه ۸)

$$Z_6=4754*A_4+4661*A_5+5442*A_6$$

محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی مکانیزاسیون پایدار در محلول‌پاشی و برداشت برنج در منطقه رامهرمز، شامل زمین و ماشین‌های کشاورزی هستند. با توجه به سطح زیر کشت برنج در سال ۱۳۹۹ با ۳۳۱۰ هکتار، مجموع سطوح عملیات سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت شلتوک به شکل معادلات زیر به عنوان محدودیت در مدل بهینه‌سازی وارد شدند. به این علت از علامت مساوی استفاده شده که حتماً در جواب‌های بهینه، تمام سطح کشت برنج در رامهرمز پوشش داده شود.

(رابطه ۹)

$$A1+A2+A3=3310$$

(رابطه ۱۰)

$$A4+A5+A6=3310$$

جدول ۵– توان اجرایی ماشین‌های محدودکننده سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت محصول برنج در منطقه رامهرمز

Table 5. Performance capacity of limiting machines of rice spraying and harvesting systems in Ramhormoz region

	نوع ماشین محدودکننده	تعداد ماشین	ظرفیت هکتار در ساعت	هکتار در روز (۸ ساعت کار روزانه)	محدودیت روز برای انجام کار	توان اجرایی ماشینی در تقویم زراعی
کوادکوپتر	کوادکوپتر	۲	۳/۳۳	۵۳	۱۴	۷۴۷
مستقیم با کمباین برنج	کمباین برنج	۱۲	۰/۱۹	۱۸	۲۱	۳۷۳
مستقیم با کمباین غلات	کمباین غلات	۵۲	۰/۲۹	۱۱۹	۲۱	۲۴۹۶
دو مرحله‌ای	کمباین غلات با هد برنج	۱۰	۰/۵۰	۴۰	۲۱	۸۴۰

برخی ماشین‌های کشاورزی مانند پهپاد و انواع کمباین به علت تعداد محدودی که در منطقه وجود دارند به‌عنوان محدودیت ظاهر می‌شوند. توان اجرای ماشینی به عنوان شاخص محدودکننده در مدل وارد شد. 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). با توجه به جدول ۵، محدودیت‌های ماشینی محاسبه شدند.

نتایج بهینه‌سازی

در بررسی اثرات مکانیزاسیون موارد متعارضی وجود داشت که تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی را با مشکل مواجه می‌کند. مورد مشابه در جدول ۴ در خروجی روش TOPSIS و محاسبه هزینه سامانه‌های محلول‌پاشی مشاهده شد، به‌طوری‌که هر سامانه در یک بعد بالاترین مقدار را نشان داده است. این مسئله با بهینه سازی چند هدفه حل می‌شود. در جدول ۶ جواب‌های بهینه پارتو ناشی از حداکثرسازی توابع هدف اجتماعی و زیست‌محیطی و حداقل‌سازی تابع هدف هزینه سامانه‌های محلول‌پاشی ارائه شده است. نتایج نشان دادند عمده سطوح بهینه بر سمپاشی پشتی دلالت دارند. این سامانه کمترین هزینه را بر کشاورز تحمیل نموده و شاخص‌های شباهت در ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی متوسطی را داشته است. سمپاشی تراکتوری با وجود عدم محدودیت ماشین، سطوح قابل توجهی را نداشته است.

جدول ۶- بهینه سطوح (هکتار) سامانه‌های محلول‌پاشی برنج با محدودیت* پهپاد

Table 6. Optimum levels (hectares) of rice spraying systems with the limitation of quadcopter

ردیف	سمپاش پشتی	سمپاش تراکتوری	پهپاد	ردیف	سمپاش پشتی	سمپاش تراکتوری	پهپاد
۱	۱۶۶۱	۹۰۳	۷۴۶	۲۶	۲۶۸۷	۴۰۶	۲۱۷
۲	۳۰۵۶	۲۵۴	۰	۲۷	۲۸۶۳	۴۱	۴۰۶
۳	۲۷۱۹	۰	۵۹۱	۲۸	۲۴۵۹	۴۵۲	۳۹۹
۴	۱۹۴۱	۹۵۷	۴۱۲	۲۹	۱۹۷۶	۹۴۵	۳۸۹
۵	۲۱۳۶	۱۱۷۴	۰	۳۰	۲۸۶۲	۳۹۶	۵۳
۶	۲۶۵۰	۲۲۳	۴۳۶	۳۱	۲۶۰۰	۳۰۱	۴۰۹
۷	۲۳۲۹	۸۷۷	۱۰۴	۳۲	۲۸۱۲	۴۹۴	۴
۸	۲۱۷۶	۱۰۲۱	۱۱۳	۳۳	۲۱۹۱	۹۹۲	۱۲۶
۹	۲۱۱۱	۱۱۴۶	۵۲	۳۴	۲۴۴۷	۴۱۸	۴۴۵
۱۰	۲۱۹۷	۱۰۹۰	۲۲	۳۵	۲۲۲۳	۹۶۹	۱۱۸
۱۱	۲۷۷۵	۴۰	۴۹۵	۳۶	۲۴۵۵	۷۲۹	۱۲۶
۱۲	۲۱۴۵	۱۱۵۱	۱۴	۳۷	۲۳۱۶	۷۹۰	۲۰۴
۱۳	۲۴۶۹	۵۶۳	۲۷۸	۳۸	۲۴۴۶	۶۵۶	۲۰۷
۱۴	۲۴۴۰	۵۰۱	۳۶۹	۳۹	۳۱۴۱	۱۳۱	۳۹
۱۵	۳۲۱۶	۸۴	۱۰	۴۰	۲۹۸۴	۶۷	۲۵۹
۱۶	۲۵۴۱	۵۳۰	۲۳۹	۴۱	۲۲۱۶	۱۰۹۲	۱
۱۷	۲۲۹۷	۴۱۰	۶۰۳	۴۲	۳۱۷۳	۰	۱۳۷
۱۸	۲۵۰۱	۴۴۸	۳۶۰	۴۳	۲۹۵۸	۵	۳۴۷
۱۹	۱۶۸۶	۸۸۸	۷۳۷	۴۴	۲۲۲۳	۹۳۱	۱۵۶
۲۰	۲۴۰۵	۷۹۸	۱۰۶	۴۵	۲۵۰۷	۵۱۳	۲۹۰
۲۱	۲۸۴۰	۹۲	۳۷۸	۴۶	۲۵۳۱	۳۷۷	۴۰۲
۲۲	۲۳۹۸	۷۰۶	۲۰۶	۴۷	۲۴۲۳	۶۷۹	۲۰۸
۲۳	۲۴۰۲	۶۲۷	۲۸۱	۴۸	۲۷۲۰	۰	۵۹۰
۲۴	۲۰۶۶	۹۶۹	۲۷۵	۴۹	۳۳۱۰	۰	۰
۲۵	۲۷۱۵	۸	۵۸۷				

* محدودیت‌ها:

۳۳۱۰ هکتار سطح مجموع سامانه‌ها

۷۴۷ هکتار توان اجرایی ماشینی پهپاد

* Limitations:

3310 hectares of cultivated area

747 hectares of operational capacity of the quadcopter machine

از طرف دیگر، سمپاشی با پهپاد با توجه به محدودیت توان اجرایی ماشینی ۷۴۷ هکتاری، سهم عمده‌ای از محدودیت را تکمیل نموده است. وضعیت الگوهای بهینه سامانه‌های محلول‌پاشی تحت سناریوی عدم محدودیت پهپاد در منطقه مدل‌سازی شده و در جدول ۷ نشان داده شده است. نقاط بهینه نشان می‌دهند که در شرایط بدون محدودیت ماشینی سطوح عملیات در سه سامانه تقسیم شده و از ظرفیت سامانه‌های مختلف محلول‌پاشی در انتخاب الگوی بهینه پایدار استفاده شده است. با توجه به محدودیت توان اجرایی پهپادهای موجود در منطقه رامهرمز (جدول ۵)، در صورتی که نیاز باشد ۲۰۰۰ هکتار پوشش داده شود، می‌بایست ۳ دستگاه پهپاد دیگر در منطقه خدمات محلوپاشی انجام دهند.

جدول ۷- سطوح (هکتار) بهینه سامانه‌های محلول‌پاشی برنج بدون محدودیت* ماشین

Table 7. Optimum levels (hectares) of rice foliar spraying systems without machine limitation

ردیف	سمپاش پشتی	سمپاش تراکتوری	پهپاد	ردیف	سمپاش پشتی	سمپاش تراکتوری	پهپاد
۱	۰	۱۷۴۴	۱۵۶۶	۲۵	۱۳۰۳	۳۶	۱۹۷۱
۲	۱۴۶۵	۱۸۴۵	۰	۲۶	۱۸۲۸	۵۵۲	۹۳۰
۳	۱۳۰۵	۰	۲۰۰۵	۲۷	۷۳۹	۱۶۶۴	۹۰۷
۴	۱۹۳۱	۱۳۷۹	۰	۲۸	۲۱۴۰	۶۲۲	۵۴۸
۵	۱۱۵۳	۱۶۴۸	۵۱۰	۲۹	۱۲۳۴	۱۸۳۰	۲۴۶
۶	۱۹۹	۱۵۱۱	۱۶۰۰	۳۰	۳۱۴۷	۰	۱۶۳
۷	۱۴۶۵	۱۰۹۳	۷۵۲	۳۱	۲۳۹۲	۳۲۴	۵۹۴
۸	۱۳۷۰	۷۵۷	۱۱۸۳	۳۲	۲۴۷۲	۴۶	۷۹۲
۹	۲۰۶۱	۱۲۴۸	۰	۳۳	۱۴۰۲	۱۲۵۳	۶۵۵
۱۰	۱۴۶۵	۱۷۵۵	۹۰	۳۴	۳۱۱۹	۱۹۱	۰
۱۱	۲۳۷۱	۸۷۵	۶۴	۳۵	۲۳۹۷	۰	۹۱۳
۱۲	۱۲۴۰	۵۱۱	۱۵۵۹	۳۶	۳۳۱۰	۰	۰
۱۳	۱۷۵۴	۱۵۵۶	۰	۳۷	۱۴۶۶	۱۳۸	۱۷۰۶
۱۴	۵۸۸	۱۱۳۸	۱۵۸۴	۳۸	۴	۱۷۳۹	۱۵۶۷
۱۵	۱۸۳۰	۵۷	۱۴۲۳	۳۹	۱۴۳۶	۷۵۷	۱۱۱۷
۱۶	۱۴۵۱	۱۶۸۸	۱۷۱	۴۰	۱۲۹۷	۱۷۹۵	۲۱۸
۱۷	۱۴۷۳	۱۸۰۷	۳۰	۴۱	۱۳۸۳	۱۶۲۷	۳۰۰
۱۸	۱۵۸۶	۴۶۴	۱۲۵۹	۴۲	۲۵۲۲	۶۰۷	۱۸۱
۱۹	۱۳۰۰	۸۷	۱۹۲۳	۴۳	۱۴۶۴	۱۸۴۶	۰
۲۰	۱۲۴۶	۵۴۵	۱۵۲۰	۴۴	۱۳۵۰	۳۰۷	۱۶۵۳
۲۱	۲۰۲۷	۵۸۶	۶۹۷	۴۵	۲۶۴۶	۰	۶۶۴
۲۲	۱۴۵۷	۹۱	۱۷۶۲	۴۶	۹۵۴	۱۷۱۱	۶۴۵
۲۳	۱۳۴۸	۱۳۸۴	۵۷۸	۴۷	۲۵۰۰	۴۹۱	۳۱۹
۲۴	۲۲۸۶	۰	۱۰۲۳	۴۸	۲۶۶۱	۶۴۸	۰

*محدودیت: ۳۳۱۰ هکتار سطح مجموع سامانه‌ها

Limitation: 3310 hectares of cultivated area

نتایج بهینه‌سازی سطوح سامانه‌های برداشت برنج در جدول ۸ نشان داده شده است. این نتایج با وجود محدودیت کمباین‌های غلات و برنج در منطقه به دست آمده است. الگوهای بهینه تحت شرایط فعلی نشان می‌دهند از حداکثر ظرفیت محدودیت‌های سامانه‌های برداشت مستقیم استفاده شده است. ازینرو مدلسازی الگوهای مکانیزاسیون پایدار برداشت شلتوک بدون محدودیت ماشین انجام شده و در جدول ۹ ارائه گردید. جواب‌های بهینه پارتو نشان داد که برداشت مستقیم با کمباین برنج تا توان اجرایی تقریبی ۱۰۰۰ هکتار در شرایط پایدار قرار دارد. بدین ترتیب دو برابر تعداد کمباین‌های برنج منطقه یعنی ۲۴ دستگاه نیاز است به ناوگان مکانیزاسیون برداشت رامهرمز اضافه شود. همچنین نتایج نشان داد، جهت دستیابی به مکانیزاسیون برداشت پایدار، نیازی به اضافه کردن کمباین غلات نمی‌باشد بلکه کمبود سکوی برش تغذیه برنج جهت تجهیز کمباین‌های غلات وجود دارد.

جدول ۸- سطوح (هکتار) بهینه سامانه‌های برداشت برنج با محدودیت* ماشین

Table 6. Optimum levels (hectares) of rice harvesting systems with machine limitation

ردیف	مستقیم با کمباین برنج	مستقیم با کمباین غلات	دو مرحله‌ای	ردیف	مستقیم با کمباین برنج	مستقیم با کمباین غلات	دو مرحله‌ای
۱	۳۷۳	۲۴۹۶	۴۴۱	۲۵	۳۷۳	۲۴۷۹	۴۵۸
۲	۳۷۲	۲۲۹۶	۶۴۱	۲۶	۳۷۲	۲۳۷۸	۵۶۰
۳	۳۷۲	۲۲۴۸	۶۹۰	۲۷	۳۷۳	۲۴۴۵	۴۹۲
۴	۳۷۲	۲۱۸۹	۷۴۹	۲۸	۳۷۲	۲۳۳۱	۶۰۷
۵	۳۷۲	۲۱۲۵	۸۱۳	۲۹	۳۷۲	۲۲۱۴	۷۲۴
۶	۳۷۳	۲۴۰۹	۵۲۸	۳۰	۳۷۲	۲۲۳۱	۷۰۷
۷	۳۷۲	۲۱۶۶	۷۷۲	۳۱	۳۷۲	۲۲۰۷	۷۳۱
۸	۳۷۳	۲۳۴۲	۵۹۵	۳۲	۳۷۲	۲۱۴۲	۷۹۶
۹	۳۷۳	۲۳۹۱	۵۴۶	۳۳	۳۷۳	۲۴۹۲	۴۴۵
۱۰	۳۷۲	۲۱۰۶	۸۳۲	۳۴	۳۷۲	۲۱۸۱	۷۵۷
۱۱	۳۷۲	۲۲۹۳	۶۴۵	۳۵	۳۷۳	۲۴۱۵	۵۲۳
۱۲	۳۷۳	۲۴۳۶	۵۰۲	۳۶	۳۷۳	۲۴۰۴	۵۳۳
۱۳	۳۷۲	۲۳۰۴	۶۳۳	۳۷	۳۷۲	۲۲۱۹	۷۱۹
۱۴	۳۷۲	۲۱۱۵	۸۲۳	۳۸	۳۷۳	۲۴۷۵	۴۶۲
۱۵	۳۷۲	۲۲۲۴	۷۱۴	۳۹	۳۷۲	۲۲۶۶	۶۷۲
۱۶	۳۷۲	۲۱۵۶	۷۸۱	۴۰	۳۷۳	۲۴۵۸	۴۷۹
۱۷	۳۷۲	۲۲۸۴	۶۵۴	۴۱	۳۷۳	۲۴۲۹	۵۰۸
۱۸	۳۷۳	۲۴۴۸	۴۸۹	۴۲	۳۷۲	۲۰۹۸	۸۴۰
۱۹	۳۷۲	۲۲۸۷	۶۵۱	۴۳	۳۷۲	۲۲۵۷	۶۸۱
۲۰	۳۷۲	۲۲۷۷	۶۶۱	۴۴	۳۷۳	۲۴۶۱	۴۷۶
۲۱	۳۷۲	۲۱۷۸	۷۶۰	۴۵	۳۷۳	۲۴۹۶	۴۴۱
۲۲	۳۷۳	۲۴۸۷	۴۵۰	۴۶	۳۷۳	۲۴۱۹	۵۱۸
۲۳	۳۷۲	۲۱۴۷	۷۹۱	۴۷	۳۷۲	۲۱۵۶	۷۸۱
۲۴	۳۷۲	۲۳۱۱	۶۲۶				

*محدودیت‌ها: ۳۳۱۰ هکتار سطح مجموع سامانه‌ها، ۳۷۳ هکتار توان اجرایی ماشینی کمباین برنج، ۲۴۹۶ هکتار توان اجرایی ماشینی کمباین غلات، ۸۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی کمباین غلات با هد برنج

*Limitations:3310 hectares of cultivated area, 373 hectares of rice harvester machinery, 2496 hectares of grain harvester machinery, 840 hectares of machine capacity of grain combine with rice head

جدول ۹- سطوح (هکتار) بهینه سامانه‌های برداشت برنج بدون محدودیت* ماشین

Table 9. Optimum levels (hectares) of rice harvesting systems without machine limitation

ردیف	مستقیم با کمباین برنج	مستقیم با کمباین غلات	دو مرحله‌ای	ردیف	مستقیم با کمباین برنج	مستقیم با کمباین غلات	دو مرحله‌ای
۱	۱۰۳۷	۲۲۷۲	۰	۲۵	۱۰۲۶	۱۱۷۱	۱۱۱۳
۲	۱۰۲۸	۱۳۵۱	۹۳۱	۲۶	۱۰۱۴	۱۰۰	۲۱۹۶
۳	۱۰۲۷	۱۳۱۰	۹۷۲	۲۷	۱۰۱۹	۵۳۸	۱۷۵۳
۴	۱۰۲۶	۱۲۰۸	۱۰۷۶	۲۸	۱۰۱۶	۲۴۰	۲۰۵۴
۵	۱۰۳۶	۲۱۲۲	۱۵۲	۲۹	۱۰۲۳	۸۷۵	۱۴۱۳
۶	۱۰۲۴	۹۸۶	۱۳۰۰	۳۰	۱۰۲۰	۶۵۹	۱۶۳۰
۷	۱۰۲۱	۷۵۵	۱۵۳۴	۳۱	۱۰۱۷	۳۱۱	۱۹۸۲
۸	۱۰۱۵	۱۳۹	۲۱۵۶	۳۲	۱۰۲۲	۸۴۲	۱۴۴۶
۹	۱۰۲۹	۱۴۵۳	۸۲۸	۳۳	۱۰۲۵	۱۱۲۴	۱۱۶۱
۱۰	۱۰۲۵	۱۰۷۱	۱۲۱۴	۳۴	۱۰۲۲	۷۸۴	۱۵۰۴
۱۱	۱۰۳۳	۱۸۵۰	۴۲۷	۳۵	۱۰۲۱	۶۹۶	۱۵۹۳
۱۲	۱۰۲۷	۱۲۵۹	۱۰۲۴	۳۶	۱۰۳۷	۲۲۳۸	۳۵
۱۳	۱۰۳۲	۱۷۵۰	۵۲۸	۳۷	۱۰۳۵	۲۰۱۴	۲۶۱
۱۴	۱۰۱۹	۵۰۳	۱۷۸۸	۳۸	۱۰۳۷	۲۱۸۶	۸۸
۱۵	۱۰۱۷	۳۷۶	۱۹۱۷	۳۹	۱۰۱۸	۴۴۴	۱۸۴۸
۱۶	۱۰۲۸	۱۴۱۳	۸۶۸	۴۰	۱۰۳۲	۱۷۲۷	۵۵۱
۱۷	۱۰۳۳	۱۸۲۷	۴۵۰	۴۱	۱۰۲۰	۶۴۸	۱۶۴۱
۱۸	۱۰۲۴	۱۰۲۶	۱۲۶۰	۴۲	۱۰۳۰	۱۵۶۷	۷۱۳
۱۹	۱۰۳۰	۱۶۰۹	۶۷۱	۴۳	۱۰۳۴	۱۹۶۸	۳۰۸
۲۰	۱۰۳۲	۱۷۷۶	۵۰۲	۴۴	۱۰۱۵	۱۸۰	۲۱۱۵
۲۱	۱۰۲۰	۵۷۸	۱۷۱۲	۴۵	۱۰۲۸	۱۴۰۱	۸۸۱
۲۲	۱۰۳۶	۲۱۷۱	۱۰۲	۴۶	۱۰۳۱	۱۶۹۳	۵۸۶
۲۳	۱۰۱۵	۱۸۷	۲۱۰۸	۴۷	۱۰۱۳	۰	۲۲۹۷
۲۴	۱۰۱۸	۴۱۸	۱۸۷۴	۴۸	۱۰۳۱	۱۶۷۲	۶۰۷

*محدودیت: ۳۳۱۰ هکتار سطح مجموع سامانه‌ها

*Limitation: 3310 hectares of cultivated area

نتیجه‌گیری

یکی از اساسی‌ترین چالش‌های توسعه مکانیزاسیون شناسایی سامانه‌هایی 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. در این مطالعه، چارچوبی ارائه شد که به حل مسئله سطوح بهینه مکانیزاسیون پرداخته شد.

سامانه سمپاشی با پهپاد با عدم مصرف سوخت و کاهش مصرف سموم، امتیاز شاخص زیست محیطی را به بالاترین مقدار (۱) رساند. سمپاشی تراکتوری بهترین امتیاز شاخص اجتماعی را به میزان ۰/۸۰۶ نشان داد. با این حال، بدترین عملکرد شاخص زیست‌محیطی را بین سامانه‌های محلولپاشی با مقدار ۰/۱۳۲ داشت. ضریب تابع هدف اجتماعی برای سامانه برداشت دو مرحله‌ای با ۰/۶۷ بیشتر از دو برابر از سایر سامانه‌ها به دست آمده است. این سامانه توانست بالاترین امتیاز بعد زیست‌محیطی (۰/۸۴۹) را بدست آورد. در مقابل، این سامانه بالاترین هزینه برداشت۵/۴۴۲ میلیون تومان در هکتار را نشان داد. در برداشت با کمباین برنج بالاترین مصرف سوخت و کمترین شدت بار مزرعه حاصل شد که امتیاز بعد زیست محیطی متوسط (۰/۵۸) را کسب نمود. با این حال یکی از دلایل محبوبیت این سامانه هزینه برداشت (۴/۷۵۴) پایین‌تر از دو مرحله‌ای، زحمت کمتر و سرعت عملیات برداشت است.

بر اساس چارچوب ارائه شده، ترکیب‌های مکانیزاسیون بهینه سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت شلتوک شهرستان رامهرمز ارائه گردیدند. این سطوح الگوهای مکانیزاسیون از منظر پایداری و همه توابع هدف تعریف شده برتری نسبت به هم ندارند. با توجه به جواب‌های بهینه پارتو ناشی از حداکثرسازی توابع هدف اجتماعی و زیست‌محیطی و حداقل‌سازی تابع هدف هزینه سامانه‌های محلول‌پاشی، عمده سطوح بهینه بر سمپاشی پشتی دلالت دارند. در صورت نبود محدودیت ماشین، با اضافه کردن ۳ دستگاه پهپاد دیگر در منطقه می‌توان تا ۲۰۰۰ هکتار سامانه سمپاشی با پهپاد را پوشش داد. برداشت مستقیم با کمباین برنج تا توان اجرایی تقریبی ۱۰۰۰ هکتار در شرایط پایدار قرار دارد. بدین ترتیب دو برابر تعداد کمباین‌های برنج منطقه یعنی ۲۴ دستگاه نیاز است به ناوگان مکانیزاسیون برداشت رامهرمز اضافه شود. همچنین جهت دستیابی به مکانیزاسیون برداشت پایدار، نیازی به اضافه کردن کمباین غلات نمی‌باشد بلکه کمبود هد تغذیه برنج جهت تجهیز کمباین‌های غلات وجود دارد.

نتایج و کاربرد چارچوب مکانیزاسیون پایدار نشان داد، نه‌تنها می‌توان از طریق آن اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سامانه‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف را نیز به محققان و مجریان بخش کشاورزی می‌دهد.

REFERENCES

Abraham, A. & Jain, L. (2005). Evolutionary multiobjective optimization. *Evolutionary Multiobjective Optimization*, Springer, 1-6.

Alizadeh, M. & Haghtalab, D. (2019). Field Performance Assessment of Self-propelled and Knapsack Power Rice Reapers, and Comparison with Manual Harvesting. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 20(72), 55-72. (in Farsi)

Alizadeh, M. R. (2003). Field study of reaper performance in rice harvesting and comparison with traditional method. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 3(13), 1-14. (in Farsi)

Almassi, M., Kiani, S. & Loveimi, N. (2008). Principles of agricultural mechanization. Tehran, Iran, Jungle Publication.

Askin, D. & Askin, V. (2012). Financial budget manual 2012, Lincoln University. Faculty of Commerce.

Banerjee, S. & Punekar, R. M. (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. & Doluschitz, R. (2014). Sustainability in agricultural machinery production-an empirical study among farmers. *Landtechnik*, 69(2), 84-89.

Bochtis, D., Sørensen, C. A. G. & Kateris, D. (2019). Choosing a Machinery System. Operations Management in Agriculture. D. Bochtis, C. A. G. Sørensen and D. Kateris, Academic Press**:** 117-158.

Bochtis, D. D., Sørensen, C. G. & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems engineering*, 126, 69-81.

Camarena, E., Gracia, C. & Sixto, J. C. (2004). A mixed integer linear programming machinery selection model for multifarm systems. *Biosystems Engineering*, 87(2), 145-154.

Corti, D., Granados, M. H., Macchi, M. & Canetta, L. (2013). Service-oriented business models for agricultural machinery manufacturers: Looking forward to improving sustainability. 2013 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE) & IEEE International Technology Management Conference.

Cupiał, M. & Kowalczyk, Z. (2020). Optimization of Selection of the Machinery Park in Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12(4), 1380.

De Toro, A., Gunnarsson, C., Lundin, G. & Jonsson, N. (2012). Cereal harvesting–strategies and costs under variable weather conditions. *Biosystems Engineering*, 111(4), 429-439.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. International conference on parallel problem solving from nature, Springer.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2): 182-197.

Emami, M., Almassi, M. & Bakhoda, H. (2018). Agricultural mechanization, a key to food security in developing countries: strategy formulating for Iran. *Agriculture & Food Security*, **7**(1): 24.

Faiçal, B. S., H. Freitas, P. H. Gomes, L. Y. Mano, G. Pessin, A. C. P. L. F. de Carvalho, B. Krishnamachari & Ueyama, J. (2017). An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138: 210-223.

FAO. (2019). Sustainable Agricultural Mechanization. http://www.fao.org/sustainable-agricultural-mechanization.

Fleming, P. H. (2003). Farm technical manual 2003.

García-Alcaraz, J., Maldonado-Macías, A., Hernández-Arellano, J., Blanco-Fernández, J., Jiménez-Macías, E. & Sáenz-Díez Muro, J. (2016). Agricultural tractor selection: a hybrid and multi-attribute approach. *Sustainability* **8**(2), 157.

García-Alcaraz, J. L., Martínez-Loya, V., Maldonado-Macias, A. & Avelar-Sosa, L. (2017). Selection of Agricultural Technology: A Multi-attribute Approach. International Conference on Technologies and Innovation, Springer.

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(8), 885-894.

Gunnarsson, C., Spörndly, R., Rosenqvist, H., De Toro, A. & Hansson, P. A. (2009). A method of estimating timeliness costs in forage harvesting illustrated using harvesting systems in Sweden. *Grass and forage science*, 64(3), 276-291.

Hahn, R. H. & Rosentreter, E. E. (1988). ASAE Standards 1987: Standards, Engineering Practices and Data Developed and Adopted by the American Society of Agricultural Engineers/ed.

Hasan Jani, H., Hosseini, M., Khadem Alhosseini, N. A. & Alizadeh, M. R. (2007). Evaluation of Different Rice Harvesting Methods in Gilan Province. *Journal of Agriculture*, 9(1), 23-38 (in Farsi).

Hormozi, M., Abdeshahi A., Asoodar, M. & Baruah, D. (2016). Energy use pattern of paddy production systems in khuzestan province, Iran. *Iran Agricultural Research*, 35(2), 47-56.

Hormozi, M. A., Asoodar, M. A. & Abdeshahi, A. (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(1), 235-251. (in Farsi)

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.

Landers, A. (2000). Farm machinery: selection, investment and management, Farming Press, United Business Media.

Leiva, F. & Morris, J. (2001). PH—Postharvest Technology: Mechanization and Sustainability in Arable Farming in England. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79(1), 81-90.

Li, P. & Zheng, Z. (2017). Minimized Cost Programming Method for Farming Machines' Distribution Based on Reliability Analysis. 2017 ASABE Annual International Meeting. St. Joseph, MI, ASABE: 1.

Loveimi, N., Gilany, A. & Alizadeh, M. (2008). The Effect of Harvesting Method on Losses for Two Rice Varieties in Khouzestan Province. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 9(3), 89-106. (in Farsi)

Mrema, G., Soni, P. & Rolle, R. (2014). A Regional Strategy for Sustainable Agricultural Mechanization. Sustainable Mechanization across Agri-Food Chains in Asia and the Pacific Region; Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific: Bangkok, Thailand: 74.

Pandey, M. (2008). Mechanization of Hill Agriculture. Proceedings of Conference on Agricultural Mechanization Technologies for North East India, Organized by Division of Agricultural Engineering, ICAR Research Complex for NEH Region, Umiam, Meghalaya, India.

Radoglou-Grammatikis, P., P. Sarigiannidis, T. Lagkas & Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172: 107148.

Rahman, M. F., S. Fan, Y. Zhang & Chen, L. (2021). A Comparative Study on Application of Unmanned Aerial Vehicle Systems in Agriculture. *Agriculture*, 11 DOI: 10.3390/agriculture11010022.

Rahmati, M. H., Sohrabvandi, G. A., Khodadadi, M. & Razdari, A. M. (2014). Technical and Economic Evaluation of Rice Harvesting Methods in Shirvan-Chrdavol Region. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 378-386. (in Farsi)

Romanelli, T. L. & Milan, M. (2012). Machinery management as an environmental tool-material embodiment in agriculture. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14 (1), 73-73.

Rostami, S., Lotfalian, M. & Hosseinzadeh Samani, B. (2018). Assessment and Comparison of Conventional and Straw Walker Combines Harvesting Losses in Fars Province. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 19: 85-96. (in Farsi)

Saaty, T. L. (1988). What is the analytic hierarchy process? Mathematical models for decision support, Springer: 109-121.

Safari, M. & Sheikhi Garjan, A. (2020). Comparison between unmanned aerial vehicle and tractor lance sprayer against Dubas bug Ommatissus lybicus (Hemiptera: Tropiduchidae). *Iranian Journal of Plant Protection Science*, 51(1): 13-26.

Safari, M., Alizadeh, M. R. & Gerami, K. (2014). Comparison of Three Conventional Rice Combine Harvesters in Mazandaran, Iran. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 14(4), 73-86. (in Farsi)

Sahu, R. & Raheman, H. (2008). A decision support system on matching and field performance prediction of tractor-implement system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(1), 76-86.

Sen, P. & Yang, J. B. (2012). Multiple criteria decision support in engineering design, Springer

Science & Business Media.
Søgaard, H. T. & Sørensen, C. G. (2004). A model for optimal selection of machinery sizes within the farm machinery system. *Biosystems Engineering*, 89(1), 13-28.
Sopegno, A., Busato, P., Berruto, R. & Romanelli, T. L. (2016). A cost prediction model for machine operation in multi-field production systems. *Scientia Agricola*, 73(5), 397-405.
Sørensen, C. (2003). Workability and machinery sizing for combine harvesting. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 5, 1-19.
Witney, B. (1988). Choosing and using farm machines, Longman.
Zhou, Q., Lou, J., Xie, F. & Liu, Q. (2011). The method research on optimum selection of agricultural machinery. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 5(6), 337-334.