

مقاله پژوهشی

اثربخشی توسعه فنی مکانیزاسیون برنج بر تقاضای انرژی در استان‌های شمالی کشور

محمد نصیری^۱، محمد قهدریجانی^{۲*} و بابک بهشتی^۲

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ استادیار؛ و دانشیار گروه مهندسی سیستم‌های هوشمند کشاورزی، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۲۵

چکیده

توسعه فنی مکانیزاسیون برنج در استان‌های شمالی ایران طی سال‌های اخیر شامل افزایش سطح مکانیزاسیون، گسترش کاربرد ماشین‌های نشاکاری و برداشت و نوسازی ناوگان کشاورزی بوده است. با این حال، اثر این تحولات بر تقاضای انرژی در شرایط مختلف فنی و مدیریتی به طور کامل مشخص نیست. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثربخشی تقاضای انرژی از توسعه فنی مکانیزاسیون و نقش عوامل تعدیل‌کننده مانند کارایی انرژی، قیمت حامل‌های انرژی و سطح فناوری ناوگان به اجرا درآمده است. از داده‌های سه استان گیلان، مازندران و گلستان طی دوره ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ استفاده گردید. کارایی انرژی با روش DEA-BCC و روابط پویا با مدل داده‌های تابلویی System-GMM برآورد شد. برای محاسبه شاخص‌های انرژی، از ضریب‌های هم‌ارز انرژی بومی‌سازی شده برای شرایط ایران استفاده گردید که بر اساس مطالعات معتبر داخلی (Zahedi et al., 2015; Alam et al., 2023) تهیه شده‌اند. نتایج تحقیق نشان داد میانگین کارایی فنی خالص در گلستان (۰/۹۲) بالاتر است تا در مازندران (۰/۸۵) و گیلان (۰/۸۱). همچنین بیشترین و کمترین انرژی ورودی به ترتیب در گلستان (۷۷۶۸۵ مگاژول در هکتار) و گیلان (۳۴۱۸۸ مگاژول در هکتار) است. برآورد مدل System-GMM بیانگر وجود رابطه غیرخطی به شکل U بین سطح مکانیزاسیون و شدت انرژی است به گونه‌ای که در گلستان افزایش سطح مکانیزاسیون تا آستانه ۳/۶ اسب بخار در هکتار موجب کاهش شدت انرژی شده است، در حالی که در گیلان اثر مکانیزاسیون غیریکنواخت است: در سطوح پایین کاهش و در سطوح بالاتر، به دلیل سهم کمتر فناوری‌های نوین و پراکندگی اراضی، افزایشی بر شدت انرژی بود ($P < 0.05$). کشش قیمتی تقاضای انرژی در گیلان (۰/۱۳) بیش از کشش قیمتی تقاضای انرژی در گلستان (۰/۰۸) برآورد شد. در میان عوامل مورد بررسی، کارایی انرژی مهم‌ترین عامل کاهش‌دهنده شدت انرژی در هر سه استان بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد اثر توسعه فنی مکانیزاسیون بر تقاضای انرژی به شرایط منطقه‌ای، سطح فناوری ناوگان، ساختار بهره‌برداری و کارایی مدیریتی وابسته است؛ بنابراین، سیاست‌های توسعه مکانیزاسیون برنج باید متناسب با ویژگی‌های فنی و ساختاری هر استان طراحی شوند.

واژه‌های کلیدی

تحلیل پوششی داده‌ها، فناوری ناوگان ماشین‌آلات، کارایی انرژی، System-GMM

مقدمه

تأمین نیازهای غذایی است، به گونه‌ای که امنیت غذایی به عنوان یکی از اهداف مهم سرلوحه برنامه‌های دولت‌ها قرار گرفته است. با گذشت زمان، مدیریت منابع به موازات رشد جوامع پیچیده‌تر

کشاورزی به عنوان یکی از محورهای اساسی رشد و توسعه، نقش مهمی در توسعه اقتصادی کشورها دارد. در جهان امروز یکی از مشکلات اساسی بشر

می‌شود و هم‌زمان با افزایش جمعیت و رشد اقتصادی کشورها، تقاضا برای مواد غذایی نیز رو به افزایش می‌گذارد. پاسخگویی به این نیازها موجب به‌کارگیری ابزارهای مدرن و مواد شیمیایی جدید مانند انواع کودهای شیمیایی و سموم شده است. اما استفاده بیش از حد و خارج از استاندارد این مواد شیمیایی موجب بروز آثار منفی جسمی برای مصرف‌کنندگان و آلودگی محیط زیست شده است (Hansen, 1996).

برنج از مهم‌ترین محصولات استراتژیک و غذایی ایران است و در امنیت غذایی، اشتغال و اقتصاد کشاورزی استان‌های شمالی کشور به‌ویژه گیلان و مازندران نقش اساسی دارد. تولید این محصول به‌دلیل نیاز به عملیات متعدد زراعی شامل آماده‌سازی زمین، خزانه‌گیری، نشاکاری، مدیریت آب، مبارزه با آفات و بیماری‌ها، برداشت و پس از برداشت، از نظام‌های تولیدی با مصرف قابل‌توجه انرژی محسوب می‌شود. در دو دهه اخیر، توسعه مکانیزاسیون کشاورزی در مناطق برنج‌خیز شمال کشور با افزایش استفاده از ماشین‌آلات و تجهیزات مدرن، تغییر الگوی مصرف نهاده‌ها و بهبود فناوری‌های تولید همراه بوده است. این تحولات هرچند با هدف افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید و جبران کمبود نیروی کار صورت گرفته‌اند، اما آثار آن‌ها بر میزان و ساختار مصرف انرژی در تولید برنج به‌صورت جامع و نظام‌مند کمتر ارزیابی شده است. از سوی دیگر، افزایش هزینه حامل‌های انرژی، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و ضرورت ارتقای پایداری نظام‌های تولید کشاورزی توجه به شاخص‌های انرژی را به یکی از محورهای اصلی ارزیابی عملکرد سامانه‌های تولیدی تبدیل کرده است. بخش کشاورزی ایران

سهم قابل توجهی در مصرف نهایی انرژی دارد و زراعت برنج به‌دلیل مصرف بالای سوخت (گازوئیل) و برق (پمپاژ آب) یکی از زیربخش‌هایی است که به مصرف انرژی بالایی نیاز دارد. بررسی روند تغییرات مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی در تولید برنج می‌تواند تصویری روشن از میزان موفقیت توسعه مکانیزاسیون و دیگر تحولات فنی در افزایش کارایی تولید ارائه دهد. بنابراین، تحلیل وضعیت مصرف انرژی و شاخص‌های مرتبط در فرآیند تولید برنج طی سال‌های اخیر، علاوه بر کمک به شناخت نقاط قوت و ضعف نظام تولید، می‌تواند مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی توسعه مکانیزاسیون، مدیریت بهینه نهاده‌ها و دستیابی به کشاورزی پایدار در مناطق برنج‌کاری شمال کشور فراهم سازد (Rasoli Sharbiani et al., 2022; Hashemi et al., 2025).

استان‌های گیلان، مازندران و گلستان قطب‌های اصلی تولید برنج کشور هستند و بیش از ۸۰ درصد تولید ملی این محصول راهبردی را دارند. بر اساس آخرین آمارنامه کشاورزی کشور (۱۴۰۱-۱۴۰۲)، سطح زیر کشت برنج در این استان‌ها به‌ترتیب ۲۵۱/۶۳۳، ۲۹۶/۲۲۴ و ۴۷/۳۳۰ هکتار و عملکرد شلتوک نیز به‌ترتیب ۳/۷۸۸، ۴/۹۷۲ و ۵/۸۱۱ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Anon, 2025). اهمیت اقتصادی و غذایی برنج موجب شده است طی دو دهه اخیر، برنامه‌های توسعه مکانیزاسیون در این مناطق با هدف افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید، جبران کمبود نیروی کار و بالا رفتن پایداری تولید به‌طور گسترده دنبال شود. توسعه فنی مکانیزاسیون در استان‌های مذکور عمدتاً در سه محور شامل افزایش سطح مکانیزاسیون (اسب بخار در هکتار)، گسترش

حوزه مکانیزاسیون، مدیریت انرژی و توسعه پایدار تولید برنج فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

حوزه مطالعه این پژوهش شامل استان‌های گیلان، مازندران و گلستان است که مهم‌ترین مناطق برنج‌کاری کشور هستند. دوره زمانی مورد بررسی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ را دربرمی‌گیرد که با در نظر گرفتن این سه استان مجموعاً ۳۰ مشاهده^۴ برای تحلیل فراهم شده است. به منظور نمایش موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه، نقشه شمال کشور شامل محدوده سه استان مذکور تهیه و در شکل ۱ ارائه شده است.

داده‌های مورد نیاز شامل سطح زیر کشت، عملکرد شلتوک، تعداد و توان ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده در زنجیره تولید برنج شامل تراکتور، تیلر، نشاکار و کمباین برنج از آمارنامه‌های رسمی وزارت جهاد کشاورزی (جلد دوم، سال‌های زراعی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۲) استخراج گردید (Anon, 2014; 2016; 2017; 2019; 2025). اطلاعات مربوط به قیمت حامل‌های انرژی و فرآورده‌های سوختی مورد استفاده در بخش کشاورزی از گزارش‌ها و پایگاه‌های آماری بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران و شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران گردآوری شد. کلیه داده‌ها پس از بررسی، پالایش و یکسان‌سازی برای تحلیل شاخص‌های مکانیزاسیون، مصرف انرژی و مدل‌سازی اقتصادسنجی به کار گرفته شدند.

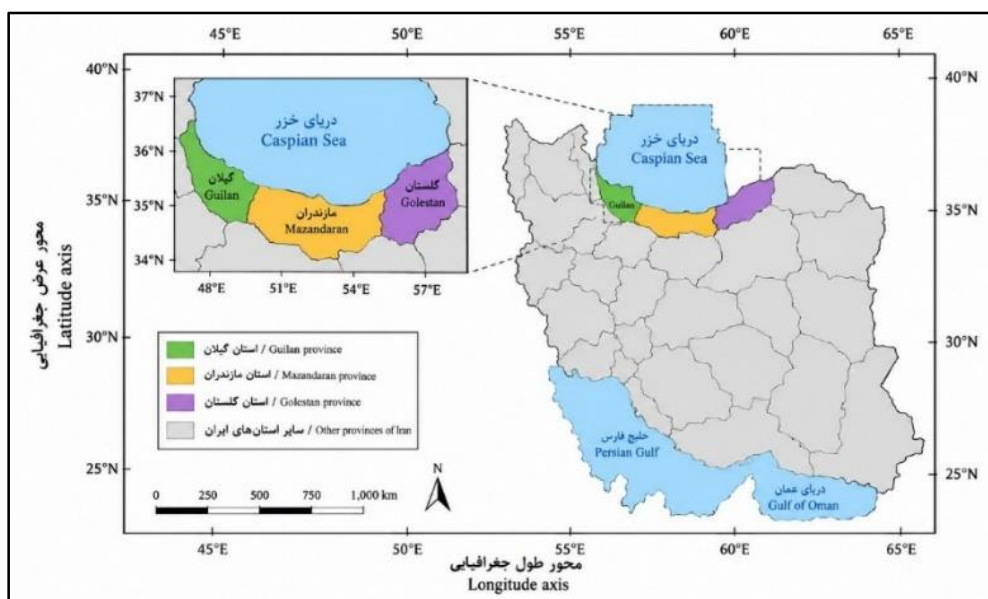
مکانیزاسیون عملیات نشاکاری و برداشت (افزایش تعداد ماشین‌های نشاکار و کمباین‌های ویژه برنج) و نوسازی نسبی ناوگان تراکتورها صورت گرفته است. با وجود این تحولات، یکی از پرسش‌های اساسی و کمتر بررسی شده در ادبیات پژوهشی کشور آن است که توسعه فنی مکانیزاسیون تا چه اندازه و با چه شدتی بر تقاضای انرژی در سامانه‌های تولید برنج تأثیر می‌گذارد و آیا این اثر در استان‌های مختلف یکسان است یا نه. از آنجا که مصرف انرژی در تولید برنج تحت تأثیر عوامل متعددی مانند سطح فناوری ماشین‌آلات، قیمت و دسترسی به حامل‌های انرژی، ویژگی‌های اقلیمی، ارقام کشت شده، ساختار بهره‌برداری و شیوه‌های مدیریتی قرار دارد، انتظار می‌رود رابطه میان مکانیزاسیون و تقاضای انرژی از الگوی یکنواختی تبعیت نکند و در شرایط مختلف، شدت و جهت متفاوتی داشته باشد (Kazemi et al., 2015; Suh & Moss, 2017). در ادبیات بین‌المللی، این پدیده با مفاهیمی مانند «اثرگذاری ناهمگن»^۱، «اثرگذاری شرطی»^۲ و «کشش متغیر»^۳ تبیین می‌شود (Suh & Moss, 2017; Pellegrini & Fernández, 2018). باین‌حال، شواهد تجربی کافی در خصوص چگونگی بروز این پدیده در نظام‌های تولید برنج ایران وجود ندارد. از این‌رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از تلفیق تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و مدل‌های داده‌های تابلویی پویا درصدد است تا ضمن ارزیابی وضعیت بهره‌وری انرژی در تولید برنج، نحوه اثرگذاری توسعه فنی مکانیزاسیون بر تقاضای انرژی را در شرایط متفاوت سه استان شمالی کشور تبیین کند و شواهدی علمی برای سیاست‌گذاری در

1- Heterogeneous Effects

2- Conditional Effects

3- Variable Elasticity

4- Panel Data



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان‌های گیلان، مازندران و گلستان در شمال ایران

Fig. 1- Geographical location of Gilan, Mazandaran, and Golestan provinces in northern Iran

شاخص‌های کلیدی انرژی

به منظور ارزیابی وضعیت مصرف انرژی و توسعه مکانیزاسیون در تولید برنج، شاخص‌های منتخب انرژی و مکانیزاسیون بر اساس ضریب‌های هم‌ارز انرژی بومی‌سازی شده برای شرایط فنی، اقلیمی و ساختار سوخت ایران محاسبه شدند. با توجه به اینکه ضریب‌های ارائه شده توسط کیتانی (Kitani, 1999) - متعلق به بیش از دو دهه پیش و مبتنی بر فناوری‌های رایج در کشورهای صنعتی است - برای ایران معتبر

نیست (Alam et al., 2023; Mohammadi & Maysami, 2009). در این پژوهش از ضریب‌های به‌روز و بومی‌شده که در مطالعات معتبر داخلی و منطقه‌ای ارائه شده‌اند، استفاده گردید (Zahedi et al., 2015; Alam et al., 2023). این ضریب‌ها در جدول (۱-الف) نمایش داده شده‌اند. به‌کارگیری این ضریب‌های اصلاح‌شده، دقت نتایج را در مقایسه با مطالعات پیشین، که صرفاً از داده‌های CIGR استفاده کرده‌اند، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

جدول ۱-الف- ضریب‌های هم‌ارز انرژی نهاده‌های کشاورزی مورد استفاده در پژوهش

Table 1a. Energy equivalent coefficients of agricultural inputs used in the study

مرجع Reference	واحد Unit	ضریب هم‌ارز انرژی Energy equivalent coefficient	Input / نهاده
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/L	56.31	Diesel گازوئیل
تبدیل مستقیم Direct conversion	MJ/MJ	1.00	Electricity برق
Zahedi <i>et al.</i> , (2015)	MJ/h	1.96	Human labor نیروی کار انسانی
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/kg	62.70	Machinery (tractor and implements) ماشین‌آلات (تراکتور و ادوات)
Zahedi <i>et al.</i> , (2015)	MJ/kg	14.70	Seed بذر
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/kg	66.14	Nitrogen fertilizer (urea) کود نیتروژنه (اوره)
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/kg	12.44	Phosphate fertilizer کود فسفات
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/kg	11.15	Potassium fertilizer کود پتاسه
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/kg	238.00	Pesticides سموم دفع آفات
Alam <i>et al.</i> , (2023)	MJ/m ³	1.03	Irrigation water آب آبیاری

نسبت تعداد تراکتورهای با توان بیش از ۸۰ اسب بخار به کل تراکتورهای فعال به‌عنوان شاخص فناوری ناوگان در نظر گرفته شد.

شاخص‌های انرژی شامل کل انرژی ورودی (TEI)، شدت انرژی (EI)، نسبت انرژی (ER) و بهره‌وری انرژی (EP) هستند. کل انرژی ورودی از مجموع انرژی مصرفی ناشی از سوخت، برق، ماشین‌آلات، نیروی انسانی، بذر، کودهای شیمیایی و سموم کشاورزی محاسبه شد و بر حسب مگاژول در هکتار بیان گردید. شدت انرژی از نسبت کل انرژی ورودی به عملکرد شلتوک مگاژول در هکتار محاسبه شد، نسبت انرژی از تقسیم انرژی خروجی بر کل انرژی ورودی به‌دست آمد، و بهره‌وری انرژی از نسبت عملکرد شلتوک به کل انرژی ورودی (کیلوگرم بر مگاژول) محاسبه شد. معادل انرژی دانه و بقایای گیاهی (کاه و کلش) نیز در محاسبه انرژی خروجی لحاظ شد.

نکته: ضریب برق معادل ۱ (نسبت تبدیل مستقیم) در نظر گرفته شده تا صرفاً انرژی نهایی مصرفی در مزرعه محاسبه گردد. در صورت نیاز به محاسبه انرژی اولیه، می‌توان از ضریب ۴/۱۷ (با در نظر گرفتن راندمان نیروگاه‌های حرارتی ایران) استفاده کرد که در بخش تحلیل حساسیت به آن پرداخته شده است.

شاخص‌های مکانیزاسیون شامل سطح مکانیزاسیون (LM)، درجه مکانیزاسیون نشاکاری (DM_T)، درجه مکانیزاسیون برداشت (DM_H) و شاخص فناوری ناوگان (TECH) هستند. سطح مکانیزاسیون از نسبت مجموع توان تراکتورها و تیلرهای فعال در تولید برنج به سطح زیر کشت برنج (اسب بخار در هکتار) به‌دست آمد. درجه مکانیزاسیون نشاکاری و برداشت نیز به‌ترتیب از نسبت تعداد ماشین‌های نشاکار و کمباین برنج به سطح زیر کشت محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی سطح فناوری ناوگان ماشینی،

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)

که در آن،

$D_{\{Golestan\}}$ و $D_{\{Mazandaran\}}$, $D_{\{Guilan\}}$ متغیرهای مجازی استان هستند. برای جلوگیری از هم‌خطی کامل میان اثر اصلی سطح مکانیزاسیون و مجموع جملات تعاملی آن با متغیرهای مجازی استانی (که برابر یک است)، ضریب‌های جملات تعاملی استانی (θ) به صورت انحراف نسبت به استان گلستان به عنوان استان مبنا تفسیر می‌شوند. کشش‌های نقطه‌ای شدت انرژی نسبت به سطح مکانیزاسیون نیز به صورت زیر محاسبه شد:

$$E_{LM} = \frac{\partial \ln EI}{\partial \ln LM} = \beta_1 + 2\beta_2 \ln LM + \beta_3 \ln TECH + \theta_j \quad (2)$$

برای تخمین مدل از تخمین گر گشتاورهای تعمیم‌یافته سیستمی (System GMM) در نرم‌افزار Stata 17 (دستور xtabond2) استفاده شد. ابزارهای مورد استفاده شامل وقفه‌های دوم و بالاتر متغیرهای درون‌زا بودند. آزمون‌های تشخیصی شامل آزمون خودهمبستگی (AR(2)) و آزمون سارگان (هانسن) برای اعتبار ابزارها به کار گرفته شدند (Roodman, 2009).

لازم است توضیح داده شود کشش‌های استانی گزارش شده در بخش نتایج برای متغیرهای کارایی انرژی (EE) و قیمت حامل‌های انرژی (P_e) از ترکیب ضریب اصلی هر متغیر در جدول ۳ با میانگین سطح مکانیزاسیون و فناوری ناوگان هر استان محاسبه شده‌اند و مستقیماً از یک جمله تعاملی جداگانه در مدل برآوردی برنگرفته‌اند؛ این نکته برای شفافیت بیشتر در تفسیر نتایج استانی ذکر می‌شود.

به منظور ارزیابی کارایی مصرف انرژی در تولید برنج از روش تحلیل پوششی داده‌ها^۱ و مدل BCC ورودی محور با فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس (VRS) استفاده شد. در این مدل، انرژی مصرفی ناشی از سوخت، برق، نیروی کار انسانی، ماشین‌آلات و بذر به عنوان نهاده‌ها (مگاژول بر هکتار) و عملکرد شلتوک (کیلوگرم در هکتار) به عنوان ستانده در نظر گرفته شدند. هر ترکیب استان-سال به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری^۲ (DMU) تعریف شد. نتایج حاصل از مدل، شاخص کارایی فنی مصرف انرژی را برای هر واحد تصمیم‌گیری در بازه صفر تا یک برآورد کرد به گونه‌ای که مقادیر نزدیک به یک بیانگر استفاده کاراتر از نهاده‌های انرژی در تولید برنج هستند. برای تمامی محاسبات تحلیل پوششی داده‌ها از نرم‌افزار DEA Solver Pro 15 استفاده شد.

مدل داده‌های تابلویی پویا

برای آزمون اثرپذیری شرطی، مدل پایه با جملات تعامل به صورت زیر تصریح شد:

$$\begin{aligned} \ln EI_{it} = & \alpha + \rho \ln EI_{i,t-1} + \beta_1 LM_{it} + \beta_2 LM_{it}^2 \\ & + \beta_3 (LM_{it} \times TECH_{it}) \\ & + \beta_4 (DM_{T,it} \times P_{e,it}) \\ & + \beta_5 DM_{T,it} + \beta_6 DM_{H,it} \\ & + \beta_7 TECH_{it} + \gamma_1 \ln P_{e,it} \\ & + \gamma_2 \ln E E_{it} \\ & + \delta_1 \ln Area_{it} \\ & + \delta_2 \ln Yield_{it} \\ & + \theta_1 (LM_{it} \times D_{Guilan}) \\ & + \theta_2 (LM_{it} \times D_{Mazandaran}) \\ & + \theta_3 (LM_{it} \times D_{Golestan}) \\ & + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

نتایج و بحث

آمار توصیفی شاخص‌های پایه

جدول (۱-ب) مقادیر شاخص‌های کلیدی مکانیزاسیون و همچنین مقادیر مصرف نهاده‌های انرژی را در سه استان عمده برنج خیز کشور در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ نشان می‌دهد. برابر نتایج به‌دست‌آمده استان گلستان با سطح مکانیزاسیون ۴/۹ اسب بخار در هکتار، در جایگاه بالاتری نسبت به استان‌های مازندران (۳/۸ اسب بخار در هکتار) و گیلان (۲/۴ اسب بخار در هکتار) قرار دارد. شاخص فناوری ناوگان نیز روند مشابهی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که سهم ماشین‌آلات با فناوری نوین در گلستان (۲۴/۳ درصد) به‌مراتب بیشتر از مازندران (۱۸/۵ درصد) و گیلان (۱۲/۱ درصد) است. این یافته‌ها بیانگر توسعه بیشتر زیرساخت‌های مکانیزاسیون و نوسازی ناوگان ماشین‌های کشاورزی در استان گلستان است. به نظر می‌رسد یکپارچگی نسبی اراضی، بزرگ‌تر بودن اندازه مزارع و امکان بهره‌برداری اقتصادی‌تر از ماشین‌آلات کشاورزی در این استان، از مهم‌ترین عوامل

مؤثر بر افزایش سطح مکانیزاسیون و ارتقای فناوری ناوگان در مقایسه با دو استان شمالی دیگر باشد.

در زمینه نهاده‌های انرژی، استان گلستان با مصرف ۳۰۷/۵ لیتر گازوئیل در هکتار بالاترین میزان مصرف سوخت را دارد که با سطح مکانیزاسیون بالاتر این استان همخوانی دارد. مصرف برق نیز در گلستان (۳۵۷/۵ کیلووات-ساعت در هکتار) بیشتر از دو استان دیگر است که می‌تواند به وسعت بیشتر اراضی و نیاز به پمپاژ بیشتر آب مرتبط باشد. الگوی مصرف کود نیز نشان می‌دهد در مازندران مصرف کود اوره (۱۸۰/۲۰ کیلوگرم در هکتار) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر است تا در گیلان (۹۰/۵۱ کیلوگرم در هکتار) و گلستان (۱۴۵/۴۱ کیلوگرم در هکتار) که می‌تواند ناشی از سیاست‌های کودی و ساختار خاک در این استان باشد. مصرف سموم نیز در گلستان (۱۴/۲۳ کیلوگرم در هکتار) بیش از دو استان دیگر است که با گستردگی اراضی و تنوع بیشتر آفات در این منطقه قابل توجیه است.

جدول ۱-ب- شاخص‌های منتخب برنج و مصرف نهاده‌های انرژی در سه استان شمالی (۱۴۰۱-۱۴۰۲)

Table 1b- Selected rice indicators and energy input consumption in three northern provinces (2022-2023)

استان Province	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg/ha)	LM (hp/ha)	TECH (%)	مصرف گازوئیل (لیتر در هکتار) Diesel consumption (L/ha)	مصرف برق (کیلووات-ساعت در هکتار) Electricity consumption (kWh/ha)	مصرف اوره (کیلوگرم در هکتار) Urea consumption (kg/ha)	مصرف فسفات (کیلوگرم در هکتار) Phosphate consumption (kg/ha)	مصرف پتاسه (کیلوگرم در هکتار) Potassium consumption (kg/ha)	مصرف سموم (کیلوگرم در هکتار) Pesticide consumption (kg/ha)
گیلان Guilan	251,633	3,788	2.4	12.1	290.0	312.5	90.51	73.52	133.16	12.46
مازندران Mazandaran	296,224	4,972	3.8	18.5	290.0	332.5	180.20	106.57	60.32	11.73
گلستان Golestan	47,330	5,811	4.9	24.3	307.5	357.5	145.41	95.65	89.05	14.23

استان از منظر بهره‌وری انرژی عملکرد مناسب‌تری دارد.

نکته: مقادیر انرژی ورودی و شدت انرژی در این پژوهش بر اساس ضریب‌های بومی‌سازی شده برای ایران (جدول ۱-الف) محاسبه شده‌اند. در صورت استفاده از ضریب‌های قدیمی کیتانی (Kitani, 1999)، این اعداد ۱۲ تا ۱۸ درصد تغییر می‌کردند که نشان‌دهنده اهمیت به‌کارگیری ضریب‌های متناسب با شرایط کشور است. بنابراین، مقایسه اعداد این پژوهش با مطالعات پیشین، که از ضریب‌های CIGR استفاده کرده‌اند، باید با احتیاط صورت گیرد.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح مکانیزاسیون و مصرف نهاده‌های انرژی‌بر، اگرچه می‌تواند ظرفیت تولید را ارتقا دهد، لزوماً به بهبود کارایی انرژی منجر نمی‌شود و مدیریت بهینه نهاده‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای بهره‌وری انرژی دارد.

جدول ۲ میانگین شاخص‌های انرژی تولید برنج را در سه استان مورد مطالعه طی دوره ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که استان گلستان با ۷۷/۶۸۵ مگاژول در هکتار، بالاترین میزان انرژی ورودی را دارد. این وضعیت عمدتاً ناشی از کاربرد بیشتر ماشین‌آلات، مصرف بالاتر سوخت و اجرای عملیات مکانیزه در مزارع بزرگ‌تر و یکپارچه‌تر این استان است. در همین راستا، شدت انرژی نیز در گلستان با مقدار ۱۳/۳۷ مگاژول بر کیلوگرم شلتوک، بیشترین مقدار را در میان استان‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که حاکی از مصرف انرژی بیشتر به ازای واحد محصول تولیدی است. در مقابل، استان گیلان با برخورداری از بالاترین نسبت انرژی (۱/۶۰)، کارایی مطلوب‌تری در تبدیل انرژی مصرفی به محصول تولیدی دارد. این شاخص بیانگر آن است که به ازای هر واحد انرژی مصرف‌شده، بازده انرژی در گیلان بیش از دو استان دیگر است و سامانه تولید برنج در این

جدول ۲- شاخص‌های انرژی (میانگین ۱۳۹۲-۱۴۰۲) محاسبه شده با ضریب‌های بومی
Table 2. Energy indices (mean 2013-2023) calculated with localized coefficients

ER	EP (kg/MJ)	EI (MJ/kg)	TEI (MJ/ha)	Province	استان
1.60	0.111	9.03	34,188	Guilan	گیلان
1.36	0.085	11.79	58,647	Mazandaran	مازندران
1.27	0.075	13.37	77,685	Golestan	گلستان

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین در مناطق برنج‌خیز شمال ایران هم‌راستا است. برای نمونه، در مطالعه‌ای در استان مازندران، مجموع انرژی ورودی در سیستم تولید برنج ۷۱ تا ۷۹ هزار مگاژول در هکتار گزارش شده است که با مقادیر مشاهده‌شده در این پژوهش (گلستان با حدود

۷۷/۶۸۵ مگاژول در هکتار) هم‌خوانی نزدیکی دارد (Kazemi et al., 2015). همچنین در همان مطالعه، سهم بالای سوخت دیزل و نهاده‌های مکانیزه به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه‌های انرژی ورودی گزارش شده است که نشان می‌دهد مکانیزاسیون در افزایش مصرف انرژی نقش تعیین‌کننده دارد. از سوی دیگر،

نتایج تحلیل پوششی داده‌ها

میانگین کارایی فنی خالص (PTE) در استان گلستان (۰/۹۲) بیشتر است تا در مازندران (۰/۸۵) و گیلان (۰/۸۱). این نتیجه نشان می‌دهد که کشاورزان گلستانی با توجه به مقیاس بزرگ‌تر مزارع و دسترسی به فناوری مدرن‌تر توانسته‌اند نهاده‌های انرژی را بهینه‌تر به کار گیرند. پتانسیل صرفه‌جویی انرژی کل در هر سه استان حدود ۱۵/۳ درصد (معادل ۷/۲۴۰ مگاژول در هکتار) برآورد شد.

نتایج برآورد مدل GMM

جدول ۳ نتایج برآورد مدل پویا با در نظر گرفتن جملات تعاملی را ارائه می‌دهد. آزمون خودهمبستگی مرتبه دوم آرانو-باند (AR(2) با مقدار احتمال ۰/۳۴ نشان می‌دهد فرض صفر نبود خودهمبستگی در باقیمانده‌ها قابل رد کردن نیست؛ بنابراین شواهدی از وجود خودهمبستگی مرتبه دوم در مدل مشاهده نمی‌شود و برآوردها از این منظر معتبر هستند. نتایج آزمون سارگان/هانسن با مقدار احتمال ۰/۲۹ بیانگر آن است که فرض صفر مربوط به اعتبار محدودیت‌های بیش‌شناسایی شده رد نمی‌شود، به این معنا که ابزارهای مورد استفاده در تخمین مدل اعتبار آماری مناسبی دارد و با متغیرهای خطا همبستگی معناداری ندارند. در مجموع، نتایج آزمون‌های تشخیصی نشان می‌دهد مدل پویا برآورد شده از نظر اعتبار ابزارها و نبود خودهمبستگی در جملات خطا، استحکام مناسبی دارد و نتایج آن قابل اتکا است.

پژوهش‌ها در استان گیلان نشان می‌دهد که اگرچه میزان انرژی ورودی در برخی موارد کمتر است تا در استان‌های دیگر، اما کارایی انرژی معمولاً بالاتر و در حدود ۱/۶ تا ۱/۷ گزارش شده است (Pishgar-Komleh et al., 2012). این موضوع با یافته‌های این تحقیق درباره نسبت انرژی بالاتر در گیلان و کارایی بهتر تبدیل انرژی کاملاً سازگار است.

در مطالعات مقایسه‌ای سه استان شمالی ایران نیز گزارش شده است گلستان معمولاً دارای انرژی ورودی بالاتر و شدت انرژی بیشتر است، در حالی که گیلان از نظر بهره‌وری انرژی وضعیت بهتری دارد (Kazemi et al., 2015). این تفاوت عمدتاً به ساختار مالکیت اراضی، اندازه مزارع و سطح مکانیزاسیون مرتبط دانسته شده است، به‌طوری‌که مزارع بزرگ‌تر و یکپارچه‌تر در گلستان موجب افزایش مصرف سوخت و ماشین‌آلات می‌شود و در نتیجه شدت انرژی را افزایش می‌دهد، اما در گیلان ساختار خرد و مدیریت سنتی‌تر، به بهبود نسبی نسبت انرژی کمک کرده است. در مجموع، هم‌راستایی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد در سیستم‌های تولید برنج شمال ایران، افزایش مکانیزاسیون لزوماً به بهبود کارایی انرژی منجر نمی‌شود و در بسیاری از موارد بدون بهینه‌سازی مدیریت نهاده‌ها می‌تواند موجب افزایش شدت انرژی گردد. بنابراین، بهبود بهره‌وری انرژی نیازمند رویکردی تلفیقی شامل بهینه‌سازی مصرف سوخت، ارتقای فناوری ماشین‌آلات و مدیریت ساختار مزرعه است.

جدول ۳- برآورد مدل اثرپذیری شرطی (متغیر وابسته: $\ln EI$)Table 3- Estimation of conditional effect model (dependent variable: $\ln EI$)

P-value	Std. Error / خطای استاندارد	Coefficient / ضریب	Variable / متغیر
0.000	0.118	0.521	$\ln EI$ (وقفه اول) / $\ln EI$ (lag 1)
0.002	0.102	-0.315	LM
0.000	0.011	0.043	LM ²
0.004	0.065	-0.187	LM × TECH
0.007	0.092	-0.251	DM_T × P_e
0.016	0.079	-0.192	DM_T
0.052	0.071	-0.138	DM_H
0.008	0.074	-0.198	TECH
0.002	0.032	-0.102	$\ln P_e$
0.002	0.148	-0.468	$\ln EE$
0.010	0.046	0.119	$\ln Area$
0.012	0.058	0.145	LM × D_Guilan
0.150	0.043	0.062	LM × D_Mazandaran
0.350	0.041	-0.038	LM × D_Golestan
0.000	0.540	2.105	ثابت / Constant

مکانیزاسیون می‌تواند به کاهش قابل توجه‌تر شدت انرژی منجر شود. به عبارت دیگر، اثر مکانیزاسیون بر بهره‌وری انرژی یکنواخت نیست و در حضور فناوری پیشرفته تقویت می‌شود. این یافته با نتایج پژوهش سا و ماس (Suh & Moss, 2017) مبنی بر وجود رابطه غیرخطی و وابسته به شرایط (U-شکل و شرطی) بین مکانیزاسیون و شدت انرژی هم‌راستاست.

ضریب جمله تعاملی $DM_{T \times P_e}$ منفی و معنادار در سطح ۱ درصد است که نشان می‌دهد افزایش قیمت انرژی اثر کاهشی مکانیزاسیون نشاکاری بر شدت انرژی را تشدید می‌کند. این نتیجه حاکی از آن است که در شرایط افزایش هزینه‌های انرژی، انگیزه اقتصادی برای استفاده از ماشین‌های نشاکار مدرن و کم‌مصرف افزایش می‌یابد و در نتیجه، بهبود کارایی انرژی تسریع می‌شود. از این‌رو، سیاست‌های قیمتی در حوزه حامل‌های انرژی می‌توانند نقش مکملی در ارتقای بهره‌وری فناوری در بخش کشاورزی داشته باشند (Taei Samiromi et al., 2021). نتایج مربوط

پیش از تفسیر جملات تعاملی، ضریب‌های اصلی مدل نیز نکته‌ای مهم نشان می‌دهند: نشانه منفی و معنادار ضریب LM (-۰/۳۱۵) در کنار نشانه مثبت و معنادار ضریب LM² (۰/۰۴۳) بیانگر رابطه‌ای غیرخطی به شکل U میان سطح مکانیزاسیون و شدت انرژی در استان مینا (گلستان) است؛ به این معنا که شدت انرژی ابتدا با افزایش مکانیزاسیون کاهش می‌یابد و در نقطه بهینه (حدود ۳/۶ اسب بخار در هکتار) به کمترین مقدار می‌رسد، نتیجه‌ای که با کشش‌های نزدیک به صفر گزارش‌شده در جدول ۴ برای همین محدوده سازگار است. نتایج برآورد مدل پویا با جملات تعاملی نشان می‌دهد که اثر مکانیزاسیون بر شدت انرژی ماهیتی مشروط و وابسته به شرایط ساختاری و قیمتی دارد. در این راستا، ضریب جمله تعاملی LM×TECH منفی و از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنادار است. این نتیجه بیانگر آن است که اثر افزایش سطح مکانیزاسیون بر کاهش شدت انرژی به ترکیب فناوری ناوگان وابسته است و در شرایطی که سهم تراکتورها و ماشین‌آلات مدرن بالاتر است، افزایش

به جملات تعاملی مکانیزاسیون با متغیرهای مجازی استان‌ها نشان‌دهنده وجود ناهمگونی فضایی معنادار در اثرگذاری مکانیزاسیون بر شدت انرژی است. به‌طور خاص، ضریب مثبت و معنادار برای استان گیلان ($P < 0.05$ ، 0.145) بیانگر آن است که اثر افزایش سطح مکانیزاسیون بر شدت انرژی در این استان نسبت به استان مینا (گلستان) قوی‌تر و در جهت افزایش شدت انرژی عمل می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد ساختار خرد مالکیت اراضی، محدودیت مقیاس مزرعه و الگوی متفاوت استفاده از ماشین‌آلات در گیلان موجب شده است مکانیزاسیون به‌جای بهبود بهره‌وری انرژی، در برخی موارد با افزایش مصرف انرژی همراه باشد. در مجموع، نتایج این بخش تأکید می‌کند که اثر مکانیزاسیون بر شدت انرژی رابطه‌ای ساده و خطی نیست، بلکه به‌شدت تحت تأثیر سطح فناوری، قیمت نسبی انرژی و ویژگی‌های ساختاری مناطق مختلف قرار دارد. بنابراین، سیاست‌گذاری در حوزه مکانیزاسیون کشاورزی باید به‌صورت هدفمند و منطقه‌محور طراحی شود تا بتواند به بهبود واقعی بهره‌وری انرژی منجر شود.

کشش‌های نقطه‌ای

جدول ۴ کشش نقطه‌ای شدت انرژی نسبت به

سطح مکانیزاسیون را در سطوح مختلف فناوری ناوگان و استان‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که این کشش‌ها ماهیتی غیرخطی دارند و به سطح فناوری و درجه مکانیزاسیون وابسته‌اند. در استان گلستان با سطح بالاتر فناوری ناوگان ($24/3$ درصد)، کشش شدت انرژی نسبت به مکانیزاسیون در سطح پایین مکانیزاسیون (2 اسب بخار بر هکتار) منفی و قابل توجه (حدود -0.21 یا -21 درصد) برآورد شده است. این نتیجه نشان می‌دهد در این سطح 10 درصد افزایش در مکانیزاسیون منجر به کاهش حدود $2/1$ درصد در شدت انرژی می‌شود که بیانگر نقش مؤثر مکانیزاسیون در بهبود بهره‌وری انرژی در مراحل ابتدایی توسعه فناوری است. با افزایش سطح مکانیزاسیون، اثر نهایی آن بر شدت انرژی به‌تدریج کاهش می‌یابد و در سطح 5 اسب بخار بر هکتار کشش به مقادیر نزدیک به صفر میل می‌کند. این وضعیت بیانگر نزدیک شدن سیستم تولید به نقطه بهینه یا اشباع فناوری است، به‌گونه‌ای که افزایش بیشتر مکانیزاسیون در این سطح اثر معناداری بر کاهش شدت انرژی ندارد. این الگو وجود بازده نزولی در اثرگذاری مکانیزاسیون بر بهره‌وری انرژی را در سطوح بالاتر توسعه فناوری تأیید می‌کند.

جدول ۴- کشش نقطه‌ای EI نسبت به LM در سطوح مختلف TECH و استان‌ها

Table 4- Point elasticity of EI with respect to LM at different TECH levels and provinces

استان	Province	TECH (%)	LM=2 hp/ha	LM=3.6 hp/ha	LM=5 hp/ha
گیلان	Guilan	12.1	-0.08	0.02	0.12
مازندران	Mazandaran	18.5	-0.14	-0.04	-0.05
گلستان	Golestan	24.3	-0.21	-0.11	0.00

می‌تواند کارایی فنی را افزایش دهد، اثر آن بر بهره‌وری انرژی وابسته به ساختار مزرعه، ترکیب فناوری و مدیریت نهاده‌هاست. به بیان دیگر، نتایج مطالعات قبلی نیز تأیید می‌کنند که افزایش مکانیزاسیون بدون بهینه‌سازی مصرف سوخت و ارتقای فناوری ناوگان ممکن است به افزایش شدت انرژی منجر شود، در حالی که در شرایط مدیریت بهینه می‌تواند به بهبود هم‌زمان کارایی فنی و انرژی کمک کند.

در مقابل، در استان گیلان با سطح پایین‌تر فناوری ناوگان (۱۲/۱ درصد)، کاهش شدت انرژی نسبت به مکانیزاسیون در سطح پایین (۲ اسب بخار بر هکتار) منفی و نسبتاً محدود (حدود ۰/۰۸- یا ۸- درصد) برآورد شده است. باین‌حال، در سطوح بالاتر مکانیزاسیون (۵ اسب بخار بر هکتار)، این کاهش به مقدار مثبت (حدود ۰/۱۲ یا ۱۲ درصد) تغییر جهت می‌دهد. این تغییر علامت نشان می‌دهد که در غیاب فناوری مناسب، افزایش صرف سطح مکانیزاسیون لزوماً به بهبود بهره‌وری انرژی منجر نمی‌شود و حتی می‌تواند با افزایش شدت انرژی همراه باشد.

این نتیجه بیانگر نقش کلیدی فناوری ناوگان به‌عنوان عامل تعدیل‌گر در رابطه بین مکانیزاسیون و بهره‌وری انرژی است، به‌گونه‌ای که اثر مکانیزاسیون نه‌تنها به سطح آن بلکه به کیفیت و ترکیب فناوری‌های مورد استفاده نیز وابسته است. به بیان دیگر، در شرایطی که سهم ماشین‌آلات مدرن پایین است، افزایش مکانیزاسیون ممکن است به‌دلیل استفاده از تجهیزات کم‌بازده یا مدیریت غیربهینه عملیات اثر معکوس بر کارایی انرژی داشته باشد. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه نقش تعدیل‌گر فناوری در بهره‌وری انرژی هم‌راستا

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد سطح مکانیزاسیون و فناوری در استان‌های مختلف نه‌تنها بر ساختار مصرف انرژی بلکه بر کارایی فنی و بهره‌وری انرژی نیز اثرگذار است. در این راستا، نتایج نشان می‌دهد استان گلستان با سطح بالاتر مکانیزاسیون و فناوری ناوگان، دارای بیشترین کارایی فنی خالص ($PTE=0.92$) نسبت به مازندران (۰.۸۵) و گیلان (۰.۸۱) است. این نتیجه با مطالعات پیشین در سیستم‌های تولید برنج ایران هم‌راستا است، به‌طوری‌که در تحلیل‌های مبتنی بر تابع تولید و روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، افزایش مقیاس مزرعه و استفاده از فناوری‌های مدرن به‌عنوان عوامل اصلی ارتقای کارایی فنی معرفی شده‌اند (Kazemi et al., 2015). در مطالعه‌ای در استان خوزستان، دامنه گسترده‌ای از کارایی فنی (۰/۱۵ تا ۰/۹۹) گزارش شده که نشان‌دهنده ناهمگونی شدید در استفاده از نهاده‌های مکانیزه در بین بهره‌برداران است. باین‌حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کارایی فنی بالاتر در گلستان الزاماً به معنای بهبود کامل بهره‌وری انرژی نیست زیرا به‌رغم PTE بالاتر، این استان دارای بیشترین انرژی ورودی (۷۷/۶۸۵ مگاژول بر هکتار) و بالاترین شدت انرژی (۱۳/۳۷ مگاژول بر کیلوگرم) است. این یافته با مطالعات انرژی در شمال ایران همخوانی دارد که نشان می‌دهند افزایش مکانیزاسیون می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت و نهاده‌های غیرمستقیم انرژی شود، به‌ویژه در مزارع مکانیزه‌تر (Pishgar-Komleh et al., 2012; Vahedi, 2021). در مجموع، مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد رابطه بین مکانیزاسیون، کارایی فنی و بهره‌وری انرژی در سیستم‌های تولید برنج رابطه خطی ساده نیست. در حالی که مکانیزاسیون

به تنهایی منجر به بهبود قابل توجه بهره‌وری شود (Hatirli et al., 2006; Kazemi et al., 2015).

به‌طور کلی، این نتایج با ادبیات موجود هم‌خوانی دارد که تأکید می‌کند اثرگذاری سیاست‌های بهبود بهره‌وری انرژی در کشاورزی به‌شدت وابسته به ساختار مزرعه و مقیاس تولید است، به‌گونه‌ای که در مناطق دارای مزرعه بزرگ و متمرکز مانند گلستان، سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها اثربخشی بالاتری دارند، در حالی که در مناطق خرد و پراکنده مانند گیلان، علاوه بر مداخلات مدیریتی، اصلاحات ساختاری مانند یکپارچه‌سازی اراضی نیز برای دستیابی به بهبود معنادار در کارایی انرژی ضروری است.

نتیجه‌گیری

جمع‌بندی نتایج به تفکیک استان: یافته‌های این پژوهش نشان داد که اثر توسعه مکانیزاسیون و فناوری ناوگان بر کارایی فنی و شدت انرژی در استان‌های مورد مطالعه ناهمگنی قابل توجهی دارد و نمی‌توان الگویی واحد برای کل منطقه شمال کشور تعریف کرد.

در استان گلستان، سطح بالاتر مکانیزاسیون (۴/۹ اسب بخار بر هکتار) و فناوری ناوگان (۲۴/۳ درصد) همراه با بیشترین کارایی فنی خالص (۰/۹۲) مشاهده شد. با این حال، این استان به‌رغم کارایی فنی بالاتر، دارای بیشترین انرژی ورودی و شدت انرژی نیز هست. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در این استان، اثر مکانیزاسیون بر شدت انرژی در سطوح پایین منفی و قابل توجه است، اما در سطوح بالاتر به آستانه اشباع نزدیک می‌شود. کاهش بالاتر کارایی انرژی نسبت به سایر استان‌ها نشان داد که اقدامات

است (Özokcu & Özdemir, 2024; Pishgar-Komleh et al., 2012) که تأکید می‌کنند اثر مکانیزاسیون بر کارایی انرژی در سیستم‌های کشاورزی اثری است مشروط و در حضور فناوری پیشرفته می‌تواند مثبت و در غیاب آن حتی منفی باشد.

نقش کارایی انرژی

کشش کارایی انرژی در استان گلستان (۰/۵۲-) نسبت به گیلان (۰/۴۱-) بزرگ‌تر و بیانگر حساسیت بیشتر شدت انرژی نسبت به بهبود مدیریت نهاده‌ها در این استان است. به عبارت دیگر، در گلستان اقدامات مدیریتی مانند کاهش مصرف سوخت، بهینه‌سازی عملیات پمپاژ و تنظیم صحیح ادوات کشاورزی، به دلیل وجود صرفه‌های مقیاس و یکپارچگی نسبی اراضی، اثرگذاری بیشتری بر ارتقای کارایی انرژی دارد. این نتیجه با مطالعاتی هم‌راستا است که نشان می‌دهند در نظام‌های کشاورزی با مقیاس بزرگ‌تر و مکانیزاسیون پیشرفته‌تر، کاهش کارایی نسبت به بهبود مدیریت نهاده‌ها بالاتر است و اصلاحات مدیریتی سریع‌تر به بهبود بهره‌وری انرژی منجر می‌شود (Pishgar-Komleh et al., 2012). در مقابل، در استان گیلان کاهش کارایی انرژی (۰/۴۱-) کمتر است که نشان می‌دهد حتی در صورت بهبود مدیریت انرژی، میزان کاهش شدت انرژی محدودتر خواهد بود. این موضوع به ساختار خرد و پراکنده مزارع و کوچک بودن قطعات زراعی در این استان نسبت داده می‌شود. در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است که در سیستم‌های کشاورزی با قطعات کوچک و پراکندگی بالا، کارایی انرژی به‌شدت تحت تأثیر محدودیت‌های ساختاری قرار دارد و اصلاحات صرفاً مدیریتی نمی‌تواند

مدیریتی در این استان به دلیل یکپارچگی اراضی و صرفه‌های مقیاس اثرگذاری بیشتری دارد.

در استان مازندران، وضعیت شاخص‌ها در سطح میانی قرار داشت و نتایج نشان داد که این استان در آستانه بهینه مکانیزاسیون (حدود ۳/۸ اسب بخار بر هکتار) قرار دارد. در این سطح، افزایش بیشتر مکانیزاسیون اثر محدودتری بر کاهش شدت انرژی دارد و به نظر می‌رسد بهبود بهره‌وری انرژی بیشتر از مسیر مدیریت مصرف نهاده‌ها و نگهداری ماشین‌آلات قابل دستیابی باشد تا توسعه کمی مکانیزاسیون.

در استان گیلان، با پایین‌ترین سطح مکانیزاسیون (۲/۴ اسب بخار بر هکتار) و کمترین فناوری ناوگان (۱۲/۱ درصد)، کارایی فنی پایین‌تر و در مقابل، کارایی نسبی انرژی بالاتر مشاهده شد. نتایج کشش‌ها نشان داد که در این استان، افزایش مکانیزاسیون در برخی سطوح می‌تواند اثر خنثی یا حتی افزایشی بر شدت انرژی داشته باشد که بیانگر نقش محدودکننده ساختار خرد و پراکنده اراضی است. اثرپذیری پایین‌تر کارایی انرژی از مدیریت نیز نشان داد که اصلاحات صرف مدیریتی به تنهایی کافی نیست و اصلاحات ساختاری ضروری است.

بر اساس نتایج این پژوهش، سیاست‌های توسعه مکانیزاسیون و مدیریت انرژی در زراعت برنج باید متناسب با شرایط فنی، ساختاری و مدیریتی هر استان طراحی و اجرا شوند. در استان گیلان، به دلیل پراکندگی و خردبودن اراضی، سهم پایین فناوری‌های نوین و حساسیت بیشتر تقاضای انرژی به قیمت حامل‌های انرژی، اولویت سیاستی باید بر یکپارچه‌سازی اراضی، کاهش خردمالکی و نوسازی ناوگان ماشین‌آلات کشاورزی متمرکز باشد. حمایت‌های هدفمند برای توسعه و به‌کارگیری

نشاکارها و سایر ماشین‌های کم‌مصرف، همراه با اصلاح تدریجی قیمت سوخت و ارائه بسته‌های حمایتی و جبرانی برای بهره‌برداران خرد نیز می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش شدت مصرف انرژی کمک کند. در استان مازندران، با توجه به نزدیک‌شدن سطح مکانیزاسیون به مقادیر بهینه، توسعه کمی ماشین‌آلات در اولویت قرار ندارد و تمرکز سیاست‌ها باید بر ارتقای کارایی استفاده از تجهیزات موجود باشد. در این راستا، بهینه‌سازی مصرف سوخت، توسعه نظام‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین‌آلات و آموزش بهره‌برداران در زمینه مدیریت کارای عملیات مزرعه و نهاده‌های انرژی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش شدت انرژی و افزایش بهره‌وری داشته باشد. در استان گلستان نیز که سطح بالاتری از کارایی انرژی و فناوری ناوگان وجود دارد، حفظ سطح بهینه مکانیزاسیون و جلوگیری از اشباع فناوری اهمیت ویژه‌ای دارد. سرمایه‌گذاری در سامانه‌های پایش و مدیریت مصرف انرژی، توسعه روش‌های تولید کم‌مصرف مانند کشت مستقیم (خشکه‌کاری) و گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه سامانه‌های خورشیدی در مزارع، می‌تواند ضمن حفظ مزیت‌های موجود زمینه ارتقای بیشتر بهره‌وری انرژی و پایداری تولید برنج را فراهم سازد.

پیشنهاده‌ها

در سطح ملی، پیشنهاد می‌شود شاخص توسعه مکانیزاسیون به صورت چندبعدی شامل $DM_{T/H}$ ، LM و $TECH$ بازتعریف شود تا تصویر دقیق‌تری از وضعیت واقعی مکانیزاسیون ارائه دهد. همچنین، اصلاح تدریجی و هدفمند قیمت حامل‌های انرژی،

استانداردسازی مصرف سوخت ماشین آلات کشاورزی، و توسعه سامانه‌های پایش انرژی در مزارع الگویی از اقدامات ضروری در سطح سیاست‌گذاری کلان است.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهاد برای مطالعات آتی: مهم‌ترین محدودیت این پژوهش، نبود داده‌های دقیق مصرف سوخت در سطح مزرعه و نداشتن دسترسی به اطلاعات فنی ناوگان (مانند سن و وضعیت ماشین آلات) بوده است. اگرچه در این پژوهش از به‌روزترین ضریب‌های هم‌ارز انرژی موجود برای ایران استفاده شده است، اما به دلیل تنوع قابل توجه اقلیمی و تفاوت در سن ناوگان ماشین آلات در استان‌های مختلف، این ضریب‌ها ممکن است با خطای منطقه‌ای (تا حدود ۵ تا ۱۰ درصد) همراه باشند. بنابراین، تعمیم نتایج این پژوهش به کل کشور باید با احتیاط باشد و پژوهش‌های میدانی تکمیلی در هر منطقه برای استخراج ضریب‌ها مختص آن منطقه توصیه می‌گردد. در پژوهش‌های آینده، استفاده از داده‌های خرد مزرعه‌ای و نمونه‌گیری میدانی می‌تواند امکان تحلیل دقیق‌تر ناهمگنی درون‌استانی را فراهم کند. تعمیم این چارچوب تحلیلی به دیگر محصولات زراعی مانند گندم، جو و ذرت نیز می‌تواند به درک جامع‌تری از رابطه بین مکانیزاسیون، فناوری و بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی کشور منجر شود.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Alam, M. J., Mahmud, A. A., Gaber, A., & Hossain, A. (2023). Energy efficiency and water use indices for sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) production under subtropical climatic conditions of Bangladesh. *Journal of Water and Climate Change*, 14 (2), 576-589. doi: 10.2166/wcc.2023.401.
- Anon. (2014). Agricultural statistics of the crop year 2011-2012, Volumes I & II. Center for Statistics, Information Technology and Communication. Ministry of Jihad-e Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)
- Anon. (2016). Agricultural statistics of the crop year 2014-2015, Volumes I & II. Center for Statistics, Information Technology and Communication. Ministry of Jihad-e Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)
- Anon. (2017). Agricultural statistics of the crop year 2015-2016, Volumes I & II. Center for Statistics, Information Technology and Communication. Ministry of Jihad-e Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)
- Anon. (2019). Agricultural statistics of the crop year 2017-2018, Volumes I & II. Center for Statistics, Information Technology and Communication. Ministry of Jihad-e Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)

- Anon. (2025). Agricultural statistics of the crop year 2022-2023, Volumes I & II. Center for Statistics, Information Technology and Communication. Ministry of Jihad-e Agriculture, Tehran, Iran. (in Persian)
- Hansen, J. W. (1996). Is agricultural sustainability a useful concept? *Agricultural Systems*, 50(2), 117-143. doi: 10.1016/0308-521X(95)00011-S.
- Hashemi, R., Moghaddasi, R., Kazemnejad, M., & Mohammadinejad, A. (2025). Investigating the trend of consumption and calculation of energy efficiency indicators in the production of irrigated cereals (wheat, barley, rice and corn) in Iran during 2000-2020 [Barresi-ye raved-e masraf va mohasebe-ye shākhshā-ye kārai-ye energy dar tolid-e ghallāt-e ābi-ye keshvar (gandom, jo, berenj va zorat) tay-e sālha-ye 1379-1399]. *Scientific Publications Management System*, 35(1), 255–265. doi: 10.22034/saps.2024.58735.3127. (in Persian)
- Hatirli, S. A., Ozkan, B., & Fert, C. (2006). Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, 31(4), 427-438. doi: 10.1016/j.renene.2005.04.007.
- Kazemi, H., Kamkar, B., Lakzaei, S., Badsar, M., & Shahbyki, M. (2015). Energy flow analysis for rice production in different geographical regions of Iran. *Energy*, 84, 390-396. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.005.
- Kitani, O. (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering, Volume V: Energy and biomass engineering*. ASAE.
- Maysami, M. A., & Mohammadi, S. (2009). Energy consumption pattern for corn production in Iran. *Journal of Agricultural Mechanization*, 6(1), 49-55. doi: 10.22034/jam.2021.13121. (in Persian)
- Özokcu, S., & Özdemir, O. (2024). The technological effects of renewable and non-renewable energy on agricultural productivity in developed countries: A dynamic panel GMM approach. *International Journal of Empirical Economics*, 3(1), 2450007. doi: 10.1142/S2810943024500082.
- Pellegrini, P., & Fernández, R. J. (2018). Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(10), 2335-2340. doi: 10.1073/pnas.1717072115.
- Pishgar-Komleh, S. H., Sefeedpari, P., & Ghahderijani, M. (2012). Energy consumption and CO₂ emissions analysis of potato production based on different farm size levels in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 33, 183-191. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.04.008.
- Rasoli Sharbiani, V., Sadegh Bousharte Moghaddam, M., & Taghinejad, A. (2022). Comparison of energy consumption for rice production in lands with and without modernization plan (Case study: Bandar Anzali County). *Journal of Environmental Science Studies*, 7(2), 144-156. (in Persian)
- Roodman, D. (2009). How to do xtabond2: An introduction to difference and system GMM in Stata. *The Stata Journal*, 9(1), 86-136. doi: 10.1177/1536867X0900900106.
- Suh, D. H., & Moss, C. B. (2017). Decomposition of regional energy intensity change in rice production: The role of mechanization and technical change. *Energy Economics*, 65, 421-430.

- Taei Samiromi, F., Khalilian, S., Vakilpoor, M. H., & Najafi Alamdarlo, H. (2021). Investigating the multiple effects of adjusting the price of energy carriers on major economic-environmental indicators in the agricultural sector of Iran: An ARDL approach. *Agricultural Economics and Development*, 29(1), 1-28.
- Vahedi, A. (2021). Energy use patterns and carbon footprint of rice production in Northern Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 448-459.
- Zahedi, M., Eshghizadeh, H. R., & Mondani, F. (2015). Energy Efficiency and Productivity in Potato and Sugar Beet Production Systems in Isfahan Province. *Journal of Crop Production and Processing*, 5(17), 181-191.

Original Paper

Effect of Technical Development of Rice Mechanization on Energy Demand in Northern Provinces of Iran

Mohammad Nasiri, Mohammad Gahderijani and Babak Beheshti

*Corresponding Author: Assistanty Professor, Department of Agricultural Intelligent Systems Engineering, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: ghahderijani@srbiau.ac.ir

Received: 23 June 2026, Accepted: 16 September 2026

<https://doi.org/10.22092/amsr.2026.373169.1540>

Abstract

The technical development of rice mechanization in the northern provinces of Iran has accelerated in recent years, encompassing an expansion in mechanization levels, the increased adoption of transplanting and harvesting machinery, and the ongoing renewal of the agricultural machinery fleet. However, the precise impact of these advancements on energy demand, particularly under varying technical and managerial conditions, remains insufficiently explored. This study investigates the influence of technical mechanization development on energy demand, while also examining the moderating roles of energy efficiency, energy carrier prices, and fleet technology levels. Data spanning from 2013 to 2023 were collected from the three primary rice-producing provinces: Guilan, Mazandaran, and Golestan. For energy indicator calculations, locally-adapted energy equivalent coefficients specific to Iran's conditions were employed, derived from validated domestic studies (Alam *et al.*, 2023; Zahedi *et al.*, 2015). Energy efficiency was assessed using the DEA-BCC model, and the dynamic relationships were estimated through a System-GMM panel data approach. The findings reveal that the average pure technical efficiency was highest in Golestan (0.92), followed by Mazandaran (0.85) and Guilan (0.81). Moreover, the highest and lowest total energy inputs were recorded in Golestan (77,685 MJ ha⁻¹) and Guilan (34,188 MJ ha⁻¹), respectively. The System-GMM estimates indicate a non-linear, U-shaped relationship between the mechanization level and energy intensity. In Golestan, increasing mechanization up to a threshold of 3.6 hp ha⁻¹ led to a reduction in energy intensity, whereas in Guilan, the effect was non-uniform: decreasing at lower levels but increasing at higher levels due to the lower adoption of modern technologies and greater land fragmentation ($P < 0.05$). The price elasticity of energy demand was estimated to be higher in Guilan (0.13) than in Golestan (0.08). Among the factors examined, energy efficiency emerged as the most significant contributor to reducing energy intensity across all three provinces. The results underscore that the effect of technical mechanization development on energy demand is contingent upon regional conditions, fleet technology levels, operational structures, and managerial efficiency. Consequently, rice mechanization development policies should be tailored to the specific technical and structural characteristics of each province.

Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), Energy Efficiency, Fleet Technology, System-GMM



© 2024 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)