

Evaluation of Energy Indicators of rapeseed (*Brassica napus* L.) Cultivation in Paddy Fields influenced by Tillage Systems, Planting Method and Nitrogen amounts

Mohammad Rabiee^{1*}, Sajjad Shaker Kouhi²

Received: October 15, 2024

Accepted: March 16, 2025

1- Researcher, Dept. of Seed Improvement, Rice Research Institute, Rasht, Rasht, Iran.

2- Dept. of Seed Improvement, Rice Research Institute, Rasht, Rasht, Iran.

Corresponding Author Mohammad Rabiee E-mail: rabiee_md@yahoo.co.uk

Abstract

Background and Objectives: Efficient energy use is one of the key components of sustainable agriculture. Increasing the energy use efficiency requires a reduction in energy inputs without negatively affecting the crop yield. Optimal crop management can play a significant role in reducing energy consumption. The present study was performed to evaluate the effects of tillage, planting method and nitrogen (N) amounts on the energy indicators of rapeseed (*Brassica napus* L.) production in paddy fields.

Materials and Methods: The experiment was designed as a split factorial arrangement based on a randomized complete block design with three replications at research field of Rice Research Institute of Iran in Rasht during two cropping seasons of 2016-2018. The conventional tillage, minimum tillage, and no-tillage methods were considered as the main plots and two planting methods of direct seeding and transplanting, and the amounts of 0, 100, 200, and 300 kg. ha⁻¹ of pure N as factorial in subplots. For accurate analysis of the energy used and to evaluate the share of each input in the total energy consumption, the energy input was divided into direct, indirect, renewable, and non-renewable energies. Energy indices included energy use efficiency (EUE), energy productivity (EP), specific energy (SE), and net energy (NEG).

Results: The results showed that the studied factors had significant effects on the grain yield of rapeseed and energy indices. In most experimental treatments, the N fertilizer and diesel fuel showed higher share percentages in rapeseed production than the other energy inputs. The treatments with no N fertilizer had the lowest net energy due to their low grain yield. This emphasizes the importance of using an optimal level of N fertilizer to successfully produce rapeseed. In all experimental treatments, non-renewable energy showed a much higher share than renewable energy. The no-tillage and minimum tillage were found to be superior to the conventional tillage due to higher EUE and EP. The treatments of conventional tillage with 300 kg. ha⁻¹ of N in both planting methods had the highest energy input (>38000 MJ. ha⁻¹) due to more consumption of diesel fuel and nitrogen.

Conclusion: The treatment combination of minimum tillage at 100 kg. ha⁻¹ of N in both planting methods due to high energy consumption efficiencies, as sustainable options could be recommended for rapeseed cultivation after rice harvesting in paddy fields of Guilan province.

Keywords: Energy Use Efficiency, Minimum Tillage, Rice, Second Crop, Transplanting

ارزیابی شاخص‌های انرژی زراعت کلزا (*Brassica napus* L.) در شالیزار تحت تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی، روش کاشت و مقدار نیتروژن

محمد ربیعی^{۱*}، سجاد شاکرکوهی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶
--------------------------	-------------------------

۱- پژوهشگر بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

۲- بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

چکیده

مقدمه و اهداف: استفاده بهینه از انرژی یکی از مؤلفه‌های اصلی کشاورزی پایدار است. افزایش کارایی مصرف انرژی مستلزم کاهش نهاده‌های انرژی بدون تأثیر منفی بر عملکرد محصول است. مدیریت بهینه زراعی می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ایفا نماید. پژوهش حاضر به منظور مطالعه اثر سیستم‌های خاک‌ورزی، روش کاشت و مقدار نیتروژن بر شاخص‌های انرژی زراعت کلزا در شالیزار اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: آزمایشی به صورت اسپلیت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در شهرستان رشت طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۵ انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه روش خاک‌ورزی (خاک‌ورزی متداول، کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی) به عنوان فاکتور اصلی و دو روش کشت (کشت مستقیم و کشت نشایی) و چهار سطح کود نیتروژن خالص (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) به عنوان فاکتور فرعی بودند. به منظور تحلیل دقیق‌تر انرژی مصرفی و تعیین سهم هر یک از نهاده‌ها در کل مصرف انرژی، انرژی ورودی به انرژی مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر تقسیم شد. شاخص‌های انرژی شامل کارایی مصرف انرژی (EUE)، بهره‌وری انرژی (EP)، انرژی ویژه (SE) و انرژی خالص (NEG) بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که فاکتورهای مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه کلزا و شاخص‌های انرژی داشتند. در اکثر تیمارهای آزمایشی، سهم کود نیتروژن و سوخت دیزل نسبت به سایر ورودی‌های انرژی بیشتر بود. تیمارهایی که از کود نیتروژن استفاده نکردند، به دلیل عملکرد پایین، کمترین مقدار انرژی خالص را داشتند که این امر نشان‌دهنده اهمیت استفاده از کود نیتروژن برای تولید موفقیت‌آمیز کلزا است. در تمامی تیمارهای آزمایشی، سهم انرژی تجدیدنپذیر بسیار بیشتر از انرژی تجدیدپذیر بود. روش‌های بدون خاک‌ورزی و کم خاک‌ورزی به دلیل EUE و EP بالاتر، نسبت به روش خاک‌ورزی متداول برتری داشتند. تیمارهای خاک‌ورزی متداول در ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در هر دو روش کشت مستقیم و نشایی، بیشترین مقدار انرژی مصرفی (بیش از ۳۸۰۰۰ مگاژول در هکتار) را به علت مصرف زیاد سوخت و نیتروژن دارا بودند.

نتیجه‌گیری: ترکیبات تیماری کم خاک‌ورزی در ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در هر دو روش کشت، به دلیل کارایی بالای مصرف انرژی به عنوان گزینه‌های امیدوارکننده جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای کشت کلزا پس از برداشت برنج در اراضی شالیزاری استان گیلان قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: برنج، کارایی مصرف انرژی، کشت دوم، کشت نشایی، کم خاک‌ورزی

مقدمه

امروزه به دلیل رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی، مصرف انرژی در بخش کشاورزی افزایش یافته است، زیرا تأمین غذا برای جمعیت در حال رشد، مستلزم تشدید استفاده از آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی، سوخت، برق، ماشین‌آلات و منابع طبیعی است (السورگابی و همکاران ۲۰۱۹ و کوندان و همکاران ۲۰۲۱). از طرفی، افزایش مصرف انرژی همچون سوخت‌های فسیلی باعث ایجاد مشکلاتی در سلامتی انسان و مسائل زیست‌محیطی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (مارتینز و همکاران ۲۰۱۹). الگوی مصرف انرژی می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند نوع نظام‌های زراعی، الگوی کشت، فناوری، جمعیت شاغل در بخش کشاورزی، دانش کشاورزان و عملکرد محصول قرار گیرد (محمدزاده و همکاران ۲۰۱۷). استفاده بهینه از انرژی در کشاورزی باعث افزایش بهره‌وری، کاهش مشکلات زیست‌محیطی و گسترش کشاورزی پایدار می‌شود (صدیق‌کیا و عبدی ۲۰۲۲). با این حال، افزایش بازده مصرف انرژی مستلزم کاهش انرژی‌های ورودی بدون تأثیر بر عملکرد محصول است. بنابراین برای اتخاذ سیاست‌های مناسب در جهت افزایش بازدهی نظام‌های تولید، آگاهی از منابع انرژی و شناسایی روش‌هایی که باعث افزایش کارایی مصرف انرژی می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و استفاده از سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی، از جمله روش‌های کارآمد برای کاهش انرژی‌های ورودی به‌شمار می‌روند (آلووین و همکاران ۲۰۱۱).

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی در جهان است. دانه‌های این گیاه به‌طور متوسط حاوی ۴۳ درصد روغن و ۱۹ درصد پروتئین می‌باشد (پواسون و همکاران ۲۰۱۹). روغن کلزا سومین منبع تأمین روغن نباتی در جهان به‌شمار می‌رود و تقریباً ۱۳ درصد از کل روغن تولیدی در جهان به کلزا اختصاص دارد (رامان و همکاران ۲۰۱۹). روغن کلزا به دلیل دارا بودن مقادیر بالای اسیدهای چرب اشباع

نشده، فقدان کلسترول و سطوح پایین اسید اروسیک و گلوکوزینولات از کیفیت تغذیه‌ای بالایی برخوردار می‌باشد (ماروسک و همکاران ۲۰۱۵). بیش از ۹۰ درصد روغن‌های خوراکی در ایران به‌صورت خام یا فرآوری شده وارد می‌شود که حجم زیادی از منابع انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. توسعه کشت کلزا می‌تواند یکی از راهکاری اساسی جهت دستیابی به خوداتکایی تولید روغن و امنیت غذایی باشد (امیری و همکاران ۲۰۱۹). استان‌های شمالی کشور به دلیل آب‌وهوای معتدل و مرطوب، از شرایط مطلوبی برای رشد کلزا برخوردار هستند. انطباق رویش کلزا با فصل بارندگی در شمال کشور و امکان قرار گرفتن آن در تناوب با برنج، زمینه گسترش کشت کلزا در این مناطق را فراهم ساخته است (ربیعی و همکاران ۲۰۱۱). با وجود پتانسیل بالای اراضی شالیزاری جهت کشت دوم کلزا، متأسفانه بیشتر آن‌ها در نیمه دوم سال خالی از زراعت باقی می‌مانند. توسعه کشت کلزا در شالیزار علاوه بر تأمین بخشی از روغن مصرفی، می‌تواند باعث جلوگیری از فرسایش خاک، افزایش حاصلخیزی خاک، جذب نیترات اضافی از خاک، کاهش علف‌های هرز و آفات و در نتیجه کاهش مصرف کود و سم، افزایش درآمد کشاورزان و تولید پایدار برنج شود (معتمد و همکاران ۲۰۲۲).

نتایج بررسی کارایی مصرف انرژی مزارع کلزا در خرمشهر نشان داد که میزان انرژی ورودی مزرعه کلزا برابر با ۳۳۵۱۷ مگاژول بر هکتار می‌باشد. از این مقدار ۱۹۴۳۴ و ۱۴۰۸۳ مگاژول بر هکتار به ترتیب مربوط به انرژی مستقیم و انرژی غیرمستقیم بود. همچنین، میزان انرژی ورودی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به ترتیب ۳۱۴ و ۳۳۲۰۲ مگاژول بر هکتار به دست آمد. بیشترین انرژی ورودی به ترتیب مربوط به الکتریسیته، کود نیتروژن و سوخت بود (خدائی جوقان و همکاران ۲۰۲۲). قربانزاده و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی جریان انرژی در بوم‌نظام‌های تولید کلزا در استان خراسان شمالی گزارش کردند که کل انرژی ورودی و خروجی یک مزرعه کلزا به ترتیب ۳۵۸۰۹/۶۸ و ۱۲۸۵۴۵/۰۵ مگاژول بر هکتار است. انرژی‌های ورودی مستقیم و غیرمستقیم

به ترتیب ۶۱/۷۷ و ۳۸/۲۳ درصد از کل انرژی ورودی را به خود اختصاص دادند. متوسط راندمان مصرف انرژی مزارع کلزا در استان ۱/۳۴ و میزان بهره‌وری انرژی ۰/۰۵ کیلوگرم بر مگاژول در هکتار به دست آمد.

نتایج تجزیه و تحلیل مصرف انرژی در تولید کلزا در استان مازندران نشان داد که میزان کارایی مصرف انرژی برابر با ۳/۷۳ مگاژول بر هکتار بود و استفاده از کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن، بیشترین میزان انرژی ورودی را به خود اختصاص داد (موسوی اول و همکاران ۲۰۱۷). در تحقیقی گزارش شد که بیشترین میزان انرژی ورودی در تولید کلزا مربوط به کود نیتروژن (۴۲/۹ درصد) و سوخت (۳۹/۸ درصد) بود. علاوه بر این، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر به ترتیب ۲/۰۲ و ۹۷/۹۸ درصد بود (کاظمی و همکاران ۲۰۱۶). در پژوهشی دیگر کارایی مصرف انرژی کشت کلزا در استان مازندران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کل انرژی ورودی و خروجی به ترتیب برابر با ۲۸۷۰۵/۳ و ۴۱۲۳۰ مگاژول در هکتار بود. کود نیتروژن بیشترین میزان انرژی ورودی را با میانگین ۱۸۸۰۹/۸ مگاژول در هکتار (۶۵/۵ درصد)، به خود اختصاص داد. همچنین، سوخت دیزل با سهم ۳۰ درصد (۸۶۰۴/۲ مگاژول در هکتار) پس از کود شیمیایی قرار گرفت (طاهری گراوند و همکاران ۲۰۱۰).

تحلیل کارایی مصرف انرژی در تولید کلزا در ترکیه نشان داد که مقدار انرژی مستقیم و غیرمستقیم از کل انرژی ورودی به ترتیب ۲۴/۶۹ و ۷۵/۳۱ درصد بود. بیشترین انرژی مصرفی در تولید کلزا نیز به ترتیب مربوط به کود شیمیایی (۶۴/۶۶ درصد)، سوخت دیزل (۲۴/۴۵) و سموم شیمیایی (۴/۱۴ درصد) بود. مطابق نتایج این تحقیق، متوسط کارایی مصرف انرژی معادل ۴/۸ به دست آمد که این میزان با افزایش اندازه مزرعه، افزایش یافت (اوناکیتان و همکاران ۲۰۱۰). در تحقیقی اثر روش‌های خاک‌ورزی متداول، کم خاک‌ورزی و کشت مستقیم بر کارایی مصرف انرژی در تولید کلزا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کود شیمیایی و سوخت بیشترین میزان انرژی ورودی را به خود اختصاص دادند. تیمار کم خاک‌ورزی به دلیل بازده

انرژی بیشتر، به عنوان بهترین روش کشت پیشنهاد شد (کوسک و همکاران ۲۰۱۶). مقایسه کشت کلزای زمستانه و بهار در اروپای شمالی نشان داد که کاشت کلزا در بهار به دلیل مصرف بیشتر نهاده‌ها و عملکرد کمتر، به ۳۶ درصد انرژی بیشتری نسبت به کلزای زمستانه نیاز دارد. بر اساس نتایج، کودهای معدنی و ماشین‌آلات بیشترین سهم را در اثرات زیست‌محیطی داشتند (فریدریهسون و همکاران ۲۰۲۰). بهینه‌سازی مصرف انرژی در فعالیت‌های کشاورزی از نظر ملاحظات زیست‌محیطی یک موضوع حیاتی است. دستیابی به تولید پایدار کلزا مستلزم تجزیه و تحلیل شاخص‌های مختلف انرژی می‌باشد. بنابراین، این تحقیق با هدف بررسی اثر سیستم‌های خاک‌ورزی، روش کاشت و سطوح کود نیتروژن بر شاخص‌های انرژی در تولید کلزا به عنوان کشت دوم در اراضی شالیزاری استان گیلان انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در شهرستان رشت با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳ دقیقه شرقی با ارتفاع ۷ متر از سطح دریا طی دو سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل سه روش خاک‌ورزی ۱- خاک‌ورزی متداول (شخم برگردان در عمق ۳۰-۲۵ سانتی‌متر + دوبار دیسک)، ۲- کم خاک‌ورزی (یک بار استفاده از روتیواتور تراکتوری در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر) و ۳- بدون خاک‌ورزی (کاشت در شیارهای ایجاد شده با شیاربازکن تیغه‌ای)، به عنوان فاکتور اصلی و دو روش کشت ۱- کشت مستقیم (کشت بذر در عمق ۲-۱ سانتی‌متری خاک)، ۲- کشت نشایی (نشای کلزا در زمان چهار برگگی) و چهار سطح کود نیتروژن خالص (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار، از منبع اوره) به عنوان فاکتور فرعی بودند. رقم مورد کشت کلزا، رقم زودرس جدید دلگان با پتانسیل عملکرد بالا بود. بر اساس آمار هواشناسی میزان بارندگی در سال زراعی اول (۹۶-۱۳۹۵) و سال زراعی

خالص به مقدار ۷۸ کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم در زمان کاشت به مزرعه اضافه شد. احداث خزانه برای کشت نشایی در شرایط هوای آزاد و بدون هیچ‌گونه پوشش پلاستیک در مهر ماه صورت گرفت. مقدار بذر برای کشت نشایی بر مبنای ۱/۸ کیلوگرم در هکتار محاسبه شد و کشت نشایی کلزا به صورت دستی و به روش ریشه لخت در مرحله چهار برگی انجام گرفت (حسین‌زاده و همکاران ۲۰۰۸). مقدار بذر مصرفی در کاشت مستقیم شش کیلوگرم در هکتار بود. کاشت بذر در اوایل آبان و هم‌زمان با کشت نشایی به صورت دستی با تراکم ۶۰ بوته در متر مربع انجام شد. محاسبه عملکرد دانه در مرحله رسیدگی و پس از حذف اثرات حاشیه‌ای (دو ردیف کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر کرت) بر اساس رطوبت دوازده درصد انجام گرفت.

دوم (۹۷-۱۳۹۶) به ترتیب ۱۰۷۳/۱ و ۷۳۲ میلی‌متر بود. همچنین، حداقل و حداکثر میانگین دما در سال اول به ترتیب ۷/۲ و ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد و در سال دوم به ترتیب ۸/۹ و ۱۷/۶ درجه سانتی‌گراد بود. پس از برداشت برنج عملیات آماده‌سازی زمین برای کشت کلزا صورت گرفت. برای جلوگیری از آب‌گرفتگی مزرعه به دلیل بارندگی‌های سنگین احتمالی، زهکش‌هایی به عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر و به عرض ۲۵-۳۰ سانتی‌متر دورتادور زمین احداث شد. هر کرت آزمایشی شامل شش خط کشت به فواصل ۲۵ سانتی‌متر و به طول ۱۰ متر بود. فواصل بین کرت‌ها و تکرارها به ترتیب یک و سه متر در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱)، یک سوم مقدار کود نیتروژن تخصیص یافته برای هر تیمار و تمام کود فسفر خالص به مقدار ۶۹ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل و پتاسیم

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)	پتاسیم قابل استفاده (mg.kg ⁻¹)	فسفر قابل استفاده (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن کل (%)	کربن آلی (%)	اسیدیته	بافت
۰/۹۷	۱۵۵	۱۹/۶	۰/۱۴۶	۱/۳۶	۷/۴۱	رسی-سیلتی

قاسمی کردخیلی و همکاران ۲۰۱۳). انرژی مستقیم شامل نیروی انسانی، سوخت و الکتریسیته و انرژی غیرمستقیم شامل بذر، سموم شیمیایی، کودهای شیمیایی و انرژی ماشین‌آلات بود که در تولید کلزا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، انرژی تجدیدپذیر شامل نیروی انسانی، بذر و کودهای دامی و انرژی تجدیدناپذیر شامل سموم و کودهای شیمیایی، انرژی ماشین‌آلات، الکتریسیته و حمل و نقل بود. محاسبه شاخص‌های انرژی با استفاده از معادلات ۱ تا ۴ صورت گرفت (موسوی اول و همکاران ۲۰۱۱).

معادل‌های انرژی برای ورودی‌ها و خروجی‌های مورد استفاده در تولید کلزا در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین جدول ۳، میزان نهاده‌های ورودی و انرژی مصرفی برای تولید نشاء کلزا در خزانه را نشان می‌دهد. انرژی ورودی شامل نیروی کار، ماشین‌آلات، سوخت، سموم شیمیایی، کودهای شیمیایی، بذر و الکتریسیته و انرژی خروجی شامل عملکرد دانه بود. برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر انرژی‌های مصرفی به کار رفته و تعیین سهم هر کدام از انرژی‌های فوق در کل انرژی مصرفی، انرژی ورودی به انرژی مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم شد (کریمی و همکاران ۲۰۰۸ و معادله (۱): کارایی مصرف انرژی

$$EUE = EOU/EIN$$

$$EP = Y/EIN$$

$$SE = EIN/Y$$

$$NEG = EOU - EIN$$

معادله (۲): بهره‌وری انرژی

معادله (۳): انرژی ویژه

معادله (۴): انرژی خالص

در این معادلات، EUE^۱: کارایی مصرف انرژی، EOU: انرژی خروجی (مگاژول در هکتار)، EIN: انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)، EP^۲: بهره‌وری انرژی، Y: عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)، SE^۳: انرژی ویژه و NEG^۴: انرژی خالص است. کارایی مصرف انرژی از نسبت انرژی خروجی به ورودی به دست می‌آید. این شاخص بدون واحد بوده و مقدار انرژی به دست آمده به ازای هر واحد مصرف انرژی برای تولید را نشان می‌دهد.

بهره‌وری انرژی از حاصل کسر عملکرد دانه به انرژی ورودی به دست می‌آید. به عبارت دیگر، مقدار تولید محصول به ازای هر واحد انرژی مصرف شده را نشان می‌دهد. انرژی ویژه عکس بهره‌وری انرژی می‌باشد و نشان‌دهنده مصرف انرژی برای تولید یک واحد از محصول است. این شاخص بسته به نوع محصول، موقعیت و زمان متفاوت است (الماسی، ۲۰۱۲).

جدول ۲- ضرایب معادل انرژی برای ورودی‌ها و خروجی مورد استفاده در تولید کلزا

عنوان	واحد	انرژی معادل (MJ.unit ⁻¹)	منبع
الف) ورودی‌ها			
بذر کلزا	کیلوگرم	۲۵	(ونتوری و ونتوری ۲۰۰۳)
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹۶	(آککائوز و همکاران ۲۰۰۹)
ماشین‌آلات	ساعت در هکتار	۶۲/۷	(کاناکچی و همکاران ۲۰۰۵)
نیتروژن	کیلوگرم	۸۷/۱	(کیتانی ۱۹۹۹)
فسفر	کیلوگرم	۱۷/۴	(کیتانی ۱۹۹۹)
پتاسیم	کیلوگرم	۱۳/۷۴	(کیتانی ۱۹۹۹)
سوخت گازوئیل	لیتر	۴۷/۸	(کیتانی ۱۹۹۹)
سوخت بنزین	لیتر	۴۶/۳	(کیتانی ۱۹۹۹)
علف‌کشی	کیلوگرم	۸۵	(کیتانی ۱۹۹۹)
حشره‌کشی	کیلوگرم	۲۲۹	(کیتانی ۱۹۹۹)
الکتریسیته	کیلو وات بر ساعت	۱۲	(کیتانی ۱۹۹۹)
ب) خروجی			
دانه کلزا	کیلوگرم	۲۵	(ونتوری و ونتوری ۲۰۰۳)

جدول ۳- میزان نهاده‌های ورودی و انرژی مصرفی برای تولید نشاء کلزا

ورودی‌ها	مقدار	انرژی مصرفی (MJ.unit ⁻¹)
۱. بذر کلزا	۱/۸ کیلوگرم	۴۵
۲. نیروی انسانی	۴ ساعت	۷/۸۴
۳. ماشین‌آلات	۰/۵ ساعت در هکتار	۳۱/۳۵
۴. کودهای شیمیایی		
۱.۴. نیتروژن	۰/۲ کیلوگرم	۱۵/۶۲
۲.۴. فسفر	۰/۱۵ کیلوگرم	۲/۶۱
۳.۴. پتاسیم	۰/۱ کیلوگرم	۱/۳۷
۵. سوخت (گازوئیل)	۲ لیتر	۹۵/۶
۶. حشره‌کشی	۰/۰۶ کیلوگرم ماده مؤثره	۱۳/۷۴

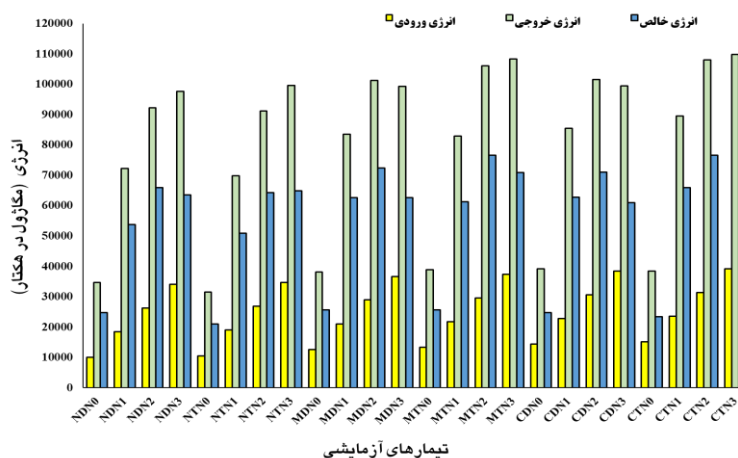
متداول در کشت مستقیم با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌ترتیب با میانگین ۳۹۱۷۴/۸ و ۳۸۳۸۶/۰ مگاژول در هکتار، مربوط بود (شکل ۱). مطابق با یافته‌های محققان (کوسک و همکاران ۲۰۱۶ و همکاران ۲۰۱۶) این نتیجه نشان می‌دهد که علاوه بر روش خاک‌ورزی، کود نیتروژن نیز سهم بالایی در مصرف کل انرژی داشته است. انرژی ورودی برابر با ۱۵۲۰۸/۷ مگاژول در هکتار (موسوی اول و همکاران ۲۰۱۷) و ۱۴۵۲۳/۲ مگاژول در هکتار (کاظمی و همکاران ۲۰۱۶) توسط سایر محققان برای تولید کلزا گزارش شده است. بیشترین انرژی خروجی در تیمارهای آزمایشی، از سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آمد. میزان انرژی خروجی از ۳۱۵۰۰/۰ مگاژول در هکتار مربوط به تیمار بدون خاک‌ورزی در کشت نشایی و عدم مصرف کود نیتروژن تا ۱۰۹۸۶۷/۵ مگاژول در هکتار مربوط به تیمار خاک‌ورزی متداول در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار متغیر بود (شکل ۱). این موضوع نشان‌دهنده اهمیت به‌کارگیری کود نیتروژن در افزایش عملکرد کلزا و در نتیجه افزایش انرژی خروجی می‌باشد. تیمار کم خاک‌ورزی در کشت نشایی با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار علی‌رغم ورودی کمتر انرژی، با خروجی ۱۰۶۰۴۲/۵ مگاژول در هکتار قابل رقابت با تیمار خاک‌ورزی متداول در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود. مقادیر انرژی خروجی برابر با ۵۶۶۹۶ مگاژول در هکتار (موسوی اول و همکاران ۲۰۱۷)، ۵۰۰۹۱ مگاژول در هکتار (کاظمی و همکاران ۲۰۱۶) و ۳۹۰۶۰ مگاژول در هکتار (جعفری و همکاران ۲۰۱۵) توسط سایر محققان برای تولید کلزا گزارش شده است.

با توجه به یکنواختی واریانس خطای آزمایشی برای تمامی صفات تجزیه مرکب به‌عمل آمد. تجزیه مرکب با فرض تصادفی‌بودن سال و ثابت‌بودن تیمارهای آزمایشی برای صفات مورد نظر صورت گرفت. تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

انرژی ورودی و خروجی

نتایج نشان داد که در بین روش‌های خاک‌ورزی، خاک‌ورزی متداول بیشترین انرژی مصرفی سوخت و ماشین‌آلات را به خود اختصاص داد که علت آن را می‌توان به افزایش ساعات کارکرد تراکتور در این روش نسبت داد. نتایج این آزمایش با گزارش کوسک و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. مصرف انرژی نیروی کار در روش کشت نشایی با میانگین ۱۴۸۳/۰۷ مگاژول در هکتار بیشتر از روش کشت مستقیم با میانگین ۲۹۱/۲۲ مگاژول در هکتار بود. دلیل این موضوع را می‌توان به نبود ماشین‌آلات مکانیزه و در نتیجه نیاز به تعداد کارگر بیشتر جهت انجام عملیات نشاکاری به‌صورت دستی نسبت داد. در مقابل، مصرف آفت‌کش‌ها در کشت نشایی نسبت به کشت مستقیم کمتر بود که علت آن را می‌توان به مساحت کمتر خزانه در این روش نسبت داد. در کشت نشایی، از بذر کمتری (۱/۸ کیلوگرم در هکتار، معادل انرژی ۴۵ مگاژول در هکتار) در مقایسه با کشت مستقیم بذر (۶ کیلوگرم در هکتار، معادل ۱۵۰ مگاژول در هکتار) استفاده شد. در مجموع، بیشترین انرژی ورودی در تولید کلزا به تیمارهای خاک‌ورزی متداول در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و خاک‌ورزی



شکل ۱- مجموع انرژی‌های ورودی، خروجی و انرژی خالص در تیمارهای آزمایشی

N0= 0, N1= 100, N2= 200, N3= 300 Kg/ha
 N= بدون خاکورزی، M= کم خاکورزی، C= خاکورزی متداول، D= کشت مستقیم بذر، T= کشت نشایی، N0-N3= سطوح کود نیتروژن (N0= 0, N1= 100, N2= 200, N3= 300 Kg/ha)

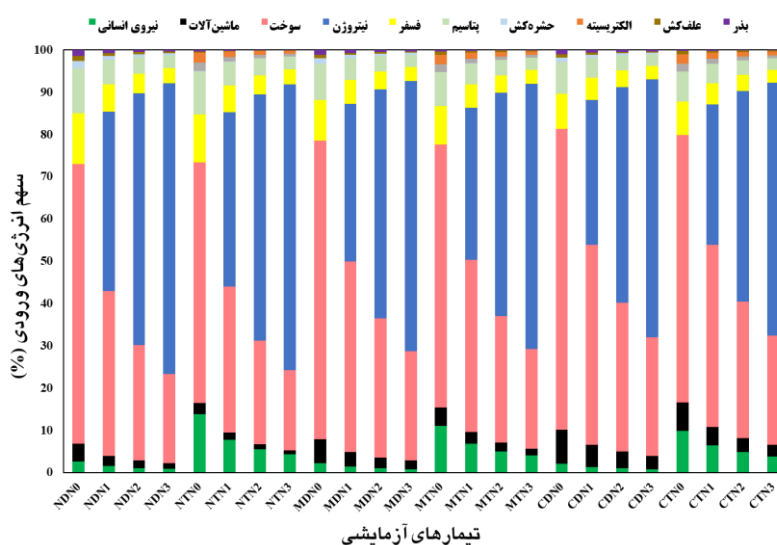
اختصاص داد (جعفری و همکاران ۲۰۱۵). نتایج نشان داد که سهم انرژی حاصل از ماشین‌آلات از ۰/۹۱ درصد در تیمار بدون خاکورزی در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تا ۸/۱ درصد در تیمار خاکورزی متداول در کشت مستقیم و بدون مصرف نیتروژن متغیر بود (شکل ۲). جعفری و همکاران (۲۰۱۵) سهم انرژی ماشین‌آلات را ۳/۱۳ درصد از کل انرژی ورودی گزارش کردند.

سهم انرژی‌های مستقیم و غیرمستقیم در تولید کلزا در شکل ۳ نشان داده شده است. انرژی مستقیم در روش خاکورزی متداول بیشتر از سایر روش‌های خاکورزی بود. انتخاب ماشین‌آلات و شیوه خاکورزی، تأثیر به‌سزایی در مصرف سوخت دیزل و در نهایت انرژی مستقیم در تولید کلزا دارد. در کل، سهم انرژی مستقیم از ۲۱/۹۶ درصد تا ۷۷/۳۹ درصد متغیر بود. بیشترین درصد سهم انرژی مستقیم به‌ترتیب در تیمارهای کم خاکورزی در کشت نشایی و عدم مصرف کود نیتروژن (۷۷/۳۹ درصد) و خاکورزی متداول در کشت نشایی و عدم مصرف کود نیتروژن (۷۷/۱۵ درصد) به‌دست آمد. در بین انرژی‌های غیرمستقیم، کود نیتروژن نسبت به سایر کودهای شیمیایی، انرژی مصرفی بیشتری را در اکثر تیمارهای آزمایشی (به استثنای تیمارهای عدم مصرف نیتروژن) دارا بود. این مسئله نشان می‌دهد که

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سهم کود نیتروژن و سوخت دیزل در اکثر تیمارهای آزمایشی نسبت به سایر ورودی‌های انرژی بیشتر بود. بیشترین سهم مصرف سوخت به تیمارهای خاکورزی متداول در کشت مستقیم و بدون مصرف نیتروژن (۷۱/۱۱ درصد) و کم خاکورزی در کشت مستقیم و بدون مصرف نیتروژن (۷۰/۷۷ درصد) مربوط بود. از سوی دیگر، تیمار بدون خاکورزی در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار کمترین سهم مصرف سوخت (۱۸/۹۸ درصد) را به خود اختصاص داد. همچنین، بیشترین سهم مصرف نیتروژن به ترکیبات تیماری خاکورزی متداول در کشت مستقیم با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (۶۸/۷۸ درصد) و خاکورزی متداول در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (۶۷/۷۲ درصد) مربوط بود. مصرف کود فسفر و پتاسیم نیز در تمام تیمارها یکسان و به‌ترتیب برابر با ۶۹ و ۷۸ کیلوگرم در هکتار بود که معادل ۱۲۰۰/۶ و ۱۰۶۸/۶ مگاژول در هکتار است. در مطالعه‌ای کل انرژی ورودی در تولید کلزا برابر با ۲۹۳۳۲/۴ مگاژول در هکتار گزارش شد. از کل انرژی ورودی، کودهای شیمیایی بیشترین سهم (۶۵/۱۱ درصد) را داشتند و در بین کودهای شیمیایی، کود نیتروژن با ۶۰/۷۱ درصد و انرژی ۱۷۸۰۸ مگاژول در هکتار بیشترین سهم را به خود

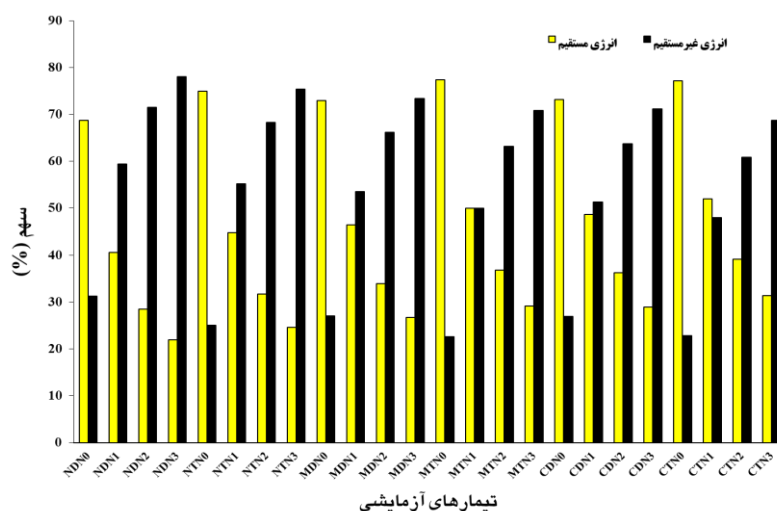
اختصاص داشت. محققان دیگر نیز سهم‌های ۴۷/۰۱ درصد و ۵۲/۹۹ (آذرپور ۲۰۱۲) و ۳۱/۲۳ درصد و ۶۸/۷۷ درصد (جعفری و همکاران ۲۰۱۵) را به ترتیب برای انرژی‌های مستقیم و غیرمستقیم در مزارع کلزا گزارش کردند.

استفاده از سطوح بالای کود نیتروژن باعث افزایش مصرف انرژی غیرمستقیم می‌شود. بیشترین درصد سهم انرژی غیرمستقیم به ترتیب به تیمارهای بدون خاک‌ورزی در کشت مستقیم با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (۷۸/۰۴ درصد) و بدون خاک‌ورزی در کشت نشایی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (۷۵/۴۵ درصد)



شکل ۲- درصد سهم انرژی‌های ورودی در تیمارهای آزمایشی

N= بدون خاک‌ورزی، M= کم خاک‌ورزی، C= خاک‌ورزی متداول، D= کشت مستقیم بذر، T= کشت نشایی، N0-N3= سطوح کود نیتروژن (N0= 0, N1= 100, N2= 200, N3= 300 Kg/ha)

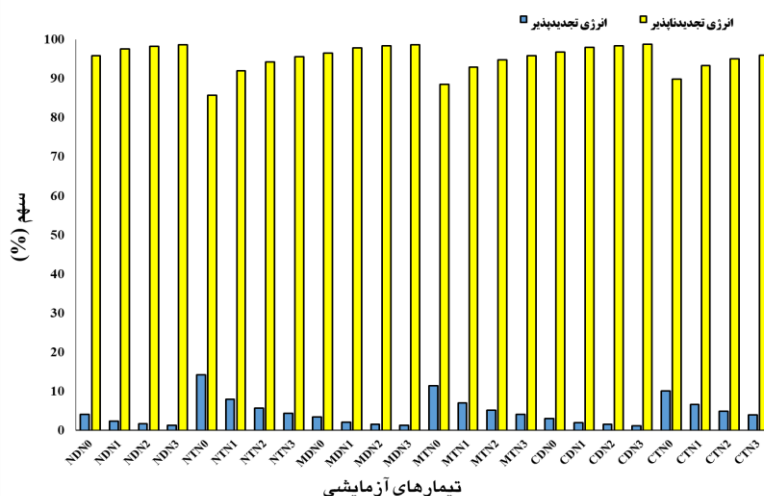


شکل ۳- درصد سهم انرژی‌های مستقیم و غیرمستقیم در تیمارهای آزمایشی

N= بدون خاک‌ورزی، M= کم خاک‌ورزی، C= خاک‌ورزی متداول، D= کشت مستقیم بذر، T= کشت نشایی، N0-N3= سطوح کود نیتروژن (N0= 0, N1= 100, N2= 200, N3= 300 Kg/ha)

هکتار، بیشترین نقش را در افزایش سهم انرژی تجدیدناپذیر در این آزمایش برعهده داشت. از نتایج می‌توان دریافت که تولید کلزا به دلیل استفاده از مقادیر زیاد کودهای شیمیایی و سوخت دیزل، به شدت به مصرف انرژی تجدیدناپذیر وابسته است. آذرپور (۲۰۱۲) سهم انرژی تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر در تولید کلزا به روش دیم در استان گیلان را به ترتیب ۹۴/۴۸ درصد و ۵/۳۳ درصد از کل انرژی ورودی محاسبه نمود و پیشنهاد کرد برای تولید کلزا نیاز به بهبود بهره‌وری مصرف انرژی و به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر است. جعفری و همکاران (۲۰۱۵) کارایی انرژی در تولید کلزا در استان مازندران را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که سهم انرژی تجدیدناپذیر ۹۹/۲۲ درصد و سهم انرژی تجدیدپذیر ۰/۷۸ درصد می‌باشد.

بر اساس نتایج شکل ۴، سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر بود. بیشترین درصد سهم انرژی تجدیدپذیر، به ترتیب به تیمارهای بدون خاک‌ورزی در کشت نشایی و عدم مصرف کود نیتروژن با میانگین ۱۴/۲۳ درصد و کم خاک‌ورزی در کشت نشایی و عدم مصرف کود نیتروژن با میانگین ۱۱/۴ درصد اختصاص داشت. بیشترین سهم انرژی تجدیدناپذیر نیز به تیمار خاک‌ورزی متداول در کشت مستقیم با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، تیمار کم خاک‌ورزی در کشت مستقیم با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و تیمار بدون خاک‌ورزی در کشت مستقیم با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به ترتیب با میانگین‌های ۹۸/۷۷، ۹۸/۷۹ و ۹۸/۷۲ درصد مربوط بود. تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در



شکل ۴- درصد سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تیمارهای آزمایشی

N= بدون خاک‌ورزی، M= کم خاک‌ورزی، C= خاک‌ورزی متداول، D= کشت مستقیم بذر، T= کشت نشایی، N0-N3= سطوح کود نیتروژن (N0= 0, N1= 100, N2= 200, N3= 300 Kg/ha)

عملکرد دانه

رشد نسبت داد. مقایسه میانگین اثرات متقابل خاک‌ورزی در روش کشت نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در ترکیب تیماری خاک‌ورزی متداول در کشت نشایی با میانگین ۳۴۵۸ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. عملیات خاک‌ورزی با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، شکستن لایه‌های خاک و سست نمودن آن باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود و در نتیجه گیاهچه‌های کلزا در روش کشت

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که سال دوم آزمایش (۳۳۴۸/۶ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با سال اول (۳۰۵۷/۳ کیلوگرم در هکتار) از عملکرد دانه بیشتری برخوردار بود (جدول ۴)، که علت این امر را می‌توان به شرایط مساعد آب و هوایی در سال دوم به سبب دمای بالاتر و بارندگی کمتر به ویژه در ماه‌های ابتدایی دوره

کاشت در مقدار نیتروژن نشان داد که در کشت نشایی با افزایش سطوح نیتروژن، عملکرد کلزا افزایش یافت، به‌گونه‌ای که مقدار ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار با میانگین ۴۲۳۵ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد (جدول ۵). نتایج مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی اثر مقادیر نیتروژن بر عملکرد کلزا در دو روش کشت نشایی و مستقیم در چین نشان داد که عملکرد دانه در کشت نشایی، با افزایش مقدار نیتروژن تا ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار و در کشت مستقیم، تا ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت.

نشایی به دلیل بهبود شرایط فیزیکی خاک، استقرار و توسعه بهتر ریشه و در نتیجه جذب بیشتر عناصر غذایی، از عملکرد مناسب‌تری برخوردار بودند. نتایج نشان داد که در روش کشت نشایی برای دستیابی به پتانسیل عملکرد کلزا، باید از تیمارهای خاک‌ورزی استفاده کرد. نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی در نیتروژن نشان داد که در تیمارهای خاک‌ورزی متداول و کم خاک‌ورزی بین سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در حالی‌که عملکرد دانه کلزا در سیستم بدون خاک‌ورزی با افزایش سطوح نیتروژن، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. اثرات متقابل روش

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سال بر عملکرد دانه و شاخص‌های انرژی در تولید کلزا

سال	عملکرد دانه (kg.ha ⁻¹)	کارایی مصرف انرژی	بهره‌وری انرژی (kg.MJ ⁻¹)	انرژی ویژه (MJ.kg ⁻¹)	انرژی خالص (MJ.ha ⁻¹)
۱۳۹۵-۹۶	۳۰۵۳/۷b	۳/۱۰b	۰/۱۲۴b	۸/۲۵a	۵۱۵۴۱/۴b
۱۳۹۶-۹۷	۳۳۴۸/۶a	۳/۴۱a	۰/۱۳۶a	۷/۵۴b	۵۸۷۶۶/۳a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

۲/۸۰ کم‌ترین کارایی انرژی را به خود اختصاص دادند. کم‌بودن مقدار کارایی مصرف انرژی در تیمارهای خاک‌ورزی متداول و کم خاک‌ورزی در تیمار ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، نشان داد که مقادیر بالای کود نیتروژن سبب کاهش کارایی استفاده از انرژی در تولید کلزا می‌شود. محققان دیگر نیز کارایی مصرف انرژی برابر با ۲/۶۵ (رمدانی و همکاران ۲۰۱۲) و ۳/۴۴ (کاظمی و همکاران ۲۰۱۶) را برای کلزا گزارش کردند. مقایسه میانگین اثرات متقابل روش کاشت در نیتروژن نشان داد که بیشترین کارایی مصرف انرژی در تیمارهای کشت مستقیم و کشت نشایی در ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن به‌ترتیب با میانگین‌های ۳/۹۱ و ۳/۷۶، به‌دست آمد (جدول ۵). این نتایج نشان داد که از نظر کارایی مصرف انرژی، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مصرف بهینه نیتروژن برای تولید کلزا در اراضی شالیزاری استان گیلان محسوب می‌شود.

کارایی مصرف انرژی

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که سال دوم با میانگین ۳/۴۱ از کارایی مصرف انرژی بیشتری نسبت به سال اول با میانگین ۳/۱۰ برخوردار بود (جدول ۴). با توجه به این‌که به دلیل شرایط مساعد آب و هوایی در سال دوم آزمایش، انرژی خروجی (عملکرد کلزا) نسبت به سال اول افزایش داشت، اما انرژی ورودی در دو سال آزمایش تفاوت چندانی نداشت، بنابراین بیشتر بودن کارایی مصرف انرژی در سال دوم آزمایش طبیعی به‌نظر می‌رسید. مقایسه میانگین اثرات متقابل خاک‌ورزی در نیتروژن نشان داد که هر سه تیمار خاک‌ورزی، با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بیشترین کارایی مصرف انرژی را داشتند و به‌طور مشترک در یک گروه آماری قرار گرفتند. از سوی دیگر، ترکیبات تیماری خاک‌ورزی متداول در تیمار شاهد، خاک‌ورزی متداول در ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن و کم‌خاک‌ورزی در ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن، به‌ترتیب با میانگین‌های ۲/۶۳، ۲/۶۹ و

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل دو عاملی بر عملکرد دانه و شاخص‌های انرژی در تولید کلزا

برهمکنش	عملکرد دانه (kg.ha ⁻¹)	کارایی مصرف انرژی	بهره‌وری انرژی (kg.MJ ⁻¹)	انرژی ویژه (MJ.kg ⁻¹)	انرژی خالص (MJ.ha ⁻¹)
خاک‌ورزی × میزان نیتروژن (kg.ha ⁻¹)					
بدون خاک‌ورزی × ۰	۱۳۲۴/۷g	۳/۲۱c	۰/۱۲۹c	۷/۸۹d	۲۲۷۹۴/۴d
بدون خاک‌ورزی × ۱۰۰	۲۸۴۰/۳e	۳/۷۸a	۰/۱۵۲a	۶/۷۲fg	۵۲۲۵۴/۵c
بدون خاک‌ورزی × ۲۰۰	۳۶۶۶/۷c	۳/۴۵b	۰/۱۳۸bc	۷/۲۹e	۶۵۰۹۸/۹b
بدون خاک‌ورزی × ۳۰۰	۳۹۴۲/۲b	۲/۸۷de	۰/۱۱۴de	۸/۷۵c	۶۴۱۷۲/۵b
کم خاک‌ورزی × ۰	۱۵۴۰/۰f	۲/۹۷d	۰/۱۱۹d	۸/۵۰c	۲۵۵۳۱/۹d
کم خاک‌ورزی × ۱۰۰	۳۳۷۸/۷d	۳/۹۵a	۰/۱۵۷a	۶/۴۴g	۶۳۰۶۶/۹b
کم خاک‌ورزی × ۲۰۰	۴۱۴۴/۳a	۳/۵۵b	۰/۱۴۱b	۷/۰۸ef	۷۴۳۹۴/۷a
کم خاک‌ورزی × ۳۰۰	۴۱۴۹/۲a	۲/۸۰def	۰/۱۱۲def	۸/۹۷bc	۶۶۷۰۱/۶b
خاک‌ورزی متداول × ۰	۱۵۵۱/۳f	۲/۶۳f	۰/۱۰۵f	۹/۶۷a	۲۳۹۹۹/۳d
خاک‌ورزی متداول × ۱۰۰	۳۵۰۰/۵cd	۳/۷۷a	۰/۱۵۲a	۶/۶۸fg	۶۴۲۹۹/۴b
خاک‌ورزی متداول × ۲۰۰	۴۱۹۰/۸a	۳/۳۸bc	۰/۱۳۵bc	۷/۴۴de	۷۳۷۴۳/۸a
خاک‌ورزی متداول × ۳۰۰	۴۱۸۵/۲a	۲/۶۹ef	۰/۱۰۸ef	۹/۳۲ab	۶۵۷۸۸/۲b
روش کشت × میزان نیتروژن (kg.ha ⁻¹)					
کشت مستقیم × ۰	۱۴۹۳/۲d	۳/۰۷c	۰/۱۲۳c	۸/۳۳b	۲۴۹۷۷/۲c
کشت مستقیم × ۱۰۰	۳۲۴۹/۳c	۳/۹۱a	۰/۱۵۶a	۶/۴۶d	۶۰۴۵۰/۱b
کشت مستقیم × ۲۰۰	۳۹۳۲/۸b	۳/۴۴b	۰/۱۳۷b	۷/۳۱c	۶۹۷۲۲/۳a
کشت مستقیم × ۳۰۰	۳۹۴۹/۶b	۲/۷۲d	۰/۱۰۸d	۹/۲۵a	۶۲۳۲۷/۸b
کشت نشایی × ۰	۱۴۵۰/۸d	۲/۸۱d	۰/۱۱۳d	۹/۰۵ab	۲۳۲۳۹/۸c
کشت نشایی × ۱۰۰	۳۲۳۰/۳c	۳/۷۶a	۰/۱۵۱a	۶/۷۶d	۵۹۲۹۷/۱b
کشت نشایی × ۲۰۰	۴۰۶۸/۴b	۳/۴۷b	۰/۱۳۹b	۷/۲۲c	۷۲۴۳۳/۰a
کشت نشایی × ۳۰۰	۴۲۳۸/۴a	۲/۸۶d	۰/۱۱۴d	۸/۷۷b	۶۸۷۸۰/۴a
خاک‌ورزی × روش کشت					
کشت مستقیم × بدون خاک‌ورزی	۲۹۶۷/۱d	۳/۴۳a	۰/۱۳۷a	۷/۴۳a	۵۱۹۳۷/۱bc
کشت نشایی × بدون خاک‌ورزی	۲۹۱۹/۸d	۳/۲۳a	۰/۱۳۰a	۷/۸۹a	۵۰۲۲۳/۱cd
کشت مستقیم × کم خاک‌ورزی	۳۲۴۵/۸bc	۳/۳۳a	۰/۱۳۳a	۷/۷۵a	۵۶۳۴۷/۶ab
کشت نشایی × کم خاک‌ورزی	۳۳۶۰/۳ab	۳/۳۰a	۰/۱۳۲a	۷/۷۴a	۵۸۴۹۹/۹a
کشت مستقیم × خاک‌ورزی متداول	۳۲۵۵/۸bc	۳/۰۹a	۰/۱۲۳a	۸/۳۳a	۵۴۸۳۳/۴b
کشت نشایی × خاک‌ورزی متداول	۳۴۵۸/۱a	۳/۱۴a	۰/۱۲۶a	۸/۲۲a	۵۹۰۹۲/۰a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

بهره‌وری انرژی

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که سال دوم آزمایش با میانگین ۰/۱۳۶ کیلوگرم در مگاژول نسبت به سال اول با میانگین ۰/۱۲۴ کیلوگرم در مگاژول، از بهره‌وری انرژی بیشتری برخوردار بود (جدول ۴)، که دلیل این امر را می‌توان به بیشتر بودن عملکرد دانه در

سال دوم به سبب شرایط مساعد آب و هوایی نسبت داد. نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی در نیتروژن نشان داد که هر سه ترکیب تیماری خاک‌ورزی به همراه مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، به طور مشترک بیشترین بهره‌وری انرژی را داشتند. این نتیجه به وضوح نشان می‌دهد که از نظر بهره‌وری انرژی، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم

مصرف نیتروژن، بیشترین انرژی ویژه را به خود اختصاص دادند. از طرفی، کمترین انرژی ویژه به ترکیبات تیماری کشت مستقیم و نشایی در ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مربوط بود (جدول ۵). این نتیجه بیانگر آن است که بدون در نظر گرفتن روش کشت، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن دارای کمترین انرژی ویژه می‌باشد و از این رو، به عنوان یک سطح بهینه کودی برای کشت کلزا در منطقه باید مورد توجه قرار گیرد. محققان دیگر نیز انرژی ویژه در تولید کلزا را برابر با ۸/۲۷ (موسوی اول و همکاران ۲۰۱۱) و ۲۱/۴۴ (رمدانی و همکاران ۲۰۱۲) گزارش کردند.

انرژی خالص

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که سال دوم آزمایش با میانگین ۵۸۷۶۶/۳ مگاژول بر هکتار نسبت به سال اول با میانگین ۵۱۵۴۱/۴ مگاژول در هکتار، از مقدار انرژی خالص بیشتری برخوردار بود که علت آن را می‌توان به عملکرد دانه (انرژی خروجی) بیشتر در سال دوم، نسبت داد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثرات متقابل خاکورزی در روش کاشت نشان داد که بیشترین انرژی خالص در ترکیبات تیماری کم خاکورزی و خاکورزی متداول در روش نشاکاری حاصل شد. نتایج اثرات متقابل خاکورزی در نیتروژن بیانگر آن است که ترکیبات تیماری کم خاکورزی و خاکورزی متداول در تیمار ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به ترتیب با میانگین‌های ۷۴۳۹۴/۷ و ۷۳۷۴۳/۸ مگاژول در هکتار، بیشترین انرژی خالص را به خود اختصاص دادند. از سوی دیگر، کمترین انرژی خالص به ترتیب با میانگین‌های ۲۲۷۹۴/۷، ۲۳۹۹۹/۳ و ۲۵۵۳۱/۹ مگاژول در هکتار در ترکیبات تیماری بدون خاکورزی، خاکورزی متداول و کم خاکورزی به همراه عدم مصرف نیتروژن به دست آمد. در این ترکیبات تیماری با وجود این که تیمار بدون مصرف نیتروژن کمترین مقدار انرژی ورودی را دارا بود، به علت کاهش عملکرد دانه (انرژی خروجی) در اثر عدم مصرف نیتروژن، کمترین انرژی خالص را به خود اختصاص داد. همچنین، نتایج اثرات متقابل روش کاشت در نیتروژن نشان داد که در هر دو روش کشت مستقیم

نیتروژن در هکتار، بیشترین بهره‌وری انرژی را دارا می‌باشد. از سوی دیگر، ترکیب تیماری خاکورزی متداول بدون مصرف نیتروژن با میانگین ۰/۱۰۵ کیلوگرم در مگاژول، کمترین بهره‌وری انرژی را به خود اختصاص داد. هرچند که با تیمار خاکورزی متداول به همراه مصرف ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن و کم خاکورزی به همراه ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین، نتایج اثرات متقابل روش کاشت در نیتروژن نشان داد که بیشترین بهره‌وری انرژی در ترکیبات تیماری کشت مستقیم و کشت نشایی در ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، به دست آمد (جدول ۵). این نتایج مشابه با نتایج کارایی مصرف انرژی حاکی از آن است که مصرف بالای نیتروژن در زراعت کلزا باعث کاهش کارایی مصرف و بهره‌وری انرژی می‌شود و برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش کارایی و بهره‌وری انرژی باید از تیمارهایی با مقادیر کمتر نیتروژن استفاده کرد. کارایی مصرف انرژی برابر با ۲/۶۵ (رمدانی و همکاران ۲۰۱۲)، ۳/۴۴ (کاظمی و همکاران ۲۰۱۶) و ۱/۲۸ (زکیدی‌زاجی و منجری ۲۰۱۲) برای تولید کلزا توسط محققان دیگر گزارش شده است.

انرژی ویژه

مقایسه میانگین نشان داد که سال اول با میانگین ۸/۲۵ مگاژول در کیلوگرم نسبت به سال دوم با میانگین ۷/۵۴ مگاژول در کیلوگرم، از مقدار انرژی ویژه بیشتری برخوردار بود. با توجه به این که بین انرژی‌های ورودی دو سال مورد آزمایش، تفاوت چندانی وجود نداشت ولی عملکرد دانه در سال اول آزمایش کمتر از سال دوم بود، بنابراین بیشتر بودن انرژی ویژه در سال اول قابل انتظار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثرات متقابل خاکورزی در نیتروژن نشان داد که بیشترین انرژی ویژه (۹/۶۷ مگاژول در کیلوگرم) در تیمار خاکورزی متداول و عدم مصرف نیتروژن حاصل شد، هرچند که با تیمار خاکورزی متداول در ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت. نتایج اثرات متقابل روش کاشت در نیتروژن نشان داد که تیمارهای کشت مستقیم در ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و کشت نشایی با عدم

و نشایی، تیمار ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بیشترین مقدار انرژی خالص را دارا بود (جدول ۵). به طور کلی، در تمام تیمارهایی که از کود نیتروژن استفاده نشد، مقدار انرژی خالص کمتری به دست آمد که این موضوع نشان دهنده اهمیت استفاده از کود نیتروژن برای تولید موفقیت آمیز کلزا در شرایط شالیزاری می باشد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که روش های بدون خاکورزی و کم خاکورزی در مقایسه با خاکورزی متداول، از کارایی مصرف و بهره وری انرژی بالاتر برخوردار بودند، که علت اصلی این امر را می توان به مصرف سوخت کمتر در این روش ها نسبت داد. بین سطوح نیتروژن، بیشترین کارایی مصرف و بهره وری انرژی به تیمار ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تعلق داشت. ترکیبات تیماری خاکورزی متداول در کشت نشایی با ۳۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار با میانگین

۳۹۱۷۴/۸ مگاژول در هکتار و خاکورزی متداول در کشت مستقیم با ۳۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار با ۳۸۳۸۶/۰ مگاژول در هکتار بیشترین انرژی ورودی را به خود اختصاص دادند. با توجه به محدودیت منابع انرژی و لزوم حفظ این ذخایر ارزشمند برای نسل های آینده، استفاده صحیح و با کارایی بالا از این منابع ضروری است. از این رو، جهت افزایش کارایی مصرف انرژی، ترکیبات تیماری بدون خاکورزی و کم خاکورزی در ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در هر دو روش کشت به عنوان گزینه های کشاورزی پایدار برای کشت کلزا در اراضی شالیزاری قابل توصیه هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و موسسه تحقیقات برنج کشور بابت حمایت های مالی از این تحقیق تشکر و قدردانی می کنند.

منابع مورد استفاده

- Alluvione F, Moretti B, Sacco D and Grignani C. 2011. EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. *Energy*, 36(7): 4468e81. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.075>
- Almasi M. 2012. Energy efficiency management textbook. Science and Research Unit of Tehran. (In Persian with English Abstract).
- Akcaoz H, Ozcatalbas O and Kizilay H. 2009. Analysis of energy use for pomegranate production in Turkey. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(2): 475-480.
- Amiri Z, Asgharipour MR, Campbell DE and Armin M. 2019. A sustainability analysis of two rapeseed farming ecosystems in Khorramabad, Iran, based on energy and economic analyses. *Journal of Cleaner Production*, 266: 1051-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.091>
- Azarpour E. 2012. Evaluation energy balance of canola production under rain fed farming in north of Iran. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, 7(4): 285-288.
- Canakci M, Topakci M, Akinci I and Ozmerzi A. 2005. Energy use pattern of some field crops and vegetable production: case study for Antalya region, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 46(4): 655-666. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.008>
- Elsoragaby S, Yahya A, Mahadi MR, Nawi NM and Mairghany M. 2019. Energy utilization in major crop cultivation. *Energy*, 173: 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.142>
- Fridrihsone A, Romagnoli F and Cabulis U. 2020. Environmental life cycle assessment of rapeseed and rapeseed oil produced in Northern Europe: A Latvian case study. *Sustainability*, 12(14): 1-21. <https://doi.org/10.3390/su12145699>
- Ghorbanzadeh M, Babaeian M, Kheirkhah M, Ghorbanzadeh M and jafarian M. 2021. Environmental hazards and energy flow in rapeseed agroecosystem Case study: North Khorasan. *Journal of Agricultural Science*

- and Sustainable Production, 31(4): 325-339. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44566.2637>
- Hosseinzadeh MH, Esfahani M, Rabiee M and Rabiei B. 2008. Effect of row spacing on light interception, grain yield and growth indices of rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars as second crop following rice. Iranian Journal of Crop Sciences, 10(3): 281-302. (In Persian with English Abstract).
- Jafari R, Niknejad Y and Fallah H. 2015. Assess the energy efficiency of rapeseed (*Brassica napus* L.) production in the Mazandaran province: A case study of Amol city. Biological Forum – An International Journal, 7(1): 1131-1136.
- Karimi M, Rajabi Pour A, Tabatabaeefar A and Borghei A. 2008. Energy analysis of sugarcane production in plant farms a case study in Debel Khazai Agro-industry in Iran. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science, 4(2): 165-171.
- Kazemi H, Hassanpour Bourkheili S, Kamkar B, Soltani A, Gharanjic K and Nazari NM. 2016. Estimation of greenhouse gas (GHG) emission and energy use efficiency (EUE) analysis in rainfed canola production (case study: Golestan province, Iran). Energy, 116(1): 694-700. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.010>
- Khodaei Joghani A, Taki M and Matoorian H. 2022. Evaluating energy productivity, greenhouse gas emission, global warming potential and sustainability index of Wheat and Rapeseed agroecosystems in Khorramshahr. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 32(1): 309-324. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44507.2634>
- Kitani O. 1999. Energy and Biomass Engineering. CIGR Handbook of Agricultural Engineering. ASAE Publication, New York.
- Kizilaslan H. 2009. Input–output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. Applied Energy, 86: 1354-1358. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.009>
- Koondhar MA, Udemba EN, Cheng Y, Khan ZA, Batool M and Kong R. 2021. Asymmetric causality among carbon emission from agriculture, energy consumption, fertilizer, and cereal food production – A nonlinear analysis for Pakistan. Sustainable Energy Technol Assess, 45: 101099. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101099>
- Kusek G, Huseyin Ozturk H and Akdemir S. 2016. An assessment of energy use of different cultivation methods for sustainable rapeseed production. Journal of Cleaner Production, 112(4): 2772-2783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.015>
- Marousek J, Haskova S, Marouskova A, Myskova K, Vaníckova R, Vachal J, Vochozka M, Zeman R and Zak J. 2015. Financial and biotechnological assessment of new oil extraction technology. Energy Sources, 37(16): 1723-1728. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1048391>
- Martins F, Felgueiras C, Smitkova M and Caetano N. 2019. Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries. Energies, 12(6): 964. <https://doi.org/10.3390/en12060964>
- Mohammadzadeh A, Damghani AM, Vafabakhsh J and Deihimfard R. 2017. Assessing energy efficiencies, economy, and global warming potential (GWP) effects of major crop production systems in Iran: a case study in East Azerbaijan province. Environmental Science and Pollution Research, 24: 16971-16984. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9253-5>
- Motamed MK, Ghorbani piralidehi F and Rahimnejad balagafshe Z. 2022. Analysis of Factors Affecting the Adoption of Canola Cultivation (Second Crop) in the Paddy Fields of Guilan Province. Iranian Agricultural Extension and Education Journal, 17(2): 1-10. (In Persian with English Abstract).
- Mousavi-Avval SH, Rafiee Sh, Jafari A and Mohammadi A. 2011. Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach, Energy, 36(5): 2765-2772. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.016>
- Mousavi-Avval SH, Rafiee Sh, Sharifi M, Hosseinpour S and Shah A. 2017. Combined application of life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling energy and environmental

- emissions of oilseed production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78: 807-820. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.002>
- Poisson E, Trouverie J, Brunel-Muguet S, Akmouche Y, Pontet C, Pinochet X and Avice JC. 2019. Seed yield components and seed quality of oilseed rape are impacted by sulfur fertilization and its interactions with nitrogen fertilization. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00458>
- Qasemi-Kordkheili P, Taki M, Kazemi N and Hemmati A. 2013. Energy input-output and economic analysis for soybean production in Mazandaran province of Iran. *Elixir Agriculture*, 56: 13246-13251.
- Rabiee M, Majidian M, Alizadeh MR and Kavooosi M. 2021. Effect of tillage system, planting method and nitrogen fertilizer rate on agronomic characteristics and seed yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) cv. Dalgan in Guilan, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 22(4): 335-349. (In Persian with English Abstract). <http://doi.org/10.52547/abj.22.4.335>
- Raman H, Uppal RK and Raman R. 2019. Genetic solutions to improve resilience of canola to climate change. Pp. 75–131. In: Kole C (eds). *Genomic designing of climate-smart oilseed crops*. Springer International Publishing. Germany.
- Ramedani Z, Omid M, Fahimi F and Mirzaee F. 2012. A comparative study on energy inputs and yield of canola production under different environmental conditions. *Journal of Agricultural Technology*, 8(3): 811-824.
- Sedighkia M and Abdoli A. 2022. Balancing environmental impacts and economic benefits of agriculture under the climate change through an integrated optimization system. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13: 1053-1066. <https://doi.org/10.1007/s40095-022-00482-9>
- Taheri Garavand A, Asakereh A and Haghani K. 2010. Energy elevation and economic analysis of canola production in Iran a case study: Mazandaran province. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(2): 236-242.
- Unakitan G, Hurma H and Yilmaz F. 2010. An analysis of energy use efficiency of canola production in Turkey. *Energy*, 35(9): 3623-3627. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.005>
- Venturi P and Venturi G. 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass & Bioenergy*, 25(3): 235-255. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00015-1)
- Wang Y, Lu J, Li X, Li J, Liu P, Xu W and Yang Y. 2011. Study on nitrogen fertilizer effect and optimum fertilizer rate for transplanting and direct seeding rapeseed. *Scientia Agricultura Sinica*, 44(21): 4406-4414. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2011.21.009>
- Zakidizaji N and Monjezi H. 2012. Energy and economic analysis of canola production in Iran a case study: Khuzestan province. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(3): 227-231.