

بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌های محیط زیست در تولید کلوچه با استفاده از تکنیک‌های تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک

مجید خانعلی^{۱*}، مهدیه محمدنیا گالشکلومی^۲، اسداله اکرم^۳ و هما حسین‌زاده بندباف‌ها^۴

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب: دانشیار؛ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ و دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱

چکیده

در این پژوهش به بررسی میزان مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در تولید کلوچه در استان گیلان پرداخته شده است. روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی به‌منظور کاهش آلاینده‌های محیط زیست با استفاده از دو روش مرسوم تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه گردید. بدین منظور، اطلاعات لازم از ۳۰ واحد تولید کلوچه استخراج و به‌عنوان داده‌های اولیه در تحلیل‌های انرژی و زیست‌محیطی به کار گرفته شد. با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه زندگی، تأثیرات زیست‌محیطی تولید کلوچه بررسی شد. نهاده‌ها و ستانده بر اساس هم‌ارزهای انرژی به انرژی‌های معادل تبدیل شدند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ۳۰۵۳۳/۶۶ مگاژول انرژی برای تولید هر تن کلوچه مصرف می‌شود. بیشترین سهم انرژی مصرفی به گاز طبیعی با ۱۶۹۴۵/۲۸ مگاژول به‌ازای هر تن کلوچه تولیدی ارتباط دارد. طبق نتایج ارزیابی چرخه زندگی، شاخص گرمایش جهانی برای تولید هر تن کلوچه ۳۷۳۲/۰۹ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل تعیین گردید. بر اساس نتایج مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها، میزان کل انرژی مورد نیاز در حالت مصرف بهینه نهاده‌ها، درصد صرفه‌جویی انرژی و کاهش شاخص گرمایش جهانی به ترتیب برابر ۳۰۲۲۱/۵۸ مگاژول در تن، ۱/۰۲ درصد و ۱۹۰/۳۷ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل به‌ازای تولید یک تن کلوچه به‌دست آمد. همچنین، اجرای الگوی پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه مصرف انرژی را ۲۱/۶۲ درصد کاهش می‌دهد که بیشترین درصد صرفه‌جویی در انرژی در مصرف گردو در تولید کلوچه دیده شده است. بر اساس نتایج بهینه‌سازی چندهدفه، میزان شاخص گرمایش جهانی به‌ازای تولید یک تن کلوچه برابر ۲۹۲۳/۷۴ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل تعیین شد.

واژه‌های کلیدی

اثرات زیست‌محیطی، صنایع غذایی، گرمایش جهانی

مقدمه

صادرات داشته است. با توجه به توانمندی صنعتگران کشور در تولید ماشین‌های مورد نیاز صنایع غذایی که به دستیابی به جایگاه دانش فنی بومی منجر شده، می‌توان آینده‌ای روشن برای این صنعت شیرین به‌ویژه در حوزه صادرات رسم کرد. ارزان بودن مواد خام، ارزبری کم و نیروی کار ارزان از

با نگاهی به مزیت‌های کشور به لحاظ تأمین نیازهای داخلی و صدور تولیدات به سایر کشورها، می‌توان صنایع شیرینی و تولیدات مشابه را یکی از گروه‌های عمده صنایع غذایی دانست که در سال‌های اخیر رشد بسیار خوبی در سرمایه‌گذاری، تولید و

اکوسیستم به‌طور مستقیم تأثیر منفی می‌گذارند و هزینه‌های اجتماعی بسیار بالایی را به جامعه تحمیل می‌کنند (Rajaeifar *et al.*, 2015).

در خصوص ارزیابی جریان انرژی و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی در تولید مواد غذایی مختلف از جمله نان‌های صنعتی و مواد غذایی مشابه، تحقیقات مختلفی شده است. برای مثال، در تحقیقی در تولید نان‌های حجیم صنعتی که منبع انرژی آنها گاز طبیعی و الکتریسیته بود، گفته شده که به ترتیب ۲۲ و ۱۴ مگاژول انرژی برای تولید یک کیلوگرم نان حجیم صرف شده است (Andersson & Ohlsson, 1991). در زمینه مصرف انرژی در تولید نان‌های حجیم صنعتی نیز نتایج مطالعه برشکات و همکاران (Braschkat *et al.*, 2004) نشان می‌دهد که برای تولید هر کیلوگرم نان حجیم صنعتی ۴ مگاژول انرژی مصرف شده است. نتایج تحقیق دیگر درباره ارزیابی آلاینده‌های محیط زیست در تولید نان‌های حجیم با رویکرد چرخه زندگی در بلژیک نشان داده شده که حذف زغال سنگ و به‌کارگیری حامل‌های انرژی دیگر در سال‌های اخیر منجر به کاهش شاخص‌های پتانسیل گرمایش جهانی و اکسیداسیون فتوشیمیایی شده است (Geerken *et al.*, 2006). در تحقیقی در استکهلم سوئد، تأثیرات زیست‌محیطی تولید نان در دو مقیاس صنعتی و خانگی مقایسه و نشان داده شد شاخص پتانسیل گرمایش جهانی، شاخص نقصان لایه اوزن، شاخص مسمویت انسان و شاخص اسیدی شدن برای تولید صنعتی نان نسبت به تولید سنتی به‌طور غیرمحسوسی وضعیت مناسب‌تری دارند (Bimpeh *et al.*, 2006). در بررسی چرخه تولید نان در ایتالیا نشان داده شد که تولید مواد اولیه، انبارداری و حمل‌ونقل بین ۴۴ تا ۱۰۰ درصد

عواملی هستند که ایجاد صنایع تبدیلی را توجیه‌پذیر و ارزش افزوده محصولات کشاورزی را چند برابر می‌کنند. ساختار اقتصادی ایران به‌گونه‌ای است که بخش کشاورزی و صنایع تبدیلی در فرآیند توسعه اقتصادی، اجتماعی و سیاسی کشور همواره جایگاهی ویژه داشته است. امکانات بالقوه وسعت اراضی قابل کشت، تنوع اقلیم، سهم قابل توجه جمعیت و اشتغال در مناطق روستایی و معیارهای برتری اقتصادی - از جمله برتری نسبی سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی و صنایع تبدیلی و استعداد این سرزمین را برای توسعه و رشد بخش کشاورزی و راه‌اندازی صنایع تبدیلی و غذایی توجیه می‌کند. بر اساس نتایج آمارگیری از کارگاه‌های صنعتی ایران، بخش صنایع غذایی ۱۸/۳ درصد از صنایع کشور را به‌خود اختصاص داده است (Anon, 2014). از سوی دیگر، همانند دیگر بخش‌های صنعتی، صنایع تولید نان‌های شیرین (مانند کلوچه) نیز نیازمند استفاده از تجهیزات پیشرفته وابسته به مصرف انرژی هستند که از سوخت‌دیزل، گاز طبیعی و الکتریسیته به‌دست می‌آید (Karakaya & Ozilgen, 2011).

انرژی یکی از اجزای اصلی استراتژی توسعه پایدار در هر کشور است. در هر جامعه، از سنتی گرفته تا صنعتی، عدم دسترسی به انرژی و بالا بودن هزینه‌های انرژی، ایجاد بحران می‌کند و مدیریت انرژی تنها و نزدیک‌ترین راه برای بهره‌برداری بیشتری از سوخت‌های موجود و منابع انرژی است و هر کشوری باید راه‌حل مسئله بحران انرژی را در چارچوب استراتژی توسعه اقتصادی خود تعیین کند (Taki *et al.*, 2012). افزایش مصرف انرژی علاوه بر افزایش هزینه بی‌تردید انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌های زیست‌محیطی را بالا می‌برد، آلاینده‌هایی که بر سلامت عمومی جوامع و

برای ارائه الگوهای بهینه، یکی از فاکتورهای کلیدی به منظور مصرف صحیح انرژی و همچنین کاهش تأثیرات گلخانه‌ای است. بهینه‌سازی در هر سامانه فرآیندی است که در آن با تغییر مقادیر ورودی یا خروجی می‌توان به بیشترین میزان سود یا کمترین میزان زیان دست یافت (Thankappan, 2003).

فارل (Farrell, 1957) با استفاده از روشی مانند اندازه‌گیری کارایی در مباحث مهندسی، به اندازه‌گیری کارایی در واحد تولیدی پرداخت که شامل یک ورودی و یک خروجی بود. چندی بعد چارنر و همکاران (Charnes et al., 1979) دیدگاه فارل را توسعه و الگویی ارائه دادند که توانایی اندازه‌گیری کارایی با چندین ورودی و خروجی را داشت. این الگو، تحلیل پوششی داده‌ها نام گرفت. تحلیل پوششی داده‌ها رویکردی داده‌محور نسبتاً جدیدی است برای ارزیابی عملکرد مجموعه‌ای از موجودیت‌های مشابه به نام واحدهای تصمیم‌گیری که ورودی چندگانه را به خروجی‌های چندگانه تبدیل می‌کند (Cooper et al., 2004). در تحلیل پوششی داده‌ها، از کلیه مشاهدات گردآوری شده برای اندازه‌گیری کارایی استفاده می‌شود. از آنجا که تحلیل پوششی داده‌ها تکنیکی غیرپارامتری است، آزمون‌های آماری برای آن مشکل است. تعداد مدل‌های مورد نیاز و حل آنها وابسته به تعداد واحدهای تحت بررسی است که تا حدودی حجم محاسبات را افزایش می‌دهد. اضافه کردن واحد جدید به مجموعه واحدهای قبلی بررسی شده موجب تغییر در امتیاز کارایی تمامی واحدها می‌گردد. تغییر در نوع و تعداد ورودی‌ها ممکن است باعث تغییر در نتایج ارزیابی شود. با افزایش تعداد متغیرهای ورودی و خروجی، تعداد واحدهای کارا نیز افزایش می‌یابد (Qasari et al., 2007).

شاخص‌های پتانسیل گرمایش جهانی، اسیدی شدن و مسمومیت آب‌های سطحی و آزاد را شامل شده‌اند (Maupu et al., 2012). نتایج مطالعه‌ای در خصوص بهینه‌سازی مصرف انرژی محصولات تجاری نانویی مانند نان، رولت، کیک منجمد، کیک، شیرینی، بیسکویت و کراکر در آمریکا حاکی از آن است که سامانه مدیریت قوی انرژی با شناسایی اقداماتی به‌منظور افزایش کارایی در مصرف انرژی باعث خواهد شد قیمت تمام شده محصولات کاهش یابد (Therkelsen et al., 2014). در تحقیقی دیگر برای تولید هر کیلوگرم نان، میزان مصرف انرژی تجدیدناپذیر بین ۶ تا ۲۱/۵ مگاژول محاسبه شده است (Kulak et al., 2015). در پاسخ به افزایش هزینه‌های انرژی در صنایع تولید نان‌های شیرین، یک چارچوب بهینه‌سازی چند هدفه برای طرح اجاق پخت ارائه شد و ترکیب بهینه ویژگی‌های طراحی مانند یکنواختی دما در اجاق پخت شناسایی و بررسی شد (Khatir et al., 2015). تجزیه و تحلیل جریان انرژی در کشورهای عضو اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که انرژی مصرفی برای تولید یک کیلوگرم نان حجیم در بازه ۹ تا ۳۲/۹ مگاژول تغییر می‌کند. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد مرحله پخت نان برای بسیاری از نان‌های تولید شده در کشورهای مختلف، عامل اصلی در ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی است که مقدار این آسیب‌ها وابسته به اندازه و شکل نان است که بر این اساس نان‌های گران قیمت‌تر دارای پایداری محیط زیستی بالاتری هستند (Notarnicola et al., 2017).

توجه همزمان به کاهش مصرف انرژی، افزایش تولید و کُند کردن روند رو به رشد گرمایش زمین از مهم‌ترین عوامل برای رسیدن به موفقیت در صنایع غذایی است. بر این اساس، استفاده از روش‌های نوین

مصرف بهینه انرژی در تولید کلوچه در سال ۱۳۹۵ و با استفاده از اطلاعات ۳۰ کارخانه تولید کلوچه ارائه گردید.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها

این پژوهش در چند شهر استان گیلان از جمله در لاهیجان، لنگرود و رودسر به‌عنوان قطب‌های تولید کلوچه استان اجرا شده است. استان گیلان در شمال کشور و در محدوده جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی قرار دارد و ۰/۸۵ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد. در این تحقیق، اطلاعات تولیدی کلیه واحدهای صنعتی تولید کلوچه در استان گیلان (۳۰ واحد) بررسی شده است. این اطلاعات مربوط است به کارخانه، میزان مصرف نهاده‌های مختلف، تعداد کارگران شاغل در هر بخش، نوع و میزان مصرف ماشین‌های مختلف و غیره.

مراحل پخت کلوچه

کلوچه نوعی نان شیرین است که از آرد گندم، شکر و روغن تهیه می‌شود. با اضافه کردن پودر نارگیل یا گردو به خمیر کلوچه، می‌توان کلوچه نارگیلی یا گردویی تهیه کرد. ترکیبات کلوچه‌های مختلف تفاوت زیادی باهم ندارند و فرآیند تولید در تمامی انواع کلوچه‌ها مشابه است. بدین ترتیب که ابتدا تمامی مواد اولیه کلوچه در مخلوط‌کن ریخته و پس از مخلوط شدن وارد دستگاه کلوچه‌زنی می‌شود؛ در دستگاه کلوچه‌زنی، مغزی در داخل خمیر قرار داده می‌شود و کلوچه فرم نهایی خود را می‌گیرد. پخت در فر صورت می‌گیرد و پس از آن،

الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های محاسبات تکامل یافته است که رابطه‌ای مستقیم با مبحث هوش مصنوعی دارد. در واقع الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم ژنتیک قانون بقای بهترین را روی مجموعه‌ای از جواب‌های مسئله، به امید به دست آوردن جواب‌های بهتر، اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست می‌آید. این فرآیند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسئله سازگارتر باشد. در سال‌های اخیر از الگوریتم ژنتیک به‌طور گسترده‌ای در حوزه‌ای وسیع از مسائل علوم، بازرگانی و مهندسی به عنوان ابزار جستجو و بهینه‌یابی استفاده شده است. دلیل عمده موفقیت این الگوریتم‌ها، قابلیت کاربرد وسیع، سهولت در استفاده و چشم‌انداز عمومی آنهاست (Shamshirband et al., 2015).

مرور منابع مرتبط نشان می‌دهد با وجود گستردگی تحقیقات در زمینه انرژی مصرفی در ایران، هنوز مطالعه‌ای در خصوص بهینه‌سازی انرژی صنایع تولید کلوچه از دیدگاه بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف بهینه انرژی نشده است. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی مصرف انرژی با هدف افزایش کارایی انرژی و کمک به کاهش پدیده گرمایش جهانی ناشی از مصرف انرژی است. برای رسیدن به این هدف، از دو روش مرسوم بهینه‌سازی تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک استفاده شد و الگوی

هم‌ارز در نظر گرفته‌شده برای نهاده‌ها از محاسبه میزان انرژی مصرف‌شده برای تولید هر واحد آن نهاده‌ها به دست می‌آید. این ضریب بسته به نوع نهاده یا ستانده واحد متفاوتی خواهد داشت. در این مطالعه، نهاده‌هایی که در نظر گرفته شده اند از این قرارند: آرد، شکر، روغن، تخم مرغ، گردو، نارگیل، آب، الکتریسیته، گاز، نیروی کارگری و ماشین‌ها؛ خروجی سامانه تولید نیز کلوجه است که نوع و میزان مصرف آن را کارشناسان صنایع غذایی کارخانه‌های بررسی کرده و در اختیار قرار داده‌اند. هم‌ارز انرژی معادل نهاده‌ها و ستانده در تولید کلوجه در جدول ۱ ارائه شده است.

سرد کردن و بسته بندی دنبال می‌شود.

تجزیه و تحلیل انرژی در تولید کلوجه

در این پژوهش، جریان انرژی در تولید کلوجه با استفاده از هم‌ارزهای انرژی نهاده‌ها بررسی شده است. هم‌ارز (معادل) انرژی به ضرایبی اطلاق می‌شود که بیان‌کننده میزان انرژی معادل نهاده‌ها یا ستانده‌هاست که در فرآیند تولید به سامانه تولیدی وارد یا از آن خارج می‌شود. برای مثال هم‌ارز در نظر گرفته شده برای هر ساعت کار انسان، ۱/۹۶ مگاژول برای کارگر است که معادل با میزان انرژی مصرفی توسط آنهاست (Ozkan et al., 2004). معادل یا

جدول ۱- مقدار انرژی ورودی و خروجی در تولید کلوجه

منبع	هم‌ارز انرژی (مگاژول بر واحد)	واحد	ورودی‌ها و خروجی سامانه تولید
(Abolshikhi, 2014)	۲۰/۵۶	کیلوگرم	آرد
(Namdari, 2015)	۱۶/۱۹	کیلوگرم	شکر
(Kitani, 1999)	۳۶/۸	کیلوگرم	روغن
(Baum et al., 2009)	۷/۲۸	کیلوگرم	تخم مرغ
(Banaeian et al., 2010)	۱/۹	کیلوگرم	گردو
(Erdal et al., 2007)	۱/۰۲	مترمکعب	نارگیل
(Erdal et al., 2007)	۱/۰۲	مترمکعب	آب
(Kitani, 1999)	۱۲	کیلووات ساعت	الکتریسیته
(Kitani, 1999)	۴۹/۵	مترمکعب	گاز طبیعی
(Canakci et al., 2005)	۶۲/۷	کیلوگرم	ماشین‌ها نیروی انسانی:
(Kitani, 1999)	۱/۵۷	ساعت	- زن
(Kitani, 1999)	۱/۹۶	ساعت	- مرد
محاسبه شده	۱۹/۶	کیلوگرم	کلوجه

ارزیابی چرخه زندگی

ارزیابی چرخه زندگی یا تحلیل چرخه زیستی، روشی است ابداعی که برای گردآوری و ارزیابی ورودی‌ها و خروجی‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی بالقوه فرآیند تولیدی یا خدماتی در طول چرخه زندگی آن استفاده می‌شود؛ در این روش، تمام مراحل فرآیند موردنظر شامل استخراج منابع، قطعات تولیدی و ساخت آنها، مدیریت تولید و مدیریت پسماند

مقدار انرژی موجود در هر ۱۰۰ گرم کلوجه، ۴۷۰ کیلوکالری (Anon, 2017) است که با استفاده از تبدیلات رابطه ۱ مقدار هم‌ارز کلوجه بر حسب مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد:

$$\frac{470(\text{kcal})}{100(\text{gr})} \times \frac{1000(\text{gr})}{1(\text{kg})} \times \frac{10^3(\text{cal})}{(\text{kg})} \times \frac{4.1868(\text{J})}{1(\text{cal})} \times \frac{1(\text{MJ})}{10^6(\text{J})} = 19.6(\text{MJ/kg}) \quad (1)$$

می‌شود. در مرحله تحلیل سیاهه، به اطلاعاتی در مورد ورودی‌ها و خروجی‌های فیزیکی فرآیندهای سامانه تولیدی نیاز خواهد بود. اطلاعات مورد نیاز در این مطالعه به دو گروه تقسیم شدند که گروه اول اطلاعات مرتبط با میزان مصرف نهاده‌ها و گروه دوم اطلاعات مرتبط با ساخت و حمل و نقل نهاده‌های مصرفی (فرآیندهای بالادستی) است؛ اطلاعات درباره مقدار نهاده‌های مصرفی از کارشناسان کارخانه‌های مورد بررسی به دست آمد. اما به دلیل نبود اطلاعات کافی در زمینه فرآیندهای بالادستی، از اطلاعات موجود در پایگاه داده اکواینوننت^۱ استفاده شد. در جدول ۲ تحلیل سیاهه تولید کلوجه با رویکرد چرخه زندگی بر اساس مرز سامانه تعریف شده در این مطالعه بیان شده است.

(دورریز، بازیافتی، یا دفع نهایی) بررسی می‌شود (Guinée, 2002). هر پروژه ارزیابی چرخه زندگی چهار مرحله الزامی دارد: تعریف هدف و دامنه، تحلیل سیاهه، ارزیابی تأثیرات چرخه زندگی و تحلیل و تفسیر نتایج (Anon, 2006).

در این مطالعه، هدف در مرحله اول ارزیابی زیست‌محیطی تولید کلوجه و در مرحله دوم تحلیل زیست‌محیطی تولید کلوجه با در نظر گرفتن مصرف بهینه انرژی است. از این رو واحد کارکردی در این مطالعه یک تن کلوجه در نظر گرفته شده و مرز سامانه از ورود مواد اولیه به کارخانه تا پایان مرحله پخت کلوجه گسترش یافته است. در مرحله تحلیل سیاهه، منابع استفاده شده و انتشار آلاینده‌ها با توجه به واحد عملکردی و مرز سامانه تعیین

جدول ۲- تحلیل سیاهه تولید کلوجه با رویکرد چرخه زندگی

مقدار	واحد	نهاده
۲۴۴/۹۱	کیلوگرم بر تن	آرد
۲۴۸/۹۴	کیلوگرم بر تن	شکر
۳۶/۱۱	کیلوگرم بر تن	روغن
۱۳/۴۲	کیلوگرم بر تن	تخم مرغ
۸/۳۵	کیلوگرم بر تن	گردو
۶/۴۲	کیلوگرم بر تن	نارگیل
۰/۱۸	متر مکعب بر تن	آب
۱۵۰	کیلووات ساعت بر تن	الکتریسیته
۳۴۵/۳۴	مترمکعب بر تن	گاز طبیعی
۵۲/۹۸	کیلوگرم بر تن	ماشین‌ها و تجهیزات

تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها با ساخت و حل n مدل، عملکرد n واحد را بررسی می‌کند. این روش، به‌طور کلی با ترکیب تمامی واحدهای تحت بررسی، یک واحد مجازی با بالاترین کارایی را می‌سازد و واحدهای ناکار را با آن می‌سنجد (Ronald & Samuel, 2008). در حقیقت، تحلیل پوششی داده‌ها کارایی یک واحد را محاسبه نمی‌کند بلکه کارایی

در این مطالعه، برای ارزیابی آلاینده‌های محیط زیست در تولید کلوجه با رویکرد چرخه زندگی از روش CML2 Baseline2000 شامل ۱۰ بخش اثر با نام‌های تقلیل مواد غیر آلی، اسیدی شدن، اختناق دریاچه‌ای، گرمایش جهانی، نقصان لایه اوزون، مسمومیت انسان‌ها، مسمومیت آب‌های سطحی، مسمومیت آب‌های آزاد، مسمومیت خاک و اکسیداسیون فتوشیمیایی استفاده شده است.

برای محاسبه کارایی فنی خالص، از مدل برنامه‌ریزی خطی زیر استفاده شده است (Mousavi-Avval et al., 2011):

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= uy_i - u_i \\ \text{Subjected to } vx_i &= 1 \\ -vX + uY - u_0 e &\leq 0 \quad (3) \\ v_s \geq 0, u_r &\geq 0 \text{ and } u_0 \text{ free in sign} \end{aligned}$$

کارایی مقیاس از تقسیم کارایی فنی بر کارایی فنی خالص محاسبه شد (Drake & Howcroft, 1994). در این مطالعه، کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده (کارخانه‌های تولید کلوچه) با نرم‌افزار EMS 1.3 تحلیل گردید و کارخانه‌ها از نظر کارایی مصرف انرژی ارزیابی شدند. واحدهای کارا و ناکارا در مصرف انرژی تعیین گردیدند و میزان مصرف نهاده‌ها در حالت کارایی صددرصد واحدهای تصمیم‌گیرنده بررسی شد.

الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چندهدفه

الگوریتم ژنتیک روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی است که از طبیعت الهام می‌گیرد و فرآیندهای آن بر اساس تکامل زیستی پیش می‌رود. این روش مکرراً جمعیتی از راه‌حل‌های منفرد مسئله را تغییر می‌دهد که از این تغییرات با عنوان تکامل یاد می‌شود. در هر گام از این تکامل، دو عضو از جمعیت را به‌طور تصادفی به‌عنوان والد انتخاب می‌کنند و فرزند آنها را به‌عنوان نسل بعدی در نظر می‌گیرند. به این ترتیب جمعیت به سمت راه‌حل بهینه تکامل می‌یابد (Davis, 1991). الگوریتم ژنتیک ذاتاً موازی و تصمیمات آن تصادفی است و از آنجا که چندین نقطه شروع دارد، در یک لحظه

یک واحد را در برابر کارایی واحدهای دیگر محاسبه می‌کند و آن را با واحدهای دیگر می‌سنجد.

روش تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی را در سه تعریف متفاوت ارائه می‌دهد که شامل کارایی فنی، کارایی فنی خالص و کارایی مقیاس است. کارایی فنی اساساً با واحدهای ارزیابی شده برای عملکردشان اندازه‌گیری می‌شود که وابسته به دیگر واحدهاست. کارایی فنی خالص نوعی کارایی فنی است که از جابه‌جایی کارایی مقیاس تأثیر می‌گیرد. کارایی مقیاس نیز از تقسیم کارایی فنی بر کارایی فنی خالص حاصل می‌شود (Mousavi-Avval et al., 2011). در این مطالعه، برای محاسبه کارایی از جامع‌ترین مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است که مدل بازگشت به مقیاس ثابت (CCR) و مدل بازگشت به مقیاس متغیر (BCC) هستند؛ از مدل بازگشت به مقیاس متغیر برای محاسبه کارایی فنی خالص و از مدل بازگشت به مقیاس ثابت برای محاسبه کارایی فنی استفاده می‌شود (Cooper et al., 2007). در اینجا، رابطه تعیین کارایی فنی ارائه شده است (Ghasemi-Mobtaker et al., 2012):

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta &= \sum_r u_r y_{rj} \\ \sum_i v_i x_{ij} &= 1 \\ \sum_r u_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} &\leq 0 \text{ for } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2) \\ u_r &\geq 0 \text{ for } j = 1, 2, 3, \dots, s \text{ and } v_s \geq 0 \\ &\text{for } j = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned}$$

که در آن،

θ = کارایی فنی؛ u = وزن خروجی‌ها؛ y = خروجی‌ها؛ v = وزن ورودی‌ها؛ x = ورودی‌ها؛ n = تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده؛ s = تعداد خروجی‌ها؛ و m = تعداد نهاده‌ها.

تابع) عملکرد و شاخص‌های زیست‌محیطی، راه‌حلی منطقی تلقی می‌شود. در این بخش از مطالعه، دو هدف افزایش عملکرد تولید کلوچه و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی بررسی شده است. از میان شاخص‌های زیست‌محیطی محاسبه شده، گرمایش جهانی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد، بنابراین دو تابع هدف یکی برای به حداکثر رساندن عملکرد تولید کلوچه و دیگری برای به حداقل رساندن میزان شاخص گرمایش جهانی در فرآیند تولید تعریف شده است. محدودیت‌ها در حل این مسئله بیشترین و کمترین میزان مصرف هر نهاده در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

تحلیل جریان انرژی در تولید کلوچه

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۳، برای تولید هر تن کلوچه ۳۰۵۳۳/۶۶ مگاژول انرژی مصرف می‌شود که گاز طبیعی با معادل انرژی ۱۷۰۹۴/۲۹ مگاژول بر تن، آرد با معادل انرژی ۵۰۳۵/۶۴ و شکر با معادل انرژی ۴۲۰۷/۱ مگاژول بر تن به ترتیب بیشترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. بر این اساس، انرژی در قالب سوخت، مصرف بالایی دارد که استفاده نکردن از تجهیزات مستهلک، تغییر نوع سوخت مصرفی در فرهای پخت از سوخت‌های فسیلی به سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر خصوصاً انرژی خورشید و استفاده از اجاق‌های خورشیدی با توجه به اقلیم ایران می‌تواند کارایی مصرف انرژی سوخت را در تولید کلوچه در استان گیلان بالا برد. میانگین تابش خورشیدی در شش ماه نخست سال شمسی ۵/۹۲ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز و برابر اطلاعات گرفته‌شده از سیستم اطلاعات جغرافیایی فتوولتائیک

می‌تواند فضای مسئله را از چند جهت مختلف جستجو کند؛ به همین سبب، الگوریتم‌های ژنتیک برای حل مسائل غیرخطی بسیار مفیدند که فضای راه‌حل بزرگی دارند. از سوی دیگر، بسیاری از مسائل واقعی چندهدفه‌اند و نمی‌توانند محدود به یک ویژگی شوند تا آن ویژگی حداکثر یا حداقل شود. الگوریتم‌های ژنتیک با قابلیت تغییر همزمان چندین پارامتر، در حل این‌گونه مسائل بسیار مفیدند و ممکن است برای هر مسئله، دو یا چندراه حل پیدا کنند که هر یک با در نظر گرفتن یک پارامتر خاص به جواب رسیده است. یافتن یک یا چند جواب بهینه را بهینه‌یابی چندهدفه می‌نامند (Shamshirband *et al.*, 2015) و جوابی که در مقایسه با سایر جواب‌ها در فضای تصمیم مسئله، پست‌تر نباشد، جواب بهینه پارتو نامیده می‌شوند.

هر مدل بهینه‌یابی به‌طور کلی دارای سه بخش اصلی توابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری است. شکل عمومی مدل بهینه‌یابی در رابطه ۴ ارائه شده است:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize/Maximize } f_m(x), \quad m=1,2,\dots,M; \\ & \text{Subjected to } \quad g_j(x_i) \geq 0 \quad j=1, 2,\dots,J; \\ & \quad \quad \quad h_k(x_i) \geq 0 \quad k=1, 2,\dots,k; \\ & \quad \quad \quad x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i=1,2,\dots,n; \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن،

تعداد J محدودیت نامعادله و K محدودیت معادله وجود دارد. عبارات $g_j(x)$ و $h_k(x)$ توابع محدودیت نامیده می‌شوند و هر جواب x که همه $j+k$ محدودیت و $2N$ حدود متغیر را برآورده سازد، یک جواب موجه و در غیر این صورت یک جواب غیرموجه نامیده می‌شود. بنا بر دلایل ذکر شده، استفاده از الگوریتم ژنتیک در تحقیق حاضر، به‌منظور بهینه‌یابی همزمان دو تابع (بیش از یک

اروپایی ۵/۹۵ کیلووات ساعت بر متر مربع است. این مقادیر بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند و پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی را بسیار ایده‌آل نشان می‌دهند. از این‌رو در این بازه زمانی می‌توان از این انرژی نیز برای مصارف گوناگون بهره برد (Nia-Jalili *et al.*, 2013).

جدول ۳- انرژی نهاده و ستانده در تولید کلوچه در استان گیلان

عنوان (واحد)	انرژی معادل (مگاژول بر تن)
نهاده‌ها	
آرد (کیلوگرم)	۵۰۳۵/۶۴
شکر (کیلوگرم)	۴۲۰۷/۱
روغن (کیلوگرم)	۱۹۰۸/۱۱
تخم‌مرغ (کیلوگرم)	۹۷/۷۲
گردو (کیلوگرم)	۱۵/۸۶
نارگیل (کیلوگرم)	۱۲/۳۹
آب (مترمکعب)	۰/۱۸
الکتریسیته (کیلووات ساعت)	۱۸۰۰
گاز طبیعی (مترمکعب)	۱۷۰۹۴/۲۹
نیروی انسانی (ساعت)	۹۷/۶۶
ماشین‌ها (کیلوگرم)	۲۶۴/۸۸
انرژی ورودی کل (مگاژول بر تن) ستانده	۳۰۵۳۳/۶۶
محصول (تن)	۱۹۶۰۰
انرژی خروجی کل (مگاژول بر تن)	۱۹۶۰۰

تحلیل شاخص‌های زیست‌محیطی در تولید کلوچه

در جدول ۴، میزان آلاینده‌های محیط‌زیست از کارخانه و فرآیندهای بالادستی در تولید هر تن کلوچه نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که برای تولید هر تن کلوچه، میزان گرمایش جهانی ۳۷۳۲/۰۹ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل (یا ۳/۷۳ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل به‌ازای تولید هر کیلوگرم کلوچه) محاسبه شده است که این میزان در تحقیقات دیگر در زمینه ارزیابی آلاینده‌های محیط زیست در تولید انواع محصولات مرتبط با نان و شیرینی با رویکرد چرخه زندگی، بین ۰/۶۲ تا ۰/۹ (Andersson & Ohlsson, 1999)، تا ۰/۸ تا ۰/۱۵۸ (Braschkat *et al.*, 2004) می‌باشد.

(Espinoza-Orias *et al.*, 2011) و ۰/۶ تا ۱/۷ (Kulak *et al.*, 2015)، کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل برای هر کیلوگرم نان حجیم محاسبه شده است که میزان بسیار کمتری را نسبت به انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از تولید کلوچه نشان می‌دهند. مقایسه نتایج، میزان گرمایش جهانی ناشی از تولید کلوچه را در این مطالعه بیشتر از سایر مطالعات نشان داده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، میزان آلاینده‌های محیط‌زیست از کارخانه نقش اصلی در بخش‌های اثر مسمومیت آب‌های آزاد و نقصان لایه اوزون داشته است در حالی‌که در بخش‌های اثر تقلیل منابع غیر آلی و مسمومیت خاک نقش چندانی نداشته است.

جدول ۴- مقدار آلاینده‌های محیط زیست در تولید هر تن کلوچه

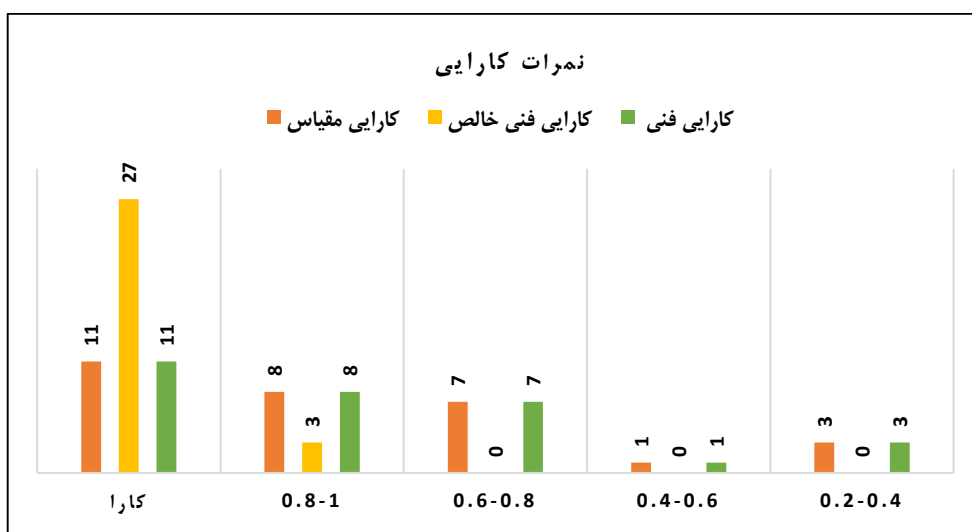
بخش اثر	واحد	کل	خارج از کارخانه	داخل کارخانه
تقلیل منابع غیر آلی	کیلوگرم آنتیموان معادل	۸/۱۸	۸/۱۸	۰
اسیدی شدن	کیلوگرم سولفور دی‌اکسید معادل	۱۶/۶۳	۱۰/۴۵	۶/۱۸
اختناق دریاچه‌ای	کیلوگرم فسفات معادل	۲/۴۳	۲/۱۸	۰/۲۵
گرمایش جهانی	کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل	۳۷۳۲/۰۹	۱۸۲۴/۲۵	۱۹۰۷/۸۵
نقصان لایهٔ اوزون	کیلوگرم تری‌کلوروفلورمتان معادل	۰/۰۰۰۱۲۴	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۱
مسمومیت انسان‌ها	کیلوگرم ۱، ۴-دی‌کلروبنزن معادل	۲۰۳۶/۵۰	۱۸۶۸/۶۳	۱۶۷/۸۷
مسمومیت آب‌های سطحی	کیلوگرم ۱، ۴-دی‌کلروبنزن معادل	۲۵۹/۰۵	۲۱۵/۴۹	۴۳/۵۶
مسمومیت آب‌های آزاد	کیلوگرم ۱، ۴-دی‌کلروبنزن معادل	۲۵۱۱۳۶/۱۳	۴۷۲۸۳/۵۸	۲۰۳۸۵۲/۵۵
مسمومیت خاک	کیلوگرم ۱، ۴-دی‌کلروبنزن معادل	۹۴/۲۴	۹۳/۹۴	۰/۳
اکسیداسیون فتوشیمیایی	کیلوگرم اتیلن معادل	۰/۸۳	۰/۴۶	۰/۳۷

تعیین کارایی و بهینه سازی انرژی مصرفی تولید کلوچه با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

نامناسب بودن مقیاس تولید برای آنها بوده است و در نتیجه کارایی مقیاس کمتر از ۱ دارند. از میان واحدهای ناکارا، ۸ واحد دارای کارایی فنی در محدوده ۱-۰/۸ و ۳ واحد دارای کارایی فنی خالص در محدوده ۱-۰/۸ بوده‌اند.

بنابراین، اولین گام برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای تولید کلوچه در استان گیلان، رعایت مقیاس صحیح است و رعایت اصول مدیریتی در جایگاه بعدی قرار دارد.

نتایج مدل‌های بازگشت به مقیاس ثابت و متغیر در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، از مجموع ۳۰ واحد تولید کلوچه، ۲۷ واحد از نظر کارایی فنی خالص کارا شناخته شده‌اند اما از نظر فنی تنها ۱۱ واحد کارا بودند که نشان می‌دهد ۱۶ واحد دارای کارایی فنی خالص برابر ۱ بوده‌اند ولی کارایی فنی کمتر از ۱ داشته‌اند که دلیل آن



شکل ۱- فراوانی واحدها از نظر امتیاز کارایی در مصرف انرژی کلوچه

نسبت به کارایی فنی و کارایی مقیاس بسیار کمتر است. به‌طور کلی می‌توان گفت واحدهای تولیدکننده کلوچه در استان گیلان با توجه به میانگین نمره‌های کارایی، از نظر مصرف و تولید انرژی وضعیت مطلوبی دارند.

به‌عبارت دیگر واحدهای تولیدکننده کلوچه از نظر مصرف و تولید انرژی رفتاری مشابه دارند.

مقادیر میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر کارایی فنی، کارایی فنی خالص و کارایی مقیاس واحدهای تولید کلوچه در جدول ۵ نشان داده شده است. کارایی فنی خالص با نمره میانگینی در حدود ۱، بیشترین مقدار را دارد در حالی که از نظر کارایی فنی این میزان ۰/۹۱ را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر انحراف معیار، پراکندگی کارایی فنی خالص

جدول ۵- مقادیر انواع کارایی واحدهای تولید کلوچه

عنوان	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
کارایی فنی	۰/۹۱	۰/۱۱	۰/۶۳	۱
کارایی فنی خالص	۱	۰/۰۱	۰/۹۷	۱
کارایی مقیاس	۰/۹۱	۰/۱۱	۰/۶۳	۱

مصرف انرژی موجب کاهش ۳۱۲/۰۷ مگاژول یا ۱/۰۲ درصد در انرژی مصرفی به‌ازای تولید هر تن کلوچه است.

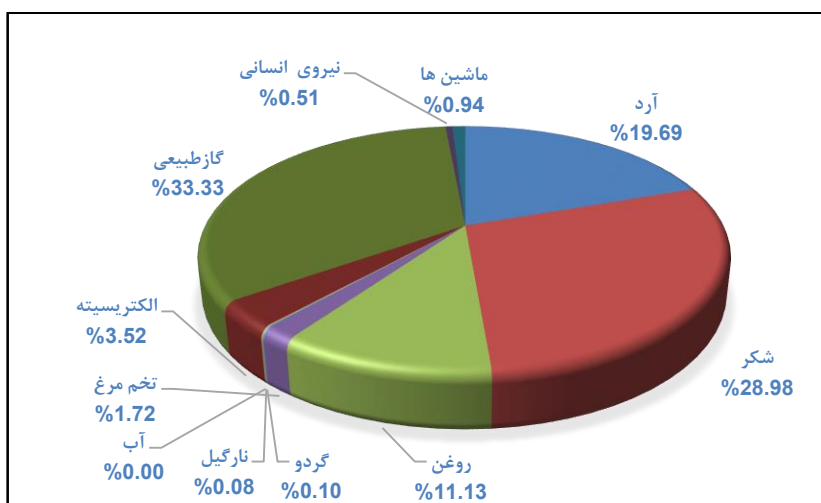
بر اساس نتایج به‌دست آمده، تخم‌مرغ با ۵/۴۸ درصد بیشترین مقدار ذخیره انرژی را در حالت بهینه به خود اختصاص داده است در حالی که کمترین میزان ذخیره انرژی مربوط به مصرف الکتریسته و گاز طبیعی با ۰/۶۱ درصد است.

در شکل ۲ سهم هر یک از نهاده‌ها در ذخیره‌سازی انرژی ورودی در تولید هر تن کلوچه نشان داده شده است. از کل ۳۱۲/۰۷ مگاژول بر تن انرژی ذخیره شده، ۳۳ درصد به صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی و ۲۹ درصد به کاهش مصرف شکر ارتباط دارد.

برای رتبه‌بندی واحدهای کارا، از روش تعداد دفعات ارجاع در مجموعه مرجع استفاده شد و به‌وسیله آن تعداد دفعاتی برآورد گردید که هر یک از واحدهای کارا به‌عنوان مرجع برای واحدهای ناکارا انتخاب شده است. در این روش برای یافتن مقدار مصرف بهینه واحدهای کارا شناسایی می‌شوند و مقدار مصرف انرژی در این واحدها به‌عنوان الگو در اختیار واحدهای ناکارا قرار می‌گیرد تا با پیروی از این الگو به کارایی برسند (Hosseinzadeh- Bandbafha *et al.*, 2017). نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی با الگوگیری از واحدهای مرجع در جدول ۶ ارائه شده است. بر این اساس، میزان کل انرژی مورد نیاز در حالت مصرف بهینه نهاده‌ها برابر ۳۰۲۲۱/۵۸ مگاژول به‌ازای هر تن تعیین شد که این میزان

جدول ۶- مقادیر مصرف بهینه و ذخیره شده انرژی در تولید کلوچه با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

نهادها (واحد)	مقدار بهینه مصرف (مگاژول بر تن)	مقدار انرژی ذخیره شده (مگاژول بر تن)	درصد ذخیره شده
۱- آرد	۴۹۷۴/۲۰	۶۱/۴۳	۱/۲۲
۲- شکر	۴۱۱۶/۶۴	۹۰/۴۵	۲/۱۵
۳- روغن	۱۸۷۳/۳۸	۳۴/۷۲	۱/۳۰
۴- تخم مرغ	۹۲/۳۶	۵/۳۵	۵/۴۸
۵- گردو	۱۵/۵۲	۰/۳۲	۲/۰۶
۶- نارگیل	۱۲/۱۳	۰/۲۵	۲/۰۶
۷- آب	۰/۱۷۰۱	۰/۰۰۹۸	۵/۴۷
۸- الکتریسیته	۱۷۸۹/۰۲	۱۰/۹۸	۰/۶۱
۹- گاز طبیعی	۱۶۹۴۵/۲۸	۱۰۴	۰/۶۱
۱۰- نیروی کارگری	۹۶/۰۶	۱/۵۹	۱/۶۳
۱۱- ماشین‌ها	۲۶۱/۹۳	۲/۹۴	۱/۱۱
کل انرژی نهاد	۳۰۲۲۱/۵۸	۳۱۲/۰۷	۱/۰۲

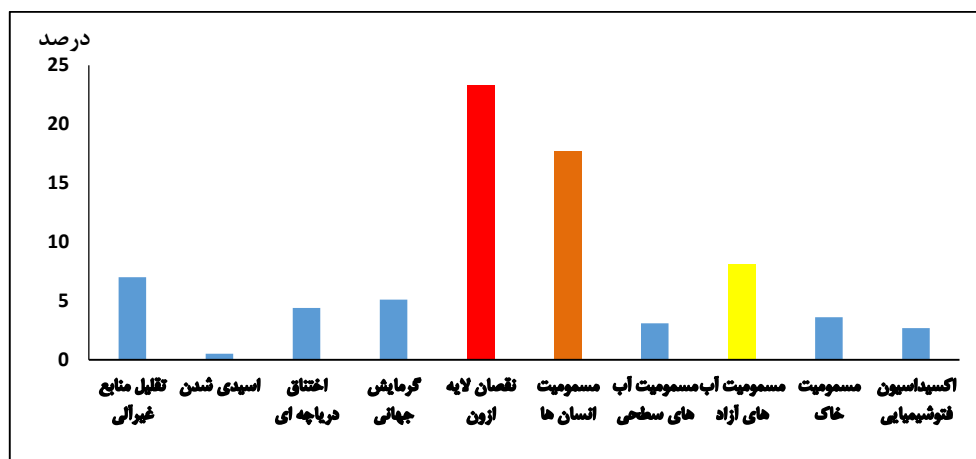


شکل ۲- سهم نهادهای مختلف در ذخیره‌سازی انرژی در تولید کلوچه با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

شاخص مسمومیت انسان‌ها و مسمومیت آب‌های آزاد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. شاخص اسیدی شدن نیز کمترین درصد کاهش را دارد. با توجه به این میزان کاهش در بخش‌های اثر، در جدول ۷ میزان انتشار برای هر بخش اثر در حالت مصرف بهینه انرژی بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌ها ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد مصرف

در شکل ۳، درصد کاهش شاخص‌های زیست‌محیطی مورد مطالعه نسبت به حالت معمول بر اساس مصرف بهینه انرژی با تحلیل پوششی داده‌ها در تولید یک تن کلوچه نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، با مصرف بهینه انرژی، شاخص نقصان لایه اوزون با حدود ۲۳ درصد کاهش، بیشترین درصد کاهش را داراست و بعد از آن

شد. به عبارت دیگر، با کاهش مصرف انرژی به‌ازای تولید هر کیلوگرم کلوچه، در حدود ۲۰۰ گرم از تولید دی‌اکسید کربن معادل جلوگیری خواهد شد. بهینه‌انرژی در کارخانه‌های تولید کلوچه منجر به کاهش ۱۹۰/۳۷۳۹ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل در گرمایش جهانی برای تولید هر تن کلوچه خواهد



شکل ۳- درصد کاهش شاخص‌های زیست‌محیطی بر اساس الگوی مصرف روش تحلیل پوششی داده‌ها

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های زیست‌محیطی بهینه بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌ها

بخش اثر	واحد	انتشار برحسب مصرف بهینه انرژی	کاهش در انتشار
تقلیل منابع غیر آلی	کیلوگرم آنتیموان معادل	۷/۶۰	۰/۵۷
اسیدی شدن	کیلوگرم سولفور دی‌اکسید معادل	۱۶/۵۴	۰/۰۸۳
اختناق دریاچه‌ای	کیلوگرم فسفات معادل	۲/۳۲	۰/۱۰
گرمایش جهانی	کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل	۳۵۴۲/۵۲	۱۹۰/۳۷
نقصان لایه ازن	کیلوگرم تری کلوروفلورمتان معادل	۹/۵۱×۱۰ ^{-۵}	۲/۸۹×۱۰ ^{-۵}
مسمومیت انسان‌ها	کیلوگرم ۱، ۴- دی کلروبنزن معادل	۱۶۷۶/۰۴	۳۶۰/۴۶
مسمومیت آب‌های سطحی	کیلوگرم ۱، ۴- دی کلروبنزن معادل	۲۵۱/۴۵	۸/۰۴
مسمومیت آب‌های آزاد	کیلوگرم ۱، ۴- دی کلروبنزن معادل	۲۳۰۷۹۴/۱	۲۰۳۴۲/۰۳
مسمومیت خاک	کیلوگرم ۱، ۴- دی کلروبنزن معادل	۹۰/۸۴	۳/۳۹
اکسیداسیون فتوشیمیایی	کیلوگرم اتیلن معادل	۰/۸۰۷	۰/۰۲۲

تعیین شد. شکل کلی توابع هدف و قیود هر نهاد با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ تعیین گردید. ضرایب این روابط با استفاده از رابطه رگرسیونی بین مقدار مصرف انرژی هر یک از نهادها با میزان عملکرد و میزان گرمایش جهانی ناشی از مصرف انرژی با استفاده از نرم افزار SPSS برآورد شده است:

بهینه‌یابی عملکرد و شاخص زیست‌محیطی گرمایش جهانی در تولید کلوچه به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه

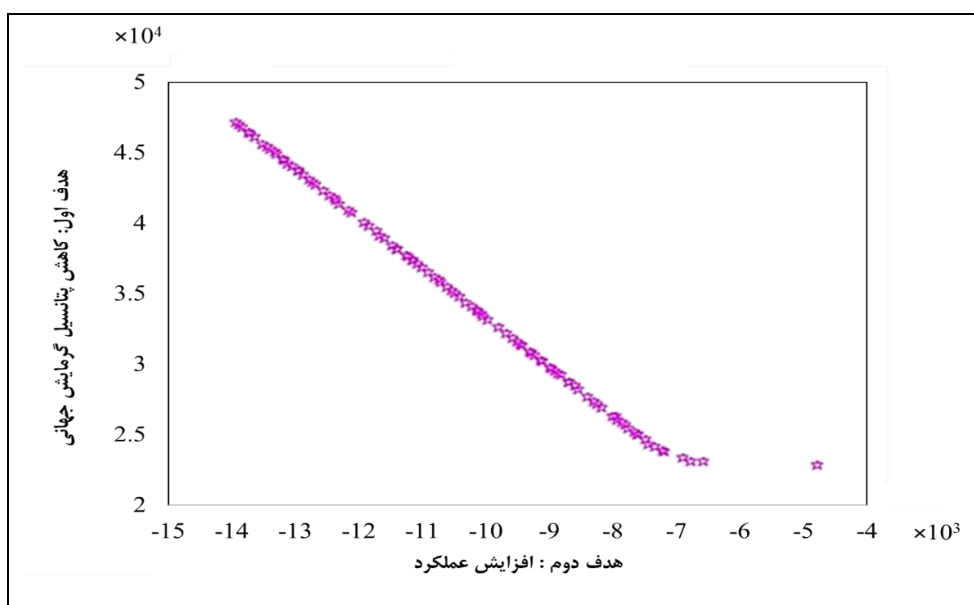
با توجه به آنچه گفته شد، برای بهینه‌یابی چندهدفه توسط الگوریتم ژنتیک ابتدا توابع هدف برای تولید کلوچه تعریف و همزمان بر اساس حداقل و حداکثر میزان مصرف هر یک از نهادها، قیود لازم

$$f(1) = (-1) * (-7461.296 + 0.081 x(1) - 0.017 * x(2) - 0.729 * x(3) + 0.658 * x(4) + 6.116 * x(5) + 20.089 * x(6) - 28.091 * x(7) - 148.460 * x(8) + 0.458 * x(9) + 0.008 * x(10) + 1.038 * x(11) + 4.829 * x(12) + 1.445 * x(13)) \quad (5)$$

$$f(2) = 4238.372 - 0.642 x(1) - 0.108 * x(2) - 8.684 * x(3) - 1.466 * x(4) - 14.495 * x(5) - 8.509 * x(6) - 18.843 * x(7) + 825.893 * x(8) + 0.115 * x(9) - 0.392 * x(10) + 3.900 * x(11) - 7.227 * x(12) - 1.185 * x(13) \quad (6)$$

اجرای الگوریتم در نمودار با ستاره نشان داده شده‌اند. مشخصات الگوریتم در زمان یافتن جواب بهینه عبارت‌اند از تعداد تکرار: ۱۰۰، میزان تقاطع: ۰/۹۹ و میزان جمعیت: ۵۰. برای دستیابی به مجموعه جواب‌های بهینه واقعی، ۵۰ مجموعه جواب بهینه انتخاب شدند. میزان انرژی مصرفی برای هر سری از نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک به‌طور جداگانه محاسبه و ترکیبی که کمترین میزان انرژی ورودی را دارد به‌عنوان ترکیب بهینه انتخاب گردید. میزان بهینه انرژی مصرفی در حالت ایده‌آل در جدول ۸ نشان داده شده است.

در رابطه‌های ۵ و ۶، متغیرهای ۱ تا ۱۳ به ترتیب عبارت‌اند از آرد، شکر، روغن آفتابگردان، روغن سویا، تخم‌مرغ، گردو، نارگیل، آب، الکتریسیته، گاز طبیعی، نیروی کارگری مرد، نیروی کارگری زن و ماشین‌ها. توزیع جبهه بهینه-پارتو حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB در شرایط ایده‌آل، برای تصمیم‌گیری کلان در تولید کلوچه در شکل ۴ ارائه شده است. محور افقی در این نمودار نشان‌دهنده مقدار عملکرد (تابع هدف اول) و محور عمودی نشان‌دهنده شاخص گرمایش جهانی (تابع هدف دوم) است. اعضای جبهه بهینه-پارتو نسل آخر



شکل ۴- جبهه بهینه- پارتو در بخش تصمیم‌گیری کلان در شرایط ایده‌آل برای تولید کلوچه

بر اساس جدول ۸، الگوی مصرف انرژی ارائه شده با الگوریتم ژنتیک منجر به کاهش ۲۱/۶۲ درصد در مصرف انرژی شده است. همچنین، بیشترین صرفه‌جویی در انرژی به کاهش در مصرف گردو (۶۹/۴۴ درصد) و به‌دنبال آن نتایج بهینه‌سازی چندهدفه، میزان گرمایش جهانی را برای تولید کلوجه برابر ۲۹۲۳/۷۴ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل نشان می‌دهد.

جدول ۸- مقادیر مصرف بهینه و ذخیره شده انرژی در تولید کلوجه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه

نهادها (واحد)	مقدار بهینه مصرف انرژی (مگاژول بر تن)	مقدار انرژی ذخیره شده (مگاژول بر تن)	درصد ذخیره شده
۱- آرد	۳۱۳۶/۴۹	۱۸۹۹/۱۴	۳۷/۷۱
۲- شکر	۳۲۲۳/۳۱	۹۸۳/۷۹	۲۳/۳۸
۳- روغن	۱۵۱۹/۴	۳۸۸/۷۱	۲۰/۳۷
۴- تخم‌مرغ	۵۳/۲۴۱	۴۴/۴۷	۴۵/۵۲
۵- گردو	۴/۸۴	۱۱/۰۱	۶۹/۴۴
۶- نارگیل	۱۷/۳۶	-۴/۹۷	-۴۰/۱۲
۷- آب	۰/۰۹۷۸	۰/۰۸۲۱۱	۴۵/۶۲
۸- الکتریسیته	۱۵۲۵/۴۸	۲۷۴/۵۱	۱۵/۲۵
۹- گاز طبیعی	۱۴۱۵۹/۱۱	۲۹۳۵/۱۸	۱۷/۱۷
۱۰- نیروی کارگری	۶۶/۲۱	۳۱/۴۴	۳۲/۱۹
۱۱- ماشین‌ها	۲۲۶/۷۹	۳۸/۰۸	۱۴/۳۸
کل انرژی نهاد	۲۳۹۳۲/۳۵	۶۶۰۱/۳۱	۲۱/۶۲

داده‌ها نشان می‌دهد. در خصوص دیگر نهادهای مصرفی به‌جز نارگیل (افزایش ۴۳/۰۷ درصد در مصرف)، الگوی مصرفی توسط الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش تحلیل پوششی داده‌ها، کاهش در محدوده ۴۲/۴۸ درصد برای آب تا ۱۳/۴۲ درصد برای ماشین‌ها را نشان می‌دهد. می‌توان گفت بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک نسبت به بهینه‌سازی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها نتایج بهتری ارائه کرده است. به این دلیل که در روش تحلیل پوششی داده‌ها، بهینه‌سازی بر اساس واحدهای تصمیم‌گیری بهینه (واحدهای کارا) در منطقه است و به‌عبارتی گزینش بین واحدهای کارا و ناکارا است و برای این کار تنها یک هدف (کاهش مصرف انرژی ورودی) را مد نظر قرار داده است که

مقایسه بین الگوی مصرف انرژی ارائه شده توسط تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چند هدفه در تولید کلوجه

نتایج مقایسه بین الگوی مصرف انرژی ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه و تحلیل پوششی داده‌ها در جدول ۹ برای هر نهاد به تفکیک ذکر شده است. بر این اساس، میزان انرژی مصرفی کل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه، به‌مقدار ۲۰/۸۱ درصد کمتر از انرژی کل مصرفی ارائه شده توسط روش تحلیل پوششی داده‌هاست. بیشترین درصد تفاوت بین نهادهای ورودی در مصرف گردو دیده می‌شود که الگوی ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک میزان آن را ۶۸/۷۸ درصد کمتر از الگوی ارائه شده توسط روش تحلیل پوششی

بنابراین، باید در ابتدا مصرف انرژی را به سمت الگوی مصرف ارائه شده توسط تحلیل پوششی داده‌ها سوق داد و پس از آن به سمت الگوی مصرف الگوریتم ژنتیک چندهدفه حرکت کرد که ملزم به مدیریت قوی و استفاده از روش و تجهیزات نوین در تولید کلوچه در استان گیلان است.

این خود گام بزرگی در جهت حرکت به سوی کاهش مصرف انرژی است. در حالی که الگوی ارائه شده با الگوریتم ژنتیک چند هدفه با در نظر گرفتن هدف‌های تعریف شده، الگویی برای مصرف انرژی ارائه کرده است که خارج از چارچوب محلی و منطقه‌ای برای واحدهای تولیدکننده کلوچه است.

جدول ۹- مقایسه الگوی مصرف انرژی بر اساس روش‌های الگوریتم ژنتیک و تحلیل پوششی داده‌ها در تولید کلوچه

درصد تفاوت (A-B/B)	تحلیل پوششی داده‌ها		میزان واقعی مصرف انرژی (مگاژول بر تن)	نهادها
	انرژی بهینه (B) (مگاژول بر تن)	الگوریتم ژنتیک (A) (مگاژول بر تن)		
-۳۶/۹۴	۴۹۷۴/۲۰	۳۱۳۶/۴۹	۵۰۳۵/۶۴	آرد
-۲۱/۷۰	۴۱۱۶/۶۴	۳۲۲۳/۳۱	۴۲۰۷/۱	شکر
-۱۸/۹۰	۱۸۷۳/۳۸	۱۵۱۹/۴	۱۹۰۸/۱۱	روغن آفتابگردان
-۴۲/۳۶	۹۲/۳۶	۵۳/۲۴۱	۹۷/۷۲	تخم‌مرغ
-۶۸/۷۸	۱۵/۵۲	۴/۸۴	۱۵/۸۶	گردو
۴۳/۰۷	۱۲/۱۳	۱۷/۳۶	۱۲/۳۹	نارگیل
-۴۲/۴۸	۰/۱۷۰۱	۰/۰۹۷۸	۰/۱۸	آب
-۱۴/۷۳	۱۷۸۹/۰۲	۱۵۲۵/۴۸	۱۸۰۰	الکتریسیته
-۱۶/۴۴	۱۶۹۴۵/۲۸	۱۴۱۵۹/۱۱	۱۷۰۹۴/۲۹	گاز طبیعی
-۳۱/۰۷	۹۶/۰۶	۶۶/۲۱	۹۷/۶۶	نیروی کارگری
-۱۳/۴۲	۲۶۱/۹۳	۲۲۶/۷۹	۲۶۴/۸۸	ماشین‌ها
-۲۰/۸۱	۳۰۲۲۱/۵۸	۲۳۹۳۲/۳۵	۳۰۵۳۳/۶۶	کل انرژی ورودی

تحلیل پوششی داده‌ها منجر به کاهش ۱/۰۲ درصد در انرژی مصرفی خواهد شد در حالی که با استفاده از الگوی ارائه شده با الگوریتم ژنتیک چندهدفه این کاهش به ۲۱/۶۲ درصد می‌رسد. نتایج مقایسه الگوی مصرف ارائه شده با تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که با استفاده از الگوی مصرف ارائه شده با الگوریتم ژنتیک، نسبت به روش تحلیل پوششی داده‌ها، ۶۲۶۹/۲۳ مگاژول انرژی بیشتر برای تولید هر تن کلوچه صرفه‌جویی می‌شود که نشان‌دهنده برتری الگوی ارائه شده با الگوریتم ژنتیک چندهدفه است. مهم‌ترین دلیل این امر، چندهدفه بودن الگوی ارائه شده با الگوریتم ژنتیک

نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در تولید کلوچه در استان گیلان است که با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چند هدفه اجرا شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای تولید هر تن کلوچه در استان گیلان، به‌طور متوسط ۳۰۵۳۳/۶۶ مگاژول انرژی مصرف می‌شود که گاز طبیعی بیشترین سهم را دارد. در ازای این میزان انرژی مصرفی، ۳۷۳۲/۰۹ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل به جو منتشر شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد بهینه‌سازی مصرف انرژی با استفاده از الگوی ارائه شده از طریق

به‌منظور تغییر نوع تکنولوژی برای تأمین انرژی وجود ندارد.

در حال حاضر، اکثر تولیدکنندگان کلوچه از دستور پخت سنتی که سال‌هاست از آن استفاده می‌کنند، بهره می‌گیرند و به‌دلیل استقبال نکردن احتمالی مصرف‌کنندگان، تمایلی به تغییر نوع و میزان مواد اولیه در محصولات تولیدشان ندارند. بنابراین برای استقبال تولیدکنندگان از تغییر تکنولوژی و مواد اولیه پخت کلوچه در درجه اول باید راه‌هایی جدید برای افزایش و تأمین سرمایه تولیدکنندگان ارائه داد و از تولیدات نوین (از نظر طعم و مزه) حمایت کرد.

است (افزایش عملکرد و کاهش گرمایش جهانی). از این‌رو می‌توان گفت پتانسیل بالای کاهش مصرف انرژی براساس بهینه‌سازی چند هدفه نه تنها باعث کاهش انرژی مصرفی و شاخص گرمایش جهانی در تولید کلوچه خواهد شد بلکه موجب کارایی مصرف انرژی واحدهای تولیدی، افزایش عملکرد، افزایش سودآوری، کاهش مستقیم و غیرمستقیم هزینه‌ها و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی می‌شود و راه را برای رقابت پایدار با سایر صنایع غذایی مشابه در داخل و خارج از کشور هموار خواهد کرد. گفتنی است که در عمل به دلیل نبود سرمایه بالا و نگرانی صاحبان صنایع از کاهش نقدینگی، انگیزه‌ای

مراجع

- Abolshikhi, M. 2014. Study of life cycle of bread production-case study: Ray county, Tehran. M. Sc. Thesis. University of Tehran. Karaj. Iran. (in Persian)
- Andersson, K. and Ohlsson, T. 1999. Life cycle assessment of bread produced on different scales. *Int. J. Life Cycle Assess.* 4(1): 25-40.
- Anon. 2006. Environmental Management- Life Cycle Assessment- Principles and Framework- ISO 14040.
- Anon. 2014. Results of the survey design from industrial workshops of 10-49 employees. National Statistics Organization. Available at: <https://www.amar.org.ir>. (in Persian)
- Anon. 2017. USDA Food Composition Databases. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Available at: <https://ndb.nal.usda.gov>.
- Baum, A. W., Patzek, T., Bender, M., Renich, S. and Jackson, W. 2009. The visible, sustainable farm: A comprehensive energy analysis of a Midwestern farm. *Crit. Rev. Plant Sci.* 28(4): 218-239.
- Bimpeh, M., Djokoto, E., Doe, H. and Jequier, R. 2006. Life cycle assessment (lca) of the production of homemade and industrial bread in Sweden. KTH, Life Cycle Assessment Course (1N1800).
- Braschkat, J., Patyk, A., Quirin, M. and Reinhardt, G. A. 2004. Life cycle assessment of bread production-a comparison of eight different scenarios. DIAS report.
- 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 Convers. Manage.* 46(4): 655-666.
- Charnes, A., Cooper, W. W. and Rhodes, E. 1978. Measuring the efficiency of decision-making units. *Eur. J. Oper. Res.* 2(6): 429-444.

- Cooper, W. W., Seiford, L. M. and Zhu, J. 2004. Data envelopment analysis. Handbook on data envelopment analysis. Springer US.
- Cooper, W. W., Ruiz, J. L. and Sirvent, I. 2007. Choosing weights from alternative optimal solutions of dual multiplier models in DEA. *Eur. J. Oper. Res.* 180(1): 443-458.
- Davis, L. 1991. A Review of: Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN 0-442-00173-8.
- Drake, L. and Howcroft, B. 1994. Relative efficiency in the branch network of a UK bank: an empirical study. *Omega*. 22(1): 83-90.
- Erdal, G., Esengün, K., Erdal, H. and Gündüz, O. 2007. Energy use and economical analysis of sugar beet production in Tokat province of Turkey. *Energy*. 32(1): 35-41.
- Espinoza-Orias, N., Stichnothe, H. and Azapagic, A. 2011. The carbon footprint of bread. *Int. J. Life Cycle Assess.* 16(4): 351-365.
- Farrell, M. J. 1957. The measurement of productive efficiency. *J. R. Stat. Soc. Series A (General)*. 120(3): 253-290.
- Geerken, T. H., Scholliers, D., De Vooght, C., Spirinckx, V., Van Holderbeke, M. and Vercauteren, A. 2006. Analysis of the 4 Cases 1/5. Case Study: Bread, Sustainability Developments of Product Systems, 1800-2000. The Belgian Science Policy.
- Ghasemi-Mobtaker, H., Akram, A., Keyhani, A. and Mohammadi, A. 2012. Optimization of energy required for alfalfa production using data envelopment analysis approach. *Energy Sustain. Dev.* 16(2): 242-248.
- Guinée, J. B. 2002. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *Int. J. Life Cycle Assess.* 7, 311-313.
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Safarzadeh, D., Ahmadi, E., Nabavi-Pelesaraei, A. and Hosseinzadeh-Bandbafha, E. 2017. Applying data envelopment analysis to evaluation of energy efficiency and decreasing of greenhouse gas emissions of fattening farms. *Energy*. 120, 652-662.
- Karakaya, A. and Özilgen, M. 2011. Energy utilization and carbon dioxide emission in the fresh, paste, whole-peeled, diced, and juiced tomato production processes. *Energy*. 36(8): 5101-5110.
- Khatir, Z., Taherkhani, A. R., Paton, J., Thompson, H., Kapur, N. and Toropov, V. 2015. Energy thermal management in commercial bread-baking using a multi-objective optimisation framework. *Appl. Therm. Eng.* 80, 141-149.
- Kitani, O. 1999. CIGR handbook of agricultural engineering. Energy and Biomass Engineering, ASAE Pub. St Joseph, MI.
- Kulak, M., Nemecek, T., Frossard, E., Chable, V. and Gaillard, G. 2015. Life cycle assessment of bread from several alternative food networks in Europe. *J. Clean. Prod.* 90, 104-113.
- Maupu, P., Berthoud, A., Négri, O., Leguereau, B., Gely, B. and Poupart, A. 2012. Traceability of environmental information all along the cereal industry: from the wheat field to the bakery. Proceedings of the 2nd LCA Conference. Nov. 6-7. Lille, France.
- Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., Jafari, A. and Mohammadi, A. 2011. Optimization of energy consumption for soybean production using Data Envelopment Analysis (DEA) approach. *Appl. Energy*. 88(11): 3765-3772.

- Namdari, M. 2015. Optimization of sugar beet production using colonial competition algorithm and life cycle assessment of sugar production. Ph. D. Thesis. University of Tehran. Karaj, Iran. (in Persian)
- Nia-Jalili, M., Nakhashzadegan, M., Haghghi-Pashiri, A. and Hossein-Nia, S. M. 2013. Investigating the potential of wind and solar energy in Guilan province. Proceedings of The 3rd Conference on Renewable Energies and Scattered Iran Production. April 10-11. Isfahan, Iran. (in Persian)
- Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A. and Monforti, F. 2017. Energy flows and greenhouses gases of EU (European Union) national breads using an LCA (Life Cycle Assessment) approach. *J. Clean. Prod.* 140, 455-469.
- Ozkan, B., Akcaoz, H. and Fert, C. 2004. Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renew. Energy.* 29(1): 39-51.
- Qasari, K., Mehrno, H. and Jafari, A., 2007. Introduction to Fuzzy Data Envelopment Analysis. Islamic Azad University, Qazvin Branch, Iran. (in Persian)
- Rajaeifar, M. A., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Khoshnevisan, B. and Rafiee, S. 2015. Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran. *Renew. Sust. Energy Rev.* 51, 886-898.
- Ronald, K. K. and Samuel J. R. 2008. Modeling Data Envelopment Analysis (DEA) efficient location allocation decision. *Comput. Oper. Res.* 35(2): 457-474
- Shamshirband, S., Khoshnevisan, B., Yousefi, M., Bolandnazar, E., Anuar, N. B., Wahab, A. W. A. and Khan, S. U. R. 2015. A multi-objective evolutionary algorithm for energy management of agricultural systems- a case study in Iran. *Renew. Sust. Energy Rev.* 44, 457-465.
- Taki, M., Ajabshirchi, Y., and Mahmoudi, A. 2012. Prediction of output energy for wheat production using artificial neural networks in Esfahan province of Iran. *J. Agric. Tech.* 8(4): 1229-1242.
- Thankappan, S. 2003. Modelling sustainable energy use for smallholder agriculture in Gujarat: a multi-objective programming approach. Ph. D. Thesis. University of Wales, Aberystwyth.
- Therkelsen, P., Masanet, E. and Worrell, E. 2014. Energy efficiency opportunities in the US commercial baking industry. *J. Food Eng.* 130, 14-22.

Optimization of Energy Consumption and Reduction of Environmental Emissions in Cookie Production using Data Envelopment Analysis and Genetic Algorithm Techniques

M. Khanali*, M. Mohammadnia-Galeshklamei, A. Akram and H. Hosseinzadeh-Bandbafha

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj, Iran. Email: khanali@ut.ac.ir

Received: 12 August 2017, Accepted: 21 April 2018

Abstract

In this study, energy consumption and pollutant emissions in producing local cookies in Guilan province have been assessed. Optimization techniques in energy consumption to reduce pollutant emissions were also shown using two conventional methods: data envelopment analysis (DEA) and multi-objective genetic algorithm (MOGA). Required data, gathered from 30 units preparing local cookies, were used as the preliminary data for energy and environmental analyses. Also, the environmental impacts in cookie production were investigated using life cycle assessment (LCA) approach. Inputs and output were converted to equivalent energies based on equivalent energy values. Results showed that 30533.66 MJ of energy would be needed to produce one ton of cookies. The share of natural gas in providing energy to produce one ton of cookies was calculated as high as 16945.2893 MJ. Based on LCA results, the global warming (GW) index was calculated as 3732.09 kg CO₂ eq. per ton of local cookies. Based on the results of DEA models, the optimum amount of energy consumption is 30221.5856 MJ ton⁻¹, the energy saving percentage is 1.02 %, and the reduction of GW index is 190.3739 kg CO₂ eq. per ton of cookies produced in the units. Following patterns proposed by MOGA would results 21.62% reduction in energy consumption, main part of which associated with cookies in which walnuts are used. Based on the optimization results of MOGA, GW index per production of one ton of cookie was calculated as 2923.74 kg CO₂ eq.

Keywords: Environmental Impacts, Food Industries, Global Warming