



تحول مدل‌ها و استانداردهای بهره‌وری انرژی در صنایع کشاورزی و غذایی: گذار از ارزیابی ایستا به مدیریت یکپارچه و چابک

محمدعلی میسمی^{۱*}، حبیبه نعلبندی^۱، علی میرزازاده^۲

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز maysami@tabrizu.ac.ir

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

چکیده

صنعت کشاورزی و غذایی، به عنوان محور امنیت غذایی و نیز یکی از بخش‌های عمده مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، در کانون توجه راهبردهای توسعه پایدار قرار دارد. رویکردهای رایج در ایران و بسیاری از کشورها ارزیابی‌های کمی مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی در این بخش بوده ولی علیرغم آن، این ارزیابی‌ها و مطالعات عمدتاً مقطعی و فاقد چارچوبی نظام‌مند برای مدیریت مستمر و یکپارچه اهداف انرژی با ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و راهبردی است. این مقاله با هدف ترسیم یک نقشه راه عملیاتی، به بررسی تحول پارادایم از «سنجش ایستا» به «مدیریت پویا» در این صنعت می‌پردازد. روش تحقیق، مرور سیستماتیک و تحلیل محتوای منابع معتبر فارسی و انگلیسی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربست منفرد استانداردهایی چون VDI 4600 (انرژی مورد نیاز تجمعی اولیه) و یا ISO 14044 (ارزیابی چرخه حیات) اگرچه لازم است، اما به تنهایی کافی نیست. دستیابی به بهبود مستمر بهره‌وری انرژی، مستلزم استقرار چارچوب مدیریت انرژی مستمر مبتنی بر استاندارد ISO 50001، و تعمیق تحلیل‌ها با ابزارهایی چون تحلیل اکسرژی است. یکپارچه‌سازی این اجزا در قالب یک مدل چرخه‌ای، و توانمندسازی آن با نرم‌افزارهای تخصصی و فناوری‌های دیجیتال، کلید موفقیت است. مقاله با تحلیل موانع داخلی شناسایی شده در ادبیات موضوع، الگویی مرحله‌ای و بومی‌سازی شده را برای پیاده‌سازی در شرایط صنعت کشاورزی و غذایی ایران ارائه می‌دهد. این الگو بر شروع از پروژه‌های پایلوت، اولویت‌بندی اقدامات کم‌هزینه، و پیوند زدن نتایج بهبود عملکرد با الزامات گزارش‌دهی پایداری ملی و بین‌المللی تأکید دارد.

کلمات کلیدی: بهره‌وری انرژی، سیستم مدیریت انرژی، ISO 50001، ارزیابی چرخه حیات (LCA)، تحلیل اکسرژی، صنایع کشاورزی و غذایی، استانداردها، یکپارچه‌سازی، فناوری دیجیتال



۱. مقدمه

صنعت کشاورزی و غذایی در تقاطع سه ضرورت حیاتی قرار دارد: تأمین امنیت غذایی، حفظ پایداری محیط زیست، و مدیریت بهینه منابع انرژی. برآوردهای سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نشان می‌دهد که سیستم‌های غذایی جهانی مسئول حدود ۳۰ درصد از مصرف انرژی نهایی و سهم عمده‌ای از انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند [۱]. در ایران نیز بخش کشاورزی سهم قابل توجهی از مصرف حامل‌های انرژی را به خود اختصاص داده است. مطالعه کیانی و همکاران (۱۳۹۸) نشان می‌دهد که شدت انرژی در این بخش نسبت به میانگین جهانی در سطح بالاتری قرار دارد که لزوم توجه جدی به بهینه‌سازی را آشکار می‌سازد [۲]. بر اساس آمارها، ایران با مصرف سالانه معادل ۷۵ میلیون بشکه نفت خام در بخش کشاورزی، پس از آمریکا و برزیل در رده سوم جهان قرار دارد اما این در حالی است که از نظر ارزش تولید کشاورزی در جایگاه دهم جهانی است [۳]. این مطلب نشان دهنده شدت انرژی بالا در بخش کشاورزی ایران است. تولید محصول در مزرعه و نگهداری، فرآوری و تبدیل آن در بخش صنایع تبدیلی جزو بخش کشاورزی در مصرف انرژی کشور محسوب می‌شوند. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، داده‌های مرکز آمار ایران حاکی از آن است که گاز طبیعی سهم غالب (۷۸٪) و برق سهم قابل توجهی (۱۳٪) از سبد انرژی صنایع کشور را تشکیل می‌دهند [۴]. در صنایع غذایی، این حامل‌ها به ترتیب عمده‌ترین در فرآیندهای حرارتی (مانند دیگ‌های بخار) و سیستم‌های سرمایش متمرکز شده‌اند [۵].

جدول ۱- سهم فرآیندهای مختلف در صنایع از سبد انرژی [۴، ۵]

بخش مصرف انرژی	سهم تقریبی از کل مصرف	حامل انرژی غالب	مصرف کننده های عمده
فرآیندهای حرارتی	۷۸	گاز طبیعی	دیگ‌های بخار و پخت و پز
سیستم‌های سرمایش و برودت	۱۳	الکتریسیته	سردخانه‌ها و چیلرها
تجهیزات فرآیندی (پمپ‌ها، میکسرها، بسته‌بندی)	۷	الکتریسیته	الکتروموتورهای پرمصرف مانند پمپ‌های انتقال، هموژنایزرها، میکسرها و بسته‌بندی
نورپردازی و سایر	۲	الکتریسیته	-

داده‌های جدول ۲ مصرف انرژی از منابع مختلف را در یک واحد نمونه صنایع غذایی نشان می‌دهد که توسط FSTC^۱ برآورد شده و اهمیت نسبی بخش‌های مختلف در مصرف انرژی و بهینه‌سازی انرژی در آشپزخانه‌های صنعتی از روی آن قابل مشاهده است. بر اساس این جدول، نیاز به انرژی برای پخت و پز بیشترین سهم مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد (۴۰٪) که با فاصله قابل توجهی مصرف انرژی در سامانه‌های سرمایش و تبرید قرار دارد (۲۵٪). بررسی این اطلاعات، زمینه‌های عمده در راستای تلاش‌ها برای افزایش بهره‌وری انرژی را نشان می‌دهد [۶].

^۱ Food Service Technology Centre



جدول ۲- توزیع سهم مصرف‌کننده‌های عمده انرژی در یک صنعت غذایی نمونه [۶]

بخش مصرف‌کننده انرژی	سهم تقریبی از کل مصرف انرژی	اقدام بهینه‌سازی کلیدی
تجهیزات پخت و پز (اجاق، فر، دیگ)	۴۰٪	استفاده از فناوری‌های با راندمان بالا مانند هیترهای القایی
سیستم‌های تهویه و هود	۲۵٪	نصب سیستم‌های تهویه مبتنی بر تقاضا (DCV)
سرمایش و یخچال‌ها	۱۵٪	عایق کاری، نگهداری منظم و استفاده از کمپرسورهای اینورتر
آب گرم و شست‌وشو	۱۰٪	بازیافت حرارت (Heat Recovery) و عایق کاری لوله‌ها
روشنایی و سایر	۱۰٪	جایگزینی با LED و استفاده از حسگرهای حرکتی

پاسخ اولیه به این چالش در ادبیات پژوهشی ایران و جهان، عموماً در قالب ارزیابی‌های ایستایی (استاتیک) انرژی ارائه شده است. این قبیل مطالعات که محاسبه شاخص‌هایی مانند «نسبت خروجی به ورودی انرژی» یا «مصرف ویژه انرژی» را هدف قرار می‌دهند، بدون شک گامی ضروری برای شناخت الگوی مصرف محسوب می‌شوند [۷]. با این حال، این رویکردها از چند محدودیت بنیادین رنج می‌برند: نخست آنکه غالباً مقطعی و فاقد چشم‌انداز چرخه حیات کامل هستند. دوم آنکه فاقد چارچوبی برای بهبود مستمر هستند؛ به این معنا که پس از اندازه‌گیری، سازوکار مشخصی برای برنامه‌ریزی، اجرا و پایش اقدامات اصلاحی ارائه نمی‌دهند. سوم آنکه تمرکز صرف بر کمیت انرژی داشته و از کیفیت آن (قابلیت انجام کار مفید) غافلند. این کاستی‌ها به ویژه در تحلیل فرآیندهای حرارتی و سرمایشی صنایع غذایی می‌تواند به شناسایی نادرست اولویت‌های بهینه‌سازی بینجامد.

مرور پژوهش‌های داخلی نیز گویای پراکندگی روش‌ها و نبود چارچوبی استاندارد است. همان‌گونه که می‌سمی و برگ (۱۳۹۳) نیز پیشتر اشاره کرده‌اند، اختلاف در تعاریف، مرزهای سیستم و ضرایب انرژی، مقایسه‌پذیری و اتکاپذیری نتایج را با مشکل مواجه ساخته است [۸]. از سوی دیگر، مطالعاتی که به بررسی موانع پیاده‌سازی راهکارهای بهینه‌سازی انرژی می‌پردازند، نشان می‌دهند که چالش‌هایی چون محدودیت منابع مالی، ناکافی بودن دانش فنی، و نبود نظام تشویقی مؤثر، گسترش رویکردهای نظام‌مند را در صنایع غذایی ایران با دشواری روبرو ساخته است [۹].

با توجه به این پیشینه، پرسش اصلی این مقاله آن است که الگوی بهینه برای یکپارچه‌سازی استانداردها، مدل‌های تحلیلی و فناوری‌های نوین به منظور دستیابی به بهبود مستمر و قابل اندازه‌گیری در بهره‌وری انرژی صنایع کشاورزی و غذایی ایران چگونه باید باشد؟ در پاسخ، این مقاله پس از تبیین روش تحقیق، به تحلیل طبقه‌بندی‌شده استانداردهای کلیدی و مدل‌های تحلیلی پیشرفته می‌پردازد. سپس با تلفیق این مبانی و با در نظر گرفتن چارچوب‌های کلان حکمرانی انرژی، یک مدل مفهومی یکپارچه و گام‌به‌گام را برای پیاده‌سازی در شرایط بومی ارائه می‌دهد. در نهایت، بر اساس یافته‌ها، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی در سطوح مختلف سیاست‌گذاری، صنعت و پژوهش عرضه خواهد شد.



۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش با نگاه توصیفی-تحلیلی به روش‌ها و استانداردهای معرفی شده در زمینه ارزیابی مصرف انرژی در بنگاه‌ها و سامانه‌های انرژی پرداخته است. هدف، سنتز نقادانه روش‌های ایستا و چارچوب و ادبیات موجود در آنها بوده و بدنبال معرفی و ارائه یک چارچوب مفهومی یکپارچه است که روش‌های پویا و مستمر ارزیابی معرفی شده توسط استانداردهای متاخر ارائه کرده‌اند. در این مسیر و با هدف کنکاش در روش‌ها و نتایج و تحلیل‌های برآمده از این روش‌ها و مواردی از مطالعات بکارگیرنده این روش‌ها و استانداردها، شناختی کلی از روش‌های مختلف حاصل و رویکردی مستمر و چرخه‌ای برای فرآیند ارزیابی مصرف انرژی و انتشارات با هدف بهبود مستمر بهره‌وری انرژی ارائه شود. بر اسن اساس، روش کار این مطالعه در گام‌های زیر انجام پذیرفت:

۱. **جستجوی هدفمند:** جستجو در پایگاه‌های علمی معتبر بین‌المللی و داخلی با کلیدواژه‌های ترکیبی مرتبط با محورهای مقاله (مانند: Energy Efficiency Agriculture, ISO 50001 Food Industry, LCA Iran Agriculture, Exergy Analysis, نرم افزار مدیریت انرژی، برآورد انتشارات ناشی از مصرف انرژی و ارزیابی سامانه‌ها از منظر استانداردهای مرتبط، بهبود بهره‌وری انرژی بصورت مستمر و مداوم و ...) انجام شد.

۲. **گزینش منابع:** معیارهای گزینش شامل: ارتباط مستقیم با موضوع، انتشار در مجلات معتبر یا توسط نهادهای شناخته‌شده، و اولویت با مقالات منتشرشده در دهه اخیر (با وجود استثنا برای منابع پایه) بود. تلاش شد تا توازن بین منابع انگلیسی‌زبان (جهت معرفی استانداردها و تجربیات جهانی) و منابع فارسی (جهت انعکاس وضعیت، کاستی‌ها و پژوهش‌های داخلی) برقرار شود. موارد معدودی از منابع که با بکارگیری عملی روش‌های مرتبط نتایجی را گزارش کرده‌اند از نگاه صرفا اشاره به کاربرد و صرفنظر از نتایج بدست آمده توسط آنها مورد اشاره قرار گرفتند.

۳. **استخراج و تحلیل:** داده‌های کلیدی هر منبع شامل: تعاریف، اصول، مزایا، محدودیت‌ها، زمینه کاربرد و یافته‌های تجربی استخراج و در ماتریسی تحلیلی دسته‌بندی شد.

۴. **سنتز و الگوسازی:** اطلاعات طبقه‌بندی‌شده برای پاسخ به پرسش پژوهش تحلیل و در نهایت مدل مفهومی یکپارچه پیشنهادی مبتنی بر ادغام منطقی اجزاء و تطبیق با مقتضیات ایران طراحی گردید.

چارچوب تحلیلی مقاله بر سه رکن متعامل استوار است که در طول مقاله بسط می‌یابند:

- بررسی ابزارهای ارزیابی پیشرفته (شناخت) سامانه‌ها از منظر مصرف انرژی: شامل بررسی استانداردهای VDI 4600 ISO 14044 [۱۰] و مدل تحلیل اکسرژی.
- مدیریت نظام‌مند (اقدام): شامل استاندارد ISO 50001 و خانواده مکمل آن (ISO 50002, 50006, 50015).



- یکپارچه‌سازی و توانمندسازی: شامل نقش نرم‌افزارهای تخصصی، فناوری‌های دیجیتال و ادغام با چارچوب‌های کلان (مانند اهداف توسعه پایدار).

۳. نتایج و بحث

۱.۳. مرور استانداردهای ارزیابی مصرف انرژی: مبانی شناخت سیستم انرژی

۱.۱.۳. استاندارد VDI 4600 و مفهوم انرژی مورد نیاز تجمعی (CED^1) اولیه

این استاندارد که توسط انجمن مهندسان آلمان ارائه شده، روشی برای محاسبه کل انرژی اولیه مصرف‌شده در چرخه حیات یک محصول است [۱۱]. سادگی نسبی و شفافیت آن باعث شده تا به عنوان شاخصی پرکاربرد در مطالعات ارزیابی انرژی کشاورزی در سطح جهان و نیز ایران مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، در مطالعاتی که به تحلیل انرژی محصولات زراعی ایران می‌پردازند، اغلب از منطق CED برای جمع‌بندی معادل نهاده‌ها استفاده می‌شود. با این حال، نقد اصلی به این روش، بی‌توجهی به کیفیت انرژی است. در این روش، یک مگاژول برق و یک مگاژول حرارت کم‌دمای کاملاً هم‌ارز در نظر گرفته می‌شوند که می‌تواند در تحلیل سیستم‌های دارای تبدیل انرژی (مانند نیروگاه‌های CHP در صنایع غذایی) گمراه‌کننده باشد [۱۲]. بنابراین، CED بیشتر به عنوان یک شاخص اولیه و میانی مفید است تا ابزاری نهایی برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده بهینه‌سازی.

۲.۱.۳. ارزیابی چرخه حیات (LCA^2) و استانداردهای سری ISO 14040

ارزیابی چرخه حیات چارچوبی استاندارد و جامع‌تر است که به ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی یک محصول در تمام مراحل عمر آن می‌پردازد [۱۳]. برخلاف CED، LCA یک ارزیابی چندمعیاره ارائه می‌دهد و معیارهایی مانند پتانسیل گرمایش جهانی، اسیدی‌سازی و یوتریفیکاسیون را در کنار مصرف انرژی می‌سنجد. این جامعیت، LCA را به ابزاری ضروری برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر پایداری تبدیل کرده است. در سطح جهانی، مطالعاتی مانند مطالعه روی و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده‌اند که چگونه LCA می‌تواند مبادلات (Trade-offs) پنهان را آشکار کند؛ مثلاً اینکه کاهش مصرف سوخت در یک روش کشت ممکن است منجر به افزایش مصرف آفت‌کش و اثرات سمیت شود [۱۴]. در ایران نیز گام‌هایی در جهت کاربرد این استاندارد برداشته شده است. برای نمونه، مطالعه نوروزی و رضوی (۱۳۹۹) با بهره‌گیری از نرم‌افزار SimaPro به انجام ارزیابی چرخه حیات تولید شکر از چغندر قند پرداخته و نقاط داغ زیست‌محیطی این زنجیره را شناسایی کرده است [۱۵]. چنین مطالعاتی بستر مناسبی برای اولویت‌بندی پروژه‌های بهبود در مقیاس کلان فراهم می‌آورند.

۳.۱.۳. تحلیل اکسرژی: گذار از کمیت به کیفیت انرژی

برای رفع نقیصه کیفی در تحلیل‌های مرسوم، مفهوم اکسرژی بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک مطرح می‌شود. اکسرژی، بخشی از انرژی است که قابلیت انجام کار مفید دارد [۱۶]. تحلیل اکسرژی محل و میزان اتلاف واقعی کیفیت انرژی را در

¹ Cumulative Energy Demand

² Life Cycle Assessment



سیستم‌های پیچیده نشان می‌دهد. برای مثال، در یک سیستم خشک‌کن صنعتی، استفاده از حرارت دما-بالا برای فرآیند خشک‌کردن دما-پایین، موجب اتلاف عظیم اکسرژی می‌شود؛ اگر چه ممکن است از لحاظ تحلیل انرژی، تفاوتی در مصرف کل انرژی آنها دیده نشود. این تحلیل به مهندسان کمک می‌کند تا راهکارهایی مانند بازیافت حرارت یا استفاده از منابع حرارتی با دمای منطبق با فرآیند را پیشنهاد دهند. کاربرد این تحلیل در پژوهش‌های داخلی نیز در حال توسعه است. به عنوان مثال، موسوی و فلاح (۱۳۹۸) با انجام تحلیل اکسرژی بر روی یک خشک‌کن خورشیدی-هیبریدی برای زعفران، اجزای دارای بیشترین اتلاف را شناسایی و راهکارهای افزایش بازده را ارائه نموده‌اند. تلفیق این تحلیل با استانداردهای مدیریتی، می‌تواند اثربخشی اقدامات بهینه‌سازی را به شدت افزایش دهد [۱۷].

این روش‌های برآورد مصرف انرژی گامی آغازین و ضروری در شناخت جریان انرژی در سامانه‌های مختلف است. نتایج وضعیت مصرف انرژی و به تبع آن انتشارات در اتمسفر را در سیستم را مشخص می‌کند. امکان مقایسه سامانه‌های مختلف بر اساس نتایج بررسی آنها وجود دارد و از این حیث نتایج مورد استفاده مفید می‌توانند قرار گیرند. اما معمولاً با اتمام مطالعه و اخذ نتایج، ارزیابی مستمر و ادامه‌دار صورت نمی‌گیرد. فواصل ارزیابی ممکن است بسیار طولانی باشد و نتایج ارزیابی قبلی در ارزیابی‌های بعدی لحاظ نشود. از این حیث نتایج بصورت ایستا باقی می‌مانند، و بنابراین در بهبود مداوم و مستمر همان سامانه مورد استفاده آنچنانی قرار نمی‌گیرند. راه‌حل گذر از سیستم‌های ارزیابی ایستا به سیستم‌های ارزیابی مستمر و مداوم و ارزیابی‌های ادامه‌دار و به هم پیوسته یا یکپارچه است. در ارزیابی مستمر و یکپارچه، اثر هرگونه تغییر در وضعیت فعالیت سامانه‌های مورد ارزیابی در نتایج بدست آمده مشاهده شده و امکان مقایسات درون سامانه‌ای در زمان‌های مختلف را مقدور می‌سازد. بنابراین، ضروری است تغییر در رویکردها از ارزیابی‌های ایستا (استاتیک) به ارزیابی‌های مستمر و پویا (دینامیک) ایجاد شود که در ادامه استانداردها و روش‌های تبیین شده در این مسیر مورد ملاحظه قرار می‌گیرند.

۳. ۲. استانداردهای مدیریت انرژی: چارچوبی برای بهبود مستمر

۳. ۲. ۱. استاندارد ISO 50001: از اندازه‌گیری تا مدیریت

اگر استانداردهای بخش پیشین ابزار شناسایی و اولویت‌بندی هستند، ISO 50001 چارچوبی برای اقدام، پایش و بهبود مستمر عملکرد انرژی در سطح سازمان است. این استاندارد بین‌المللی بر مبنای چرخه PDCA^۱ (برنامه‌ریزی-اجرا-بررسی-اقدام) بنا شده و بر یکپارچه‌سازی مدیریت انرژی با فرآیندهای اصلی کسب‌وکار تأکید دارد [۱۸]. اثربخشی این چارچوب در مطالعات جهانی به کرات نشان داده شده است. برای نمونه، پژوهشی در صنایع سوئد حاکی از نرخ بهبود بهره‌وری انرژی بالاتر در شرکت‌های دارای سیستم مدیریت انرژی مستقر بود [۱۹]. کلید موفقیت در این استاندارد، انجام برنامه‌ریزی انرژی است که طی آن جنبه‌های انرژی بر معنادار (SEUs) شناسایی، شاخص‌های عملکرد (EnPIs) تعریف، و اهداف کمی بهبود تعیین می‌گردد. در ایران، گرچه استقرار این استاندارد در صنایع غذایی فراگیر نیست، اما نمونه‌های موفقیتی وجود دارد. در یک مطالعه موردی، فرآیند استقرار ISO 50001 در یک کارخانه تولید کنسانتره میوه بررسی و صرفه‌جویی‌های محقق شده گزارش شد [۲۰].

^۱ Plan-Do-Check-Act



۳. ۲. ۲. استانداردهای مکمل: تقویت ستون‌های عملیاتی

پیاده‌سازی مؤثر ISO 50001 مستلزم بهره‌گیری از استانداردهای پشتیبان است. تعدادی از استانداردهای مکمل و پشتیبان عبارتند از:

- **ISO 50002 (ممیزی انرژی):** روشی سیستماتیک برای تشخیص فرصت‌های بهبود. یک ممیزی دقیق می‌تواند نقاط اتلاف در یک سردخانه یا خط پاستوریزاسیون را آشکار کند [۲۱].
- **ISO 50006 (شاخص‌های عملکرد انرژی):** راهنمای تعریف شاخص‌های عملکرد انرژی (EnPI) معنادار و پایه عملکرد (EnB²) برای پایش پیشرفت [۲۲].
- **ISO 50015 (اعتبارسنجی صرفه‌جویی):** ارائه روش‌های آماری برای اثبات صرفه‌جویی حاصل از پروژه‌ها و جداسازی اثر آن از سایر عوامل، که برای توجیه سرمایه‌گذاری حیاتی است [۲۳].

۳. ۲. ۳. همگرایی LCA و EnMS: پیوند استراتژیک شناخت و اقدام

نوآوری در مدیریت نوین انرژی، ایجاد پل بین این دو حوزه است. خروجی یک مطالعه LCA مراحل تولید کربن را شناسایی و مشخص می‌کند [۲۴]؛ مانند شناسایی مرحله «تولید کود» (به عنوان نقطه داغ^۳ تولید کربن) می‌تواند به صورت مستقیم اولویت‌های استراتژیک (SEUs^۴) را برای سیستم مدیریت انرژی (EnMS^۵) تعیین کند. به این ترتیب، EnMS بر روی مسائلی متمرکز می‌شود که بیشترین تأثیر را از منظر چرخه حیات دارند. این رویکرد یکپارچه، کارایی سرمایه‌گذاری‌های بهینه‌سازی را به حداکثر می‌رساند.

۳. ۳. فناوری‌های توانمندساز: نرم‌افزار و دیجیتال‌سازی

پیاده‌سازی عملی چارچوب‌های فوق بدون ابزارهای فناورانه، دشوار و پرهزینه است.

- **نرم‌افزارهای تخصصی:** نرم‌افزارهایی مانند SimaPro و openLCA برای انجام مطالعات LCA، نرم‌افزارهای مهندسی (مانند EES, Aspen Plus) برای تحلیل اکسرژی و شبیه‌سازی، و پلتفرم‌های مدیریت انرژی (مانند DEXMA) برای پشتیبانی از چرخه PDCA در ISO 50001 ضروری هستند. این ابزارها دقت و سرعت را افزایش می‌دهند.
- **فناوری‌های دیجیتال:** اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT) با نصب حسگرهای ارزان، امکان پایش لحظه‌ای پارامترهای کلیدی تجهیزات را فراهم می‌کند. تحلیل این داده‌های حجیم با هوش مصنوعی می‌تواند منجر به شناسایی الگوهای پنهان مصرف، پیش‌بینی بار، تشخیص ناهنجاری و کنترل بهینه شود. این فناوری‌ها مدیریت انرژی را از حالت دستی و واکنشی به وضعیت خودکار و پیش‌گیرانه ارتقا می‌دهند.

¹ Energy Performance Indices

² Energy Base

³ Hot Spot

⁴ Strategic Energy Units

⁵ Energy Management System



۳. ۴. ارائه یک مدل یکپارچه برای شرایط ایران

با تلفیق مباحث فوق و با توجه به شناخت حاصل از منابع داخلی در مورد چالش‌هایی مانند محدودیت مالی، پراکندگی واحدها و ضعف زیرساخت پایش [۲۵]، مدل مرحله‌ای زیر برای پیاده‌سازی در صنعت کشاورزی و غذایی ایران پیشنهاد می‌شود. این مدل به صورت یک چرخه تکرارشونده و یادگیرنده طراحی شده است.

فاز اول: آماده‌سازی و اولویت‌بندی (شناخت)

- **گام ۱ - سطح کلان:** انجام یک مطالعه LCA ساده‌شده (Screening LCA) برای یک یا دو محصول استراتژیک ملی (مانند گندم یا چغندر قند) یا در سطح یک کشت و صنعت بزرگ، به منظور شناسایی ۲-۳ نقطه داغ اصلی انرژی و کربن در زنجیره ارزش. این کار می‌تواند توسط نهادهای تحقیقاتی یا مشاوران متخصص انجام شود.
- **گام ۲ - سطح واحد:** انتخاب یک سایت پیشرو (کارخانه فرآوری یا مزرعه بزرگ به عنوان پایلوت). انجام ممیزی انرژی (مطابق ISO 50002) بر روی نقاط داغ شناسایی شده یا مصرف‌کنندگان عمده. نصب سیستم پایش پایه (کنتورهای فرعی) برای جمع‌آوری داده اولیه.

فاز دوم: استقرار و بهبود (اقدام)

- **گام ۳ - مدیریت:** استقرار چارچوب ISO 50001 در سایت منتخب. تعیین نقاط ممیزی‌شده به عنوان جنبه‌های انرژی‌بر معنادار (SEUs). تعیین شاخص‌های عملکرد انرژی (EnPI) و پایه عملکرد (EnB) برای هر SEU و تدوین برنامه اقدام عملیاتی.
- **گام ۴ - بهینه‌سازی عمیق:** برای SEU های پیچیده و پراهمیت (مانند دیگ‌های بخار، سیستم‌های تراکمی سرمایش، خشک‌کن‌ها)، انجام تحلیل اکسرژی یا شبیه‌سازی ترمودینامیکی به منظور طراحی دقیق‌ترین و کارآمدترین راهکار فنی (مانند پروژه‌های بازیافت حرارت، بهینه‌سازی سرمایش، ارتقای عایق‌بندی).
- **گام ۵ - اجرا و هوشمندسازی:** اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی منتخب. تکمیل سیستم پایش با حسگرهای IIoT برای گردآوری داده‌های دقیق‌تر از سطح تجهیزات. اعتبارسنجی صرفه‌جویی محقق‌شده مطابق با روش‌های استاندارد (ISO 50015) برای اثبات بازگشت سرمایه.

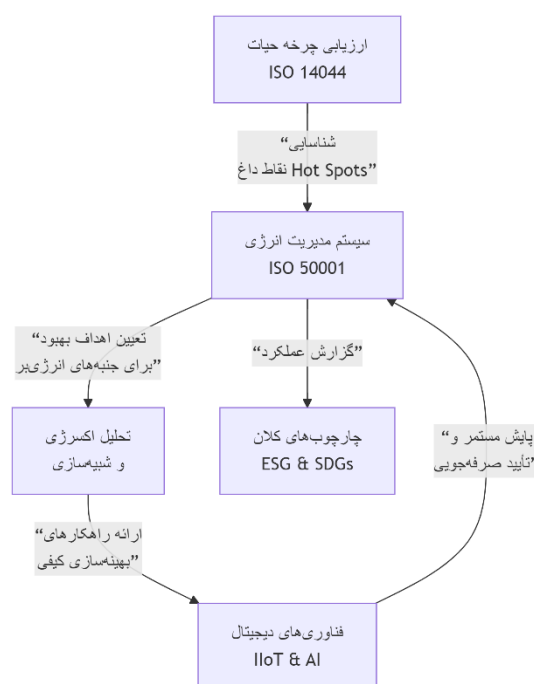
فاز سوم: نهادینه‌سازی و توسعه (یکپارچه‌سازی)

- **گام ۶ - گزارش و یادگیری:** انعکاس نتایج عملکرد (صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار کربن) در گزارش‌های سالانه پایداری شرکت. مستندسازی درس‌های آموخته و فرآیندها.
- **گام ۷ - توسعه مقیاس:** تعمیم چارچوب، فرآیندها و تجربیات کسب‌شده به سایر سایت‌های همگن در مجموعه یا گسترش دامنه به محصولات دیگر.



- گام ۸- اتصال به چارچوب کلان: پیوند دادن شاخص‌های عملکرد انرژی و کربن با الزامات ملی (مانند استاندارد ملی ایزیری^۱ ۱۲۰۰۱ و سیاست‌های کلان انرژی [۲۶]) و چشم‌اندازهای بین‌المللی (مانند گزارش‌دهی ESG^۲ و اهداف توسعه پایدار). این گام، بهبود عملکرد انرژی را از یک پروژه فنی به یک مزیت راهبردی و رقابتی تبدیل می‌کند.

این مدل چرخه‌ای، رویکردی واقع‌بینانه، کم‌خطر و مقیاس‌پذیر ارائه می‌دهد که از «شناخت مبتنی بر داده» شروع می‌کند، بر «اقدام متمرکز و کنترل‌شده» تأکید دارد و در نهایت به «نهادینه‌سازی و توسعه راهبردی» می‌انجامد. این مدل بر پایه چرخه «برنامه‌ریزی-اجرا-بررسی-اقدام (PDCA)» که هسته استاندارد ISO 50001 است، طراحی شده است. همچنین ایده یکپارچه‌سازی ممیزی انرژی در یک چارچوب مدیریتی مستمر، در ادبیات موضوع مورد تأکید قرار گرفته است. چارچوب مرحله‌ای فوق در شکل ۱ به صورت یک چرخه بهبود مستمر (PDCA) ترسیم شده است. این رویکرد که مبتنی بر استاندارد ISO 50001 است، از محدودیت‌های روش‌های صرفاً مقطعی مانند ممیزی انرژی مجزا فراتر رفته و بهبود سیستماتیک و دائمی عملکرد انرژی را ممکن می‌سازد.



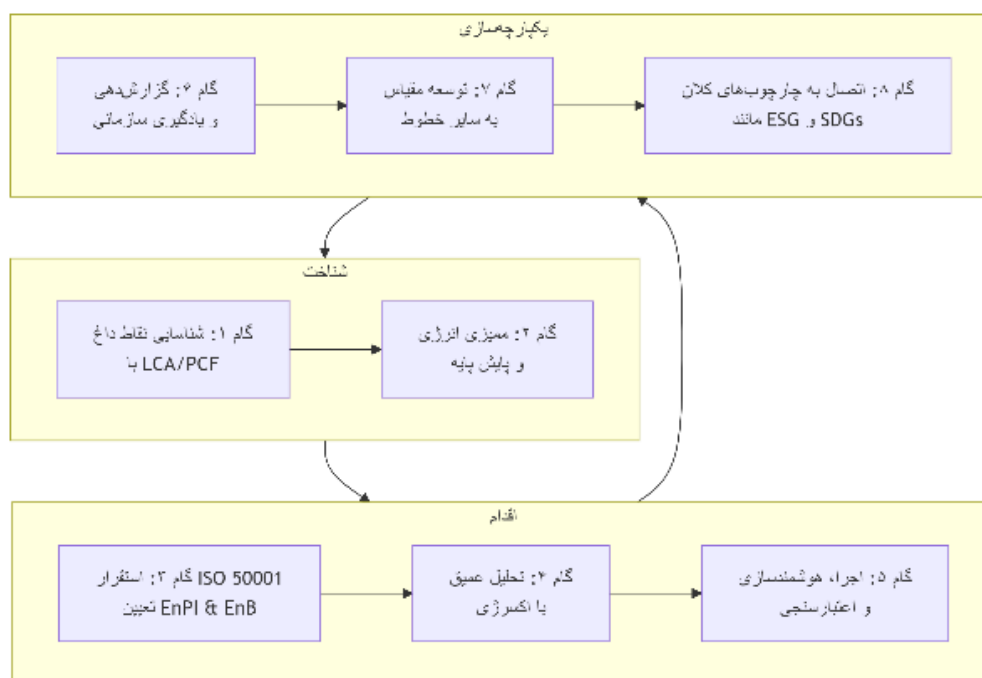
شکل ۱- مدل چرخه‌ای بهبود مستمر مدیریت انرژی (با استناد به اصول ISO 50001 و PDCA) [۱۸]

شکل ۲ گام‌های ۸ گانه اشاره شده در بالا و ارتباط آنها را با همدیگر که چارچوب اصلی مقاله حاضر است را به صورت بصری نشان می‌دهد. مطابق این شکل مطالعه و بررسی بهره‌وری انرژی در قالب یک چرخه

¹ ISIRI 12001

² Environmental Social Governmental

بهبود مستمر است. توضیح هر گام در مطالب فوق اشاره شد و این نمودار، درک کلی از ارتباط و توالی مراحل را آسان می‌کند. اثربخشی واقعی زمانی حاصل می‌شود که استانداردها نه به صورت جزیره‌ای، بلکه در یک زنجیره ارزش افزوده با هم تلفیق شوند. شکل ۲ نشان می‌دهد چگونه خروجی‌های یک استاندارد (مانند شناسایی نقاط داغ در LCA) می‌تواند به عنوان ورودی برای مرحله بعد (مانند تعیین اهداف در EnMS) مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد یکپارچه در پروژه‌ها و مطالعات موفق بین‌المللی به کار گرفته شده است.



شکل ۲- هم‌افزایی و ارتباط منطقی بین گام‌های لازم در یک سیستم یکپارچه افزایش بهره‌وری سیستم‌ها با محوریت استاندارد ISO 50001

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

صنعت کشاورزی و غذایی ایران در آستانه یک تحول ضروری در مدیریت منابع قرار دارد. این مقاله نشان داد که عبور از رویکردهای سنتی و پراکنده، مستلزم پذیرش یک نگرش سیستمی و یکپارچه است. در این نگرش، استانداردهای ارزیابی (LCA) به عنوان چراغ راهنما، استانداردهای مدیریت (ISO 50001) به عنوان ساختار بهبود، و تحلیل‌های کیفی (اکسرژی) و فناوری‌های دیجیتال به عنوان تقویت‌کننده‌های دقت و کارایی عمل می‌کنند. مدل ارائه‌شده، مسیری مرحله‌ای و منطبق با شرایط چالش‌برانگیز اما پرتأثیر ایران ترسیم می‌کند. بر این اساس، پیشنهادهای کاربردی زیر در سه سطح ارائه می‌گردد:



الف) سطح سیاست‌گذاری و نهادهای حاکمیتی:

۱. تدوین برنامه راهبردی: تدوین «برنامه ملی بهره‌وری انرژی و کاهش کربن زنجیره تأمین غذا» با محوریت استانداردهای ISO 50001 و ISO 14067 و با هماهنگی دستگاه‌های ذی‌ربط (جهاد کشاورزی، صنعت، معدن و تجارت، نیرو).
۲. طراحی مشوق‌های هوشمند: ایجاد سازوکارهای تشویقی مالیاتی، اعتباری و گمرکی برای واحدهایی که گواهی ISO 50001 اخذ می‌کنند، پروژه‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تحلیل فنی (مانند تحلیل اکسرژی) اجرا می‌کنند، یا ردپای کربن محصولات صادراتی خود را محاسبه و کاهش می‌دهند.
۳. حمایت از توسعه بازار خدمات: تقویت شرکت‌های خدمات انرژی (ESCO) تخصص‌یافته در بخش کشاورزی و غذا از طریق تضمین خرید خدمات، مشارکت در ریسک پروژه‌ها یا ارائه تسهیلات کم‌بهره.
۴. ظرفیت‌سازی و آگاه‌سازی: الزام استاندارد ملی ایزیری ۱۲۰۰۱ (معادل ISO 50001) برای صنایع بزرگ تبدیلی و برگزاری کمپین‌های ترویجی و دوره‌های آموزشی برای واحدهای کوچک و متوسط.

ب) سطح صنعت و بنگاه‌های اقتصادی:

۱. شروع با پایلوت و اقدامات زودبازده: انتخاب یک خط تولید، مزرعه یا سایت به عنوان پروژه پایلوت. اولویت دادن به اقدامات کم‌هزینه و عملیاتی با بازده سریع (بهبود تعمیر و نگهداری، عایق کاری، تنظیم تجهیزات، بهینه‌سازی بار) برای ایجاد اعتماد، صرفه‌جویی اولیه و جذب سرمایه برای پروژه‌های بزرگ‌تر.
۲. سرمایه‌گذاری بر پایش و اندازه‌گیری: تخصیص بودجه اولیه به نصب کنتورها، حسگرهای پایه و سیستم‌های پایش ساده قبل از سرمایه‌گذاری‌های سنگین در فناوری‌های جدید. «مدیریت بدون اندازه‌گیری ممکن نیست».
۳. توانمندسازی نیروی انسانی: آموزش مستمر مدیران، مهندسان و حتی اپراتورها در زمینه مفاهیم پایه مدیریت انرژی، قرائت داده‌ها، شناسایی اتلاف‌های واضح و نقش هر فرد در کاهش هزینه‌های تولید.
۴. همکاری با فناوران داخلی: جست‌وجوی همکاری با شرکت‌های دانش‌بنیان، استارت‌آپ‌ها و مراکز تحقیقاتی داخلی برای توسعه یا بومی‌سازی راهکارهای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مدیریت انرژی، پایش هوشمند و تحلیل داده که متناسب با بودجه، مقیاس و شرایط عملیاتی واحدهای ایرانی باشد.

ج) سطح دانشگاه‌ها، پژوهش و توسعه:

۱. بازنگری در سرفصل‌ها: گنجاندن واحدهای درسی اجباری یا اختیاری در مورد اصول و پیاده‌سازی ISO 50001، ارزیابی چرخه حیات (LCA)، تحلیل اکسرژی و کاربرد نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدیریت انرژی در رشته‌های مهندسی کشاورزی، مهندسی صنایع غذایی، مهندسی انرژی و مدیریت در مقاطع مختلف.



**اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی**
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



۲. **هدایت پژوهش‌های کاربردی:** جهت‌دهی پایان‌نامه‌های تحصیلات تکمیلی و پروژه‌های تحقیقاتی به سمت حل مسائل واقعی صنعت از طریق پیاده‌سازی بخشی از مدل یکپارچه پیشنهادی (مانند انجام ممیزی انرژی در یک صنعت خاص، تحلیل اکسرژی یک فرآیند فرآوری، محاسبه و تحلیل ردپای کربن یک محصول صادراتی، طراحی یک سیستم پایش ساده).

۳. **ایجاد پل ارتباطی:** توسعه و تقویت کنسرسیوم‌ها یا کلینیک‌های مشترک صنعت و دانشگاه با محوریت بهره‌وری انرژی و پایداری در کشاورزی و غذا، به منظور تسهیل انتقال دانش، فناوری و تعریف پروژه‌های حل مسئله مشترک.

حرکت در این مسیر یکپارچه، اگرچه نیازمند عزم، سرمایه‌گذاری اولیه و تغییر نگرش است، اما در بلندمدت نه تنها به کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید و افزایش سودآوری می‌انجامد، بلکه تاب‌آوری بنگاه‌ها در برابر شوک‌های قیمتی انرژی، رقابت‌پذیری محصولات در بازارهای بین‌المللی حساس به کربن، و اعتبار ملی را در عرصه تعهدات محیط‌زیستی ارتقا خواهد بخشید. آینده از آن سیستم‌های غذایی هوشمند، کم‌مصرف و پایدار است و ایران نیز با بهره‌گیری از چارچوب‌های استاندارد جهانی و تطبیق خردمندانه آن با شرایط بومی، می‌تواند در این جریان پیشرو باشد.

۵. منابع

- 1 FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient.
- ۲ کیانی، ر.، و همکاران. (۱۳۹۸). بررسی الگوی مصرف انرژی در بخش کشاورزی ایران و راهکارهای بهبود آن. مجله اقتصاد کشاورزی و توسعه، ۲۷(۱۰۶)، ۱-۲۶.
- 3 ISNA. (1404). Iranian Students News Agency. Energy Intensity in Iranian Agriculture Sector. <https://www.isna.ir/news/1404071006484/%D8%B4%D8%AF%D8%AA-%D9%85%D8%B5%D8%B1%D9%81-%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%AF%D8%B1-%D8%A8%D8%AE%D8%B4-%DA%A9%D8%B4%D8%A7%D9%88%D8%B1%D8%B2%DB%8C-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86-%D8%A8%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%B3%D8%AA>
- 4 IANA. (1394). Iranian Agriculture News Agency. Energy Consumption in Food and Beverage Small Industries. <https://www.iana.ir/%D8%A8%D8%AE%D8%B4-%DA%A9%D8%B4%D8%A7%D9%88%D8%B1%D8%B2%DB%8C-11/24868-%D9%85%DB%8C%D8%B2%D8%A7%D9%86-%D9%85%D8%B5%D8%B1%D9%81-%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%AF%D8%B1-%D8%B5%D9%86%D8%A7%DB%8C%D8%B9-%DA%A9%D9%88%DA%86%DA%A9-%D8%BA%D8%B0%D8%A7%DB%8C%DB%8C-%D8%A2%D8%B4%D8%A7%D9%85%DB%8C%D8%AF%D9%86%DB%8C-%D8%A7%D8%B9%D9%84%D8%A7%D9%85-%D8%B4%D8%AF>
- ۵ احمدی، ح. میرجلالی، س. ر.، یزدانی، ا.، رازقی، م. (۱۴۰۳). کاربرد انرژی‌های تجدید پذیر در صنایع غذایی به‌منظور سرمایش و گرمایش. فصلنامه سیستم های انرژی پایدار، دوره ۳ شماره ۳.
- 6 Anonym. 1404. Food Service Technology Centre (FSTC). Reported by: <https://gassoco.com/blog/%D8%A8%D9%87%DB%8C%D9%86%D9%87-%D8%B3%D8%A7%D8%B2%DB%8C-%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%AF%D8%B1-%D8%A2%D8%B4%D9%BE%D8%B2%D8%AE%D8%A7%D9%86%D9%87-%D8%B5%D9%86%D8%B9%D8%AA%DB%8C/>
- ۷ صفری، ع.، و کوشکی، م. (۱۴۰۰). تحلیل انرژی و بررسی کارایی آن در تولید گندم دیم در استان کردستان. مجله بهره‌وری کشاورزی، ۱۲(۲)، ۱۴۵-۱۲۳.
- ۸ میسمی، محمدعلی و برگ، ورنر. (۱۳۹۳). اصول حاکم بر مطالعات بهره‌وری انرژی توصیه شده توسط استانداردهای علمی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی.
- ۹ ستاری، م.، و شاه‌حسینی، ع. (۱۴۰۰). موانع و چالش‌های پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی در صنایع غذایی ایران از دیدگاه مدیران. فصلنامه مدیریت توسعه فناوری، ۸(۳)، ۱-۳۲.
- 10 VDI. (2012). VDI 4600 Blatt 1:2012 Cumulative energy demand (KEA) — Terms, definitions, methods of calculation.
- 11 ISO 14044. (2006). ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.
- 12 Huijbregts, M. A., et al. (2010). Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. Environmental Science & Technology, 44(6), 2189-2196.
- 13 ISO 14040. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- 14 Roy, P., et al. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. Journal of Food Engineering, 90(1), 1-10.



- ۱۵ نوروزی، م.، و رضوی، س.م. (۱۳۹۹). ارزیابی چرخه حیات (LCA) تولید شکر از چغندر قند در ایران با استفاده از نرم‌افزار SimaPro. مجله علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۷(۹۸)، ۳۰۳-۲۸۹.
- 16 Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Exergy: energy, environment and sustainable development to shocks and stresses. (2nd Ed.). Elsevier. Rome.
- ۱۷ موسوی، س.ح.، و فلاح، ع. (۱۳۹۸). تحلیل اکسرژی سیستم خشک‌کن خورشیدی-هیبریدی برای خشک‌کردن زعفران. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۵(۲)، ۶۳-۵۴.
- 18 ISO 50001. (2018). ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use.
- 19 Thollander, P., Palm, J., & Rohdin, P. (2013). Energy efficiency in energy-intensive industries—an evaluation of the Swedish voluntary agreement PFE. In Energy Efficiency (pp. 225-241). Springer, Berlin, Heidelberg.
- ۲۰ پیرعلی، م.، و محمدی، ا. (۱۴۰۱). کاربرد استاندارد ایزو ۵۰۰۰۱ در مدیریت انرژی یک کارخانه تولید کنسانتره میوه: مطالعه موردی. نشریه مهندسی صنایع غذایی، ۹(۱)، ۹۲-۷۵.
- 21 ISO 50002. (2014). ISO 50002:2014 Energy audits — Requirements with guidance for use.
- 22 ISO 50006. (2014). ISO 50006:2014 Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPIs) — General principles and guidance.
- 23 ISO 50015. (2014). ISO 50015:2014 Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance.
- 24 ISO 14067. (2018). ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification.
- ۲۵ حسینی، س.ر.، و امیری، م. (۱۳۹۹). بررسی شاخص‌های انرژی و اقتصادی در تولید ذرت دانۀ در استان فارس. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران، ۱۸(۲)، ۲۰۰-۱۸۵.
- ۲۶ سازمان ملی استاندارد ایران. (۱۳۹۸). استاندارد ملی ایزیری ۱۲۰۰۱: سامانه‌های مدیریت انرژی — الزامات با راهنمای کاربرد.