

مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۰۶۳۲ - ۲۷۱۷، شاپای الکترونیکی: ۹۸۰۴ - ۲۷۱۶

نظام‌های برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و راه‌کارهای اجرایی با تأکید بر امکان‌سنجی فنی و تجارب جهانی



نوع مقاله: مروری 20.1001.1.27170632.1404.18.4.5.6

فریده قوی‌پنجه^{۱*}، بهروز زارعی^۲، جواد کریمی^۳

۱. گروه محیط زیست و انرژی، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

۲. گروه کارآفرینی سازمانی، دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. بخش زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

fghavipankeh@merc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

صفحه ۸۲-۱۱۱

چکیده

امروزه استفاده از محصولات تراریخته به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و بهره‌گیری ایمن و مسئولانه از این فناوری مستلزم رعایت اصول ایمنی زیستی است. استقرار نظام‌های مؤثر برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته به مصرف‌کننده حق انتخاب اعطا می‌کند. نتایج یک پژوهش میدانی درباره ردیابی میزان تراریختگی در فرآیند تولید روغن سویای تراریخته، از دانه تا محصول نهایی، نشان می‌دهد ردیابی تراریختگی در محصول نهایی (روغن تصفیه‌شده) امکان‌پذیر است، اگرچه فرآیندهای شیمیایی و حرارتی، میزان دی‌ان‌ای قابل تشخیص را به شدت کاهش می‌دهند. با این وجود، مطالعات نشان می‌دهند بخش قابل توجهی از محصولات تراریخته موجود در بازار فاقد برچسب هستند. این مقاله با رویکردی تحلیلی، چالش‌ها و راهبردهای مرتبط با استقرار این نظام‌ها را بررسی می‌کند. همچنین، مفاهیم پایه، مرور و تجربیات بین‌المللی تحلیل شده‌اند. نوآوری اصلی این مقاله در ارائه‌ی چارچوب اجرایی بومی‌سازی‌شده برای ایران بر اساس تحلیل تطبیقی دو رویکرد مقرراتی غالب جهانی (رویکرد محتاطانه‌ی اتحادیه اروپا و رویکرد نوآوری‌محور آمریکا) و تلفیق آن با قابلیت‌های فنی اثبات‌شده در ردیابی تراریختگی محصولات است. در پایان، با مقایسه‌ی این دو رویکرد، توصیه‌هایی سیاستی در این حوزه ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: برچسب‌گذاری، ردیابی، محصولات تراریخته، سیستم ردیابی زنجیره‌ی تأمین

مقدمه

محصولات تراریخته Genetically Modified (GM) با انتقال ژن‌های گونه‌های دیگر به ماده ژنتیکی موجود زنده هدف ایجاد می‌شوند. کشف امکان انتقال دی‌ان‌ای بین موجودات زنده در سال ۱۹۴۶ (Clive, 2011)، آغازی بر استفاده از مهندسی ژنتیک در کشاورزی بود. در سال ۱۹۹۴، اولین گوجه فرنگی تراریخته توسط FDA (Food and Drug Administration) مجوز عرضه در بازار آمریکا را دریافت کرد. در سال ۱۹۹۵ محصولات تراریخته دیگری شامل کلزا، ذرت، پنبه، سیب‌زمینی و سویا مجوز ورود به بازار آمریکا را دریافت کردند (Clive, 2011). امروزه، طیف گسترده‌تری از محصولات تراریخته، از جمله میوه‌ها و سبزیجات، داروها، واکسن‌ها، مواد اولیه غذایی، خوراک دام و الیف در بازار جهانی عرضه می‌شوند (Obi et al., 2026). بر اساس گزارش وزارت کشاورزی آمریکا (USDA, 2023)، سطح زیر کشت محصولات تراریخته در جهان در سال ۲۰۲۳ به بیش از ۲۰۰ میلیون هکتار رسیده است که ایالات متحده با ۷۴/۴ میلیون هکتار، بزرگ‌ترین تولیدکننده‌ی این محصولات محسوب می‌شود (AgbioInvestor, 2024).

طرفداران محصولات تراریخته معتقدند که این فناوری می‌تواند به تولید محصولاتی با عملکرد بالاتر، مقاومت بیشتر در برابر برخی آفات و بیماری‌ها و در برخی موارد، ارزش غذایی بهبودیافته منجر شود. شواهد تجربی نیز نشان می‌دهد که برخی از این مزایا در شرایط مشخص قابل مشاهده و اندازه‌گیری هستند. یک متاآنالیز از ۱۴۷ مقاله درباره محصولات تراریخته نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری، با افزایش حدود ۲۲ درصدی عملکرد محصول، کاهش ۳۷ درصدی مصرف آفت‌کش‌های شیمیایی و افزایش ۶۸ درصدی سود کشاورزان همراه بوده است

(Klümper and Qaim, 2014). مهندسی ژنتیک می‌تواند برای افزایش تراکم برخی ریزمغذی‌ها یا ایجاد ویژگی‌هایی مانند مقاومت به آفات و بیماری‌ها به کار رود. با این حال، نمی‌توان همه این مزایا را به تمام محصولات تراریخته تعمیم داد؛ زیرا آثار و مزایای هر محصول تراریخته باید بر اساس صفت ژنتیکی، محصول و شرایط تولید و مصرف آن به‌طور جداگانه ارزیابی شود.

در سوی دیگر، منتقدان این فناوری ملاحظات مربوط به ارتباطات احتمالی آن بر سلامت انسان، محیط زیست و استقلال غذایی کشورها دارند. ملاحظات شامل مقاومت احتمالی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها، ناشناخته بودن آثار بلندمدت مصرف این محصولات و وابستگی فزاینده کشورها به شرکت‌های چندملیتی بیوتکنولوژی است (Bawa and Anilakumar, 2013). با این حال، یک متاآنالیز نشان داده است که اگرچه محصولات تراریخته در برخی موارد عملکرد و سود اقتصادی را افزایش داده‌اند، اما اثرات آن‌ها بر سلامت و محیط زیست همچنان نیازمند مطالعه‌ی بیشتر است (Klümper and Qaim, 2014). گزارش‌های مشترک FAO و WHO نیز تأکید کرده‌اند که ارزیابی احتمال خطر محصولات تراریخته باید بر اساس شواهد علمی به‌روز انجام شود (FAO/WHO, 2000).

در این میان، برچسب‌گذاری و قابلیت ردیابی محصولات تراریخته، دو ابزار کلیدی برای پاسخگویی به دغدغه‌های مصرف‌کنندگان و دولت‌ها به شمار می‌روند. این دو مفهوم از یک‌سو، حق آگاهانه انتخاب کردن را برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌سازند و از سوی دیگر، دولت‌ها را قادر می‌سازند تا نظارت موثرتری اعمال کنند (Sharif and Zarei, 2004). به گفته آمارتیا سن برنده جایزه نوبل اقتصاد، "حق انتخاب به مثابه آزادی

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

است" (Sen, 1988). در همین راستا، اتحادیه اروپا مفهومی تحت عنوان "همزیستی (Coexistence)" روش‌های مختلف کشاورزی را مطرح کرده است که بر اساس آن تولید کنندگان باید از حق انتخاب روش‌های تولید سنتی، ارگانیک و تراریخته برخوردار باشند (Altieri, 2005). با این حال تحقق واقعی همزیستی مستلزم رعایت الزامات هر یک از روش‌هاست، در غیر اینصورت چنین مفهومی بی‌معنا خواهد بود.

از سوی دیگر، برای این‌که مصرف کنندگان نیز بتوانند آگاهانه میان این گزینه‌ها انتخاب کنند، باید اطلاعات کافی در اختیار آن‌ها قرار داده شود. در این زمینه تجارب صنایع دیگر می‌تواند راه‌گشا باشد. برای مثال، در صنایع دارویی (WHO, 2020)، تجهیزات پزشکی (WHO, 2019) و مدیریت منابع آب (Gao et al., 2019) نظام‌های مؤثری برای برچسب‌گذاری و ردیابی طراحی شده‌اند. در صنعت دارو، امکان ردیابی دقیق مواد مؤثره در فرآیند تولید و توزیع فراهم شده است؛ به گونه‌ای که اطلاعات مربوط به زمان تولید، شیف‌ت کاری و افراد دخیل در عملیات مختلف تولید قابل ثبت و پیگیری است. اگر چه ماهیت ردیابی محصولات تراریخته ممکن است با دیگر صنایع تفاوت‌هایی داشته باشد، اما مفاهیم پایه‌ای آن از جمله؛ شفافیت، قابلیت پیگیری و پاسخ‌گویی، مشابه است. فناوری‌های نوینی نظیر دولت الکترونیکی که در سال‌های اخیر بر اصولی همچون شفافیت، پاسخ‌گویی و دسترسی آزاد به اطلاعات استوار بوده، دولت‌ها را ناگزیر به بازطراحی بنیادین ساختارها و روش‌های اداره جامعه کرده است (Saghafi et al., 2011). این تحولات، بسترهای فناورانه‌ای را فراهم کرده‌اند که می‌توانند به صورت مؤثری در مدیریت بهینه زنجیره مواد غذایی به کار گرفته شوند. لذا، به نظر می‌رسد که تجارب موفق سایر صنایع در زمینه برچسب‌گذاری و ردیابی و تمایل فزاینده دولت‌ها به شفاف‌سازی،

سکوی پرتاب مناسبی را برای پیاده‌سازی نظام برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته از مزرعه تا سفره را فراهم آورده‌اند. با بهره‌گیری از این رویکرد و به‌کارگیری فناوری‌های دیجیتال مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و کدهای QR، اطلاعات مربوط به وجود و مقدار مواد تراریخته در محصولات غذایی می‌تواند در طول زنجیره تولید و فرآوری از تأمین کنندگان اولیه تا تولید کنندگان صنایع غذایی منتقل شود و در نهایت به گونه‌ای شفاف و قابل فهم در اختیار مصرف کنندگان قرار گیرد.

با این حال، اجرای یک سیستم مؤثر ردیابی نیازمند مشارکت و هماهنگی مابین تعداد زیادی از ذی‌نفعان در مناطق جغرافیایی مختلف است و معمولاً با چالش‌های زیادی، همراه است (Bosona and Gebresenbet, 2013). موانعی همچون هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، نیاز به زیرساخت دیجیتال پیشرفته، مقاومت اولیه کاربران، خلأهای قانونی و نبود استانداردهای مشترک و مشکلات زیرساختی، از چالش‌های اصلی در مسیر تعمیم این فناوری به شمار می‌روند (Francisco and Swanson, 2018). به همین دلیل، نقش دولت‌ها و سیاست‌گذاران در تنظیم مقررات، فراهم‌سازی بسترهای فناوری و ترویج آموزش و پذیرش عمومی بسیار حیاتی است.

در ایران، با وجود تصویب قانون ایمنی زیستی در سال ۱۳۸۸ و ابلاغ دستورالعمل‌های برچسب‌گذاری توسط وزارت بهداشت، مطالعات میدانی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از محصولات تراریخته موجود در بازار فاقد برچسب شناسایی هستند (Safaei et al., 2020). لذا، این مقاله با بررسی امکان سنجی فنی اندازه‌گیری کمی تراریختگی این محصولات، به بررسی فناوری‌های نوین برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته می‌پردازد. علاوه بر آن، تجربیات جهانی، تحلیل مقرراتی و سیاستی

محصولات تراریخته مرور شده و دیدگاهی شفاف در خصوص استقرار نظام‌های برچسب‌گذاری و ردیابی این محصولات در راستای حق انتخاب مصرف‌کنندگان، امنیت غذایی جامعه و حکمرانی بهتر ارائه شده است. در نهایت چارچوب اجرایی بومی‌سازی شده برای ایران ارائه شده است.

روش پژوهش

این پژوهش با هدف تحلیل چندوجهی نظام‌های برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته و ارائه مدل بومی برای ایران، از منظر فلسفه پژوهش در چارچوب تفسیرگرایی قرار دارد. از دیدگاه تفسیرگرایی (Interpretivism)، واقعیت پدیده‌هایی مانند؛ اعتماد مصرف‌کننده، حق انتخاب و شفافیت زنجیره تأمین امری عینی و جهان‌شمول نیست، بلکه در بستر تعاملات اجتماعی، گفتمان‌های حقوقی و تجربیات زیسته کنش‌گران معنا می‌یابد. بنابراین، هدف این پژوهش نه کشف قوانین علی عام، بلکه فهم عمیق و بررسی امکان‌پذیری فنی ردیابی در بسترهای گوناگون است.

از حیث توسعه نظری، این پژوهش دارای ماهیت استنباطی (Inferential) است. به این معنا که پژوهش صرفاً به توصیف و دسته‌بندی یافته‌های پیشین اکتفا نمی‌کند، بلکه با بهره‌گیری از استدلال استنتاجی، به دنبال بهترین تبیین ممکن از نتایج گاه متناقض و پراکنده در ادبیات موضوع و تجارب عملی است. به عبارت دیگر، این پژوهش در تلاش است تا با تحلیل مدل‌های مقرراتی اتحادیه اروپا و ایالات متحده، پلی میان یافته‌های توصیفی (آنچه هست) و توصیه‌های سیاستی (آنچه باید باشد) ایجاد کند.

از لحاظ روش‌شناسی، پژوهش حاضر از رویکرد فراتحلیل بهره برده است. فراتحلیل (Meta-Analysis) در این پژوهش نه در معنای کمی صرف (ترکیب آماری نتایج کمی)، بلکه در معنای

تفسیری و کیفی آن به کار رفته است. این رویکرد شامل بررسی نظام‌مند، تحلیل تطبیق و ترکیب یافته‌های مطالعات پیشین در حوزه‌های شناسایی محصولات تراریخته و ارزیابی سیاست‌های برچسب‌گذاری در کشورهای مختلف است.

در نهایت، از حیث استراتژی پژوهش، این مطالعه یک پژوهش اسنادی (Documentary Research) محسوب می‌شود. داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش از طریق مرور اسناد مکتوب و دیجیتال در دسته‌های زیر گردآوری شده است: ۱- اسناد علمی شامل مقالات داوری‌شده و متاآنالیزهای منتشرشده در حوزه تشخیص مولکولی تراریختگی، فناوری‌های برچسب‌گذاری و ردیابی ۲- اسناد حقوقی و سیاستی شامل مقررات اتحادیه اروپا، پروتکل کارتاها و دستورالعمل‌های وزارت بهداشت ایران ۳- گزارش‌های صنعتی و موردی، مستندات پیاده‌سازی بلاک‌چین در شرکت Walmart و IBM Food Trust و ۴- آمارها و داده‌های ثانویه و نظرسنجی‌های اعتماد مصرف‌کنندگان. رویکرد پژوهش اسنادی این امکان را می‌دهد که بدون محدودیت‌های زمانی و مکانی مطالعات میدانی، به تحلیل و ترکیب دانش موجود از منابع گوناگون پرداخت و توصیه‌های سیاستی مبتنی بر شواهد ارائه کرد.

از آنجا که هدف این پژوهش، ارائه مدل بومی و توصیه‌های سیاستی برای نظام برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته در ایران است، انتخاب دو مدل مقرراتی غالب جهانی (اتحادیه اروپا و ایالات متحده) از چند جهت حائز اهمیت است. نخست، این دو سیستم قطب‌های متقابل طیف مقررات‌گذاری محصولات تراریخته را نمایندگی می‌کنند. اتحادیه اروپا با رویکرد فرآیندمحور و احتیاطی (فرض خطر تا اثبات ایمنی) و ایالات متحده با رویکرد محصول‌محور و مبتنی بر این همانی (Substantial Equivalence) (فرض ایمنی تا اثبات خطر) دو انتهای این طیف را تشکیل

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

در بیشتر روش‌های مبتنی بر دی‌ان‌ای، از واکنش زنجیره‌ای پلیمرز Polymerase Chain Reaction (PCR) استفاده می‌شود. اجرای موثر این روش‌ها مستلزم توجه به نکات کلیدی است از جمله: ویژگی اختصاصی (Specificity)، حساسیت (Sensitivity)، اثرات ماتریسی (Matrix Effects)، دی‌ان‌ای مرجع داخلی (Internal Reference)، دی‌ان‌ای و وجود مواد مرجع خارجی (External Reference Materials)، وضعیت همی‌زیگوسیتی (Hemizyosity) در مقابل هموزیگوسیتی (Homozygosity)، دی‌ان‌ای کروموزومی اضافه (DNA Extra Chromosomal) و نیز ضرورت هم‌راستاسازی با توافق بین‌المللی. در حال حاضر، روش‌های مبتنی بر دی‌ان‌ای از جمله (Quantitative Polymerase Chain Reaction) qPCR و میکروآرایه‌های دی‌ان‌ای، متداول‌ترین و پذیرفته‌شده‌ترین روش‌های تحلیل و شناسایی محصولات تراریخته محسوب می‌شوند. این روش‌ها عمدتاً بر اساس شناسایی اجزای ژنتیکی خاص مانند *pat*، *bar*، *35S*، *nos* یا مارکرهای اختصاصی برای محصولات تراریخته خاص نظیر Bt11، MON810 یا GT73 عمل می‌کنند. در روش‌های آرایه‌محور، از ترکیب PCR مرکب و فناوری آرایه استفاده می‌شود تا نمونه‌هایی که احتمال تراریختگی دارند، مورد غربال قرار گیرند. در روش qPCR نیز از پرایمرهای اختصاصی برای غربال‌گری اجزای ژنتیکی یا مارکرهای خاص محصولات تراریخته استفاده می‌شود (Broeders et al., 2014). در غذاهای با فرآوری بالا، موفقیت روش‌های مبتنی بر دی‌ان‌ای وابسته به کارایی پروتکل‌های استخراج دی‌ان‌ای است.

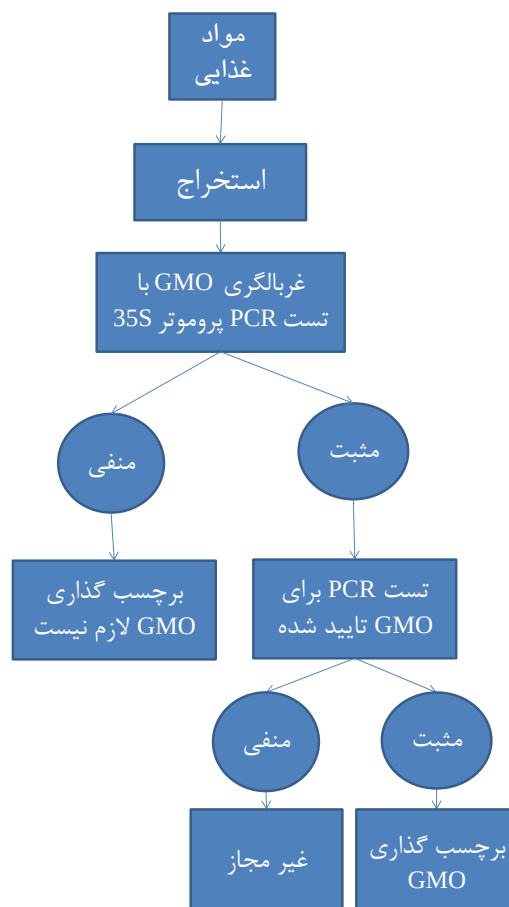
می‌دهند. مقایسه این دو مدل به پژوهش‌گر امکان می‌دهد تا نقاط قوت و ضعف هر یک را در ابعاد مختلف (هزینه اجرا، شفافیت، اعتماد عمومی، موانع تجاری) شناسایی و سپس مدل ترکیبی متناسب با شرایط ایران را استخراج نماید. دوم، این دو حوزه اقتصادی بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان محصولات تراریخته در جهان هستند. اتحادیه اروپا با وجود رویکرد احتیاطی، یکی از بزرگ‌ترین واردکنندگان خوراک دام تراریخته است (USDA, 2023) و ایالات متحده نیز بزرگ‌ترین تولیدکننده محصولات تراریخته محسوب می‌شود (AgbioInvestor, 2024). سوم، ایران در چارچوب‌های قانونی خود (مانند قانون ایمنی زیستی ۱۳۸۸) به طور ضمنی از هر دو رویکرد تأثیر پذیرفته است و شناخت دقیق این دو مدل می‌تواند به رفع تضادها و ناهماهنگی‌های موجود در نظام مقرراتی کشور کمک کند.

امکان سنجی فنی ردیابی تراریختگی مواد غذایی

امکان شناسایی و تعیین کمی ماده تراریخته در غذای انسان و خوراک دام و طیور از ارکان استقرار سیستم برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته است. این بخش، به بررسی امکان سنجی فنی این اندازه‌گیری می‌پردازد. روش‌های کنونی اندازه‌گیری تراریختگی در دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند (Singh et al., 2025).

۱) تعیین دی‌ان‌ای تراریخته

۲) تعیین پروتئین‌های جدید بیان شده در محصول تراریخته



نمودار ۱. پروتکل تست مواد غذایی تراریخته (Deisingh and Badrie, 2005)

افزایش یابد. سپس محصولات PCR با استفاده از الکتروفورز روی ژل آگارز جداسازی شده و وجود یا عدم وجود باندی با اندازه‌ی مشخص، به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی حضور یا عدم حضور ماده‌ی تراریخته در نمونه است. این روش که به‌عنوان یک آزمون غربالگری کیفی شناخته می‌شود، قادر است مقادیر بسیار ناچیز (در حدود ۰.۰۱ تا ۰.۱ درصد) از ماده‌ی تراریخته را در مواد غذایی خام و حتی فرآوری‌شده شناسایی کند و به‌عنوان گام نخست در سیستم‌های نظارتی، پیش از انجام آزمون‌های تأییدی و کمی مانند (PCR درجا) کاربرد دارد.

با توجه به افزایش قابل توجه و تنوع محصولات تراریخته در بازارها، چالش‌های زیادی در مورد

نمودار ۱، پروتکل استاندارد آزمون تشخیص ارگانیسم‌های تراریخته را بر اساس روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز و با هدف قرار دادن پروموتور ۳۵ S (یکی از رایج‌ترین عناصر ژنتیکی در محصولات تراریخته) نشان می‌دهد (Deisingh and Badrie, 2005). این پروتکل با استخراج دی‌ان‌ای از نمونه‌ی غذایی آغاز می‌شود که کیفیت آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت مراحل بعدی دارد. در مرحله‌ی بعد، دی‌ان‌ای استخراج‌شده با پرایمرهای اختصاصی پروموتور ۳۵ S و سایر مواد لازم برای واکنش PCR ترکیب شده و تحت چرخه‌های دمایی قرار می‌گیرد تا در صورت وجود توالی هدف، تعداد کپی‌های آن به‌طور تصاعدی

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

و زنجیره بلوکی (Blockchain) در مدیریت زنجیره تأمین، امکان ذخیره‌سازی و ردیابی اطلاعات محصولات تراریخته از مزرعه تا سفره به صورت لحظه‌ای و تغییرناپذیر فراهم شده است.

برچسب‌گذاری

با مصرف رو به رشد مواد غذایی تراریخته، عدم تقارن اطلاعاتی به واسطه کمبود ارتباطات مؤثر با ذی‌نفعان در خصوص مخاطرات احتمالی آن‌ها، تبدیل به موضوع مهمی شده است (Zhang *et al.*, 2021; Ghavipanah *et al.*, 2025). برچسب‌گذاری اجباری، روشی مؤثر برای مقابله با این عدم تقارن اطلاعاتی تلقی می‌شود (Roe *et al.*, 2014).

نکته قابل توجه این است که روش فعلی برچسب‌گذاری، تنها قابلیت تفکیک محصولات تراریخته و غیر تراریخته را فراهم می‌کند (Kolodinsky, 2018). در حالی که بسیاری از مصرف‌کنندگان خواهان اطلاعات دقیق‌تری درباره مزایا یا مخاطرات احتمالی مربوط به محصولات برچسب‌گذاری شده هستند (Wolfe *et al.*, 2018). در کشورهای در حال توسعه، مطالعات اندکی در این زمینه انجام شده است. برای مثال، در مطالعه‌ای در چین، ۵۶.۵ درصد از پاسخ‌دهندگان ترجیحات مثبتی برای ردیابی روغن سویای تراریخته داشتند که ناشی از درک بهتر خطرات احتمالی، عدم کفایت برچسب‌های فعلی و بی‌اعتمادی به نهادهای ناظر بود (Mingyang, 2021). همچنین، مطالعات نشان می‌دهند که کشورهایی با اعتماد بالاتر به دولت، نگرش مثبت‌تری به سیستم‌های برچسب‌گذاری دارند (Zhao, 2018). جنبه‌های گوناگون برچسب‌گذاری مواد غذایی تراریخته نیز توسط مهدی‌زاده و همکاران بررسی شده است (Mehdizadeh *et al.*, 2011).

ردیابی این محصولات وجود دارد. در این ارتباط روش‌های جایگزینی برای آنالیز، توسعه یافته‌اند که می‌توانند تشخیص سریع‌تر تراریخته هدف (نظیر روش تکثیر هم‌دما به واسطه‌ی حلقه-Loop mediated Isothermal Amplification)، شناسایی همزمان چند تراریخته هدف (نظیر روش Luminex)، افزایش دقت کمی‌سازی (نظیر روش PCR دیجیتال)، تعیین ساختار جزئی توالی‌های واردشده نظیر روش DNA walking یا تعیین توالی ژنتیکی ناشناخته (نظیر روش NGS, Next Generation Sequencing) را انجام دهند (Fraiture *et al.*, 2014).

حسگرهای زیستی قابل حمل (Portable Biosensors)، ابزارهای نوینی هستند که با استفاده از آنتی‌بادی‌ها، آنزیم‌ها یا نانوذرات زیستی قادر به شناسایی سریع عناصر تراریخته در محل (in-site) هستند. این حسگرها نه تنها دقت بالایی دارند، بلکه به دلیل عدم نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی گران‌قیمت، گزینه‌ای مناسب برای نقاط کنترل مرزی یا مزارع کوچک محسوب می‌شوند. اتوماسیون کامل واکنش‌های مولکولی مانند استخراج دی‌ان‌ای، qPCR و تجزیه داده‌ها منجر به افزایش دقت، تکرارپذیری و کاهش زمان پاسخ شده است. کیت‌های تجاری تمام‌خودکار با امکان پردازش ده‌ها نمونه در زمان کوتاه، در بسیاری از آزمایشگاه‌های مرجع اروپایی و آسیایی مستقر شده‌اند (Singh *et al.*, 2025). همچنین، با افزایش داده‌های خروجی از تست‌های qPCR و PCR دیجیتال، الگوریتم‌های یادگیری ماشین Machine Learning (ML) مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به ابزار مهمی برای کاهش خطاهای انسانی و بهبود دقت تفسیر نتایج تبدیل شده‌اند. این الگوریتم‌ها به‌ویژه در شناسایی نويز و تحلیل منحنی‌های ذوب (Melting Curves) عملکرد چشمگیری داشته‌اند (Zhang *et al.*, 2021). با تلفیق فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT)

با پیشرفت فناوری‌های دیجیتال، سیستم‌های برچسب‌گذاری سنتی نیز در حال تکامل به سمت برچسب‌گذاری هوشمند و ردیابی دیجیتال هستند. ابزارهایی مانند کد QR، فناوری بلاک‌چین (Blockchain)، اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI)، به عنوان راهکارهای نوین برای پاسخ به دغدغه‌های شفافیت و اعتماد مصرف‌کنندگان مورد توجه قرار گرفته‌اند.

کد QR، نوعی بارکد دوبعدی است که می‌تواند حجم زیادی از اطلاعات را در قالب تصویری کوچک ذخیره کند و به عنوان واسطه ساده و قابل دسترسی بین محصول و اطلاعات دقیق آن عمل کند (Kouhizadeh et al., 2021). این کد می‌تواند شامل لینک، متن، شماره سریال یا اطلاعات مربوط به محصول باشد. با قرار دادن QR روی بسته‌بندی محصولات تراریخته، مصرف‌کننده می‌تواند با اسکن آن توسط دوربین تلفن همراه، به اطلاعات زیر دسترسی یابد:

- نوع و منشأ ژنتیکی محصول،
- محل و شیوه‌ی کشت و برداشت،
- فرآیندهای فرآوری و بسته‌بندی،
- آزمون‌های ایمنی زیستی و درصد تراریختگی.

فناوری بلاک‌چین با ایجاد دفتر کل شفاف و غیرقابل تغییر، قابلیت اطمینان به اطلاعات زنجیره‌ی تأمین را افزایش می‌دهد. در این روش، تمامی مراحل تولید، انتقال و کنترل کیفی محصول به صورت تراکنش‌های دیجیتال ثبت می‌شوند و هیچ نهادی به‌تنهایی قادر به دست‌کاری داده‌ها نیست. این ویژگی باعث افزایش اعتماد مصرف‌کنندگان و نهادهای نظارتی می‌شود و برای مقابله با تقلب یا پنهان‌کاری در تولید محصولات تراریخته بسیار مؤثر است (Lin et al., 2019).

اینترنت اشیا به شبکه‌ای از حسگرها و دستگاه‌های هوشمند متصل به اینترنت گفته می‌شود که می‌توانند اطلاعات محیطی را به صورت لحظه‌ای جمع‌آوری و ارسال کنند. افزودن حسگرهای IoT به زنجیره‌ی تأمین، امکان پایش لحظه‌ای شرایط محصول مانند دما، رطوبت و سلامت بسته‌بندی را فراهم می‌کند. این داده‌ها مستقیماً می‌توانند به بلاک‌چین متصل شوند و بخشی از پروفایل دیجیتال محصول باشند. چنین رویکردی ردیابی بلادرنگ و بدون وقفه را ممکن می‌سازد و در مدیریت ریسک و پاسخ سریع به بحران‌های ایمنی غذایی بسیار ارزشمند است (Plakantara and Karakitsiou, 2025).

داده‌های بزرگ جمع‌آوری شده از QR، بلاک‌چین، حسگرهای IoT می‌توانند توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی تحلیل شوند. این تحلیل‌ها به شناسایی الگوهای ریسک، پیش‌بینی فساد یا آلودگی و حتی بررسی الگوهای تقلب کمک می‌کنند. استفاده از این فناوری‌ها نه تنها اعتماد مصرف‌کنندگان را تقویت می‌کند بلکه کارایی سیستم‌های نظارتی و تصمیم‌گیری دولتی را افزایش می‌دهد.

یکی از فناوری‌های نوین که اخیراً در برچسب‌گذاری و ردیابی مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته، میکروتگ‌ها (Microtags یا Microtransponders) هستند. میکروتگ‌ها تراشه‌های بسیار کوچک و سبک‌اند که می‌توانند به صورت آشکار یا پنهان روی محصول، بسته‌بندی، یا حتی در بافت محصول قرار گیرند و به هر محصول یک شناسه دیجیتال یکتا اختصاص دهند. این شناسه با استفاده از کدهای رمزنگاری شده تعریف شده و معمولاً به یک پایگاه داده یا بلاک‌چین متصل است تا امکان ردیابی کامل محصول از مزرعه تا سفره فراهم شود. ویژگی اصلی میکروتگ‌ها غیرقابل دستکاری بودن و مقاومت در برابر تقلب است، زیرا هر تگ دارای یک کد

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

می‌شوند و قابل ردیابی خواهند بود. این فناوری اغلب همراه با کدهای QR و حسگرهای IoT استفاده می‌شود، به‌طوری که با هر بار جابه‌جایی محصول، اطلاعات جدید به بلاک‌چین افزوده می‌شود.

به‌عنوان نمونه، شرکت Naturipe Farms در شیلی با استفاده از ساپ بلاک‌چین، ردیابی توت‌فرنگی و تمشک صادراتی را اجرا کرده است؛ مصرف‌کنندگان با اسکن QR روی بسته‌بندی می‌توانند اطلاعاتی نظیر محل دقیق تولید و تاریخ برداشت را مشاهده کنند (SAP News 2019, SupplyChainBrain 2019). چنین سامانه‌ای می‌تواند در برچسب‌گذاری محصولات تراریخته نیز بسیار مفید باشد، زیرا امکان ثبت و ارائه شفاف گواهی‌های آزمایش ژنتیکی، منبع تولید و مسیر توزیع محصول را فراهم می‌کند.

ردیابی

ردیابی در زنجیره تأمین محصولات تراریخته به معنای ثبت و انتقال اطلاعات دقیق از منبع تولید تا مرحله عرضه نهایی است. این فرآیند می‌تواند شامل ثبت نوع ماده اولیه، منشأ جغرافیایی، فرآیندهای تبدیلی و مسیرهای توزیع باشد. چنین سیستمی امکان کنترل بهتر مقرراتی، مدیریت بحران‌های احتمالی و انجام فراخوان‌های هدفمند را فراهم می‌کند (Broeders, 2014). به کمک این سیستم‌ها، امکان تفکیک محصولات تراریخته و غیر تراریخته از مزرعه تا سفره فراهم می‌گردد (Miraglia et al., 2004). پیاده‌سازی این سیستم، مستلزم توجه به نیازمندی‌های فنی خاصی برای هر قدم از زنجیره فرآوری مواد غذایی است. علاوه بر این، امکان‌پذیری این سیستم، به عواملی نظیر شناساگرهای (Identifiers) منحصر به فرد برای هر محصول تراریخته، روش‌های ردیابی، تعیین سطح مجاز تراریختگی، متدلوژی نمونه‌گیری و ردیابی،

دیجیتال اختصاصی و غیرقابل کپی است. این فناوری به‌ویژه برای محصولاتی که نیازمند تأیید اصالت یا برچسب‌گذاری تراریخته یا غیر تراریخته هستند اهمیت دارد؛ زیرا می‌توان اطلاعات مربوط به منبع تولید، گواهی‌های آزمایش ژنتیکی و مشخصات زنجیره‌ی تأمین را مستقیماً به تگ متصل کرد. این حال، استفاده از میکروتگ‌ها در بافت محصولات غذایی نیازمند بررسی‌های ایمنی دقیق از نظر مهاجرت نانوذرات و اثرات بالقوه بر سلامت مصرف‌کننده است.

به‌عنوان نمونه، در صنعت پنیر ایتالیا، پروژه‌ی Parmigiano Reggiano از میکروتگ‌های p Chip به همراه QR Code و بلاک‌چین استفاده می‌کند تا از اصالت محصول اطمینان حاصل شود و از تقلب در بازار جهانی جلوگیری شود (Food and Wine, 2023). این تجربه نشان می‌دهد که میکروتگ‌ها می‌توانند در آینده به بخشی مهم از نظام‌های ردیابی و برچسب‌گذاری هوشمند محصولات غذایی و تراریخته تبدیل شوند.

یکی از پلتفرم‌های بلاک‌چین سازمانی که به‌طور ویژه برای زنجیره تأمین و صنایع غذایی توسعه یافته، ساپ بلاک‌چین (SAP Blockchain) است. این پلتفرم که بخشی از پلتفرم BTP (Business Technology Platform) محسوب می‌شود، امکان ثبت داده‌های مربوط به برداشت، حمل‌ونقل، فرآوری و توزیع محصولات را روی یک دفتر کل توزیع شده و غیرقابل تغییر فراهم می‌کند (SAP News, 2019). ویژگی مهم ساپ بلاک‌چین، یکپارچگی بومی با سامانه‌های (Enterprise Resource Planning) ERP شرکت SAP مانند S/4HANA است. ERP یا برنامه‌ریزی منابع سازمانی، یک سامانه نرم‌افزاری یکپارچه برای مدیریت عملیات سازمان است که شامل مازول‌های مالی، خرید، فروش، انبار، تولید و لجستیک می‌شود. به این ترتیب، تمام رویدادهای زنجیره تأمین به‌صورت خودکار در بلاک‌چین ذخیره

تعیین استراتژی‌های مناسب ردیابی و تحلیل هزینه‌های مورد نیاز برای راه‌اندازی چنین سیستمی بستگی دارد.

پیاده‌سازی سیستم ردیابی مناسب علاوه بر توجه به موضوعات فنی، بایستی با برچسب‌گذاری ارتباط قوی داشته باشد. به هر میزان سیستم برچسب‌گذاری سخت‌گیرانه باشد، به همان مقدار سیستم ردیابی پیچیده و گران خواهد بود. استراتژی‌های مرتبط با ردیابی بایستی راهی را برای انتخاب بهینه این نیازمندی‌ها فراهم آورد (Bawa and Anilakumar, 2013). چالش‌های غیرفنی پیاده‌سازی شامل عواملی مانند مقاومت تولیدکنندگان به دلیل هزینه‌های اولیه، عدم شفافیت در زنجیره‌های تأمین چندلایه، ضعف نظام‌های حقوقی و جریمه‌های بازدارنده و نبود هماهنگی میان نهادهای نظارتی است. در کشورهای در حال توسعه، این چالش‌ها به دلیل کمبود زیرساخت‌های دیجیتال و مالی، شدیدتر است (Francisco and Swanson, 2018).

بنابراین، اجرای کامل سیستم ردیابی در عمل با چالش‌های متعددی همراه است، از جمله پیچیدگی در هماهنگی میان بازیگران مختلف زنجیره تأمین، محدودیت‌های فنی و تفاوت در استانداردهای ملی و منطقه‌ای (Broeders, 2014). الزامات قانونی کنونی و پیشنهادی اتحادیه اروپا در مورد ردیابی محصولات تراریخته به طور کلی زیر مجموعه برنامه‌های وسیع‌تری در مورد ردیابی مواد غذایی است و از لحاظ تجاری، به سمت تمایز یک محصول از دیگر محصولات است. چارچوب‌های فنی و عملیاتی برای ردیابی تراریخته‌ها در قالب پروژه‌های اروپایی مانند TRACE و GMOTrack،

تدوین و اجرا شده‌اند. این پروژه‌ها با ترکیب روش‌های آزمایشگاهی و فناوری اطلاعات نظیر بلاک‌چین، زنجیره تأمین مواد غذایی را شفاف کرده و دسترسی به داده‌های دقیق برای سیاست‌گذاران و مصرف‌کنندگان را فراهم آورده‌اند (European Commission, 2007). در چنین سیستمی، اطلاعات تمامی ذینفعان زنجیره عرضه، از تولیدکنندگان و صنایع فرآوری تا توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مصرف‌کنندگان نهایی، به صورت نظام‌مند ثبت، به اشتراک گذاشته و تحلیل می‌شود؛ بدون این‌که امکان دست‌کاری در داده‌ها وجود داشته باشد. بلاک‌چین به عنوان یک سیستم ردیابی شفاف و ایمن شناخته شده است (Hastig and Sodhi, 2020) و تحقیقاتی در مورد اجزای کلیدی، مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی آن در صنایع غذایی انجام شده است (Van Hilten, 2020).

از جمله نمونه‌های موفق پیاده‌سازی بلاک‌چین در صنعت غذا، می‌توان به همکاری شرکت Walmart با پلتفرم IBM Food Trust اشاره کرد، که با استفاده از بلاک‌چین توانسته‌اند زمان ردیابی منبع آلودگی در محصولات غذایی را از چند روز به چند ثانیه کاهش دهند (Kamath, 2018; IBM, 2020). این امر نه تنها ایمنی غذایی را افزایش می‌دهد، بلکه موجب اعتماد بیشتر مصرف‌کنندگان و کاهش ضایعات نیز می‌شود. جدول ۱ نمونه‌های اجرایی برچسب‌گذاری و ردیابی دیجیتال محصولات کشاورزی و تراریخته، فناوری‌های استفاده‌شده و ویژگی‌های کلیدی هر نمونه‌ی اجرایی را مقایسه می‌کند.

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

جدول ۱. نمونه‌های اجرایی برچسب‌گذاری و ردیابی دیجیتال محصولات کشاورزی و تراریخته

کشور / پروژه	محصول یا دسته غذایی	فناوری های استفاده شده	ویژگی کلیدی و دستاوردها	منبع
Carrefour (فرانسه)	مرغ روستایی، تخم مرغ، لبنیات، گوشت، پرتقال	بلاکچین IBM Food Trust + QR Code	شفافیت کامل زنجیره تأمین؛ افزایش ۱۵ درصد فروش محصولات دارای ردیابی	Ledger Insights, 2018; SupplyChainDive, 2019; Carrefour News, 2024
Walmart and Sam's Club (آمریکا)	سبزیجات برگدار، میگو، گوشت تازه	بلاکچین + QR Code	کاهش زمان ردیابی از ۷ روز به ۲.۲ ثانیه؛ کاهش ۲۰ درصد ضایعات غذایی	Food Engineering Magazine, 2023
Naturipe Farms (شیلی)	توت فرنگی و تمشک	SAP Blockchain + QR Code	دسترسی مصرف‌کننده به محل دقیق تولید و برداشت؛ افزایش اعتماد برند	Food Engineering Magazine, 2023
VeriDoc Global (آمریکا)	پاپکورن غیر تراریخته و نمونه‌های مشابه	QR رمزگذاری شده + بلاکچین	تأیید اصالت و عدم تراریختگی، کاهش ۹۵ درصد شکایت‌های اصالت	VeriDoc Global, 2022
TE-Food (اروپا/آفریقا)	میوه، سبزیجات، لبنیات، گوشت	بلاکچین TrustChain + QR Code	ردیابی ملی و بین‌المللی، پوشش ۵۰۰۰ تولیدکننده	FoodNavigator, 2023
Parmigiano Reggiano (ایتالیا)	پنیر سنتی	میکرو تگ p-Chip + QR بلاکچین	تضمین اصالت محصول و حذف کامل تقلب (تقلبی گزارش نشده)	Food and Wine, 2023
Crystalchain/BioTrace (کانادا و اسپانیا)	میوه، سبزیجات، محصولات ارگانیک	IoT + QR + بلاکچین	پایش محیطی، ردیابی از مزرعه تا مصرف‌کننده، کاهش ۳۰ درصد زمان پاسخ به بحران	StartUs Insights, 2022

تحلیل اقتصادی نظام‌های ردیابی در کشورهای در حال توسعه نشان می‌دهد که اگرچه هزینه‌های پیاده‌سازی (شامل سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های تطابق) به‌ویژه برای تولیدکنندگان کوچک و بنگاه‌های متوسط، مانعی جدی محسوب می‌شود (Frimpong *et al.*, 2025)، اما منافع بلندمدت آن‌ها شامل افزایش ۳۵ درصد دسترسی به بازارهای صادراتی، افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصد درآمد تولیدکنندگان و کاهش ۳۰ میلیون تنی ضایعات غذایی در سطح جهانی است (World Bank, 2019; Frimpong *et al.*, 2025). موردی در اندونزی نشان داده است که درک هزینه‌ها و منافع ردیابی، به سطح پیاده‌سازی

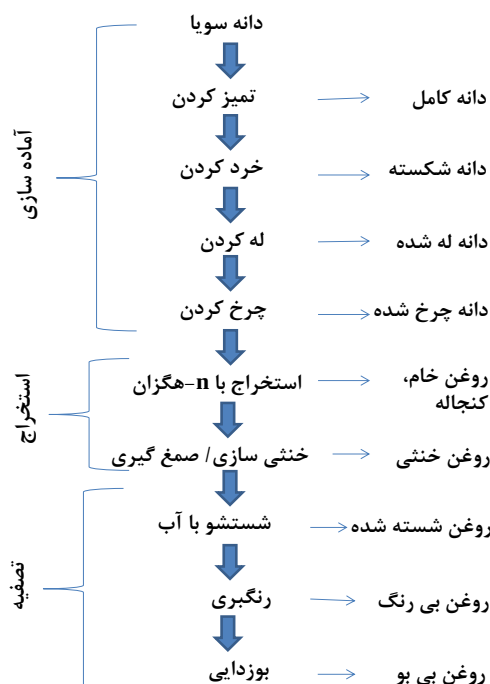
وابسته است و تولیدکنندگان خرد، منافع را عمدتاً در افزایش سهم بازار و بهبود پاسخگویی به مشتریان می‌بینند (Khoifin and Nimsai, 2018). همچنین، تجربه‌ی موفق اتصال مستقیم کشاورزان هائیتی به بازارهای جهانی با استفاده از فناوری بلاک‌چین، با حذف واسطه‌ها و افزایش ۳۳۵ درصد درآمد کشاورزان، نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای این فناوری‌ها در کشورهای در حال توسعه است (IFC, 2023). با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه‌ی بالای پیاده‌سازی، ضعف زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، سواد دیجیتال محدود و نگرانی‌های مربوط به مالکیت داده‌ها، از موانع اصلی پذیرش این نظام‌ها در کشورهای در حال توسعه باقی

سویا (*Glycine max*) از شرکت Roundup Ready (سویای RR) اصلی ترین محصول تراریخته می باشد که ۵۳ درصد سطح زیر کشت محصولات تراریخته دنیا را در سال ۲۰۰۸ تشکیل داده است (James, 2008). فرآیند تصفیه روغن شامل تصفیه شیمیایی روغن خام سویا شامل مراحل صمغ زدایی با کمک اسید فسفریک برای حذف فسفولیپیدها و صمغ های ژلاتینی (Mucilaginous Gums)، خنثی سازی با سود غلیظ برای حذف اسیدهای چرب آزاد (FFA) Free Fatty Acids و مرحله شستشو برای حذف صابون ایجاد شده است. سپس مراحل فیزیکی شامل رنگبری با کمک کربن فعال یا خاک رس و نهایتاً مرحله بوزدایی با بخار برای حذف FFA باقی مانده و تخریب گرمایی پراکسیدها انجام می شود. همه این مراحل خصوصاً مراحل رنگبری، گرمادهی و تغییرات pH می توانند بر کیفیت و کمیت دی ان ای باقی مانده در روغن نهایی تصفیه شده اثر بگذارند (Gryson et al., 2002). نمودار ۲ مراحل کامل تولید روغن سویا را نشان داده است.

مانده است (Rejeb et al., 2023; Frimpong et al., 2025). بنابراین، طراحی نظام های ردیابی در این کشورها باید بر اساس رویکرد فناوری متناسب با بافت بومی و با اولویت بندی راه کارهای کم هزینه و سازگار با زیرساخت های موجود صورت پذیرد (Frimpong et al., 2025).

مطالعه موردی: ردیابی روغن سویای تراریخته در فرآیند تولید

در این بخش، یک نمونه مطالعه تحقیقی انجام شده توسط کاستا و همکاران در سال ۲۰۱۰ در امکان سنجی اندازه گیری کمی میزان تراریختگی روغن سویای تراریخته در طول مراحل فرآوری شیمیایی - حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفته است (Costa et al., 2010). این نمونه، مثال کلیدی از چگونگی تغییر دی ان ای تراریخته در طول فرآیندهای صنعتی است. در این تحقیق، وجود دی ان ای مهندسی شده در محصولات میانی و محصول نهایی روغن سویا بررسی شده است. دانه



نمودار ۲. مراحل تولید روغن سویا

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

استخراج دی‌ان‌ای نمونه‌های روغن پس از فرآوری مورد استفاده قرار گرفت.

در تحقیق کاستا، غلظت و خلوص دی‌ان‌ای توسط طیف‌سنجی UV به ترتیب در طول موج جذب ۲۶۰ نانومتر (A260) و نسبت جذب A260/A280 توسط نانوفتومتر اندازه‌گیری شد. جدول ۲ نتایج حاصل را نشان می‌دهد که روغن خام بیشترین خلوص دی‌ان‌ای را در بین نمونه‌های روغن داشته و روغن رنگ‌بری شده، بیشترین غلظت و کمترین خلوص را داشته است (Costa et al., 2010).

چالش اصلی در تعیین تراریختگی، مقدار اندک دی‌ان‌ای باقی‌مانده در روغن فرآوری شده است. در این مطالعه، پژوهشگران از دو روش استخراج ویزارد (Wizard Extraction Method) و نوکلئوسپین (Nucleospin®) برای استخراج دی‌ان‌ای استفاده کردند. همچنین از روش‌های qPCR و PCR درجا برای اندازه‌گیری تراریخته استفاده نمودند. روش ویزارد به دلیل ساده و اقتصادی بودن برای استخراج دی‌ان‌ای نمونه‌های دانه سویا انتخاب شد و روش نوکلئواسپین برای

جدول ۲. خلوص و غلظت دی‌ان‌ای استخراج شده از نمونه‌های روغن کشی و تصفیه روغن سویا (Costa et al., 2010)

نمونه‌ها	غلظت دی‌ان‌ای (ng/μL)	خلوص (A260/A280)
دانه کامل	۸۸۳/۵ ± ۱۶/۷	۱/۸۷ ± ۰/۱
دانه شکسته	۹۵۶/۵ ± ۱۲/۰	۱/۷۸ ± ۰/۴
دانه له شده	۸۴۷/۵ ± ۳/۵۰	۱/۸۳ ± ۰/۱
دانه چرخ شده	۷۱۶/۵ ± ۴/۹۰	۱/۷۳ ± ۰/۰
کنجاله	۷۶۰/۰ ± ۲/۸۰	۱/۶۸ ± ۰/۲
روغن خام	۲۸/۳ ± ۰/۴	۱/۹۵ ± ۰/۲
روغن خنثی	۴/۵ ± ۰/۰	۱/۶۱ ± ۰/۸
روغن شسته شده	۳/۹۰ ± ۱/۲۷	۱/۲۱ ± ۰/۱
روغن رنگ‌بری شده	۳۲/۵ ± ۷/۱	۱/۲۳ ± ۰/۹
روغن بی بو شده	۵/۱۳ ± ۱/۲۴	۱/۲۷ ± ۰/۸

نمونه‌های روغن خنثی، شسته شده و رنگ‌بری شده، تعداد کپی‌های دی‌ان‌ای ژن لکتین در نمونه‌ها بسیار کم بوده و بنابراین تقویت و ردیابی سویای RR میسر نبوده است.

نتایج PCR درجا برای کلیه مراحل استخراج و تصفیه روغن سویا در جدول ۳ آمده است. در مورد نمونه‌های قبل از استخراج روغن، درصد تراریخته نمونه‌ها به طور متوسط ۵۰/۷ درصد بوده و مشابه با روغن خام و روغن بی بو شده، است. برای

جدول ۳. نتایج PCR درجا برای کلیه مراحل استخراج و تصفیه روغن سویا (Costa et al., 2010)

نمونه‌ها	لک‌تین		RR		درصد GM
	Ct	DNA copies	Ct ^a	DNA copies	
دانه کامل	۲۷/۷۳±۰/۰۷	۸۶۳۲۷/۴	۲۹/۱۷±۰/۱۱	۴۸۳۴۸/۱	۵۶/۰±۰/۹
دانه شکسته	۲۷/۵۴±۰/۰۱	۹۸۶۷۲/۶	۲۹/۲۹±۰/۱۹	۴۴۸۶۷/۷	۴۵/۵±۵/۸
دانه له شده	۲۹/۱۴±۰/۰۶	۳۱۹۴۶/۹	۳۰/۷۰±۰/۰۵	۱۷۵۵۱/۶	۵۴/۹±۱/۹
دانه چرخ شده	۲۷/۰۶±۰/۰۷	۱۳۸۴۹۵/۶	۲۸/۹۷±۰/۱۳	۵۵۱۳۲/۷	۳۹/۸±۳/۳
کنجاله	۲۷/۲۸±۰/۰۶	۱۱۹۰۲۶/۵	۲۸/۷۴±۰/۰۲	۶۴۲۴۷/۸	۵۴/۰±۰/۰۶
ماده مرجع معتبر ۱٪	۲۷/۸۴±۰/۰۰	۷۹۹۱۱/۵	۳۴/۳۲±۰/۱۹	۸۲۳/۰	۱/۰۳±۰/۰۷
روغن خام	۲۵/۷۶±۰/۳۲	۷۹۶۷/۶	۲۶/۷۸±۰/۵۹	۴۸۱۴/۲	۶۰/۴±۱۳/۳
روغن خنثی	۲۹/۹۶±۰/۴۷	۴۵۴/۵	۳۷/۵۴±۰/۶۶	۴/۲	ND ^c
روغن شسته شده	۳۱/۷۴±۰/۲۶	۱۳۱/۴	NA ^b	-	-
روغن رنگبری شده	۲۹/۸۶±۰/۰۴	۴۷۱/۷	NA	-	-
روغن بی بو شده	۲۷/۵۶±۰/۰۵	۱۷۷۸/۸	۲۹/۵۹±۰/۷۳	۷۸۶/۲	۴۴/۲±۱۵/۰
ماده مرجع معتبر ۱٪	۲۰/۸۵±۰/۰۹	۲۲۹۳۳۱/۹	۲۸/۳۰±۰/۰۷	۲۲۵۶/۶	۰/۹۸±۰/۰۵

a Ct – cycle threshold

C غیر قابل رد یابی

b ناموجود

که امکان‌پذیری فنی ردیابی در محصولات نهایی وجود دارد. این نتایج در راستای تحقق اهداف ردیابی و شفافیت برای مصرف‌کنندگان از اهمیت بالایی برخوردار است.

برچسب‌گذاری و ردیابی دی‌ان‌ای برونزاد و تغییرات سطح تراریختگی در فرآیند تولید پروتئین سویا توسط دیگر محققین نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که مرحله استخراج با حلال، بیشترین تاثیر منفی را بر یکپارچگی دی‌ان‌ای دارد (Yan et al., 2020). در راستای بررسی کاربردپذیری روش‌های تشخیص تراریختگی در شرایط واقعی بازار، صفایی و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ای مستقل بر روی ۹۰ نمونه‌ی بدون برچسب از محصولات سویا و ذرت جمع‌آوری شده از بازار تهران انجام دادند (Safaei, 2020). در این پژوهش، دی‌ان‌ای نمونه‌ها با استفاده از کیت، استخراج شده و با روش PCR کیفی مورد آزمایش قرار گرفتند. غربالگری اولیه بر اساس شناسایی پروموتور S ۳۵ (یکی از عناصر ژنتیکی رایج در محصولات تراریخته) انجام شد و

یافته‌های پژوهش کاستا و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که اگرچه فرآیندهای شیمیایی و حرارتی نظیر خنثی‌سازی، رنگ‌بری و بوگیری منجر به تخریب شدید دی‌ان‌ای می‌شوند و غلظت دی‌ان‌ای قابل استخراج را از حدود ۸۸۳ نانوگرم در میکرولیتر در دانه کامل به کمتر از ۶ نانوگرم در روغن تصفیه‌شده نهایی کاهش می‌دهند (جدول ۳)، اما با استفاده از نمونه‌های اولیه ۲۰۰ گرمی، به‌کارگیری پروتکل‌های استخراج بهینه مانند روش نوکلئوسپین و طراحی پرایمرهای مناسب برای تکثیر قطعات کوتاه دی‌ان‌ای (در محدوده ۸۱ تا ۱۶۹ جفت بازی (مطابق جدول ۲))، هنوز هم می‌توان دی‌ان‌ای قابل تکثیر را شناسایی و حتی کمی‌سازی کرد. این یافته از دو جهت حائز اهمیت است: از یک سو، تأکید می‌کند که روش‌های مبتنی بر دی‌ان‌ای می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های مبتنی بر پروتئین باشند که به دلیل ناپایداری پروتئین‌ها در فرآیندهای شدید صنعتی، برای آنالیز غذاهای با درجه فرآوری بالا چندان قابل اتکا نیستند (Bawa and Anilakumar, 2013). از سوی دیگر، نشان می‌دهد

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

تجارت بین‌المللی به شمار می‌رود. فقدان یا ضعف مقررات برچسب‌گذاری ممکن است موجب سردرگمی مصرف‌کنندگان یا تضعیف اعتماد عمومی شود. بنابراین، وجود سیاست‌های شفاف، مبتنی بر شواهد علمی و همراه با اطلاع‌رسانی عمومی مؤثر از ملزومات حکمرانی مؤثر در حوزه محصولات تراریخته به شمار می‌آید (FAO/WHO, 2008). بسیاری از کشورها و نهادهای منطقه‌ای با گسترش تولید و تجارت جهانی محصولات تراریخته، به تدوین مقرراتی برای برچسب‌گذاری و ردیابی این محصولات اقدام کرده‌اند. هدف اصلی این قوانین، تضمین شفافیت اطلاعات برای مصرف‌کنندگان، حمایت از حق انتخاب آنان و فراهم‌سازی زمینه‌ای برای مدیریت احتمال خطر در زنجیره تأمین غذا است (Gruère and Rao, 2007).

برچسب‌گذاری اجباری به مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهد تا آگاهانه میان محصولات تراریخته و غیر تراریخته انتخاب کنند. این رویکرد در بسیاری از کشورها مانند کشورهای عضو اتحادیه اروپا (EU)، چین، ژاپن، کره جنوبی، استرالیا و نیوزیلند اجرا می‌شود. در مقابل، برخی کشورها نظیر ایالات متحده آمریکا، آرژانتین و کانادا به برچسب‌گذاری داوطلبانه یا مبتنی بر هم‌ارزی ماهوی متکی‌اند و تنها در صورت تفاوت ماهوی در ترکیب یا خواص تغذیه‌ای اقدام به برچسب‌گذاری می‌کنند (USDA, 2020; Carter and Gruère, 2003). اصل هم‌ارزی ماهوی نخستین بار توسط سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) معرفی شد و بعدها توسط FAO و WHO در دستورالعمل‌های ایمنی غذایی مورد تأکید قرار گرفت (FAO/WHO, 2000). این اصل بیان می‌کند که اگر یک محصول تراریخته از نظر ترکیب شیمیایی، ارزش تغذیه‌ای و ویژگی‌های ایمنی، به‌طور اساسی معادل با همتای غیرتراریخته‌ی خود باشد، می‌توان آن را ایمن در

نمونه‌های مثبت، برای شناسایی اختصاصی رویدادهای سویای RR، ذرت Bt11 و MON810 با PCR مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که ۹۵ درصد از نمونه‌های سویا و ۶۰ درصد از نمونه‌های ذرت از نظر عناصر تراریخته مثبت بوده و بررسی اختصاصی رویدادها، حضور رویدادهای یادشده را تأیید کرد، در حالی که هیچ‌یک از نمونه‌ها دارای برچسب تراریخته نبودند روش PCR درجای کاستا با شناسایی و کمی‌سازی مقادیر بسیار ناچیز دی‌ان‌ای (تا چند کپی) از حساسیت و دقت بالاتری برخوردار است، در حالی که روش PCR کیفی صفایی با حد تشخیص حدود ۰/۱ تا ۰/۲ درصد، برای غربالگری اولیه و شناسایی سریع نمونه‌های مشکوک قابل انجام است. این مطالعه نشان می‌دهد که اندازه‌گیری کیفی تراریختگی قابلیت اجرا در ایران را دارد و می‌توان از آن به عنوان یک روش غربالگری مقرون‌به‌صرفه برای نظارت مؤثر بر بازار داخلی و تشخیص تخلفات استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود که آزمایشگاه‌های مرجع غذا و دارو در ایران با بهره‌گیری از این پروتکل، برنامه‌ی پایش مستمر محصولات تراریخته را راه‌اندازی نمایند. در یک نظام نظارتی کارآمد، می‌توان از PCR کیفی به عنوان ابزار غربالگری اولیه برای شناسایی سریع نمونه‌های مشکوک در سطح بازار استفاده کرد و سپس نمونه‌های مثبت را با PCR درجا به عنوان روش تأییدی و کمی مورد بررسی دقیق‌تر قرار داد. این راهبرد ترکیبی، ضمن کاهش هزینه‌های اجرایی، امکان پوشش گسترده‌تر نظارت بر محصولات غذایی را فراهم می‌آورد و می‌تواند به عنوان الگویی عملیاتی برای استقرار نظام برچسب‌گذاری و ردیابی در ایران مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرد.

قوانین برچسب گذاری و ردیابی

برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته از مهم‌ترین موضوعات جاری در حوزه قانون گذاری و

نظر گرفت و بررسی‌های ریسک پیچیده‌تر فقط در صورت مشاهده‌ی تفاوت‌های معنادار انجام خواهد شد.

در اتحادیه اروپا نظام قانون‌گذاری مرتبط با محصولات تراریخته بر رویکردی فرآیندمحور استوار است؛ به این معنا که تمرکز اصلی بر شیوه تولید این محصولات قرار دارد و ارزیابی‌های ایمنی بر پایه‌ی روش‌های ژنتیکی به کار رفته در فرآیند تولید انجام می‌شود (European Commission, 2021). بر اساس این رویکرد، یک محصول زمانی تراریخته نامیده می‌شود که در روش تولید آن از ارگاناسمی استفاده شود که مواد ژنتیکی آن طوری تغییر یافته که در حالت طبیعی وجود ندارد. در آمریکا و کانادا، سیستم قانون‌گذاری محصول-محور است به گونه‌ای که تمرکز قوانین بر ارزیابی احتمال خطر محصولات نهایی به جای بررسی فرایند تولید آن‌ها است؛ بنابراین، تغییر ژنتیکی به خودی‌خود به عنوان عامل خطر محسوب نمی‌گردد، بلکه ویژگی‌های جدید حاصل‌شده مبنای ارزیابی قرار می‌گیرند (Wolt et al., 2010). در اینجا، هم‌ارزی ماهوی به عنوان نقطه شروع ارزیابی احتمال خطر عمل کرده و مبنای بسیاری از سیاست‌های قانون‌گذاری محصول‌محور است که در آن که تأکید اصلی بر ویژگی‌های محصول نهایی است نه فرآیند تولید آن. در مقابل، رویکرد اروپا که فرآیندمحور است، هم‌ارزی ماهوی را تنها بخشی از ارزیابی ریسک می‌داند و علاوه بر محصول نهایی، فرآیند مهندسی ژنتیک و اثرات احتمالی آن را نیز در نظر می‌گیرد (Wolt et al., 2010).

در اروپا، برچسب‌گذاری و ردیابی مواد غذایی و خوراک دام و طیور مشتق‌شده از تراریخته‌ها الزامی است، در حالی که این الزام برای محصولات غیرخوراکی مانند الیاف نساجی اعمال نمی‌شود (Regulation (EC) No 1830/2003)، فرآیند قانون‌گذاری در اتحادیه اروپا از طریق تعامل میان

سه نهاد اصلی: کمیسیون اروپا، پارلمان اروپا و شورای اتحادیه اروپا، انجام می‌شود. در این میان، اغلب پیشنهادهای قانونی از سوی کمیسیون اروپا ارائه شده و پس از تصویب توسط دو نهاد دیگر، به اجرا درمی‌آیند (Pollack and Shaffer, 2009). افزون بر این، پروتکل بین‌المللی کارتاها دربارۀ ایمنی زیستی نیز به‌عنوان چارچوبی جهانی در تنظیم جابجایی فرامرزی تراریخته‌ها مد نظر قرار می‌گیرد (CBD, 2000).

پروتکل کارتاها (CPB) به عنوان سند مادر برای تدوین قوانین ملی ایمنی زیستی محصولات تراریخته در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته است. این پروتکل، حداقل استانداردهای لازم برای انتقال، جابجایی و استفاده ایمن از محصولات تراریخته را تعیین می‌کند (Jaffe, 2004). یکی از رویه‌های پیشنهادی، توافق اطلاع‌رسانی پیش‌گامانه که برای محصولات تراریخته‌ای است که برای اولین بار به بازار عرضه می‌شوند. بر اساس این رویه، کشورهای صادرکننده موظف‌اند اطلاعات کامل مربوط به محصول تراریخته را به کشور واردکننده ارائه دهند. کشور واردکننده نیز موظف است اطلاعات دریافتی را بررسی کرده، ارزیابی احتمال خطر انجام دهد و بر اساس نتایج حاصل در خصوص پذیرش یا رد واردات آن محصول تصمیم‌گیری نماید. این پروتکل در سال ۲۰۰۳ لازم‌الاجرا شده ولی ایالات متحده آمریکا (به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان محصولات تراریخته) آن را تصویب نکرده است. با این حال، برای اکثر کشورهای جهان از جمله ایران که این پروتکل را تصویب کرده‌اند، این یک سند الزام‌آور بین‌المللی محسوب می‌شود.

مقررات شماره ۱۸۳۰/۲۰۰۳ مبنای برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات غذایی و خوراک دام و طیور تراریخته در اتحادیه اروپا است. این مقررات برچسب‌گذاری را برای غذا، خوراک دام و طیور،

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

جدی مواجهه است. نخست، مشکل نمونه‌برداری یکنواخت در محموله‌های فله‌ای غلات و دانه‌های روغنی که اغلب از مزارع مختلف و حتی کشورهای متعدد با سطوح مختلف تراریختگی تأمین می‌شوند، عملاً تضمین همگنی نمونه را غیرممکن می‌سازد (Miraglia *et al.*, 2004).

دوم، تغییرپذیری روش‌های تشخیص

(مانند تفاوت در کارایی استخراج دی‌ان‌ای و حساسیت کیت‌های PCR) می‌تواند تا ۰.۲ درصد خطا ایجاد کند که خود معادل یک‌چهارم آستانه‌ی مجاز است (Broeders *et al.*, 2014). سوم، عدم تفکیک زنجیره‌ی تأمین در کشورهای در حال توسعه که معمولاً محموله‌های تراریخته و غیرتراریخته را با هم حمل می‌کنند، پایبندی به این آستانه را به‌طور عملی غیرممکن می‌سازد. به‌عبارت دیگر، آستانه‌ی ۰/۹ درصد عمدتاً مبتنی بر مصالحه‌ی سیاسی و اقتصادی میان تولیدکنندگان، واردکنندگان و مصرف‌کنندگان اروپایی است و ریشه در شواهد علمی مرتبط با ایمنی یا سلامت مصرف‌کننده ندارد (FAO, 2011). سازمان WHO و FAO در بیانیه‌های مشترک خود اعلام کرده‌اند که محصولات حاوی تراریخته که فرآیند ارزیابی احتمال خطر را طی کرده‌اند، از نظر علمی ایمن در نظر گرفته می‌شوند (FAO/WHO, 2000). بنابراین، آستانه‌های عددی عمدتاً ابزاری برای مدیریت پذیرش اجتماعی و تسهیل تجارت هستند تا معیاری علمی برای ایمنی.

تحمیل آستانه‌های سخت‌گیرانه‌ی اروپایی به کشورهای در حال توسعه، هزینه‌های تطابق قابل توجهی را بر تولیدکنندگان داخلی تحمیل می‌کند. این هزینه‌ها شامل سرمایه‌گذاری در تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته (مانند PCR درجا و دستگاه‌های استخراج خودکار)، هزینه‌های نمونه‌برداری و آزمون مستمر، هزینه‌های تفکیک زنجیره تأمین (جداسازی حمل‌ونقل، انبارداری و

دانه‌ها، محصولات فله، غذاهایی که برای مصرف‌کننده نهایی عرضه می‌شود یا توسط تولیدکننده انبوه تولید می‌گردد و همچنین محصولات تراریخته‌ای که پروتئین یا دی‌ان‌ای آن‌ها به راحتی قابل ردیابی نیست (مانند روغن تصفیه شده) الزامی اعلام کرده است. بر اساس این مقررات، به صرف اینکه از یک محصول تراریخته در موارد فوق استفاده شده باشد، بایستی برچسب روی آن محصول نصب گردد. این برچسب باید واضح، خوانا و ماندگار بوده و در آن واژه‌هایی نظیر "تراریخته"، "تولید شده به صورت اصلاح ژنتیکی"، یا "حاوی محصولات تراریخته" درج شود. در مواردی که محصول تراریخته دارای ویژگی‌هایی متفاوت از نوع مرسوم بازار باشد، اطلاعات مربوط به آن ویژگی‌ها باید در برچسب قید گردد. همچنین، در صورت نبود نمونه مرسوم، برچسب باید مشخصات و ماهیت دقیق محصول را توضیح دهد. هرگونه ویژگی مرتبط با ملاحظات اخلاقی یا مذهبی نیز باید در برچسب گذاری منعکس گردد. در مقابل، محصولاتی که از طریق مصرف تراریخته توسط حیوانات تولید می‌شوند، مانند گوشت، تخم‌مرغ، شیر و فرآورده‌های لبنی، مشمول الزامات برچسب‌گذاری نیستند (Devos *et al.*, 2009). از سال ۲۰۱۵، کشورهای عضو اتحادیه اروپا مجاز شدند تا به دلایلی غیر از تحلیل‌های علمی ریسک، ممنوعیت یا محدودیت‌هایی را برای کشت محصولات تراریخته اعمال کنند. همچنین بر اساس دستورالعمل EC/۱۸/۲۰۰۱، محصولات تراریخته‌ای که با روش‌های خاصی که در پیوست این دستورالعمل آمده تولید شده‌اند، نیازی به برچسب‌گذاری و ردیابی ندارند.

در اتحادیه اروپا، برای میزان ناخواسته یا غیرقابل اجتناب مواد ژنتیکی اصلاح‌شده در محصولات غیرتراریخته، آستانه پذیرش ۰/۹ درصد تعیین شده است (European Commission, 2003). با این حال، اجرای عملی این آستانه با چالش‌های

بین‌المللی و میزان صادرات/واردات محصولات کشاورزی است.

مدل بومی و نقشه راه سیاستی برای برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته در ایران

با توجه به چالش‌های موجود در زمینه تشخیص، برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته و همچنین محدودیت منابع آزمایشگاهی و اجرایی کشور، استقرار یک نظام یکپارچه و در عین حال قابل اجرا برای مدیریت محصولات تراریخته در ایران ضروری است. به نظر می‌رسد که برای شروع محاسبه هزینه‌های اجتماعی عدم شفافیت در تراریخته‌گی در زنجیره غذا موثر می‌باشد. در شرایطی که اطلاعات کافی درباره منشأ و ویژگی محصول وجود ندارد، هزینه تنها بر عهده تولیدکننده یا واردکننده نیست، بلکه بخشی از آن به مصرف‌کننده، نظام سلامت و دولت منتقل می‌شود. این چارچوب به سیاست‌گذار کمک می‌کند نشان دهد که افزایش هزینه نظارت در کوتاه‌مدت، می‌تواند به معنای کاهش هزینه اجتماعی در بلندمدت باشد. بر این اساس، مدل پیشنهادی باید بتواند میان سه هدف اساسی، یعنی حفاظت از سلامت و حقوق مصرف‌کننده، تسهیل تجارت و تأمین مواد اولیه و ایجاد زیرساخت نظارتی فناورانه پایدار تعادل برقرار کند. بر این اساس، مدل پیشنهادی برای ایران، یک الگوی ترکیبی، مرحله‌ای و ریسک‌محور است که از یک سو از رویکرد احتیاطی اتحادیه اروپا برای محصولات غذایی و فرآوری‌شده با اهمیت مصرفی بالا و از سوی دیگر از رویکرد محصول‌محور آمریکا برای محصولاتی که کاربرد غیرغذایی یا ریسک پایین‌تری دارند، بهره می‌گیرد. نظام پیشنهادی متشکل از ۳ لایه می‌باشد:

فرآوری محصولات تراریخته و غیرتراریخته) و هزینه‌های آموزشی و نیروی انسانی متخصص که به‌ویژه در کشورهای با کمبود نیروی ماهر، چالش‌برانگیز است.

در حوزه کشاورزی ارگانیک، مقررات شماره ۱۸۰۴/۱۹۹۹ بیان می‌دارد که استفاده از محصولات تراریخته با اصول تولید ارگانیک ناسازگار است. با این حال، برای وجود غیرقابل اجتناب تراریخته در محصولات ارگانیک، آستانه‌ای بین ۰/۱ درصد (حد تشخیص آنالیز دی‌ان‌ای) و ۰/۹ درصد (حد مجاز غذا و خوراک دام) تعیین شده است. همچنین به کشورهای عضو اجازه داده شده تا بسته به شرایط ملی، آستانه متفاوتی از مقدار ۰/۹ درصد را انتخاب نمایند (Devos et al., 2009).

چالش‌های اجرایی در کشورهای در حال توسعه شامل کمبود زیرساخت‌های آزمایشگاهی پیشرفته، هزینه‌های بالای واردات تجهیزات و مواد مصرفی، نبود نظام یکپارچه‌ی نمونه‌برداری و آزمون، ضعف نظام جرمه‌های بازدارنده و عدم هماهنگی میان نهادهای متولی (مانند وزارت بهداشت، سازمان استاندارد، گمرک و وزارت کشاورزی) است. در ایران، علی‌رغم وجود قانون ایمنی زیستی و دستورالعمل‌های وزارت بهداشت، این چالش‌ها باعث شده‌اند که اثربخشی سیاست‌های برچسب‌گذاری به‌طور کامل محقق نشود (Safaei et al., 2020). سطح بهینه سخت‌گیری قوانین نیز موضوعی است که باید به‌طور بومی و بر اساس تحلیل مخاطرات و شرایط عمومی جامعه تصمیم‌گیری شود. داشتن مقررات سخت می‌تواند نوآوری در فناوری را کاهش دهد و در مقابل، قوانین ضعیف یا اعمال ناکارآمد آن‌ها می‌تواند جامعه را با مخاطره مواجه نماید. معیارهای تعیین این سطح شامل هزینه‌های اجرایی، سطح پذیرش عمومی، توان فنی آزمایشگاه‌ها، الزامات تجاری

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

• لایه اول: تشخیص و آزمون با رویکرد ریسک‌محور

نخستین لایه مدل پیشنهادی، ایجاد یک نظام تشخیص و آزمون مبتنی بر ریسک است. در این نظام، تمام محصولات وارداتی با شدت یکسان مورد آزمایش قرار نمی‌گیرند، بلکه ابتدا گروه‌هایی شناسایی می‌شوند که از نظر حجم واردات، میزان مصرف، اهمیت اقتصادی و امکان وجود یا ردیابی مواد تراریخته، در اولویت بالاتری قرار دارند. در مرحله نخست، تمرکز می‌تواند بر محصولات عمده‌ای مانند سویا، ذرت و فرآورده‌های آن‌ها، به‌ویژه روغن سویا، کنجاله و پروتئین سویا قرار گیرد. این انتخاب از آن جهت اهمیت دارد که کنترل تعداد محدودی از گروه‌های کالایی با حجم واردات بالا می‌تواند در مقایسه با پراکنده کردن منابع آزمایشگاهی میان صدها نوع محصول، پوشش نظارتی بیشتری ایجاد کند. در این چارچوب، سابقه واردکننده نیز می‌تواند در تعیین شدت نمونه‌برداری مؤثر باشد. برای واردکنندگان دارای سابقه طولانی انطباق، دفعات نمونه‌برداری می‌تواند کاهش یابد، در حالی که محموله‌های مربوط به واردکنندگان دارای سابقه عدم انطباق، دفعات و شدت آزمون بیشتری خواهند داشت.

در بخش فنی، پروتکل‌هایی مانند روش پیشنهادی کاستا و همکاران، شامل استخراج دی‌ان‌ای با روش‌های مناسب برای ماتریس‌های مختلف و استفاده از PCR و PCR درجا برای شناسایی و کمی‌سازی، می‌توانند به عنوان نقطه شروع توسعه روش‌های بومی مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، پیش از استفاده رسمی، روش‌ها باید متناسب با ماتریس محصول، در آزمایشگاه‌های داخلی اعتبارسنجی و در چارچوب الزامات نهادهای ذی‌صلاح پذیرفته شوند (Costa et al., 2010).

• لایه دوم: ثبت و ردیابی با رویکرد ایجاد هویت دیجیتال برای نمونه و محموله

دومین لایه مدل پیشنهادی، اتصال نتایج آزمایشگاهی به اطلاعات زنجیره تأمین است. آزمایش PCR به‌تنهایی زمانی ارزش نظارتی پیدا می‌کند که مشخص باشد نمونه متعلق به کدام محموله، واردکننده، تولیدکننده و مسیر توزیع بوده است. بر این اساس، برای هر محموله و نمونه آزمایشگاهی باید یک شناسه یکتا ایجاد شود که بتواند اطلاعات مربوط به آن را در طول زنجیره تأمین به یکدیگر متصل کند و در نتایج آزمایش انجام شده قابل رویت بوده و بر اساس آن گواهی دیجیتال صادر شود. پیشنهاد می‌شود در فاز نخست، به جای ایجاد یک زیرساخت کاملاً جدید و پرهزینه، از ظرفیت سامانه‌های موجود در سازمان غذا و دارو، گمرک و سایر زیرساخت‌های ملی مرتبط با شناسه کالا و رهگیری استفاده شود. در این میان، QR Code می‌تواند به عنوان رابط ساده و کم‌هزینه میان محصول فیزیکی و سابقه دیجیتال آن عمل کند. با یک معماری چند سطحی اطلاعاتی اطلاعات محرمانه تجاری مانند قراردادهای تجاری یا اطلاعات اختصاصی زنجیره تأمین باید فقط برای تولیدکننده، واردکننده و نهادهای نظارتی قابل دسترسی می‌باشد. در مرحله نخست، پیشنهاد می‌شود معماری سامانه بر پایه زیرساخت‌های موجود و یک پایگاه داده مرکزی طراحی شود. این رویکرد هزینه، پیچیدگی و زمان استقرار را کاهش می‌دهد. در مراحل بعدی، چنان‌چه مشخص شود که تعدد ذی‌نفعان، نیاز به ثبت تغییرناپذیر سوابق یا ضرورت اشتراک داده میان سازمان‌های مستقل، استفاده از رویکردهای توزیع‌شده را توجیه می‌کند، می‌توان از بلاک‌چین به صورت محدود و هدفمند استفاده کرد.

• لایه سوم: حکمرانی نظام ردیابی

حتی دقیق‌ترین فناوری تشخیص نیز بدون تقسیم وظایف روشن میان دستگاه‌ها نمی‌تواند به نظام مؤثر نظارتی تبدیل شود. پیشنهاد می‌شود یک کارگروه ملی مشترک ردیابی و مدیریت محصولات

- چه محصولاتی بر اساس ریسک اولویت بالاتری دارند؛
- روش نمونه برداری چیست؛
- چه روش‌هایی برای تشخیص قابل قبول‌اند؛
- حدود گزارش‌دهی چگونه تعیین می‌شود؛
- مسئولیت تولیدکننده و واردکننده چیست؛
- و فرآیند رسیدگی به موارد اختلافی چگونه انجام می‌شود.

در میان مدت، سامانه دیجیتال باید از سطح ثبت نتایج آزمایشگاهی به یک سامانه یکپارچه مدیریت زنجیره تأمین ارتقا یابد. سامانه باید بتواند داده‌های مربوط به واردات، ترخیص، تولید، آزمایش، توزیع، بازار، بازرسی را به یکدیگر مرتبط کند. همچنین امکان اتصال سامانه با ERP شرکت‌های بزرگ باید در نظر گرفته شود این فرآیند باید به گونه‌ای طراحی شود که هزینه انطباق برای بنگاه‌های کوچک و متوسط بیش از حد افزایش نیابد. نظام ردیابی زمانی کارآمد خواهد بود که رفتار اقتصادی بنگاه‌ها را از طریق نظام تشویق و تنبیه نیز تحت تأثیر قرار دهد. در بلندمدت نیز لازم است نظارت از یک فعالیت موردی به یک نظام پایش مستمر و مبتنی بر داده و هوشمند سازی تبدیل شود. انتشار بخش عمومی این اطلاعات، ضمن افزایش شفافیت، می‌تواند اعتماد مصرف‌کنندگان و فعالان اقتصادی را افزایش دهد.

بحث

برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته به عنوان دو رکن اساسی در نظام مدیریت ایمنی زیستی، نقشی محوری در تحقق حق انتخاب مصرف‌کننده و حفظ شفافیت زنجیره تأمین ایفا می‌کنند. با این حال، استقرار مؤثر این نظام‌ها مستلزم عبور از چالش‌های فنی متعددی است که

تراریخته با مشارکت وزارت بهداشت، سازمان غذا و دارو، سازمان ملی استاندارد، وزارت جهاد کشاورزی، سازمانهای حمایت از حقوق مصرف‌کنندگان و گمرک تشکیل شود. این کارگروه می‌تواند مسئولیت‌های زیر را بر عهده داشته باشد: تدوین طبقه‌بندی ریسک محصولات، تعیین الزامات نمونه‌برداری، تعیین روش‌های آزمایش قابل قبول، تعیین الزامات اعتبارسنجی آزمایشگاه‌ها، تعیین فرآیند ثبت نتایج، هماهنگی میان سامانه‌های دستگاه‌های مختلف، تعیین فرآیند رسیدگی به عدم انطباق، طراحی نظام تشویق و جریمه، انتشار گزارش‌های دوره‌ای از وضعیت بازار، بازنگری مستمر دستورالعمل‌ها بر اساس تحولات علمی و تجاری. این نظام حکمرانی نباید صرفاً پس از ایجاد بیماری وارد عمل شود، بلکه باید بخشی از منابع خود را به پیشگیری از ریسک‌های غذایی در زنجیره تأمین اختصاص دهد. از این منظر، استقرار این نظام به عنوان یک سرمایه‌گذاری پیشگیرانه در سلامت عمومی در نظر گرفته می‌شود.

نخستین اقدام کوتاه‌مدت، افزایش ظرفیت آزمایشگاهی است. سازمان غذا و دارو و وزارت بهداشت باید با استفاده از ظرفیت آزمایشگاه‌های مرجع، دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های واجد شرایط، شبکه‌ای از مراکز دارای توانایی انجام آزمون‌های مولکولی ایجاد کنند و باید هم‌زمان به موارد آموزش نیروی انسانی، استانداردسازی استخراج دی‌ان‌ای، تدوین SOP، اعتبارسنجی روش‌ها، کنترل کیفیت بین‌آزمایشگاهی و ایجاد بانک مواد مرجع نیز توجه کند. دومین اقدام کوتاه‌مدت، بازنگری مقررات مربوط به برچسب‌گذاری، نمونه‌برداری و آزمون محصولات تراریخته است. مقررات جدید باید به صورت شفاف مشخص کنند:

- چه محصولاتی مشمول مقررات هستند؛

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

مهم‌ترین آن‌ها، امکان تشخیص و اندازه‌گیری کمی تراریختگی در محصولات نهایی به ویژه آن دسته از فرآورده‌هایی است که فرآیندهای صنعتی شدیدی را پشت سر گذاشته‌اند. مطالعه موردی کاستا و همکاران (Costa et al., 2010) که به بررسی ردیابی دی‌ان‌ای تراریخته در مراحل مختلف تصفیه روغن سویا پرداخته، به خوبی این چالش را نمایان می‌سازد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد اگرچه فرآیندهای فیزیکوشیمیایی تصفیه روغن منجر به تخریب شدید دی‌ان‌ای و در نتیجه افزایش مقادیر Ct (آستانه چرخه) در آنالیز PCR درجا می‌شود، اما این تکنیک با حساسیت بالا هنوز قادر به شناسایی و حتی کمی‌سازی دی‌ان‌ای تراریخته در محصول نهایی است. با این حال، این امر مستلزم سرمایه‌گذاری در تجهیزات پیشرفته مانند PCR درجا، بهینه‌سازی پروتکل‌های استخراج و آموزش نیروی انسانی متخصص است. همچنین، صرف وجود امکان فنی اندازه‌گیری تراریختگی برای پاسخ به نیازهای سیاستی و نظارتی کافی نیست، بلکه لازم است این قابلیت‌های فنی در چارچوب قوانین و مقررات مناسب و همچنین سیستم‌های یکپارچه اطلاعاتی تعریف و پشتیبانی شوند.

در سطح قوانین و مقررات، دو رویکرد غالب جهانی در مواجهه با برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته مرور شد. در رویکرد اتحادیه اروپا و کشورهای پیرو آن که رویکردی فرآیندمحور و احتیاطی است، تمرکز اصلی بر شیوه تولید محصول قرار دارد و صرف استفاده از روش‌های مهندسی ژنتیک در فرآیند تولید، کافی است تا محصول مشمول برچسب‌گذاری اجباری شود، حتی اگر محصول نهایی از نظر ترکیب شیمیایی و ارزش تغذیه‌ای تفاوتی با نمونه معمولی نداشته باشد. مقررات شماره ۱۸۳۰/۲۰۰۳ اتحادیه اروپا، برچسب‌گذاری را برای تمام محصولات غذایی و خوراک دام مشتق‌شده از تراریخته الزامی می‌کند

و آستانه تحمل ۰/۹ درصد را برای حضور ناخواسته و غیرقابل اجتناب تراریخته در محصولات غیرتراریخته تعیین می‌نماید. این رویکرد با تأکید بر حق مصرف‌کننده برای دانستن (Right to Know)، شفافیت بالایی را برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌آورد و اعتماد عمومی را نسبت به نظام نظارتی افزایش می‌دهد، اما در مقابل، هزینه‌های اجرایی بالایی را بر تولیدکنندگان و واردکنندگان تحمیل می‌کند و ممکن است موانعی برای تجارت بین‌المللی ایجاد نماید. رویکرد دوم، که ایالات متحده آمریکا، کانادا و آرژانتین از آن پیروی می‌کنند، رویکردی محصول‌محور و مبتنی بر هم‌ارزی ماهوی است. در این دیدگاه، تغییر ژنتیکی به خودی خود به عنوان عامل خطر محسوب نمی‌شود، بلکه محصول نهایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگر محصول تراریخته از نظر ترکیب شیمیایی، ارزش تغذیه‌ای و ویژگی‌های ایمنی، به طور اساسی معادل با همتای غیرتراریخته خود باشد، نیازی به برچسب‌گذاری خاص نخواهد داشت. این رویکرد هزینه‌های نظارتی را کاهش می‌دهد و نوآوری و تجاری‌سازی فناوری را تسریع می‌بخشد، اما در عمل، عدم تقارن اطلاعاتی بین تولیدکننده و مصرف‌کننده را تشدید می‌کند و اعتماد عمومی را تضعیف می‌نماید؛ به طوری که نظرسنجی‌ها نشان می‌دهند حدود ۸۰ درصد مصرف‌کنندگان آمریکایی خواستار برچسب‌گذاری اجباری محصولات تراریخته هستند (Lusk, 2018).

در ایران، با وجود این‌که قانون ایمنی زیستی (۱۳۸۸) بر ضرورت ردیابی و برچسب‌گذاری تأکید دارد و وزارت بهداشت فهرست مواد غذایی مشمول برچسب‌گذاری و نیز آزمایشگاه مرجع غذا و دارو را برای انجام آزمون‌های تراریختگی معرفی کرده است، اما مطالعات میدانی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از محصولات تراریخته موجود در بازار فاقد برچسب شناسایی هستند (Safaei et al.,

2020). این شکاف میان قانون و اجرا، ناشی از چند عامل است: نخست، کمبود ظرفیت آزمایشگاهی و تجهیزات پیشرفته نظیر PCR در سطح کشور که اجرای مؤثر پروتکل‌هایی مانند آن چه در مطالعه کاستا به کار رفته را با دشواری مواجه می‌سازد؛ دوم، نبود یک سامانه یکپارچه نرم‌افزاری برای ثبت، پایش و ردیابی اطلاعات محصولات تراریخته از مرحله تولید تا مصرف؛ سوم، خلأهای قانونی در زمینه آیین‌نامه‌های اجرایی دقیق و نظام جرمه‌های بازدارنده برای متخلفان و چهارم، عدم هماهنگی کافی میان نهادهای ناظر نظیر سازمان غذا و دارو، سازمان ملی استاندارد و وزارت جهاد کشاورزی. در چنین وضعیتی، کشورهای در حال توسعه مانند ایران نمی‌توانند صرفاً یکی از دو مدل اروپایی یا آمریکایی را کپی کنند، بلکه به یک مدل ترکیبی بومی‌شده نیاز دارند که ضمن حفظ اصل احتیاط (مطابق با پروتکل کارتاها که ایران آن را تصویب کرده است)، هزینه‌های اجرایی را با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال نوین کاهش دهد.

از یک سو، سیستم ردیابی تراریختگی انگیزه‌های متفاوتی برای تولیدکنندگان مواد غذایی ایجاد می‌کند. مهم‌ترین انگیزه به ویژه برای آن‌هایی که قصد صادرات دارند، الزامات قانونی بازارهای هدف به ویژه اتحادیه اروپا، چین، ژاپن و روسیه است. این کشورها بر اساس مقرراتی مانند ۲۰۰۳/۱۸۳۰ EC اتحادیه اروپا، ردیابی کامل از مزرعه تا سفره را برای محصولات تراریخته الزامی کرده‌اند و عدم رعایت آن منجر به توقیف محموله، جرمه‌های سنگین و ممنوعیت ورود به بازار می‌شود. از سوی دیگر، سیستم ردیابی هزینه‌های ناشی از فراخوانی محصول را به شدت کاهش می‌دهد. تجربه شرکت Walmart با بلاک چین IBM Food Trust نشان داد که زمان ردیابی منبع آلودگی از چند روز به چند ثانیه کاهش یافت و تنها محموله‌های آلوده، بازگردانده شدند. همچنین، دسترسی به بازار

سودآور محصولات غیرتراریخته که فروش سالانه آن در آمریکا از ۵۰ میلیارد دلار فراتر رفته، تولیدکنندگان را به سرمایه‌گذاری در سیستم‌های ردیابی تشویق می‌کند تا بتوانند اصالت برچسب خود را مستند سازند و محصولات را با قیمت بالاتری عرضه کنند (Reports and Data, 2024).

همچنین، انگیزه‌های مرتبط با اعتماد عمومی و رقابت‌پذیری، در به‌کارگیری سیستم ردیابی توسط تولیدکنندگان موثر است. نظرسنجی‌ها نشان می‌دهد حدود ۸۰ درصد مصرف‌کنندگان آمریکایی و ۸۵ درصد مصرف‌کنندگان اروپایی خواستار برچسب‌گذاری شفاف محصولات تراریخته هستند. تولیدکنندگانی که با استفاده از کدهای QR، بلاک چین یا میکروتگ‌ها، امکان دسترسی مصرف‌کننده به تاریخچه کامل محصول را فراهم می‌کنند، اعتماد بیشتری جلب نموده و مزیت رقابتی قابل توجهی نسبت به رقبای خود کسب می‌کنند. علاوه بر این، تولیدکنندگان آینده‌نگر، سیستم ردیابی را نه به عنوان یک هزینه اجتناب‌ناپذیر، بلکه به عنوان یک سرمایه‌گذاری راهبردی می‌بینند که می‌تواند با سایر سیستم‌های مدیریت سازمانی مانند ERP یکپارچه شده و داده‌های ارزشمندی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین، کاهش ضایعات و توسعه محصولات جدید فراهم آورد. همچنین، با ظهور فناوری‌های جدید و روند جهانی به سمت سخت‌گیری بیشتر در مقررات برچسب‌گذاری، تولیدکنندگانی که از هم‌اکنون زیرساخت‌های ردیابی را مستقر کرده‌اند، از رقبای خود جلوتر خواهند بود. به عبارت دیگر، اگرچه استقرار این سیستم‌ها در کوتاه‌مدت مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه است، اما در بلندمدت تاب‌آوری سازمان را در برابر بحران‌ها و تغییرات مقرراتی افزایش داده و ارزش افزوده مستقیمی برای کسب و کار ایجاد می‌کند (USDA Foreign Agricultural Service, 2025).

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

Myopia) و ناتوانی در ارزش‌گذاری منافع بلندمدت دارد، یکی از مهم‌ترین موانع تحقق شفافیت در زنجیره تأمین محصولات تراریخته محسوب می‌شود.

از نظر سیاست‌گذاری، در شرایطی که نظام سلامت، با بودجه محدود و منابع مالی تقریباً ثابت مواجه است، یکی از عمیق‌ترین تعارضات راهبردی میان تأمین غذای کافی و در دسترس برای جمعیت و پیشگیری از هزینه‌های آتی ناشی از مصرف غذاهای ناسالم یا پرخطر شکل می‌گیرد. این تعارض از آنجا نشأت می‌گیرد که سرمایه‌گذاری در ایمنی و شفافیت مواد غذایی (مانند برچسب‌گذاری محصولات تراریخته، سیستم‌های ردیابی و نظارت بر زنجیره تأمین) عمده‌تاً در کوتاه‌مدت هزینه‌بر است و مستلزم تخصیص منابعی است که می‌توانست صرف درمان بیماران، خرید تجهیزات پزشکی یا واکسیناسیون شود. اما در مقابل، هزینه‌های تحمیلی (External Costs) ناشی از مصرف غذاهای با کیفیت پایین، آلوده، یا فاقد برچسب شفاف مانند هزینه‌های درمان بیماری‌های مزمن (سرطان، اختلالات هورمونی، آلرژی‌ها)، غیبت از کار، کاهش بهره‌وری نیروی کار و فشار بر سیستم بیمه سلامت، عمده‌تاً در بلندمدت ظاهر می‌شوند و اغلب به حساب جامعه و نظام سلامت نوشته می‌شوند. این عدم تطابق زمانی و نهادی میان هزینه‌کننده/سرمایه‌گذار و بهره‌بردار از صرفه‌جویی‌های آتی، دقیقاً منشأ تعارض منافع در بخش سلامت است.

بنابراین، در یک تحلیل اقتصادی-اجتماعی، نظام سلامت با یک وضعیت دوراهی مواجه است: از یک سو، فشار فوری برای پاسخ به نیازهای درمانی موجود و کنترل هزینه‌های جاری وجود دارد که کاهش بودجه نظارت بر مواد غذایی و برچسب‌گذاری را توجیه می‌کند. از سوی دیگر، شواهد علمی نشان می‌دهد که هر دلار

با این حال، بسیاری از تولیدکنندگان مواد غذایی به دلیل نگاه کوتاه‌مدت و اولویت دادن به کاهش هزینه‌های فوری، در برابر استقرار سیستم‌های ردیابی تراریختگی مقاومت نشان می‌دهند. از منظر مالی، سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای راه‌اندازی سیستم‌های ردیابی مبتنی بر فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین، IoT و نرم‌افزارهای یکپارچه ERP، همراه با هزینه‌های آموزش نیروی انسانی و اخذ گواهی‌های بین‌المللی، می‌تواند برای تولیدکنندگان کوچک و متوسط که حاشیه سود ناچیزی دارند، سنگین و غیرقابل توجیه به نظر برسد. از منظر حقوقی، تولیدکنندگان ترجیح می‌دهند در منطقه خاکستری نظارتی باقی بمانند و هزینه‌های ناشی از انطباق با مقررات برچسب‌گذاری مانند الزامات اتحادیه اروپا یا استانداردهای غیر تراریخته را متقبل نشوند. این شرکت‌ها این ریسک را می‌پذیرند که ممکن است در آینده جریمه شوند، اما در کوتاه‌مدت از صرف هزینه‌های اجتناب‌شده سود می‌برند. از منظر فنی نیز پیچیدگی پیاده‌سازی سیستم‌های ردیابی در زنجیره تأمین چندلایه و بین‌المللی، به ویژه در صنایعی که مواد اولیه از تأمین‌کنندگان متعدد و پراکنده تأمین می‌شود، بسیاری از تولیدکنندگان را به این نتیجه می‌رساند که هزینه اجرا بیشتر از ریسک کشف تخلف است. این مقاومت‌ها به ویژه در کشورهای در حال توسعه شدیدتر است، زیرا ضعف نظارت دولتی و نبود نظام جریمه‌های بازدارنده مؤثر، انگیزه‌های منفی برای اجتناب از ردیابی را تقویت می‌کند. به عبارت دیگر، تا زمانی که هزینه تخلف (جریمه، از دست دادن بازار، خسارت اعتباری) از هزینه انطباق (سرمایه‌گذاری در سیستم ردیابی) بیشتر نباشد، تولیدکنندگان عقلانی ترجیح می‌دهند وضع موجود را حفظ کرده و از درگیر شدن با مسائل پیچیده حقوقی، مالی و فنی ردیابی اجتناب ورزند. این رفتار اقتصادی که ریشه در بی‌صبری سازمانی (Organizational

سرمایه‌گذاری در پیشگیری (از جمله ایمنی غذایی و شفافیت برچسب‌ها) می‌تواند بین ۳ تا ۱۰ دلار در هزینه‌های درمانی آتی صرفه‌جویی ایجاد کند. با این حال، در عمل، سیاست‌گذاران سلامت به دلیل افق تصمیم‌گیری کوتاه (معمولاً همسو با دوره‌های بودجه‌ریزی سالانه یا برنامه‌های توسعه پنج ساله) و نبود مکانیسم بازتخصیص منابع بین نهادهای مختلف (وزارت بهداشت، سازمان استاندارد، وزارت کشاورزی، سازمان حفاظت محیط زیست)، تمایل دارند منابع محدود خود را به سمت خروجی‌های قابل اندازه‌گیری و زودبازده (تعداد ویزیت، تعداد جراحی، پوشش واکسیناسیون) سوق دهند تا به سمت پیامدهای دیربازده پیشگیری از مخاطرات غذایی. این تعارض زمانی تشدید می‌شود که نگاهی به تجربه ایران بیندازیم: مطالعات دانشگاه‌های علوم پزشکی ایران نشان داده است که بخش قابل توجهی از محصولات تراریخته موجود در بازار فاقد برچسب شناسایی هستند، بودجه مورد نیاز برای تجهیز آزمایشگاه‌ها به دستگاه‌های PCR درجا، آموزش بازرسان و استقرار سیستم ردیابی بلاک چین محور، تأمین نشده است، زیرا این هزینه‌ها در رقابت مستقیم با خرید دارو، تجهیزات بیمارستانی و پرداخت حقوق پرستاران قرار دارند.

نتیجه‌گیری

برچسب‌گذاری و ردیابی محصولات تراریخته یکی از مهم‌ترین الزامات برای مدیریت ایمنی زیستی و حفظ اعتماد عمومی به محصولات غذایی نوین محسوب می‌شود (Euro Coop, 2025; Yeo and Shin, 2026). سیستم‌های مؤثر نیازمند سه پایه اساسی هستند: روش‌های فنی روا و معتبر، زیرساخت‌های دیجیتال یکپارچه و نوآورانه و چارچوب‌های مقرراتی منعطف و کارآمد. نوآوری اصلی این مقاله در یکپارچه‌سازی سه سطح تحلیل فنی، فناورانه و سیاستی نهفته است که در منابع

اطلاعاتی موجود عمدتاً به صورت پراکنده و مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سطح تحلیل فنی، این مقاله صرفاً به مرور کلی روش‌های تشخیص تراریختگی اکتفا نمی‌کند، بلکه با بهره‌گیری از یک مطالعه موردی عینی، نشان می‌دهد که چالش تخریب دی‌ان‌ای در فرآیندهای صنعتی شدید (نظیر تصفیه روغن سویا) چگونه بر اجرای عملی ردیابی تأثیر می‌گذارد. در سطح تحلیل فناورانه، این مقاله نشان می‌دهد چگونه فناوری‌های دیجیتال نوین مانند اینترنت اشیا، بلاک چین، میکروتگ‌ها، کدهای QR می‌توانند به عنوان راهکارهای مکمل برای غلبه بر سه چالش اساسی مطرح‌شده در ادبیات (چالش نمونه‌برداری و مستندسازی، چالش عدم تغییرناپذیری اطلاعات و کاهش اعتماد مصرف‌کننده و چالش پاسخ سریع به بحران‌های ایمنی غذایی) عمل کنند. این پیوند میان بیوتکنولوژی روش‌های تشخیص مبتنی بر دی‌ان‌ای و فناوری اطلاعات و ارتباطات یک نوآوری میان‌رشته‌ای است که در ادبیات سنتی ردیابی محصولات تراریخته به ندرت دیده می‌شود و عمدتاً به مطالعات مجزا در یکی از این دو حوزه محدود بوده است.

بررسی تجارب بین‌المللی نشان می‌دهد که کشورهای مختلف بسته به رویکرد قانون‌گذاری خود (محصول محور یا فرآیند محور) و ظرفیت‌های فنی و نظارتی، نظام‌های متفاوتی برای برچسب‌گذاری و ردیابی ایجاد کرده‌اند. با این حال، یک الگوی واحد جهانی وجود ندارد و هر کشور ناگزیر است سامانه‌ای متناسب با شرایط بومی خود طراحی کند که ضمن هم‌سویی با استانداردهای بین‌المللی، قابلیت اجرایی در سطح ملی نیز داشته باشد. لذا دستورالعمل‌های ملی با اتکا به تحلیل تطبیقی الگوهای اروپایی و آمریکایی، باید به گونه‌ای بازنگری شوند که برچسب‌گذاری شفاف مبتنی بر شناسه‌های فنی را الزامی کنند. در ایران، با وجود انتشار فهرست

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

شناسه‌دار کردن کالا و آستانه‌های تحمل بر اساس توان فنی آزمایشگاه‌های داخلی تنظیم شده است. این مدل، ضمن حفظ اصل احتیاط (مطابق با پروتکل کارتاها)، از تحمیل هزینه‌های سنگین مشابه با مدل اروپایی به اقتصاد کشور جلوگیری می‌کند. چنین رویکردی همسو با اهداف تحول نظام بهداشت و سلامت کشور، توسعه کسب‌وکارهای دانش‌بنیان و استقرار نظام دولت الکترونیک خواهد بود و می‌تواند اعتماد عمومی و شفافیت بازار محصولات تراریخته را افزایش دهد.

محصولات مشمول برچسب‌گذاری و تعیین آزمایشگاه‌های مرجع، چالش‌های اجرایی، کمبود ظرفیت آزمایشگاهی و نبود یک سامانه ردیابی یکپارچه باعث شده است که اثربخشی سیاست‌ها به‌طور کامل محقق نشود. این مقاله برای اصلاح این وضعیت راه‌کاری بین رشته‌ای مبتنی بر شواهد موجود ارائه کرده است. مدل مفهومی ترکیبی پیشنهادی این مقاله، در سه لایه، یک چارچوب اختصاصی برای ایران ترسیم می‌کند که در آن اولویت‌بندی نمونه‌ها بر اساس الگوی وارداتی کشور، بستر فنی بر اساس سامانه‌های ملی

منابع

- AgbioInvestor. (2024) Global GM Crop Area Review 2023. <https://gm.agbioinvestor.com>. [Accessed 6 December 2025].
- Altieri MA. (2005) The myth of coexistence: why transgenic crops are not compatible with agroecologically based systems of production. *Bulletin of Science Technology and Society*. 25(4):361-371. <https://doi.org/10.1177/0270467605277291>.
- Bawa AS, Anilakumar KR. (2013) Genetically modified foods: Safety, risks and public concerns—a review. *Journal of Food Science and Technology*. 50(6): 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0899-1>.
- Bosona T, Gebresenbet G. (2013) Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain. *Food Control*. 33(1): 32-48. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.02.004>.
- Broeders S, Huber I, Grohmann L, Berben G, Taverniers I, Mazzara M, Roosens N, Morisset D. (2014) Guidance document on the quality control of qualitative and quantitative PCR methods for GMO testing and GM traceability. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 406(27): 6603–6617. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-8216-8>.
- CBD (Cartagena Protocol on Biosafety). (2000) Cartagena Protocol on Biosafety to the Convention on Biological Diversity. *Secretariat of the Convention on Biological Diversity*. Retrieved from. <https://bch.cbd.int/protocol>.
- Carrefour News. (2024) Carrefour, a blockchain pioneer in Europe, has joined the IBM Food Trust platform. <https://www.carrefour.com/en/news/food-traceability-carrefour-blockchain-pioneer-europe-has-joined-ibm-food-trust-platform-take>. [Accessed 23 November 2025]
- Carter CA, Gruère GP. (2003) Mandatory labeling of genetically modified foods: Does it really provide consumer choice? *The Journal of Agrobiotechnology Management and Economics*. 6(1 & 2): 68-70.
- Clive J. (2011) Global status of commercialized biotech/GM crops. ISAAA Briefs No. 43. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, Ithaca.
- Costa J, Mafra I, Amaral JS, Oliveira MBP. (2010) MBPP. Detection of genetically modified soybean DNA in refined vegetable oils. *European Food Research and Technology*. 230(6): 915–923. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1238-2>.

Data Insights Market. (2024) GMO Detection Kit Market 2025-2033: Trends, Key Players, and Regional Analysis. <https://www.datainsightsmarket.com/reports/gmo-detection-kit-1021647>. [Accessed 8 December 2025].

Deisingh AK, Badrie N. (2005) Detection approaches for genetically modified organisms in foods and feeds. *Food Research International*. 38(6): 639–649. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.01.003>.

Devos Y, Demont M, Dillen K, Reheul D, Kaiser M, Sanvido O. (2009) Coexistence of genetically modified (GM) and non-GM crops in the European Union: A review. In: Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Véronique S, Alberola C. (eds.) Sustainable Agriculture. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_14.

Du Y, Chen F, Chen C, Liu K. (2020) Monitoring and traceability of genetically modified soya bean event GTS 40-3-2 during soya bean protein concentrate and isolate preparation. *Royal Society Open Science*. 7(10): 201147. <https://doi.org/10.1098/rsos.201147>.

Euro Coop (2025) Euro Coop co-signs op-ed on GMO labelling: defending consumers' right to know. Available at: <https://www.eurocoop.coop/news/537/>.

European Commission. (2003) Regulation (EC) No 1831/2003 of the European Parliament and of the Council of 22 September 2003 concerning the traceability and labelling of genetically modified organisms and the traceability of food and feed products produced from genetically modified organisms. *Official Journal of the European Union*. 268: 24–28. <http://data.europa.eu/eli/reg/2003/1830/oj>.

European Commission. (2007) Food traceability: Factsheet. https://food.ec.europa.eu/system/files/2016-10/gfl_req_factsheet_traceability_2007_en.pdf. [Accessed 1 December 2025].

European Commission. (2021) EU rules on GMOs. https://food.ec.europa.eu/safety/biotechnology/gmo_en. [Accessed 3 December 2025].

FAO. (2011) Food labeling and traceability of GM foods. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2011) Guidance for the risk assessment of food and feed from genetically modified plants.

FAO/WHO. (2000) Safety aspects of genetically modified foods of plant origin. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Paper 76.

FAO/WHO. (2008) Guideline for the conduct of food safety assessment of foods derived from recombinant-DNA animals (CAC/GL 68-2008). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Food Engineering Magazine. (2023) Walmart and Sam's Club cut traceability time to seconds with blockchain. <https://www.foodengineeringmag.com/articles/103126-walmart-sams-club-cut-traceability-time-to-seconds-with-blockchain>. [Accessed 8 December 2025].

Food Engineering Magazine. (2023) Naturipe Farms enables consumer access to precise harvest location with SAP blockchain. <https://www.foodengineeringmag.com/articles/103128-naturipe-farms-enables-consumer-access-to-precise-harvest-location-with-sap-blockchain>. [Accessed 8 December 2025].

Food and Wine. (2023) Parmigiano Reggiano guarantees authenticity with p-Chip microtags and blockchain. <https://www.foodandwine.com/news/parmigiano-reggiano-authenticity-p-chip-blockchain>. [Accessed 8 December 2025].

FoodNavigator. (2023) TE-Food expands blockchain traceability across Europe and Africa. Retrieved from. <https://www.foodNavigator.com/Article/2023/10/05/te-food-blockchain-traceability>. [Accessed 9 December 2025].

Fraiture M, Herman P, Taverniers I, De Loose M, Deforce D, Roosens NH. (2014) An innovative and integrated approach based on DNA walking to identify unauthorized GMOs. *Food Chemistry*. 147: 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.112>.

Francisco K, Swanson D. (2018) The supply chain has no clothes: Technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*. 2(1): 1-13. <https://doi.org/10.3390/logistics2010002>.

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

- Frimpong M, Monoarfa H, Twum S. (2025)** Digital traceability technologies in developing country nut value chains: A systematic review. *Open Access Journal of Multidisciplinary Research*. 1(9): 10-27. <https://doi.org/10.47760/oajmr.2025.v01i09.002>.
- Gao G, Xiao K, Chen M. (2019)** An intelligent IoT-based control and traceability system to forecast and maintain water quality in freshwater fish farm. *Computer and Electronics in Agriculture*. 166: 105013. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105013>.
- Ghavipanjeh F, Zarei B, Rostamzadeh J, Karimi J. (2025)** Evaluation of the risks of genetically modified products: A review of micro- and macro-level perspectives. *Journal of Crop Biotechnology*. 14(4): 69–85. <https://doi.org/10.30473/cb.2025.72719.1987>. [In Persian]
- Grùère GP, Rao SR. (2007)** A review of international labeling policies of genetically modified food to evaluate India's proposed rule. *The Journal of Agrobiotechnology Management and Economics*. 10(1): 51–64.
- Gryson N, Ronsse F, Messens K, De Loose M, Verleyen T, Dewettinck K. (2002)** Detection of DNA during the refining of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 79(2): 171–174. <https://doi.org/10.1007/s11746-002-0453-2>.
- Hastig GM, Sodhi MS. (2020)** Blockchain for supply chain traceability: Business requirements and critical success factors. *Production and Operations Management*. 29(4): 935–954. <https://doi.org/10.1111/poms.13147>.
- IBM (2020)** IBM Food Trust: Improving food safety with blockchain. <https://www.ibm.com/blockchain/solutions/food-trust>.
- Jaffe G. (2004)** Regulating transgenic crops: a comparative analysis of different regulatory processes. *Transgenic Research*. 13(1): 5–19. <https://doi.org/10.1023/B:TRAG.0000017198.80801.fb>.
- James C. (2008)** Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008. ISAAA Brief No. 39. **New York, Ithaca: ISAAA**
- IFC (International Finance Corporation). (2023)** Working with smallholders: A handbook for firms building sustainable supply chains (3rd ed.). World Bank Group.
- Kamath R. (2018)** Food traceability on blockchain: Walmart's pork and mango pilots with IBM. *The Journal of the British Blockchain Association*. 1(1): 3712.
- Khoifin K, Nimsai S. (2018)** Investigating traceability costs and benefits in food supply chain: Case study in Serang city, Indonesia. *International Journal of Supply Chain Management*. 7(5): 153-161.
- Klümper W, Qaim M (2014)** A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *PLoS ONE*. 9(11): e111629. <https://doi:10.1371/journal.pone.0111629>.
- Kolodinsky J, Lusk JL. (2018)** Mandatory labels can improve attitudes toward genetically engineered food. *Science Advances*. 4(6): eaaq1413. <https://doi:10.1126/sciadv.aaq1413>.
- Kouhizadeh M, Saberi S, Sarkis J. (2021)** Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*. 231: 107831. <https://doi:10.1016/j.ijpe.2020.107831>.
- Ledger Insights. (2018)** IBM's Food Trust blockchain goes live with Carrefour. <https://www.ledgerinsights.com/ibms-food-trust-blockchain-carrefour/>. [Accessed 10 December 2025].
- Lin Q, Wang H, Pei X, Wang J. (2019)** Food safety traceability system based on blockchain and EPCIS. *IEEE Access*. 7: 20698–20707. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897792>.
- Lusk JL, McFadden BR, Wilson N. (2018)** Do consumers care how a genetically engineered food was created or who created it? *Food Policy*. 78: 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.02.007>.
- Mehdizadeh MA, Rabiei M, Alebooyeh M, Rastegar H. (2011)** Labeling of genetically modified foods and Consumers' rights. *Journal of Medical Law*. 5(16): 115-129. <http://ijmedicallaw.ir/article-1-491-fa.html>. [In Persian]

- Miraglia M, Berdal KG, Brera C, Corbisier P, Holst-Jensen A, Kok EJ, Zagon J. (2004) Detection and traceability of genetically modified organisms in the food production chain. *Food and Chemical Toxicology*. 42(7): 1157–1180. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.02.018>.
- Obi PO, Salisu TF, Muhammad S, Yahaya TO. (2026) Benefits and potential risks of genetic modification and genetically modified foods. *Journal of Biological Research and Reviews*. 3(2): 32-43. <https://doi.org/10.5455/JBRR.20250913020814>.
- Plakantara SP, Karakitsiou A. (2025) Transforming agrifood supply chains with digital technologies: a systematic review of safety and quality risk management. *Operations Research Forum*. 6: 113. <https://doi.org/10.1007/s43069-025-00511-3>.
- Pollack MA, Shaffer GC. (2009) When cooperation fails: The international law and politics of genetically modified foods. Oxford University Press, UK.
- Rejeb A, Rejeb K, Simske S, Keogh JG. (2023) Exploring blockchain research in supply chain management: A latent Dirichlet allocation-driven systematic review. *Information*. 14(10): 557. <https://doi.org/10.3390/info14100557>.
- Reports and Data (2024) Non-GMO foods market – growth forecast, industry outlook and share insights (2025–2034). Available at: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/non-gmo-foods-market>.
- Roe BE, Teisl MF, Deans CR. (2014) The economics of voluntary versus mandatory labels. *Annual Review of Resource Economics*. 6(1): 407–427. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012439>.
- Safaei P, Rezaie S, Alimohammadi M, Kuchak Afshari SA, Mehdizadeh M, Molaee Aghaee E. (2020) Qualitative PCR-based detection of genetically modified soy and maize products in Iran. *International Journal of Food Properties*. 23(1): 459-469. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1734613>.
- Saghafi F, Zarei B, Dibaj SM. (2011) National E-government development model for Iran. *Journal of Science and Technology Policy*. 4(4): 27-40.
- SAP News. (2019, March 4). Blockchain in der Lieferkette: Vertrauen in Lebensmittel. SAP News Center. <https://news.sap.com/germany/2019/03/blockchain-lieferkette-lebensmittel/>. [Accessed 10 December 2025].
- Sen A. (1988) Freedom of Choice: Concepts and Content. *European Economic Review*. 32(2-3): 269-294. [https://doi.org/10.1016/0014-2921\(88\)90173-0](https://doi.org/10.1016/0014-2921(88)90173-0).
- Sharif H, Zarei B. (2004) An adaptive approach for implementing e-Government in Iran. *Journal of Government Information*. 30(5-6): 600–619. <https://doi.org/10.1016/j.jgi.2004.10.005>.
- Singh M, Kaur K, Aminedi R, Pal D. (2025) A comprehensive review of key requirements and analytical methods for tracking genetically modified (GM) ingredients in processed food products. *Food Bioscience*. 71: 107015. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107015>.
- SupplyChainBrain. (2019, March 5) Naturipe Farms Turns to Blockchain for Food Safety, Traceability. SupplyChainBrain. <https://www.supplychainbrain.com/articles/28891-naturipe-farms-turns-to-blockchain-for-food-safety-traceability>. [Accessed 12 December 2025].
- SupplyChainDive. (2019) Carrefour boosts sales with blockchain initiative. <https://www.supplychaindive.com/news/Carrefour-sales-boost-after-blockchain-initiative/556139/>. [Accessed 12 December 2025].
- StartUs Insights. (2022) Crystalchain and BioTrace track organic produce from farm to consumer with IoT and blockchain. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/crystalchain-biotrace/>. [Accessed 12 December 2025].
- USDA (U.S. Department of Agriculture). (2020) Biotechnology regulations in the United States. USDA. https://www.aphis.usda.gov/aphis/ourfocus/biotechnology/permits-notifications-regulations/ct_biotech_landing_page. [Accessed 8 December 2025].
- USDA Foreign Agricultural Service (2023) EU approves new GE corn, soybean, cotton crop imports.

"قوی پنجه و همکاران، نظام‌های برچسب گذاری و ردیابی محصولات تراریخته: تحلیل چالش‌ها و ..."

USDA Foreign Agricultural Service (2025) Biofuels and new technology report (GM2025-0023). United States Department of Agriculture.

van Hilten M, Ongena G, Ravesteijn P. (2020) Blockchain for Organic Food Traceability: Case Studies on Drivers and Challenges. *Frontiers in Blockchain*. 3: 567175. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.567175>.

VeriDoc Global. (2022) VeriDoc Global secures non-GMO popcorn authenticity with blockchain and encrypted QR codes. <https://www.veridocglobal.com/news/veridoc-global-secures-non-gmo-popcorn-authenticity-with-blockchain/>. [Accessed 18 December 2025].

World Bank. (2019) Data-driven digital agriculture. World Bank Group. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/1a163904ccb86646bf2e5d3d6f427f3d-0090012023/related/WB-DDAG-FA-web.pdf>.

Wolfe E, Popp M, Bazzani C, Nayga RMJr, Danforth D, Popp J, Chen P, Seo HS. (2018) Consumers' willingness to pay for edamame with a genetically modified label. *Agribusiness*. 34(2): 283–299. <https://doi.org/10.1002/agr.21505>.

Wolt JD, Keese P, Raybould A, Fitzpatrick JW, Burachik M, Gray A, Olin SS, Schiemann J, Sears M, Wu F. (2010) Problem formulation in the environmental risk assessment for genetically modified plants. *Transgenic Research*. 19(3): 425–436. <https://doi.org/10.1007/s11248-009-9321-9>.

WHO (World Health Organization). (2019) Policy brief on traceability of health products. WHO. https://www.wiredhealthresources.net/presentations/733-2/story_content/external_files/1.7OCT19draft-WHO-policy-brief-on-Traceability-of-Health-Products.pdf. [Accessed 18 December 2025].

WHO (World Health Organization). (2020) Policy paper on traceability of medical products. Geneva: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/policy-paper-on-traceability-of-medical-products>. [Accessed 8 December 2025].

Yeo YB, Shin MK. (2026) A comparative review of global GMO labeling systems and South Korea's policy transition. *Food Science and Industry*. 59: 69–82. <https://doi.org/10.23093/FSI.2026.59.1.69>.

Zhang M, Fan Y, Chen C, Cao J, Pu H. (2021) Consumer perception, mandatory labeling, and traceability of GM soybean oil: Evidence from Chinese urban consumers. *GM Crops and Food*. 12(1): 36–46. <https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1807852>.

Zhang R, Li X, Wang Y, Chen J, Zhao L. (2021) AI-assisted qPCR data interpretation for accurate GMO quantification. *Nature Machine Intelligence*. 3(12): 1017–1026. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00430-z>.

Zhao Y, Hu R, Deng H. (2018) Awareness and attitude toward GM labeling: Evidence from China. In Proceedings of the 30th International Conference of Agricultural Economists (Vancouver). <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.277344>.

Labeling and Traceability Systems for Genetically Modified Products: Analysis of Challenges and Implementation Strategies with Emphasis on Technical Feasibility and Global Experiences

Farideh Ghavipankeh^{1*}, Behrouz Zarei², Javad Karimi³

1. Department of Environment and Energy, Energy Research Institute, Materials and Energy Research Center, Meshkindasht, Alborz, Iran

2. Department of Organizational Entrepreneurship, Faculty of Entrepreneurship, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Department of Biology, Faculty of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

fghavipankeh@merc.ac.ir

Abstract

Nowadays, the use of genetically modified products has increased significantly, and the safe and responsible use of this technology requires adherence to biosafety principles. The establishment of effective labeling and traceability systems provides consumers with the right to choose. The results of a field study on tracing the level of genetic modification during the production process of genetically modified soybean oil, from seeds to the final product, show that tracing genetic modification in the final product (refined oil) is possible, although chemical and thermal processes greatly reduce the amount of detectable DNA. Nevertheless, studies show that a significant proportion of genetically modified products available on the market are not labeled. This article analytically examines the challenges and strategies associated with establishing these systems. In addition, the basic concepts are reviewed and international experiences are analyzed. The main innovation of this article lies in presenting a localized implementation framework for Iran based on a comparative analysis of the two dominant global regulatory approaches (the precautionary approach of the European Union and the innovation-oriented approach of the United States) and integrating these approaches with technically proven capabilities for tracing genetic modification in products. Finally, by comparing these two approaches, policy recommendations in this field are presented.

Keywords: Labeling, Traceability, Genetically Modified (GM) Products, Supply Chain Traceability System