

انرژی هسته‌ای، راهکاری نوین برای ارتقای امنیت غذایی و پایداری محیط زیست^۱

حمید اله‌دادی، حجت‌اله لطیف‌منش^۲ و حمید نوری^۳

چکیده

انرژی هسته‌ای، فناوری نوآورانه‌است که با بهره‌گیری از ایزوتوپ‌ها و پرتودهی هسته‌ای، توانایی افزایش بهره‌وری کشاورزی، ایجاد گوناگونی ژنتیکی و ارتقای کیفیت محصول‌ها را دارد. این فناوری در بخش‌هایی مانند مدیریت پایدار منابع، کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و تقویت تحمل گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، کاربردهای گسترده‌ای دارد. پژوهش حاضر، با استفاده از روش مروری و بررسی منابع علمی به روز، نقش انرژی هسته‌ای در تولید محصول‌های متحمل به تنش‌های اقلیمی، کاهش هدررفت پس از برداشت و افزایش ماندگاری مواد غذایی را واکاوی کرده است. نتایج نشان می‌دهند که این فناوری افزون بر بهبود کارایی مصرف آب و خاک، می‌تواند با کاهش آلودگی‌های محیط زیست، نقش مهمی در پایداری بوم‌نظام‌های کشاورزی داشته‌باشد. از سوی دیگر، چالش‌هایی مانند ایمنی، هزینه‌های اجرایی و محدودیت‌های پذیرش عمومی، ضرورت تدوین چارچوب‌های نظارتی شفاف و ارتقای آگاهی جامعه را برجسته می‌سازد. انرژی هسته‌ای با توانمندی‌های علمی و فنی خود، راهکاری پایدار و بلندمدت برای رویارویی با چالش‌های امنیت غذایی و تغییرهای اقلیمی ارائه می‌دهد. گسترش همکاری‌های بین‌المللی، سرمایه‌گذاری در زمینه تحقیق و توسعه کشاورزی، و آگاهی‌رسانی عمومی از جمله راهکارهایی است که می‌تواند به بهره‌برداری بهتر از این فناوری کمک کند. یافته‌های این بررسی نشان می‌دهند که با سیاست‌های حمایتی مناسب، انرژی هسته‌ای می‌تواند در تأمین امنیت غذایی نقش مهمی داشته‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پرتودهی، چالش‌های غذایی، گوناگونی ژنتیکی، مدیریت پایدار منابع.

مقدمه

تقاضا برای غذا در کنار نگرانی‌ها در مورد پایداری محیط‌زیست به سرعت در حال رشد است. با رشد جمعیت جهانی به ۹/۷ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ و کاهش سطح زمین قابل کشت، فشار بر نظام کشاورزی به‌طور زیادی در حال افزایش است (Tilman & Clark, 2014; World Bank, 2018). سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۴ تخمین زده است که تولید جهانی غذا باید ۷۰٪ افزایش یابد تا با رشد تقاضای غذا، همخوانی داشته‌باشد (FAO, 2023). برای این منظور،

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۶

۲- نویسنده مسئول: پست الکترونیک: h.latifmanesh@yu.ac.ir

۳- به ترتیب، دانش آموخته کارشناسی ارشد و استادیاران دانشگاه یاسوج، یاسوج.

4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

یافتن پاسخ‌هایی کارآمد برای تأمین تغذیه جمعیت جهانی و کمینه کردن تأثیرهای محیط‌زیستی به اولویت اصلی تبدیل شده‌است. روش‌های کشاورزی سنتی اگرچه ارزشمند می‌باشند، اما با چالش‌هایی از محدودیت‌های منابع تا تأثیر تغییرهای اقلیمی روبه‌رو هستند. همچنین، رویکردهای کنونی برای تضمین امنیت غذایی نیز باید بدون به خطر انداختن سلامت سیاره، همسوسازی و بهینه شود (Forster & Jankuloski, 2018). در چنین شرایطی است که نقطه تلاقی علم هسته‌ای و دانش کشاورزی، به‌عنوان فناوری صلح‌آمیز، آشکار شده است (Ukessays, 2019).

فناوری هسته‌ای مدت‌هاست که به خاطر کمک در زمینه‌هایی از دانش مورد ستایش قرار گرفته‌است، به‌صورتی که در طول پنج دهه گذشته، از انتشار حدود ۷۰ گیگاتن دی‌اکسیدکربن جلوگیری کرده است و امروزه نیز ۱۰٪ از برق تولید شده در سراسر جهان را تأمین می‌کند (World nuclear, 2022). بر همین اساس، اکنون انرژی اتمی آماده است تا بینش در مورد کشاورزی را دگرگون سازد. انرژی هسته‌ای زمینه‌ای نوپدید است که نوید انقلابی در روش رشد محصول‌های کشاورزی، افزایش بازده و رویارویی با برخی از مهمترین چالش‌های کنونی را دارد. انرژی هسته‌ای با استفاده از قدرت پرتوها، ایزوتوپ‌ها و فناوری‌های پیشرفته تلاش می‌کند تا رابطه هماهنگ بین بهره‌وری، پایداری و نظارت بر محیط زیست را تقویت کند (Akshay et al., 2023). در واقع، نقش این انرژی در کشاورزی تضمین ثبات در نظام‌های یکپارچه نوین و کمک به دستیابی به هدف‌های توسعه پایدار و امنیت غذایی توسط همه کشورها است (Muzamal, 2022). برای ساختن نظام انرژی پایدار که به شکوفایی جهانی بیانجامد، لازم است که اطمینان حاصل شود که انرژی هسته‌ای به نقش یکتای خود در تعادل انرژی جهانی ادامه می‌دهد و در ضمن هیچ آسیبی به محیط‌زیست نمی‌زند. بر این اساس، بررسی حاضر به بررسی فناوری نوین انرژی هسته‌ای و سودمندی‌های آن، همراه با چالش‌های اجتماعی و اقتصادی مرتبط می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت مروری و با استفاده از جستجو در پایگاه‌های داده معتبر مانند PubMed، Google Scholar، Scopus و SID انجام شد. در ابتدا، داده‌های مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴ دریافت شد، سپس برای این هدف، کلیدواژه‌هایی مانند انرژی هسته‌ای، پرتوهای، کاربردها و چالش‌ها و محصول‌های کشاورزی به صورت ترکیبی و منفرد در جستجوها مورد استفاده قرار گرفتند. بیش از ۹۰ مقاله علمی و ۱۰ کتاب تخصصی مرتبط با موضوع انرژی هسته‌ای شناسایی شدند. از این شمار، ۶۳ مقاله و پنج کتاب که بیشترین ارتباط موضوعی و اعتبار علمی را داشتند، برای واکاوی گزینش شدند. معیارهای گزینش منابع شامل الف- مقاله‌های دارای داده‌های کمی و کیفی مرتبط با کاربرد انرژی هسته‌ای و تأثیر آن بر بهره‌وری و پایداری، ب- مرجع‌های معتبر منتشرشده توسط ناشران برجسته یا سازمان‌های بین‌المللی مانند IAEA^۱ و FAO و پ- محدودیت جستجو به منابع منتشرشده در بازه ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴ با تمرکز بر ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ برای اطمینان از واکاوی جدیدترین داده‌ها بود. منابع به دست آمده، از نظر موضوع‌های بهینه‌سازی کشاورزی با فن‌های هسته‌ای، تقویت بهره‌وری، کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و بررسی تأثیر بر محیط‌زیست و امنیت غذایی، غربالگری و واکاوی شدند. واکاوی و تفسیر داده‌ها با هدف ارائه گزارش علمی و کاربردی انجام شد.

نتایج و بحث

دانش و انرژی هسته‌ای

گنجاندن انرژی هسته‌ای در ترکیب انرژی ملی، به توسعه صنایع انرژی‌بر رشد تولید ناخالص داخلی و پیشرفت اجتماعی از راه آموزش، نوآوری و کاهش تغییرهای اقلیمی می‌انجامد. از همه مهمتر، پروژه‌های انرژی هسته‌ای نمونه‌های مثبتی از همکاری‌های قوی بین‌المللی هستند که بهره‌وران مختلف را گرد هم می‌آورند و مشارکت بلندمدت را آسان می‌کند. هنگامی که برخی از کشورها هنوز با نیازهای اساسی مانند گرما و برق دست و پنجه نرم می‌کنند، وجود سامانه انرژی جامع می‌تواند کارساز باشد. پژوهشگران با ترکیب قدرت علم هسته‌ای و اصول کشاورزی نوین، در تلاش هستند تا آینده‌ای را ایجاد کنند که در آن تولید محصول‌های کشاورزی با مسئولیت‌های محیط زیستی همراه باشد (Akshay *et al.*, 2023).

در بخش کشاورزی، انرژی هسته‌ای، شامل استفاده از قابلیت پرتوها و رادیوایزوتوپ‌ها برای تقویت جنبه‌های مختلف کشت گیاهان مانند بذرهای پربازده، ایجاد روش‌های کارا برای اندازه‌گیری فعالیت ریشه (FAO, 2019a)، کارایی مصرف کودها و بررسی رفتار آن‌ها در خاک (Reddy Gundreddy *et al.*, 2023)، صرفه‌جویی در مصرف آب (Nuclearconnect, 2019)، استفاده از مواد شیمیایی نشاندار رادیوایزوتوپی برای بررسی پویایی آفت‌کش‌ها و توسعه فرمولاسیون‌های شیمیایی (Muzamal, 2022) و در پایان افزایش عملکرد محصول در واحد سطح و فرآیند نگهداری و ایمنی مواد غذایی (Foronuclear, 2019) است. به‌همین دلیل، توانایی چشمگیری برای پرداختن به مسئله‌های امنیت غذایی و پایداری دارد. به‌عبارت دیگر، کاربرد و هدف فناوری هسته‌ای در کشاورزی حفاظت از زمین و منابع و تضمین ایمنی مواد غذایی است (FAO, 2019b). در این راستا، همسو با گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای دستیابی به هدف‌های مورد نظر، مقدار تولیدهای حاصل از انرژی هسته‌ای تا سال ۲۰۵۰ باید دو برابر بیشتر شود (IAEA, 2021). آژانس بین‌المللی انرژی اتمی از پروژه‌های همکاری فنی گوناگون با هزینه سالانه ۱۴ میلیون دلار آمریکا و ۳۰ طرح پژوهشی در بیش از ۴۰۰ موسسه مختلف کشورهای عضو، پشتیبانی می‌کند. هر ساله این آژانس درخواست‌هایی از بیش از ۱۰۰ کشور عضو خود برای آموزش فنی، تجهیزها، خدمات، تخصص و کمک دریافت می‌کند (Muzamal, 2022; IAEA, 2019). آژانس به کشورهای عضو، اطلاعات فنی در مورد فن‌های تابش و غربالگری برای صفت‌های ویژه ارائه می‌کند. این حمایت از راه طرح‌های پژوهشی هماهنگ^۱ و برنامه همکاری فنی آن (برنامه TC)، در قالب راهنمایی فنی برای طرح‌های پژوهشی و ظرفیت‌سازی (مانند تجهیزهای آزمایشگاهی و آموزش) ارائه می‌شود. پایگاه داده‌ای برای رقم‌های جهش‌یافته^۲ وجود دارد که مخزنی از اطلاعات ارائه‌شده داوطلبانه از کشورها در مورد گونه‌های جهش‌یافته را منتشر نموده است (IAEA, 2024). در حال حاضر، ۳۳۳۱ گونه جهش‌یافته از ۲۷۰ گونه مختلف از حدود ۸۰ کشور در این پایگاه داده، ثبت شده است. این‌ها شامل انواع جهش‌یافته از نظر فیزیکی، از راه پرتوتابی و همچنین انواع انگيخته‌شده شیمیایی است. در این میان، کشورهای چین، ژاپن و هند بیشترین شمار گونه‌های جهش‌یافته را در جهان تولید کرده‌اند (Shu *et al.*, 2011).

پرتوتابی در بهنژادی گیاهی: هنر جهش‌زایی

بهنژادی گیاهی تاریخی به پیشینه تمدن بشر دارد. انسان‌ها از حدود ۱۰ هزار سال پیش با اهلی کردن گونه‌های وحشی، تکامل گیاهان را از راه گزینش آگاهانه گونه‌های مفید برای خود و دام‌هایشان دستکاری کردند. در ۱۰۰ سال

گذشته، پیشرفت‌های علمی، روند تکامل را سرعت بخشیدند و با تمرکز بر ویژگی‌های ژنتیکی پیچیده، اقدام به تولید رقم‌های برتر با عملکرد زیاده‌تر، تحمل در برابر تنش خشکی و خاک‌های اسیدی، مقاومت به بیماری‌ها، کیفیت بهتر محصول‌ها و دوره رشد کوتاه‌تر کرده‌اند (Hallauer, 2011). کشف رادیواکتیویته در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، دریچه‌ای جدید به سوی جهش‌زایی گشود (جدول ۱). مشاهده جهش در مگس‌های سرکه و گیاهان زراعی با پرتوها، راه استفاده از ابزار جهش‌های انگیزشی را برای بهبود محصول هموار کرد. تأسیس IAEA در سال ۱۹۵۷ و همکاری آن با FAO در سال ۱۹۶۴، انگیزه بیشتری برای استفاده از جهش‌زایی در راستای شعار اتم‌ها برای صلح و کمک به کشورهای عضو در تولید غذای بیشتر، بهتر و ایمن‌تر ایجاد کرد (Forster & Jankuloski, 2018).

جدول ۱- مروری تاریخی از کشف انرژی هسته‌ای تا آغاز کاربرد انرژی هسته‌ای.

سال	شرح رخداد	منبع
۱۸۹۶	رادیواکتیویته توسط هنری بکرل ^۱ زمانی که روی مواد فسفرسنت پژوهش می‌کرد، کشف شد.	(بهمنی و عزیزی، ۱۳۹۵، نوروزی، ۱۳۹۲)
۱۸۹۸	ماری کوری ^۲ و پی‌یر کوری ^۳ نشان دادند اورانیوم و توریم پرتوهایی ساطع می‌کنند که بکرل کشف نمود.	
۱۹۳۳	لیو زیلارد ^۴ دریافت که پخش شدن نوترون در فضا هنگام یک شکافت هسته‌ای می‌تواند واکنشی زنجیره‌ای را به وجود آورد (پیشنهاد فکر شکافت هسته‌ای).	
۱۹۳۴	کشف انرژی هسته‌ای توسط اتریکو فرمی ^۵ با بمباران هسته اورانیوم از راه نوترون (تایید شکافت هسته‌ای).	(بهمنی و عزیزی، ۱۳۹۵)
۱۹۳۵	فردریک ژولیو کوری ^۶ و ایرن ژولیو کوری ^۷ رادیواکتیویته مصنوعی را کشف کردند.	
۱۹۳۸	اتو هان ^۸ و فریتس اشتراسمان ^۹ ، لیزه میتنر ^{۱۰} و اتو روبرت فریش ^{۱۱} دریافتند نوترون شلیک‌شده می‌تواند هسته اورانیوم را به دو یا چند قسمت تقسیم کند (اثبات شکافت هسته‌ای).	
۱۹۴۲	در پروژه Chicago Pile-1 رآکتورهای برای تولید پلوتونیوم و استفاده در سلاح هسته‌ای راه‌اندازی شدند.	(Forster & Jankuloski, 2018)
۱۹۵۱	از نخستین رآکتور هسته‌ای برای تولید انرژی الکتریکی (در حدود ۱۰۰ کیلووات) در آمریکا استفاده شد.	
۱۹۵۴	نخستین نیروگاه هسته‌ای جهان که به شبکه برق متصل شد، در اتحاد جماهیر شوروی با توانی در حدود پنج مگاوات به بهره‌برداری رسید.	
۱۹۵۶	اولین نیروگاه تجاری هسته‌ای جهان در انگلستان با توان ۵۰ مگاوات به بهره‌برداری رسید.	(Silow, 1962)
۱۹۵۵	برنامه ویژه‌ای توسط FAO برای ارتقای همکاری‌های بین‌المللی در گسترش کاربرد علوم هسته‌ای در کشاورزی آغاز شد.	
۱۹۶۴	پیمانی میان FAO و IAEA با هدف پرتوایی برای به‌نژادی جهش‌های گیاهی و افزایش تولید محصول‌های کشاورزی بسته شد.	
۱۹۸۳	استاندارد جهانی توسط سه سازمان بین‌المللی برتر، یعنی WHO ^{۱۲} ، FAO و IAEA تصویب شد. کار مشترک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و فائو با حمایت کنوانسیون بین‌المللی حفاظت از گیاهان (IPPC) و کمیسیون Codex Alimentarius انجام شد.	(IAEA, 2019)
۲۰۱۵	در همایش تغییرهای اقلیمی سازمان ملل متحد (COP-21) توافق شد که افزایش دمای جهانی با استفاده از انرژی‌های پایدارتر (با تأکیدی بر انرژی هسته‌ای سبز) کنترل شود.	(UNEP, 2021)

1. Henri Becquerel
6. Frédéric Joliot-Curie
11. Otto Robert Frisch

2. Marie Curie
7. Irène Joliot-Curie
12. World Health Organization (WHO)

3. Pierre Curie
8. Otto Hahn
9. Fritz Strassmann
5. Enrico Fermi
10. Lise Meitner

جهش‌زایی گیاهی به عنوان فرآیندی توصیف می‌شود که در آن تغییرهای ارثی ناگهانی در اطلاعات ژنتیکی موجود زنده، جدای از تفکیک ژنتیکی یا نوترکیبی ژنتیکی، توسط عامل‌های شیمیایی، فیزیکی یا زیستی شکل می‌گیرد (Oladosu *et al.*, 2016). اصطلاح عامل فیزیکی به پرتوتابی‌هایی مانند پرتوهای گاما، پرتو ایکس و یون اشاره دارد که جهش‌زایی فیزیکی را می‌انگیزند. هرچند گام‌های بزرگی در استفاده از عامل‌های شیمیایی برای انگیزش جهش در گیاهان برداشته شده است، اما جهش‌زایی فیزیکی سودمندی‌های ویژه خود را دارد. برای نمونه، پرتوتابی یکی از ابزارهای اصلی است که به دانشمندان اجازه می‌دهد ژن‌های ناشناخته را در ژنگان^۱ کشف کنند. به عبارت دیگر، پرتوها امکان کشف ویژگی‌های ژنتیکی جدید را فراهم می‌کنند و دارای دقت و تکرارپذیری کافی هستند، به ویژه برای پرتوهای گاما که قدرت نفوذ یکنواختی دارند (Oladosu *et al.*, 2016). در فرآیند جهش‌زایی، پرتوها با سرعت دادن به فرآیند طبیعی جهش تغییرهای جدیدی در ساختار ژنتیکی گیاه ایجاد می‌کنند. سپس، گیاهان برای یافتن ویژگی‌های مطلوب مانند مقاومت به بیماری یا تحمل به خشکی غربالگری می‌شوند و آن‌هایی که این ویژگی‌ها را نشان می‌دهند، به رقم‌های جدیدی تبدیل می‌شوند که می‌توانند توسط کشاورزان کشت شوند. استفاده از پرتوهای گاما به دلیل در دسترس بودن و بررسی‌های گسترده در دامنه وسیعی از محصولات، رایج‌ترین روش جهش‌زایی گیاهان است (Joint FAO/IAEA Division, 2023). به طور معمول روش‌های بهنژادی سنتی آهسته و غیرقابل پیش‌بینی هستند، اما پرتو دهی می‌تواند با جهش‌ها ویژگی‌های مطلوب ایجاد کند. این فرآیند که به عنوان بهنژادی جهشی شناخته می‌شود، در ایجاد بیش از ۳۲۰۰ جهش‌یافته گیاهی به طور رسمی از ۲۱۴ گونه گیاهی مختلف در بیش از ۶۰ کشور کارا بوده است (Akshay *et al.*, 2023) و به همین دلیل درآمد کشاورزان را افزایش می‌دهد، تغذیه انسان را بهبود می‌بخشد و به امنیت غذایی پایدار از نظر محیط‌زیست در جهان کمک می‌کند. بهنژادی جهشی به موفق‌ترین زمینه کاربرد فن‌های هسته‌ای در غذا و کشاورزی تبدیل شده است (Ukessays, 2019).

پرتوتابی گاما به عنوان روشی رایج برای بهنژادی گیاهان، به دلیل اقتصادی بودن، یکنواختی شدت و اطمینان، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش همچنین برای تیمارهای طولانی‌مدت مناسب است و می‌تواند در گلخانه یا کشتزار به کار گرفته شود (Forster & Jankuloski, 2018). با این حال، به دلیل خطرهای ایمنی و امنیتی، از ایزوتوپ سزیوم-۱۳۷ کمتر استفاده می‌شود و به جای آن از کبالت-۶۰ با نیمه عمر کوتاه‌تر استفاده می‌شود (VCDNP, 2018). نگرانی‌ها در مورد استفاده نامطلوب تروریستی از مواد رادیواکتیو به تدوین مقررات بین‌المللی سختگیرانه‌تر برای ترابری، تولید و نوسازی منابع گاما انجامیده است (Mastrangelo *et al.*, 2010). به دلیل خطرهای امنیتی مرتبط با تابش گاما (شامل استفاده، ترابری، ذخیره‌سازی و دفع)، تلاش‌های بین‌المللی برای جایگزینی با فناوری‌های غیرایزوتوپی در حال انجام است. دستگاه‌های تولید پرتو ایکس و پرتو الکترونی پیشرفته‌ترین جایگزین‌های تجاری هستند، اما هنوز محدودیت‌هایی برای استفاده گسترده آن‌ها وجود دارند. در کشورهای در حال توسعه، پیش از پذیرش گسترده، باید هزینه‌ها کمتر و اطمینان و دوام این فناوری‌ها بهبود یابد (CISA, 2019).

دستگاه‌های اقتصادی پرتو ایکس با شدت زیاد می‌توانند پرتوتابی بذر را امکان‌پذیر سازند. این موضوع به گسترش استفاده از فناوری پرتو ایکس برای بهنژادی جهشی گیاهان در کشورهای مختلف کمک می‌کند، زیرا بذر را رایج‌ترین هدف برای تیمارهای پرتوتابی هستند. تابش پرتو یون سنگین^۲ نیز از دهه ۱۹۹۰ در ژاپن برای بهنژادی جهشی گیاهان

آغاز شد (Yamaguchi *et al.*, 2009). بخش مشترک FAO/IAEA در کتابچه راهنمای خود در مورد بهنژادی جهشی گیاهی، به شماری از بررسی‌ها اشاره می‌کند که سودمندی‌های فراوان این فناوری از جمله آسیب کمتر، جهش بیشتر و طیف جهش گسترده و جدید را نشان داده اند (Forster & Jankuloski, 2018). در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب مرحله‌های پرتوتابی بهنژادی و جهش‌زایی و سودمندی‌ها و چالش‌های پرتوتابی بذرهای بهنژاد شده نشان داده شده اند. همچنین در شکل ۱ نیز هدف‌های مورد انتظار از پرتوتابی بهنژادی در علوم کشاورزی آورده شده است.

جدول ۲- مرحله‌های پرتوتابی بهنژادی و جهش‌زایی.

ردیف	مرحله	شرح
۱	گزینش گیاه	گزینش گونه‌های گیاهی مناسب برای جهش‌زایی بر پایه هدف‌های بهنژادی.
۲	پرتوتابی	قراردادن بذر یا گیاهان در برابر پرتوهای گاما یا دیگر پرتوها برای ایجاد تغییرهای ژنتیکی.
۳	غربالگری	غربالگری گیاهان پس از پرتوتابی برای شناسایی نمونه‌های با ویژگی‌های برتر.
۴	ارزیابی ویژگی‌ها	ارزیابی و اندازه‌گیری ویژگی‌های مطلوب مانند مقاومت به بیماری، عملکرد زیاد و کیفیت محصول.
۵	تولید و افزایش	تولید گیاهان جهش‌یافته و افزایش آن‌ها برای کشت در سطح گسترده.

جدول ۳- سودمندی‌ها و چالش‌های پرتوتابی بهنژادی.

ردیف	سودمندی‌ها	چالش‌ها
۱	ایجاد جهش‌های مثبت در ویژگی‌های گیاهی.	نیاز به فن‌های دقیق و تجهیزات پیشرفته.
۲	سرعت بخشیدن به فرآیند بهنژادی گیاهان.	نگرانی‌های ایمنی مرتبط با استفاده از پرتوتابی.
۳	امکان تولید گیاهان متحمل به شرایط محیطی.	هزینه‌های زیاد مرتبط با پژوهش و توسعه.
۴	کاهش نیاز به مواد شیمیایی زیانبار.	پذیرفته نشدن عمومی و آگاهی ناکافی.



شکل ۱- هدف‌های پرتوتابی بهنژادی در پژوهش‌های کشاورزی (Askari *et al.*, 2014)

تأثیر پرتوتابی و بهنژادی جهشی در بهبود محصول‌های کشاورزی

نتیجه‌گیری علمی نشان‌داد که بهنژادی ژنتیکی با جهش‌زایی، ابزاری قدرتمند برای افزایش کارایی تولید و مقاومت زیستی گیاهان باشد. استفاده از این فن، در گیاهان دارویی و معطر، اثرهای مثبت شگرفی در بهبود ویژگی‌های کیفی و کمی محصول‌ها داشته است (جدول ۴).

جدول ۴- تأثیر بهنژادی جهشی بر بهبود ویژگی‌های برخی از گیاهان در ایران.

نام گیاه	نتیجه تأثیر پرتوتابی بر گیاه مورد بررسی	منبع
بنفشه	از تابش گاما و انگیزش گوناگونی در شرایط کشت بافت به‌عنوان راهبردی مناسب برای افزایش گوناگونی در بنفشه آفریقایی استفاده می‌شود.	(همکاران، ۱۴۰۳)
آفریقایی ^۱	جوانه‌های پرتو دیده نارنگی روی پایه نارنج پیوند زده شد و گزینش برای میوه‌های بدون هسته و زودرس انجام شد.	(همکاران، ۱۳۸۵)
نارنگی ^۲	رقم برنج جهش‌یافته 'پویا' با فعالیت بیشتر آنزیم‌های دفاعی وضعیت بهتری نسبت به رقم والد خود ('موسی طارم') نشان داد که بیانگر مقاومت آن در برابر بیماری بلاست است.	(عبادی الماس و همکاران، ۱۳۹۷)
برنج ^۳	پرتوتابی با گاما در ایجاد گوناگونی ژنتیکی رقم‌های برنج مؤثر بوده و بیشترین گوناگونی ژنتیکی در رقم‌های 'جلودار' و 'سنگ‌جو' اتفاق افتاده است. بنابراین، از آن‌ها در برنامه‌های بهنژادی استفاده می‌شود.	(اولادی و همکاران، ۱۳۹۴)
ذرت ^۴	دامنه مناسب پرتو گاما با منبع کبالت-۶۰، برای تندش بذر ذرت رقم 'RA64'، '۵۰ گری' تا '۱۵۰ گری'، رقم 'دهقان'، '۴۰۰ گری'، رقم 'فجر'، '۲۶۰ گری' و '۷۴۰ گری' است.	(داودی و تقی‌زاده، ۱۳۹۹)

اثرهای پرتوتابی و بهنژادی جهشی به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- **افزایش عملکرد محصول**- بهنژادی جهشی با تابش پرتوی گاما می‌تواند رشد گیاهان را سریع کرده و تولید بذرها و میوه‌ها را افزایش دهد. برای نمونه، پرتوتابی گاما در محصول‌هایی مانند گندم و برنج موجب افزایش تولید در شرایط کم‌آبی شده است (Bharat et al., 2024).
- ۲- **بهبود کیفیت محصول**- پرتوتابی، با تحریک مسیرهای متابولیکی گیاهان، تولید ترکیب‌های دارویی و معطر مانند آلکالوئیدها و اسانس‌ها را افزایش می‌دهد. برای نمونه، در نعنای^۵، مقدار منتول افزایش یافته است و در علف لیمو^۶، ترکیب‌های با ارزش مانند جرانیل استات^۷ تولید شده است (Jain, 2010).
- ۳- **افزایش تحمل به تنش‌های محیطی**- بهنژادی جهشی موجب ایجاد گیاهانی متحمل‌تر به خشکی و شوری و مقاوم به بیماری‌ها شده است. در گیاهانی مانند داتوره^۸، پرتوتابی موجب افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی و بهبود عملکرد در شرایط سخت شده است (Suprasanna et al., 2015).

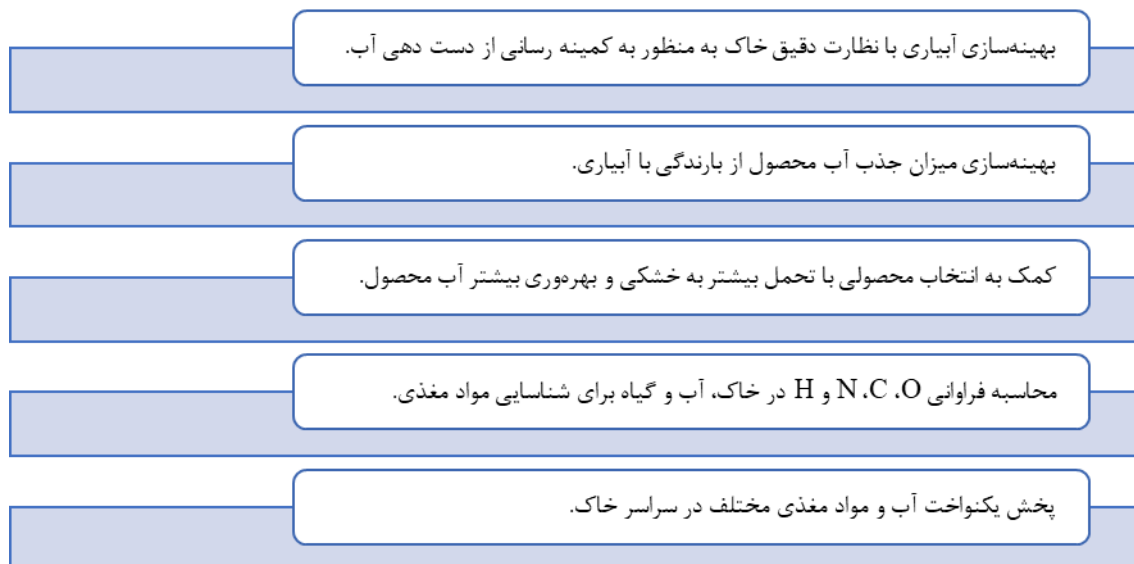
1. *Saintpaulia ionantha* H.Wendl.
5. *Cymbopogon* spp.

2. *Citrus reticulata* Blanco.
6. *Mentha* spp.

3. *Oryza sativa* L.
7. Geranyl acetate

4. *Zea mays* L.
8. *Datura* spp.

- ۴- بهبود ویژگی‌های ریختی - پرتوتابی می‌تواند ساختار ظاهری گیاهان را بهبود بخشد. برای نمونه، در ورد^۱، شمار گل‌ها و کیفیت آن‌ها افزایش یافته است (Roychowdhury & Tah, 2013).
- ۵- افزایش و گسترش گونه‌های مقاوم - فن پرتوتابی به ایجاد گونه‌هایی مقاوم‌تر کمک کرده‌اند که از نظر ژنتیکی به عامل‌های محیطی و بیماری‌ها مقاوم هستند. در زعفران^۲ پرتوتابی با شدت کم، موجب بهبود ارتفاع و مقاومت گیاه به تنش خشکی شده‌است (Mir et al., 2020).
- ۶- کاهش وابستگی به مواد شیمیایی - بهنژادی جهشی نه تنها کارایی جذب منابع لازم برای رشد توسط گیاهان را بهبود می‌بخشد، بلکه مصرف نهاده‌های شیمیایی را نیز کاهش می‌دهد. (Ntsefong et al., 2023).
- ۷- تقویت ویژگی‌های دارویی - در گیاهانی مانند خشخاش^۳، پرتوتابی موجب افزایش تولید مواد دارویی مانند مورفین شده‌است. همچنین در گیاه یام وحشی^۴، تولید دیوسجنین^۵ به‌عنوان ماده اولیه داروسازی افزایش یافته‌است (Tyagi et al., 2023).
- ۸- کاهش اثرهای منفی بر محیط‌زیست - کاهش استفاده از نهاده‌های شیمیایی با استفاده از بهنژادی جهشی، به بهره‌وری پایدارتر از منابع آب و خاک کمک کرده‌است (Ntsefong et al., 2023).
- در حالی که روش‌های متداول برای بررسی مواد مغذی و رطوبت خاک در سامانه خاک-گیاه-آب و اتمسفر کاربرد دارند، فن‌های هسته‌ای سودمندی‌های چشمگیری نسبت به آن‌ها ارائه می‌دهند. از این فن برای افزایش درک واکنش‌های آب و خاک استفاده می‌شود و داده‌ها، دقیق و کمی پیرامون وضعیت و جابه‌جایی مواد مغذی و رطوبت خاک فراهم می‌شود (Pires et al., 2021). با استفاده از فن‌های رادیونوکلئید، راهکارهایی برای حفاظت از سامانه خاک توسط IAEA ارائه شده‌است. با در نظر گرفتن نیاز شدید برای آب، نرخ تجدید منابع آب ناچیز است. همچنین، IAEA به ارزیابی منابع آب زیرزمینی و سطحی می‌پردازد که در زیر اشاره می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲- نقش فن‌های ایزوتوپی در افزایش کارایی مصرف آب کشاورزی (IAEA, 2017).

1. *Rosa spp.*

4. *Dioscorea spp.*

2. *Crocus sativus L.*

5. Diosgenin

3. *Papaver somniferum L.*

۱- استفاده از ایزوتوپ برای مدیریت بهینه مواد مغذی خاک- فن‌های ایزوتوپی آگاهی‌های مفیدی برای ارزیابی مدیریت آب و مواد مغذی خاک ارائه می‌دهند که می‌توان برای مدیریت شوری خاک در بوم‌نظام‌های کشاورزی به‌کاربرد (Zaman et al., 2018). برای نمونه، از ایزوتوپ پایدار نیتروژن-۱۵ می‌توان برای اندازه‌گیری سرعت فرآیندهای مختلف تبدیل نیتروژن در سامانه خاک-گیاه-آب و اتمسفر استفاده کرد. این فرآیندها شامل معدنی‌شدن نیتروژن، نیتریفیکاسیون، تثبیت زیستی نیتروژن در شرایط هوازی، کارایی استفاده از نیتروژن و منابع میکروبی تولید گاز گلخانه‌ای دی‌نیتروژن مونوکسید^۱، در خاک می‌باشد (Nguyen et al., 2011).

۲- ردیابی منابع و مسیرهای حرکت آب با ایزوتوپ- استفاده از ایزوتوپ‌های اکسیژن-۱۸، هیدروژن-۲ (دوتریوم) و دیگر ایزوتوپ‌ها، بخش جدایی‌ناپذیر مدیریت آب کشاورزی است. این ایزوتوپ‌ها امکان شناسایی منابع آب و ردیابی حرکت و مسیرهای آب از نظر کشاورزی زیر تاثیر فناوری‌های مختلف آبیاری و نظام‌های مختلف کشاورزی را فراهم می‌کنند. همچنین، آن‌ها به درک مصرف آب توسط گیاه و اندازه‌گیری تعرق در گیاه و تبخیر از خاک کمک می‌کنند تا امکان طراحی راهبردهای بهبود تولید محصول، کاهش هدررفت آب و جلوگیری از تخریب زمین فراهم شود (Koeniger et al., 2016). کاوشگر نوترونی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در مقیاس کشتزار، مطلوب است و داده‌های دقیقی در مورد دسترسی گیاه به آب برای تعیین مقدار مصرف آب توسط محصول، کارایی مصرف آب و ایجاد برنامه بهینه آبیاری در نظام‌های مختلف کشت، به ویژه در شرایط شور، ارائه می‌دهد (قمقامی، ۱۴۰۱).

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی با استفاده از دانش و فناوری هسته‌ای، برای ارتقای دسترسی به آب با کیفیت، مدیریت پایدار منابع آب و حفظ محیط‌زیست، منابع اطلاعاتی اصلی به شرح زیر طراحی کرده است (IAEA, 2001):

۱- پایگاه داده ایزوتوپی- این پایگاه اختصاصی^۲، دارای اطلاعات ایزوتوپی و هیدروشمیایی، با ابتکار IAEA برای ارتقای آب در دسترس^۳ ایجاد شده است. این پایگاه با استفاده از ایزوتوپ‌های جدید، سن آب‌های زیرزمینی، شرایط اقلیمی و تاثیر آن بر چرخه آب را اندازه‌گیری می‌کند. از این داده‌ها در شناخت الگوهای هیدرولوژیک، بررسی آلودگی و برنامه‌های پایش ایزوتوپی گرمایش جهانی و تغییر بارش، استفاده می‌شود.

۲- شبکه جهانی ایزوتوپ‌ها در بارش^۴- این شبکه^۵، بارش‌های مرتبط با تغییرهای اقلیمی را به عنوان بخش پایش اقلیم و منابع آب اندازه‌گیری می‌کند.

مدیریت مصرف نهاده‌های شیمیایی

از کودهای کشاورزی برای بیشینه عملکرد و دستیابی به تولید محصول زیاده‌تر استفاده می‌شود. مقدار کود مصرفی و مقدار در دسترس بودن برای گیاه همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی، افزون بر هزینه بالا، در صورت کاربرد زیاد و استفاده نادرست به آسیب‌رسانی به بوم‌نظام می‌انجامد. بنابراین، مهم است که از آن‌ها به طور کارا استفاده شود (Kumar et al., 2019). ردیاب‌های رادیواکتیو به دانشمندان و کشاورزان این امکان را می‌دهند تا با تعیین این‌که چه مقدار از مواد شیمیایی توسط گیاه جذب می‌شود و چه مقدار در محیط زیست از بین می‌رود، استفاده از کودها را بهینه کنند (Soliman & Galal, 2020). با کمک ایزوتوپ‌ها (تغییرهای عنصرهای شیمیایی با شمار نوترون‌های مختلف) پژوهشگران می‌توانند بینش ژرفی در مورد فیزیولوژی گیاه و جذب مواد مغذی به دست

1. N2O

2. <https://wateriso.utah.edu>

3. IAEA water availability enhancement

4. Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)

5. <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>

آورند. با وارد کردن ایزوتوپ‌ها به خاک، دانشمندان می‌توانند حرکت مواد مغذی را از خاک به گیاه ردیابی کنند و به بهینه‌سازی راهبردهای کوددهی و به کمینه رساندن هدررفت کمک کنند. این رویکرد دقیق نه تنها بازده مصرف کود را به بیشینه می‌رساند، بلکه همراه با کاهش هزینه‌های کشاورزی، اثرهای زیست محیطی مصرف بیش از حد کود را نیز کاهش می‌دهد (García-López *et al.*, 2023; Akshay *et al.*, 2023).

ایران نیز یکی از کشورهایی است که برای افزایش تولید محصول‌های زراعی به شدت به استفاده از کودهای شیمیایی متکی است. مصرف این کودها موجب تغییرهای نامطلوب در محیط زیست و گوناگونی زیستی ایران شده است. این در حالی است که پژوهشگران ایرانی با کمک فناوری هسته‌ای توانسته‌اند مصرف کودهای شیمیایی را در کشت چندین محصول راهبردی مانند گندم، ذرت و نیشکر تا ۳۰٪ کاهش دهند (Askari *et al.*, 2014).

مدیریت یکپارچه آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی

فن‌های هسته‌ای ابزارهای قدرتمندی در مدیریت آفت‌ها هستند. حشره‌های نابارور^۱ نمونه بارزی است که در آن حشره‌های نر با تابش پرتوهای گاما در محیط آزمایشگاهی نابارور می‌شوند. سپس، برای فرآیند جفت‌گیری، این نرهای نابارور به کمک پهبادهای کشاورزی در طبیعت رهاسازی می‌شوند، اما چون نسلی از آن‌ها پدید نمی‌آید به‌طور موثر و با گذشت زمان جمعیت آفت‌هایی مانند مگس سرکه و پشه را کاهش می‌دهند. این روش جایگزینی پایدار و سازگار با محیط است که استفاده از مواد شیمیایی زیانبار و دیگر آفت‌کش‌ها را کاهش می‌دهد (Dyck *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2020). این روش اقتصادی به زمان کمی نیاز دارد، زیرا ۲۰ هکتار در مدت پنج دقیقه تیمار می‌شود. آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و هم‌پیمانانش در تلاش هستند تا وزن پهبادهای را کاهش و شمار حشره‌های نابارور را افزایش دهند (Vreysen *et al.*, 2021). در مقابل، راهبرد دیگر برای رویارویی با آفت‌های گیاهی، ایجاد گیاهان جهش‌یافته و مقاوم نسبت به عامل تهدیدکننده است. برای نمونه، بیماری پژمردگی فوزاریومی، باغ‌های موز را در آفریقا، آسیا و آمریکای لاتین از بین برده است. رقم‌های جهش‌یافته موز به بیماری پژمردگی فوزاریومی مقاوم است و گونه جدید جهش‌یافته موز کاوندیش در آسیا و آفریقا انتشار یافت (Hu *et al.*, 2022). همچنین، پژوهشگران با ایجاد رگه‌های^۲ جدید سورگوم مقاوم به علف ناخواسته (هرز) استریگا^۳، در آزمایشگاه ژنتیک و به‌نژادی گیاهان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، خسارت ناشی از این گیاه انگلی را خنثی کرده‌اند. این علف ناخواسته موجب هدررفت سالانه غلات به ارزش بیش از هفت میلیارد دلار می‌شد و زندگی حدود ۳۰۰ میلیون نفر را زیر تأثیر قرار می‌داد (Ghanim *et al.*, 2024). افزون بر این، پژوهش‌هایی برای مبارزه با آفت کرم ارتشی پاییزی^۴ در کشورهای جنوب صحرای آفریقا انجام شده است (Jiang *et al.*, 2022).

مدیریت پس از برداشت

تیمار کنترل‌شده محصول‌ها با پرتوهای کم‌شدت به عنوان راهکاری برای افزایش ایمنی مواد غذایی توجه شده است. با از بین بردن بیماری‌ها و حشره‌های زیانبار، پرتوتابی می‌تواند ماندگاری محصول‌های غذایی را افزایش داده و خطر بیماری‌های ناشی از غذا را کاهش دهد و گزینه ایمن‌تری را برای مصرف‌کنندگان ارائه دهد (Thomas, 2020). از پرتوهای یونیزه‌کننده در دماهای کم یا معمولی برای از بین بردن باکتری‌های فاسدکننده مواد غذایی و دیگر میکروارگانیسم‌های موجود در غذاهای تازه بهره‌گیری می‌شود و در نتیجه از تغییر در گوارش و خوش طعمی (مرتبط با روش معمول نگهداری)

1. Sterile Insect Techniques (SIT)
4. *Spodoptera frugiperda* J.E. Smith

2. Lines

3. *Striga hermonthica* (Delile) Benth

جلوگیری می‌شود. بنابراین، این امکان را برای توزیع گسترده‌تر مواد غذایی فاسدشدنی در حالت تازه یا به تقریب تازه فراهم می‌نماید (Bisht *et al.*, 2021).

استفاده مناسب از تابش می‌تواند عمر مفید محصول را افزایش دهد، نیاز به مواد شیمیایی برای نگهداری و کنترل آفت‌ها را کاهش دهد، محصول‌های گندزدایی‌شده تولید کند که می‌توانند بدون یخچال نگهداری شوند، رسیدن میوه‌ها و سبزی‌ها را به تأخیر اندازد و کیفیت اندام‌های زیرزمینی خوراکی ذخیره‌شده را بهبود بخشد. این روش توسط FAO، WHO و IAEA پذیرفته و توصیه شده است (Reddy Gundreddy *et al.*, 2023). در این رابطه، برنامه مدیریت خاک و آب و تغذیه محصول^۱ در FAO و بخش کاربردهای هسته‌ای IAEA دامنه گسترده‌ای از مواد هسته‌ای و ایزوتوپی را توسعه داده‌اند. همچنین، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و صندوق توسعه بین‌المللی اوپک^۲ توافقنامه‌ای برای بهبود امنیت غذایی و ارتقای بخش کشاورزی در کشورهای مختلف آسیایی امضا کرده‌اند (OFID, 2017). در حال حاضر، مقررات مربوط به پرتوتابی مواد غذایی در اتحادیه اروپا به‌طور کامل هماهنگ نیست. برخی از کشورها مانند بریتانیا اجازه پرتوتابی به برخی از گیاهان را می‌دهند، در حالی که برخی دیگر مانند آلمان مخالف هستند. با این حال، همه هم‌فکر هستند که برای اطلاع‌رسانی به مصرف‌کنندگان در مورد پرتوتابی به مواد غذایی، برچسب‌گذاری مواد غذایی پرتو تابی شده اجباری باشد (Askari *et al.*, 2014).

مدیریت تغییر اقلیم

تغییر اقلیم با به‌وجود آوردن رویدادهای شدید اقلیمی و دگرگونی شرایط موجود، فشار زیادی بر بخش کشاورزی وارد می‌کند. در این میان، انرژی هسته‌ای با ارائه راه‌حل‌های نوآورانه، انعطاف‌پذیری این بخش را در برابر این چالش‌ها افزایش می‌دهد. به‌نژادی جهشی می‌تواند با ایجاد محصول‌های متحمل به خشکی و گرما، امکان دسترسی کشاورزان به گونه‌های انعطاف‌پذیرتر برای رویارویی با چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم را فراهم کند (Kharkwal & Olson, 2009). افزون بر این، توسعه کشاورزی پایدار نیازمند اتخاذ رویکردی جامع است که شامل استفاده ترکیبی از راهبردهای مدیریت خاک، مواد مغذی و آب باشد. این موضوع به افزایش بهره‌وری محصول و همزمان کاهش تنش‌های غیرزیستی و زیستی کمک می‌کند. برای دستیابی به یک نظام زراعی پایدار، ضروری است که شیوه‌های نوین موسوم به کشاورزی اقلیم-هوشمند^۳ توسط بهره‌برداران یا کشاورزان استفاده‌کننده، ایجاد و به‌کار گرفته شود. این شیوه‌ها شامل مجموعه‌ای از راهبردهای مدیریتی و فناوری‌های پیشرفته است که به‌طور همزمان بهره‌وری محصول، پایداری محیط‌زیست و حفاظت از بوم‌نظام‌های کشاورزی را بهبود می‌بخشند (Zaman *et al.*, 2018).

نگرانی‌های کاربرد انرژی هسته‌ای در کشاورزی

رخداد‌های ناشی از پرتوهای هسته‌ای- نگرانی‌های مربوط به ایمنی و خطرهای احتمالی کاربرد انرژی هسته‌ای، همواره موضوعی بحث‌برانگیز بوده است. در این راستا، ایجاد چارچوب‌های نظارتی دقیق و شفافیت علمی برای اطمینان از استفاده مسئولانه و اخلاقی این فن‌ها ضروری است. اثرهای فاجعه‌بار ناشی از یک حادثه هسته‌ای همچنان آلودگی احتمالی زنجیره غذایی را تهدید می‌کند. پس از فاجعه هسته‌ای چرنوبیل^۴ در سال ۱۹۸۶، مقام‌های شوروی سابق در همایش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی هیچگونه تأثیرپذیری از کشاورزی را در این حادثه فاش نکردند. با این حال، تخمین‌ها نشان

1. Soil and Water Management and Crop Nutrition (SWMCN) 2. OPEC Fund for International Development (OFID)
3. Climate-Smart Agriculture (CSA) 4. Chernobyl

می‌دهند که حدود ۵۰٪ از مواد رادیواکتیو منتشرشده در شعاع ۳۰ کیلومتری چرنوبیل ته‌نشین شده است (Hohenemser *et al.*, 1986). انتظار می‌رفت که نقطه‌های داغ^۱ در اتحاد جماهیر شوروی سابق، ایجاد شود، جایی که ذره‌های رادیواکتیو روی گیاهان و جانوران باقی می‌مانند. این موضوع به احتمال به مرگ و میر گسترده در میان جانوران یا گیاهان نمی‌انجامد، اما به طور ذاتی اثرهای محلی چشمگیری به همراه داشت. با این حال، Lewis (1986) گزارش داد هیچ اثر چشمگیری روی گیاهان و جانوران فراتر از منطقه ۳۰ کیلومتری پیرامون نیروگاه مشاهده نشده است. در مقابل، تأثیر حادثه چرنوبیل بر کارکنان زنجیره غذایی کشاورزی خارج از اتحاد جماهیر شوروی سابق سریع و چشمگیر بود. لهستان قرص‌های ید را برای جلوگیری از جذب ید-۱۳۱ رادیواکتیو از راه غذای آلوده، توزیع کرد. در آلمان، حتی با وجود سطح‌های پایین آلودگی در بیشتر موردها، مقدار زیادی کاه و سبزی‌های تازه از بین رفت. کانادا نیز به دلیل سقوط ذره‌های پرتوزای قابل تشخیص، از پذیرش گیاهان تازه از ایتالیا خودداری کرد (Bell & Riechert, 1987).

هزینه‌های زیاد سرمایه‌گذاری - ساخت تاسیسات هسته‌ای و کاربرد فناورانه آن در بخش پژوهش‌های کشاورزی به سرمایه‌گذاری کلان و دانش پیشرفته نیاز دارد که می‌تواند روند را طولانی و پرهزینه کند. با این حال، کاربرد چندگانه انرژی هسته‌ای در موردهایی مانند تولید برق می‌تواند این چالش را تا حدی توجیه‌پذیر کند.

چالش زباله‌های هسته‌ای - زباله‌های هسته‌ای، محصول جانبی اجتناب‌ناپذیر فعالیت راکتورهای هسته‌ای، چالشی بغرنج در زمینه دفع و نگهداری امن به شمار می‌روند. دفع نادرست این مواد خطرناک می‌تواند به نشت پرتوها به محیط زیست و به خطر انداختن سلامت انسان‌ها و جانوران بیانجامد.

پرغذایی^۲، فرآیندی که در اثر غنی‌شدن بیش از حد آب دریاچه‌ها و دیگر منابع آبی با مواد مغذی که بیشتر به واسطه ورود رواناب از خشکی رخ می‌دهد، به تهدیدی جدی برای سلامت آبزیان تبدیل شده است. این فرآیند به رشد بی‌رویه گیاهان می‌انجامد و در پایان با مصرف اکسیژن موجود در آب، موجب مرگ و میر آبزیان می‌شود. افزون بر رواناب، زباله‌های رادیواکتیو نیز می‌توانند در تشدید پرغذایی نقش داشته باشند. این زباله‌ها که تا ده هزار سال برای تجزیه کامل به زمان نیاز دارند، می‌توانند دارای مواد مغذی باشند که به رشد کنترل‌نشده گیاهان در آب‌ها دامن می‌زنند (Martinez, 2022). در همین راستا، نهاد اجرایی اتحادیه اروپا خواهان ایجاد مخزن همیشگی و ژرف برای دفع زباله‌های هسته‌ای به طور ایمن و بدون آسیب‌رسانی به محیط‌زیست است. افزون بر این، ساخت نیروگاه‌های جدید تا سال ۲۰۴۵ باید به عنوان نیروگاه‌های سبز شناخته شوند و گرفتن زمین‌های کشاورزی برای ساخت مخزن زباله‌های هسته‌ای نیز بررسی شود (Financial Times, 2022).

محدودیت منابع هسته‌ای - خلاف تصور رایج، انرژی هسته‌ای از منبعی تجدیدپذیر تأمین نمی‌شود. اورانیوم، عنصر اصلی مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای، با استخراج از معدن به دست می‌آید. این موضوع موجب می‌شود که دسترسی به این منبع انرژی در انحصار شمار اندکی از کشورها باشد (Reddy Gundreddy *et al.*, 2023).

کمبود نیروی متخصص - کمبود متخصصان آموزش‌دیده در زمینه رادیوایزوتوپ‌ها در بیشتر کشورها، مانعی برای استفاده مؤثر از آن‌ها در پژوهش‌های کشاورزی به شمار می‌رود. انرژی هسته‌ای از فناوری بسیار پیچیده‌ای بهره می‌برد که به سطح زیادی از تخصص و دانش فنی و همچنین سازماندهی دقیق شرکت‌ها و نظام‌های مدیریتی آن‌ها نیاز دارد. با اتخاذ رویکردی جامع و با در نظر گرفتن تمام موردها، می‌توان از انرژی هسته‌ای به عنوان ابزاری قدرتمند برای رویارویی با چالش‌های جهانی غذا و تغذیه بهره برد (IEEE, 2006).

پذیرش عمومی و چارچوب‌های نظارتی - استفاده از پرتوها در فرآوری مواد غذایی با چالش‌هایی در زمینه پذیرش عمومی روبه‌رو است. به طوری که برخی از مصرف‌کنندگان در ابتدا با این روش مخالف هستند. آموزش و آگاهی‌رسانی شفاف می‌تواند نگرش‌ها را تغییر دهد و زمینه را برای پذیرش گسترده‌تر فراهم کند (Ye, 2016). با این حال، استفاده از پرتوها نیازمند کنترل دقیق فنی است و چالش‌های ویژه‌ای را ایجاد می‌کند که هنوز نیاز به بررسی‌های بیشتر دارند. افزون بر این، دو جنبه‌ای که عموم مردم بیشتر در مورد آن‌ها نگران هستند، خطرهای زیست‌محیطی ناشی از رخدادهای هسته‌ای و مدیریت پسماندهای هسته‌ای است (Martinec, 2022).

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در دنیای امروز که تولید پایدار غذا، تغییر اقلیم و نوسان قیمت مواد غذایی از چالش‌های اساسی به شمار می‌روند، انرژی هسته‌ای به عنوان فناوری پیشرو و نویدبخشی مطرح است. این فناوری با بهره‌گیری از فن‌های پیشرفته مانند بهنژادی ژنتیکی گیاهان، کنترل آفت‌ها از راه نابارورسازی و مدیریت بهینه منابع آب، توانسته است نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و پایداری سیستم‌های کشاورزی داشته باشد. گرچه سودمندی‌های ذاتی انرژی هسته‌ای مشهود است، نگرانی‌هایی مانند آلودگی ناشی از مواد رادیواکتیو، مدیریت زباله‌های هسته‌ای و هزینه‌های زیاد اجرایی آن همچنان مانعی برای پذیرش عمومی و گسترش این فناوری محسوب می‌شوند. این چالش‌ها ضرورت توسعه فناوری‌های سازگارتر با محیط زیست و تدوین چارچوب‌های نظارتی دقیق‌تر را برجسته می‌کند.

پژوهش‌های علمی در این بخش، مرزهای دانش هسته‌ای و کشاورزی را گسترش می‌دهد و محصول‌هایی تولید شده است که ویژگی‌هایی همچون تحمل یا مقاومت در برابر تنش‌های محیطی، نیاز به آب کمتر و افزایش شمار برداشت در سال را دارا هستند. این دستاوردها نشان می‌دهند که با سرمایه‌گذاری‌های هدفمند در پژوهش و توسعه، می‌توان از ظرفیت‌های انرژی هسته‌ای برای رویارویی با چالش‌های جهانی مانند تغییر اقلیم، کاهش منابع طبیعی و امنیت غذایی بهره‌برداری کرد.

همکاری‌های بین‌المللی در این راستا اهمیت ویژه‌ای دارد. ایجاد شبکه‌های علمی و پژوهشی مشترک بین موسسه‌های ملی هسته‌ای و مراکزهای پژوهش‌های کشاورزی، به اشتراک‌گذاری دانش و فناوری را آسان و امکان استفاده کارآمدتر از منابع را فراهم می‌کند. همچنین، آموزش و آگاه کردن کشاورزان و مصرف‌کنندگان در مورد سودمندی‌ها و چالش‌های انرژی هسته‌ای، می‌تواند به بهبود پذیرش عمومی و کاهش مقاومت‌های اجتماعی کمک کند.

چشم‌انداز آینده انرژی هسته‌ای به در نظر گرفتن راه‌حل‌های نوآورانه بستگی دارد که افزون بر افزایش بهره‌وری کشاورزی، اثرهای منفی زیست‌محیطی را به کمینه برساند. برای دستیابی به این هدف‌ها، اتخاذ رویکردی جامع و متوازن که شامل پژوهش‌های پایه‌ای، کاربردی و توسعه زیرساخت‌های فناورانه باشد، ضروری است.

با در نظر گرفتن سیاست‌های حمایتی مناسب، تأمین منابع مالی کافی و تقویت همکاری‌های بین‌المللی، فناوری هسته‌ای می‌تواند به ابزاری کارا برای بهبود امنیت غذایی، حفاظت از محیط زیست و بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها در سراسر جهان تبدیل شود. این فناوری نه تنها چشم‌انداز جدیدی برای پایداری کشاورزی ارائه می‌دهد، بلکه نویدبخش راه‌حل‌های بلندمدتی است که می‌توانند چالش‌های جهانی را با موفقیت پشت سر بگذارند.

منابع

- اولادی، مرتضی؛ نعمت‌زاده، قربانعلی؛ رحیمی، مسعود؛ افخمی‌قادی، عمار؛ قلی‌زاده‌قرا، عمرا؛ مظفری، کامران؛ ضیایی، امیر. (۱۳۹۴). بررسی اثر پرتو گاما در ایجاد تنوع ژنتیکی و ریخت‌شناختی در برخی رقم‌های محلی و اصلاح شده‌ی برنج. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۳۶(۳)، ۸۰-۸۷.
- بهمنی، الهام؛ عزیزی، پیمان. (۱۳۹۹). بررسی انرژی هسته‌ای و اثرات آلودگی هسته‌ای روی محیط زیست و انسان. *اولین همایش ملی مهندسی قدرت و نیروگاه‌های هسته‌ای*. بوشهر. دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر.
- داودی، یاشار؛ تقی‌زاده، رضا. (۱۳۹۹). بررسی اثر پرتوهای گاما با منبع کبالت-۶۰ بر جوانه‌زنی بذر ذرت. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۴۱(۱)، ۱۶۷-۱۷۴.
- رحیمی، مسعود؛ مجد، فرامرز؛ جهانگیرزاده، ابراهیم؛ ودادی، سیروس؛ رحمانی، اسفندیار؛ نشان، نرگس. (۱۳۸۵). القاء موتاسیون در نارنگی به منظور ایجاد تنوع ژنتیکی در جهت تولید موتانت‌هایی با صفات کیفی برتر (با استفاده از پرتوهای گاما). *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۲۶(۲)، ۲۹-۳۴.
- شریفی، احمد؛ سرگزی مقدم، زهرا؛ خرازی، مهدیه؛ خادم، آزاده؛ مرادیان، مریم. (۱۴۰۳). تولید موتانت‌های بنفشه آفریقایی (*Saintpaulia ionantha*) با استفاده از تابش اشعه گاما. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۴۵(۳)، ۶۶-۷۴.
- عبادی الماس، داریوش؛ نواب‌پور، سعید؛ یامچی، احد؛ زینلی‌نژاد، خلیل؛ مومنی، علی؛ میرزاقادری، قادر. (۱۳۹۷). ارزیابی فعالیت برخی از آنزیم‌های دفاعی مهم در برنج جهش‌یافته‌ی مقاوم به بیماری بلاست. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۳۹(۴)، ۱۰۰-۱۰۸.
- قمقامی، مهدی؛ پیرولی بیرانوند، جواد؛ مقیسه، ابراهیم. (۱۴۰۱). برخی روش‌های هسته‌ای اندازه‌گیری رطوبت خاک برای بهبود مدیریت آبیاری. *مدیریت/راضی*، ۱۰(۲)، ۱۴۵-۱۶۰.
- نوروزی، صغری. (۱۳۹۲). اثرات زیست محیطی مواد رادیواکتیو (انرژی هسته‌ای). *اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار*. همدان. انجمن ارزیابان محیط زیست هگمتانه.
- Akshay, D.V.S., Kalyan, B., Kumar, G.A. & Banik, A. (2023). Nuclear agriculture: Growing a sustainable future for food. *Vigyan Varta: An International E-Magazine for Science Enthusiasts*, 4(11), 91-94.
- Askari, M.B., Askari, N., Mirhabibi, M. & Vahid, M. (2014). Nuclear techniques in agriculture and genetics. *American Journal of Bioscience*, 2(3), 102-105.
- Bell, M.C. & Riechert, B.P. (1987). Possible effects of nuclear radiation accidents on agriculture. *University of Tennessee*, Knoxville, 32 p.
- Bharat, R.A., Prathmesh, S., Sarsu, F. & Suprasanna, P. (2024). Induced mutagenesis using gamma rays: Biological features and applications in crop improvement. *OBM Genetics*, 8(2), 233-245.
- Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Tomar, M.S., Sinhmar, R., Rathi, N. & Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 372-385.
- CISA. (2019). Non-Radioisotopic Alternative Technologies White Paper. U.S. Department of Homeland Security Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. Retrieved from: https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19_1211_cisa_non_radioisotopic_alternative_technologies-white_paper.pdf
- Dyck, V.A., Hendrichs, J. & Robinson, A.S. (2021). Sterile insect technique: principles and practice in area-wide integrated pest management (p. 1216). Taylor & Francis.

- FAO. (2019a). Seven examples of nuclear technology improving food and agriculture, using nuclear sciences to feed the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from: <http://www.fao.org/zhc/detailevents/en/c/1039633/>
- FAO. (2019b). What is agricultural nuclear technology? Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: http://www.fao.org/newsroom/en/focus/2007/1000511/article_1000516en.html
- FAO. (2023). How to feed the world in 2050. Retrieved from: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf
- Financial Times. (2022). Brussels proposes green label for nuclear and natural gas. *Financial Times*. Retrieved from: <https://www.ft.com/content/7872a05f-9e38-4740-9b1b4efc69ca316c>
- Fornuclear. (2019). How many applications does nuclear technology have? Foro Nuclear. Retrieved from: <https://www.fornuclear.org/en/ask-the-expert/120347-applications-nuclear-technology>
- Forster, M.M. & Jankuloski, B.P.L. (2018). Manual on Mutation Breeding (Third Edition). Edited by Spencer-Lopes. *Plant Breeding and Genetics Subprogramme, Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture*, Vienna, Austria.
- García-López, J.V., Redondo-Gómez, S., Flores-Duarte, N.J., Zunzunegui, M., Rodríguez-Llorente, I.D. et al. (2023). Exploring through the use of physiological and isotopic techniques the potential of a PGPR-based biofertilizer to improve nitrogen fertilization practices efficiency in strawberry cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1243509.
- Ghanim, A., Sivasankar, S. & Rich, P.J. (2024). *Mutation breeding and efficiency enhancing technologies for resistance to Striga in cereals. Efficient Screening Techniques to Identify Mutants with TR4 Resistance in Banana: Protocols*, Springer Nature. 182 p.
- Hallauer, A.R. (2011). Evolution of plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 11, 197-206.
- Hohenemser, C., Deicher, M., Hofsäss, H., Lindner, G., Recknagel, E. & Budnick, J.I. (1986). Agricultural impact of Chernobyl: A warning. *Nature*, 321(6073), 827.
- Hu, C., Wu, Y. & Yi, G. (2022). Gamma irradiation of embryogenic cell suspension cultures from Cavendish banana (*Musa spp. AAA Group*) and *in vitro* selection for resistance to *Fusarium wilt*. *Efficient Screening Techniques to Identify Mutants with TR4 Resistance in Banana: Protocols*, 21-30.
- IAEA. (2001). Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition (Training Course Series No. 14). *International Atomic Energy Agency*, Vienna, Austria.
- IAEA. (2017). Food and agriculture [Online]. *Joint FAO/IAEA Programme, Nuclear Techniques in Food and Agriculture*. Retrieved from: <http://www.naweb.iaea.org/nafa/news/food-irradtool0807.pdf> (accessed March 4, 2017).
- IAEA. (2019). Food and agriculture. *Joint FAO/IAEA Programme, Nuclear Techniques in Food and Agriculture*. Available at: <https://www.iaea.org/topics/food-and-agriculture> (accessed July 29, 2019).
- IAEA. (2021). Nuclear Energy for a Net Zero World. Retrieved from: www.iaea.org/sites/default/files/21/10/nuclear-energy-for-a-netzero-world.pdf
- IAEA. (2024). FAO/IAEA Mutant Varieties Database (MVD) [Database]. Retrieved from: <https://www.iaea.org/resources/databases/mutant-varieties-database>
- IEEE. (2006). Nuclear Fission Fuel is inexhaustible. IEEE. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4057297> (accessed Dec 2020).
- Jain, S. M. (2010). Mutagenesis in crop improvement under the climate change. *Advances in Plant Breeding and Biotechnology*, 6(1), 45-58.
- Jiang, S., He, L.M., He, W., Zhao, H.Y., Yang, X.M., Yang, X.Q. & Wu, K.M. (2022). Effects of X-ray irradiation on the fitness of the established invasive pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Pest Management Science*, 78(7), 2806-2815.
- Joint FAO/IAEA Division. (2023). Interview with Ms. Shoba Sivasankar, Section Head, Plant Breeding and Genetics. *Plant Breeding and Genetics Newsletter*, No. 15, July 2023.
- Kharkwal, M.C. & Olson, D.G. (2009). *Microbiological Safety of Food Irradiation*. CRC Press.
- Koeniger, P., Gaj, M., Beyer, M. & Himmelsbach, T. (2016). Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations. *Hydrological Processes*, 30(16), 2817-2834.

- Kumar, R., Kumar, R. & Prakash, O. (2019). The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem. *Chief Ed*, 35(69), 1173-1189.
- Lee, H.J., Lee, S.H., Lee, J.H., Kim, Y., Seong, K.M. *et al.* (2020). Role of commensal microbes in the γ -ray irradiation-induced physiological changes in *Drosophila melanogaster*. *Microorganisms*, 9(1), 31.
- Lewis, H.W. (1986). The accident at the chernobyl nuclear power plant and its consequences: USSR state committee on the utilization of atomic energy. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 28(9), 25-27.
- Martinec, L. (2022). The influence of photovoltaic and nuclear energy sources on the use of land in the Czech Republic. *Agricultural Economics*, 68(8), 307-316.
- Mastrangelo, T., Parker, A.G., Jessup, A., Pereira, R., Orozco-Dávila, D., Islam, A., Dammalage, T. & Walder, J.M.M. (2010). A new generation of X-ray irradiators for insect sterilization. *Journal of Economic Entomology*, 103(1), 85-94.
- Mir, A.S., Maria, M., Muhammad, S. & Ali, S. M. (2020). Potential of mutation breeding to sustain food security. *Journal of Agricultural Advances*, 15(4), 85–99.
- Muzamal, M. (2022). Role of peaceful nuclear technology in the agriculture and food sector of Pakistan. *ISSRA Papers*, 14, 73-84.
- Nguyen, M.L., Zapata, F., Lal, R. & Dercon, G. (2011). Role of isotopic and nuclear techniques in sustainable land management: achieving food security and mitigating impacts of climate change. In Lal, R. & Stewart, B.A. (Eds.), *World Soil Resources and Food Security. Advances in Soil Science*, 18, 345–418.
- Ntsefong, G.N., Ernest, F.P., Kinsley, T.M. & Hervé, Z.A. (2023). Gamma ray induced mutagenesis for crop improvement: Applications, advancements, and challenges. *IntechOpen Journal of Mutagenesis Research*, 23(1), 31–49.
- Nuclearconnect. (2019). From Harvest to Home: How Radiation Improves Food Safety and Production. American Nuclear Society. Retrieved from: <http://nuclearconnect.org/wp-content/uploads/2015/09/From-Harvest-to-Home-web.pdf> (accessed on July 26, 2019).
- OFID. (2017). OFID and IAEA sign grant agreement to promote food security and sustainable agriculture in Asia. Retrieved from: <http://www.ofid.org/NEWS/PressRelease/ArticleId/3405/-OFID-and-IAEA-sign-grantagreement-to-promote-food-security-and-sustainable-agriculture-in-Asia>
- Oladosu, Y., Rafii, M.Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H.A., Miah, G. & Usman, M. (2016). Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: A review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 30(1), 1-16.
- Pires, L.F., Cássaro, F.A.M. & Correchel, V. (2021). Use of nuclear techniques in soil science: A literature review of the Brazilian contribution. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45, e0210089.
- Reddy Gundreddy, R., Reddy, K.S. & Reddy Kadapa, S. (2023). Growing Greener: Harnessing the power of nuclear technology for sustainable crop development. *Science for Agriculture and Allied Sector*, 5(7), 1-5.
- Roychowdhury, R. & Tah, J. (2013). Mutagenesis—A potential approach for crop improvement. In J. Anderson (Ed.), *New Frontiers in Plant Breeding*, 75–89.
- Shu, Q.Y., Forster, B.P., & Nakagawa, H. (2011). Plant Mutation Breeding and Biotechnology: Plant Breeding and Genetics Section. *Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture*. Vienna, Austria.
- Silow, R.A. (1962). The significance of nuclear science for food and agriculture. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 13(7-8), 313-317.
- Soliman, S.M. & Galal, Y.G.M. (2020). Isotopes in fertilizer research. *Soil and Fertilizers*, 209-244.
- Suprasanna, P., Mirajkar, S. J. & Bhagwat, S. G. (2015). Induced mutations and crop improvement. In: S. Dutta & M. Kumar (Eds.), *Advances in Crop Science*, 325–341.
- Thomas, P.A.U.L. (2020). Control of post-harvest loss of grain, fruits, and vegetables by radiation processing. *Irradiation for Food Safety and Quality*, 93-102.
- Tilman, D. & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518-522.

- Tyagi, A., Joshi, R., Singh, N., Jain, P. & Durgesh, K. (2023). Induced mutagenesis for crop improvement. *Advances in Plant Mutation Research*, 9(2), 145–157.
- Ukessays. (2019). Essays, uses of nuclear energy in agriculture. Retrieved from: <https://www.ukessays.com/essays/environmental-sciences/uses-of-nuclear-energy-in-agriculture-environmental-sciences-essay.php?vref=1> (accessed on July 24, 2019).
- UNEP. (2021). *Emissions Gap Report 2021* (p. 4). Retrieved from www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021.
- VCDNP. (2018). VCDNP Fact Sheet on the Sustainable Use of Radioactive Sources in Agriculture and Food Security. Retrieved from: https://vcdnp.org/wp-content/uploads/2018/11/Fact-Sheet_27-Nov.pdf.
- Vreysen, M.J., Abd-Alla, A.M., Bourtzis, K., Bouyer, J., Caceres, C. *et al.* (2021). The Insect Pest Control Laboratory of the Joint FAO/IAEA Programme: Ten years (2010–2020) of research and development, achievements and challenges in support of the Sterile Insect Technique. *Insects*, 12(4), 346.
- World Bank. (2018). *World Bank Open Data*. Retrieved from: <https://data.worldbank.org>.
- World Nuclear. (2022). Plans for new reactors worldwide (Updated October 2022). Retrieved from: world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/iaea.org/newscenter/pressreleases.
- Yamaguchi, H., Hase, Y., Tanaka, A., Shikazono, N., Degi, K. *et al.* (2009). Mutagenic effects of ion beam irradiation on rice. *Breeding Science*, 59(2), 169-177.
- Ye, Q.Z. (2016). Safety and effective development of nuclear power to realize green and low-carbon development. *Advances in Climate Change Research*, 1, 10–16.
- Zaman, M., Shahid, S. A., Heng, L., Zaman, M., Shahid, S.A. & Heng, L. (2018). *The Role of Nuclear Techniques in Biosaline Agriculture*. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques, 133-164.

Nuclear Energy: An Innovative Approach to Enhancing Food Security and Environmental Sustainability

Alahdadi, H., Latifmanesh, H.¹ and Nouri, H.²

Nuclear agriculture, as an innovative technology, employs isotopic and nuclear irradiation techniques to enhance agricultural productivity, foster genetic diversity, and improve crop quality. This technology finds applications in sustainable resource management, reducing dependence on chemical inputs, and boosting plant resilience against environmental stressors. This study, based on a comprehensive review of up-to-date scientific literature, explores the role of nuclear agriculture in producing climate-resilient crops, minimizing post-harvest losses, and extending food shelf life. The results indicate that this approach not only improves water and soil efficiency but also contributes significantly to environmental sustainability by reducing ecological pollution. However, challenges such as safety concerns, high implementation costs, and public acceptance underline the necessity of clear regulatory frameworks and societal awareness. With its advanced scientific and technical capabilities, nuclear agriculture offers a sustainable, long-term solution to address global food security and climate change challenges. Promoting international collaboration, investing in research and development, and raising public awareness are essential to harness the full potential of this technology. The findings suggest that, with appropriate supportive policies, nuclear agriculture can become a pivotal component in ensuring global food security and fostering environmental sustainability.

Key Words: Food challenges, Genetic diversity, Irradiation, Sustainable resource management.

1. Corresponding Author Email: h.latifmanesh@yu.ac.ir

2. M.Sc. Graduated Student and Assistant Professors of Yasouj University, Yasouj, respectively.