Packaging Sciences and Techniques
Vol. 16, No. 4, Winter 2026, Serial No. 64
ISSN: 2228-6675 , E-ISSN: 2980-7824

Food Security Enhancement via Innovative Radiation Processing of Packaged Foods

Samira Berenji Ardestani*
Correspondence: Ph.D. in Food Science and Technology, Research School of Radiation Applications, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran. Email Address: sardestani@aeoi.org.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 28 Desember 2025

Received in revised form: 15 February 2026

Accepted: 18 May 2026

Available online: 5 June 2026

Keywords:

Packaging

Ionizing Irradiation

Food Processing

ABSTRACT

In recent decades, the use of radiation for non-thermal processing to ensure food safety has become very common. One of the developing methods of food preservation is irradiating food with ionizing radiation. In this method, harmful bacteria, fungi, and parasites that cause food spoilage are eliminated, thereby increasing the shelf life of food products. Irradiation is a fast, efficient, low-cost, and contamination-free physical process, similar to traditional methods such as heating, used to achieve better and longer preservation of food. In this process, packaged food is placed in a sealed chamber, , and exposed to ionizing radiation at a specific time and dose. Food in developing countries, often located in tropical regions with high humidity and temperature, is more prone to contamination and spoilage. Therefore, packaging and irradiation are among the best ways to preserve food. This method destroys spoilage- and disease-causing microorganisms, reduces or eliminates food allergens, and breaks down harmful substances and food toxins. It also prevents the use of chemical preservatives, which are highly detrimental. Moreover, irradiation helps maintain the natural freshness of food items. Additionally, the use of high doses that sterilize products reduces the need for refrigeration, ultimately lowering energy consumption. Using this modern processing method, a significant portion of agricultural products can be prevented from becoming waste due to inadequate post-harvest processing and storage, thereby contributing to food security.

Cite this article: S. Berenji Ardestani, "Food Security Enhancement via Innovative Radiation Processing of Packaged Foods," Journal of Packaging Sciences and Techniques, vol. 16, no. 4, pp. 57-73, 2026. DOI: https://doi.org/10.47176/packaging.2026.1256

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

Ensuring a sufficient food supply for the growing global population is closely tied to food safety, which plays a vital role in public health and development. In Iran, where agriculture is extensive, around a quarter of products are lost due to poor post-harvest handling, making modern preservation methods essential. Food processing techniques are designed to halt microbial activity, slow deterioration, and extend shelf life, and they are generally divided into thermal methods, such as heating, and non-thermal methods, including high-pressure processing, refrigeration, fermentation, chemical preservatives, and irradiation. Among these, irradiation has been internationally recognized as safe since the 1960s, effectively preventing contamination and spoilage while maintaining quality without making food radioactive. With centers established in Iran in 1984 and 1997, irradiation has been applied to food, spices, packaging, and medical supplies, offering advantages such as speed, efficiency, independence from environmental conditions, and elimination of chemical preservatives. Overall, it represents a promising technology to reduce waste, improve food safety, and strengthen agricultural production and exports.

Food irradiation

Food irradiation is a non-thermal preservation method that uses ionizing and non-ionizing radiation to eliminate harmful microorganisms without damaging food quality. Applied to products such as meat, fish, fruits, and vegetables, it is often called cold sterilization or pasteurization. Its effectiveness depends on the absorbed dose, and international organizations including WHO, FAO, and IAEA have confirmed its safety at approved levels. Irradiation helps reduce post-harvest losses, control pests, delay ripening, prevent sprouting, and lower microbial loads in spices, while working at the atomic level by disrupting microbial DNA and RNA. Because of its efficiency, minimal waste, and wide applications across agriculture, medicine, and food industries, it is regarded as a reliable technology that enhances food safety, quality, and global trade.

Food Irradiation Advantages

Food irradiation is a safe and efficient preservation technology that extends food shelf life by eliminating pathogens, molds, yeasts, and insects without leaving harmful residues or compromising nutritional value. It can be applied after packaging to prevent recontamination and is especially useful for solid foods like meat, poultry, seafood, and dried products, which cannot be treated with thermal pasteurization. The method is highly effective against resistant pathogens such as Salmonella, Campylobacter, and Toxoplasma, while also delaying ripening and sprouting in fresh produce. Commercially, it is widely used for spices and herbs as an eco-friendly alternative to chemical fumigation, helping reduce foodborne diseases, cut post-harvest losses, and support international trade. At low doses, irradiation safely inactivates harmful organisms, and its cost-effectiveness makes it one of the most practical and sustainable solutions for ensuring food safety and long-term storage.

Disadvantages of Food Irradiation

Food irradiation is a valuable non-thermal preservation method, but it comes with notable limitations. Exposure to radiation can soften fruits and vegetables by altering pectin and cellulose, while fats may oxidize and turn rancid due to free radical formation. High doses often cause off-flavors, pigment changes, enzyme disruption, and the loss of sensitive vitamins such as A, B1, E, and K, though others remain stable. Certain foods are unsuitable for treatment: shell eggs cannot be irradiated, dairy products develop unpleasant flavors even at very low doses, and meat may discolor or change taste above 1.5 kGy. Moreover, irradiation cannot fully eliminate bacterial spores like Clostridium, nor can it halt enzymatic activity or reverse spoilage once it has started. Packaging materials may also degrade under high doses. Beyond technical drawbacks, public perception of "irradiation" is often negative, linked to fears of radioactivity and health risks. Thus, while effective in many cases, irradiation is not universally applicable and must be carefully matched to food type and consumer acceptance.

Food Packaging During Irradiation

Food packaging plays a crucial role in facilitating the irradiation process, protecting irradiated foods from recontamination, and maintaining hygiene and quality. A wide variety of materials are used for food packaging, but in irradiation they must not negatively affect the food or produce any toxic or unwanted substances. Key considerations in selecting packaging for food irradiation are as following: Packaging materials must remain stable under radiation and preserve the sterility of food after treatment. The structure should allow radiation to penetrate the food while preventing bacteria and environmental moisture from entering. The design must enable safe and easy opening without risk of contamination. Only approved packaging materials should be used, in compliance with standard irradiation doses (Morehouse & Komolprasert, 2004).

Conclusion

At irradiation doses below 10 kGy, foods do not become dangerous or radioactive. At permitted irradiation levels, there is only a slight reduction in thiamine (vitamin B1), but not enough to cause deficiency. Irradiation does not produce significant changes in amino acids, fatty acids, or vitamins. In fact, the changes are so minimal that it is not easily noticeable whether food has been irradiated. The major advantage of irradiated food is that it is a non-thermal, cold process, meaning the food essentially remains "raw." Irradiation is equivalent to pasteurization for solid foods and serves as an important tool in combating foodborne diseases and deaths, while improving food hygiene. Irradiation with gamma rays, X-rays, or accelerated electrons under controlled conditions does not make food radioactive. Neither irradiation nor any other food treatment can make spoiled food edible; if food shows signs of spoilage such as changes in appearance, odor, or taste, no treatment—including irradiation—can reverse it. Currently, with increasing adoption, more than half a million tons of 40 different types of food (about 1% of annual global consumption) are irradiated each year in over 40 countries to ensure food safety and security.

«علوم و فنون بسته‌بندی»
سال شانزدهم، شماره ۶۴، زمستان ۱۴۰۴؛ ص ۷۳-۵۷
شاپای چاپی: ۲۲۲۸-۶۶۷۵| شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۷۸۲۴

تأمین امنیت غذایی با فناوری نوین پرتوفراوری مواد غذایی بسته‌بندی شده

سمیرا برنجی اردستانی*

دکترای علوم و مهندسی صنایع غذایی، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: sardestani@aeoi.org.ir

چکیده

در دهه‌های اخیر استفاده از پرتوها به منظور فراوری غیرحرارتی برای تأمین سلامت مواد غذایی بسیار رایج شده است. یکی از روش‌های در حال توسعه ذخیره‌سازی مواد غذایی، پرتودهی آن‌ها با پرتوهای یون‌ساز می‌باشد. در این روش، باکتری‌ها، قارچ‌ها و انگل‌های مضر که باعث فساد مواد غذایی می‌شوند، از بین رفته و ماندگاری مواد غذایی بیشتر می‌شود. پرتودهی فرایندی فیزیکی سریع، کارآمد، کم هزینه و بدون آلودگی است که همانند فرایندهای سنتی مثل حرارت دادن، به منظور ماندگاری بهتر و طولانی مدت مواد غذایی به کار می‌رود. در این روش ماده غذایی در محفظه بسته، به‌صورت بسته‌بندی شده، در یک زمان و دُز معین توسط پرتوهای یون‌ساز پرتودهی می‌شود. مواد غذایی به ویژه در کشورهای در حال توسعه مناطق گرمسیری، با رطوبت و دمای بالا، بیشتر در معرض آلودگی و از بین رفتن هستند. بنابراین، بسته‌بندی و پرتودهی مواد غذایی از بهترین راه‌های نگهداری آن‌ها است. این روش موجب از بین رفتن میکروارگانیسم‌های مولد فساد و بیماری، کاهش یا حذف آلرژن‌های غذایی، تجزیه مواد مضر و توکسین‌های غذایی می‌شود. این روش لزوم استفاده از مواد نگهدارنده شیمیایی زیان‌آور را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، پرتودهی باعث حفظ تازگی طبیعی در اقلام غذایی می‌گردد. همچنین استفاده از دُزهای بالا که در شرایط خاص، باعث سترون کردن محصولات می‌گردد، سبب کاهش نیاز به نگهداری مواد غذایی در شرایط یخچالی و در نهایت منجر به کاهش مصرف انرژی به‌ویژه در حمل و نقل خواهد شد. همچنین با کمک این روش نوین فراوری می‌توان از تبدیل قسمت عمده‌ای از محصولات کشاورزی به ضایعات درنتیجه عدم استفاده از روش‌های فراوری پس از برداشت و عدم نگهداری در شرایط مناسب جلوگیری نمود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت:۱۴۰۴/۱۰/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

کلیدواژه‌ها:
بسته‌بندی
پرتودهی با پرتو یون‌ساز
فراوری مواد غذایی

استناد: برنجی اردستانی، سمیرا، تأمین امنیت غذایی با فناوری نوین پرتوفراوری مواد غذایی بسته‌بندی شده، نشریه علوم و فنون بسته بندی، دوره ۱۶، شماره ۴، صفحات ۷۳-۵۷، ۱۴۰۴. DOI: https://doi.org/10.47176/packaging.2026.1256

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

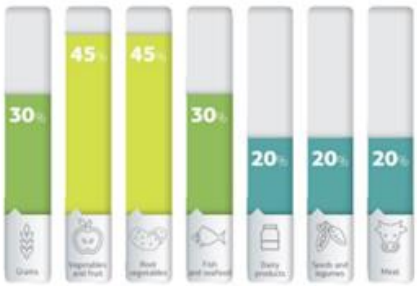
۱- مقدمه

تـأمین احتیاجـات غـذایی بـرای جمعیـت رو بـه فزاینـده جهـان از مهمترین مسائلی است که ذهـن دانشـمندان بخـش‌هـای مختلـف، خصوصاً صنعت، کشاورزی و بهداشت را به خود مشغول کرده اسـت. از طرف دیگر تأمین سـلامت مـواد غـذایی شـرط لازم بـرای تـأمین سلامت جامعه و از شاخص‌های مهم توسـعه مـی‌باشـد. بـروز مـوارد متعدد بیماری‌های منتقله از راه مواد غذایی در جهان لزوم بـه توجـه به‌کارگیری بهداشت مواد غذایی را بیشـتر نمایـان مـی‌سـازد [۱]. در کشوری با جمعیت و وسعت ایران، اهمیـت کـاربرد روش‌هـای نـوین برای حفظ طولانی مدت مواد غذایی بـر کسـی پوشـیده نیسـت. در راستای این هدف، کاربرد روش‌هـایی بـا کـارایی بـالا و بـی‌خطـر از اهمیت خاصی برخوردار است. با به‌کارگیری ایـن روش‌هـا عـلاوه بـر افزایش ماندگاری و حفظ ماده غذایی در مقابل فساد بایـد بـه حفـظ مواد مغذی و عدم تخریب در خصوصیات تغذیه‌ای محصول نیز توجه شود. بدین وسیله می‌توان از ایجـاد ضـایعات در قسـمت عمـده‌ای از محصولات کشـاورزی در اثـر عـدم اسـتفاده از روش‌هـای نگهـداری مناسب جلوگیری نمود. امید است که با توسعه این روش‌ها در آینده افق جدیـدی در تولیـد و نگهـداری محصـولات کشـاورزی بـه روی مصرف‌کنندگان گشـوده شـود. انـواع محصـولات بـاغی و کشـاورزی به‌صورت‌های مختلف در بازارهای داخلی و خارجی مصرف دارد و بـه لحاظ اقتصادی می‌توانند اقلام صادرات غیرنفتی را تشکیل دهند [۲]. به‌رغم اینکه این محصولات می‌توانند به منزلـهٔ یکـی از بـزرگ‌تـرین اقلام صادراتی کشورمحسوب شوند، به دلیل ماهیت فسادپذیر آن‌هـا همواره مشکلات جدی طی جابه‌جایی، انبارمانی پس از برداشت و نیز به هنگام فروش دارند که ضررهای اقتصادی فراوانی به دنبال می‌آورد. کاهش کیفیت میوه‌های تازه‌خوری عموماً ناشی از کـاهش وزن، نـرم شدن سریع، پوسیدگی-های قارچی و تغییرات طعم و رنگ است که بدون تیمار و شرایط انباری مناسب، کاهش کیفیت، سرعت می‌گیرد [۳]. همچنـین چاشـنی‌هـا و ادویـه‌هـا عمـدتاً در کشـورهای نیمه‌گرمسیری مانند هند، چین، پاکسـتان و پـرو کشـت مـی‌شـوند، شرایط آب‌وهـوایی گـرم و مرطـوب و همچنـین وضـعیت نامناسـب بهداشتی در مراحل برداشت، نگهداری و حمل‌ونقل، باعث شده‌اند که این محصولات به‌عنوان منابع بالقوه آلودگی میکروبی شناخته شـوند [۴]. مطابق اظهـارات رئـیس سـازمان تحقیقـات، آمـوزش و تـرویج کشـاورزی (تـات) در سـال ۱۴۰۳ سـالانه بـین ۲۵ تـا ۳۰درصـد از محصولات کشاورزی در ایران در طول زنجیره تولید و توزیـع از بـین می‌رود [۵]. همچنین مطابق آمار در سال ۲۰۲۵ میلادی، در مجموع ٪۲۰-٪۳۰ از محصولات کشاورزی در جهان نیز تبـدیل بـه ضـایعات می‌شود (شکل ۱) [۶]. اولین و مهم‌ترین دلیل آن نحوه جمع‌آوری و نگهداری محصول پـس از برداشـت اسـت. روش‌هـای فـراوری مـواد غذایی با هدف متوقـف کـردن فعالیـت میکروارگانیسـم‌هـا، کـاهش تغییرات فیزیکی و شـیمیایی کاهنـده کیفیـت مـاده غـذایی، بهبـود کیفیت مواد غذایی، جلوگیری از فساد و افزایش زمان ماندگاری ماده غذایی به کار گرفته می‌شـوند. تغییـرات در نتیجـه فـراوری مطلـوب (کاهش عوامل ضد تغذیه‌ای) یا نامطلوب (از بین رفتن ویتـامین‌هـا و سایر مواد مغذی) هستند. روش‌هـای حفـظ و نگهـداری محصـولات غذایی به دودسته اصلی فراینـدهای حرارتـی و غیرحرارتـی تقسـیم می‌شوند. روش‌های حرارتی فراوری مواد غذایی شامل حرارت دادن از دمای ۵۰°C تا ۱۵۰°C بسته به pH و زمان مانـدگاری مطلـوب بـرای محصول می‌شود. فرایندهای حرارتی به دو منظور در صـنایع غـذایی استفاده می‌شوند:

• نابودی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و توکسین‌ها، کـاهش عوامـل ضد تغذیه‌ای مانند آنزیم‌ها و در نتیجه تهیه غذای ایمن و سالم برای مصرف کنندگان؛

• پختن و فراهم کردن غذای آماده مصرف [۲].

روش‌های غیرحرارتی به گروهی از فناوری‌ها اطلاق می‌شود که مـاده غذایی را بدون اعمال حرارت حفظ و از تغییـر کیفیـت محصـول بـه وسیله گرما جلوگیری می‌کنند. از فناوری‌های غیرحرارتـی نگهـداری می‌توان به فراوری با فشار بـالای هیدرواسـتاتیک، میـدان الکتریکـی پالسی، فراصوت، میدان مغناطیسی متناوب، پالس‌هـای نـوری، سـرد کردن به‌شکل انجماد یا نگهـداری در دمـای یخچـال، تخمیـر، شـور کردن، استفاده از نگهدارنده‌هـای شـیمیایی (اسـید بنزوئیـک، اسـید پروپیونیـک، اسـید سـوربیک، اتـیلن-اکسـاید، متیـل بروماییـد و باکتریوسین‌ها) و پرتودهی، اشاره کرد [۷].



شکل (۱): درصد از بین رفتن مواد غذایی [۶]

۲- تاریخچه پرتودهی مواد غذایی در جهان و ایران

رونتگن در سال ۱۸۹۵ اشعه ایکس را کشف کرد. بکرل نیز در سـال ۱۸۹۶رادیو اکتیویته را معرفی کـرد. انفجـار تحقیقـات روی تـأثیرات بیولوژیکی پرتودهی با پرتوهای یون‌ساز بر ارگانیسـم‌هـای زنـده بـه

دنبال این اکتشافات بود. مخترعان کاربردهای عملی پرتودهی را بررسی کردند. واحد ثبت و اختراعات بریتانیا در سال ۱۹۰۵ در مورد پیشرفت‌هایی در زمینه‌های توسعه در راستای مواد غذایی نوشتند. دپارتمان کشاورزی بی شوآرتز در سال ۱۹۲۱ استفاده از اشعه ایکس را برای از بین بردن کرم گوشت پیشنهاد کردند. آزمایشگاهی در فرانسه نیز در سال ۱۹۳۰ استفاده از اشعه ایکس را برای از بین بردن باکتری‌های موجود در مواد غذایی پیشنهاد کرد. در ۴۰ سال اخیر لزوم استفاده از دیگر منابع پرتودهی مانند ماشین‌های اشعه ایکس یا ایزوتوپ‌های رادیواکتیو برای تیمارهای غذایی در کمیت‌های تجاری به مرور زمان در دسترس قرار گرفته و برای میکروب‌زدایی مواد غذایی، زمینه تحقیقات گسترده‌ای را فراهم کرده‌است. پس از به‌دست‌آوردن نتایج اولیه، این برنامه‌های تحقیقاتی تحت نظر آژانس بین‌المللی انرژی اتمی قرار گرفته و بیش از ۷۰ کشور در جهان، پرتودهی مواد غذایی را شروع کردند. کمیته مشترک تخصصی JECFI در سال ۱۹۸۰، درخصوص سالم بودن مواد غذایی مواد غذایی پرتودیده بیان کرد که پرتودهی تا دُز ۱۰ کیلوگری، هیچ خطر مسمومیتی را در پی نخواهد داشت. بسیاری از کاربردهای قابل پیش‌بینی پرتودهی مواد غذایی، دُزهای کمتر از ۱۰kGy، را نیاز داشتند. برای مثال:

- آلودگی‌زدایی باکتری‌های بیماری‌زا از غذاهایی مانند انواع گوشت‌ها، میوه‌ها و سبزی‌های تازه [۸ و۹]؛
- جلوگیری از جوانه‌زدن سیب‌زمینی، پیاز، سیر، زنجبیل؛
- جلوگیری از آلوده شدن دانه‌های غلات، جوانه‌های گیاهان مختلف و میوه‌های خشک مثل انجیر و خرما توسط حشرات؛
- افزایش مدت زمان نگهداری مواد غذایی در داخل یخچال؛
- انبار کردن میوه‌ها و سبزی‌ها.

برخی از کشورها، برای پرتودهی ادویه‌ها، دُزهای بالاتر از ۱۰kGy، را تصویب کرده‌اند. برای مثال فرانسه ۱۱kGy و ایالات متحده آمریکا در حدود ۳۰kGy، را برای پرتودهی ادویه‌ها انتخاب کرده‌اند.

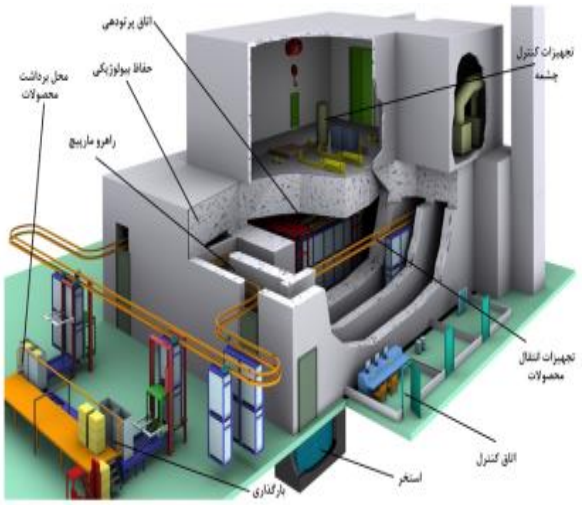
در سال ۱۹۶۴، وزارت بهداشت انگلستان، سلامت و ارزش غذایی مواد غذایی پرتودهی شده را تایید کرد. در آوریل سال ۱۹۶۹، پس از آزمایش‌های انجام شده، پرتودهی به سیب‌زمینی تا دُز ۰/۱۵kGy و گندم و محصولات وابسته به آن تا دُز ۰/۷۵ kGy به‌طور موقت مورد تأیید قرار گرفت. سرانجام در سال ۱۹۷۰، یک پروژه بین‌المللی در زمینه پرتودهی مواد غذایی، با حمایت FAO / IAEA/ OECD[1] و به پیشنهاد WHO با مشارکت ۲۴ کشور مورد تصویب قرار گرفت. مواد غذایی مطالعه شده در این پروژه شامل آرد گندم، سیب‌زمینی و برنج، ماهی، انبه، ادویه‌ها، خرمای خشک و پودر کاکائو و دُز مورد استفاده کمتر از ۱۰kGy بود. در سال ۱۹۸۲ پروژه به اتمام رسید و JECFI، دُزهای مجاز برای مواد غذایی مختلف را تعیین کرد. پس از این پروژه JECFI اعلام کرد که پرتودهی تا دُز ۱۰kGy هیچ خطر و مشکل مسمومیتی، تغذیه‌ای و میکروبی را در مواد غذایی ایجاد نمی‌کند. همچنین در سال ۱۹۹۴، براساس گزارش‌های نوشته شده توسط متخصصین مختلف در کارلسوهه، تشخیص داده شد که داده‌های در دسترس درباره خصوصیات تغذیه‌ای، میکروبی، مسمومیتی و شیمیایی مواد غذایی پرتودهی شده، به‌منظور تعیین سلامتی ماده غذایی، کافی است [۱۰]. سازمان FAO تخمین زده که حدود ۲۵٪ از تولید تمام مواد غذایی در سراسر جهان پس از برداشت محصول به دلیل وجود حشرات، میکروب‌ها و فساد نابود می‌شوند. همانطور که بازار مواد غذایی به طور فزاینده جهانی می‌شود، محصولات غذایی نیز باید استانداردهای بالای کیفیت و قرنطینه به منظور صادرات در سراسر جهان را کسب نمایند. سازمان غذا و کشاورزی پرتودهی را در قالب برنامه‌هایی در سطح ملی، جهت بهداشت گیاهی به کشورهای عضو پیشنهاد داده است [۱۱]. در کشور ایران نیز در شهریور ۱۳۶۱، مرکزی با سه هدف تولید، تحقیق و کنترل کیفی فناوری پرتودهی برنامه‌ریزی و طراحی شد. تا آن زمان محل و مرکزی برای ارایه خدمات پرتودهی در کشور وجود نداشت. مرکز تابش گاما در سازمان انرژی اتمی ایران، اولین مرکز در کشور بود که پرتودهی محصولات گوناگون نظیر محصولات پزشکی یکبار مصرف، محصولات بهداشتی، برخی مواد اولیه دارویی، مواد بسته‌بندی و ادویه‌ها را در مقیاس صنعتی آغاز کرد. با توجه به ماهیت توسعه‌ای و مصرف این فناوری جدید در کشور، قرارداد سه جانبه‌ای، میان سازمان انرژی اتمی ایران به‌عنوان مشاور فنی و مجری، برنامه عمران سازمان ملل متحد به‌عنوان تأمین کننده بودجه و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، به‌عنوان مشاور فنی پروژه، در شهریور ۱۳۶۱ امضا شد. این مرکز در اواخر سال ۱۳۶۴ افتتاح شد. مرکز تابش گاما امکانات یا جهت‌گیری‌های جدیدی را به‌منظور همکاری با دانشگاه‌ها در زمینه تحقیقات کاربردی میسر ساخته‌است. پس از ۱۲ سال مرکز پرتو فرایند یزد در سال ۱۳۷۶ تأسیس شد. از آنجا که انرژی‌های مورد استفاده در پرتودهی مواد غذایی درحدی نیست که بتواند در هسته اتم تغییراتی ایجاد کند، بنابراین محصول پس از پرتودهی پرتوزا نیست. روش پرتو فراوری محصولات که روز به روز در حال گسترش است، مزایایی مانند سرعت و سهولت انجام روش، تاثیرگذاری سریع و قابلیت مصرف بلافاصله پس از فرایند، عدم اتلاف زمان برای انجام واکنش‌های شیمیایی، عدم تاثیر دما، فشار و

[1] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)

رطوبت بر عملکرد آن، عدم اضافه شدن افزودنی‌های شیمیایی به محصولات پرتودهی شده و قابلیت پرتو فراوری پس از بسته‌بندی نهایی محصولات دارد [۱۲].

۳- پرتو فراوری محصولات غذایی

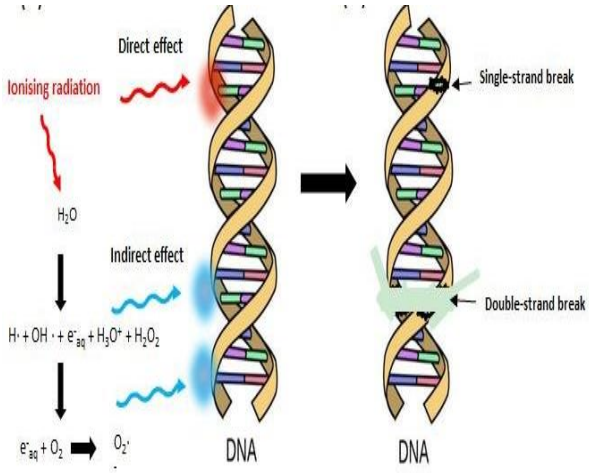
پرتوفراوری در مواد غذایی شاخه‌ی جدیدی از فناوری هسته‌ای است که با استفاده از پرتوهای یون‌ساز به‌دنبال ایجاد تغییرات مطلوب زیستی، فیزیکی و شیمیایی در غذا می‌باشد (شکل ۲). از پرتوهای مورد استفاده در صنایع غذایی می‌توان به پرتوهای یون‌ساز گاما، ایکس، باریکه الکترون و پرتوهای غیریون‌ساز فرابنفش، مادون قرمز و امواج رادیویی اشاره کرد [۱۳]. پرتودهی با پرتوهای یون‌ساز مانند پرتوگاما، پرتوایکس و باریکه الکترون به‌عنوان روشی برای نگهداری مواد غذایی مطرح است و جزء روش‌های نگهداری غیرحرارتی برای غذا طبقه‌بندی می‌شود، زیرا عملیات از بین بردن میکروارگانیسم‌ها در غذا، در دمای محیط انجام می‌شود و صدمات حرارتی به غذا وارد نمی‌شود. این فناوری تحت عنوان سترون‌سازی سرد (در دُزهای بیشتر از 10 kGy) یا پاستوریزاسیون سرد (در دُزهای کمتر از kGy ۱۰) با مقادیر مختلف پرتو به شیوه موفقیت‌آمیزی برای نگهداری غذاهایی مانند مرغ، گوشت قرمز، ماهی و میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده شده است . میزان تغییرات فیزیکی و شیمیایی ایجاد شده به هنگام قرار گرفتن مواد غذایی در برابر پرتوهای پر انرژی، به وسیله انرژی جذب شده اندازه‌گیری می‌شود. به مقدار انرژی جذب شده در ماده دُز جذب شده یا دُز جذبی گفته می‌شود که با واحد گری (مقدار انرژی جذب شده در واحد جرم) (Gy) بیان می‌شود [۱۴].



شکل (۲): سامانه پرتودهی گاما

پرتودهی مواد غذایی به‌منظور کنترل و حذف حشرات یا میکروارگانیسم‌ها عامل فساد و بیماری‌زا از قبیل باکتری‌ها، کپک‌ها، مخمرها و ویروس‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نتیجه زمان ماندگاری فرآورده‌های غذایی افزایش می‌یابد. فناوری پرتودهی در کارگروه مشترک سازمان جهانی بهداشت، سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به لحاظ بی‌خطر بودن مواد غذایی پرتودهی شده تصویب شده است. در این کارگروه بیان شده است که پرتودهی مواد غذایی تا دُز ۱۰ کیلوگری برای انسان و دُز ۵۰ کیلوگری برای مصارف حیوانی ایمن است و هیچ خطر سم‌شناختی و تغذیه‌ای خاص یا مسأله‌ی میکروبی ایجاد نمی‌کند [۱۵]. سطح ۱۰ کیلوگری بالاترین سطح ایمنی نیست بلکه سطحی است که ایمنی در آن سطح اثبات شده است [۱۶]. این فناوری به‌دلیل داشتن کارایی‌های وسیع در تمام زمینه‌های زندگی انسان از جمله کشاورزی، داروسازی، پزشکی و صنایع غذایی از اهمیت بالایی برخوردار است. روش پرتودهی کمترین ضایعات را به‌دنبال دارد و از این نظر در رتبهٔ اول روش‌های سالم‌سازی غذا قرار گرفته است. البته باید گفت که در هر روش معایبی وجود دارد اما اگر بتوان این معایب را به حداقل رساند کارآیی این روش‌ها توسعه پیدا خواهد کرد. فرایند پرتودهی در میان سایر روش‌های فراوری مواد غذایی طولانی‌ترین و دقیق‌ترین تحلیل‌ها را به‌همراه داشته است. کمیته‌های مستقلی از دانشمندان توافق دارند که اگر از پرتودهی به‌نحو صحیح استفاده شود، بی‌خطر خواهد بود. روز به روز نقش موثر فرایند پرتودهی مواد غذایی در کاهش ضایعات پس از برداشت، اطمینان از کیفیت بهداشتی غذا و تجارت وسیع مواد غذایی بیشتر نمود می‌یابد. پرتودهی مواد غذایی عبارت از قرار دادن ماده غذایی در مقابل مقدار مشخصی از پرتو گاما، به‌منظور جلوگیری از جوانه‌زنی بعضی محصولات غذایی مانند پیاز و سیب زمینی و هم‌چنین کنترل آفات انبارداری، کاهش بار میکروبی و قارچی بعضی از محصولات مانند زعفران و ادویه‌ها و تأخیر در رسیدن بعضی میوه‌ها به‌منظور افزایش زمان نگهداری آن‌ها می‌باشد [۱۷]. در این فرایند ماده غذایی در معرض پرتوهای یون‌ساز قرار داده می‌شود. نفوذ پرتو به داخل ماده باعث برهم کنش آن با اتم‌ها و مولکول‌های ماده می‌شود. در مقیاس اتمی این پرتوها، اتم‌ها و مولکول‌های ماده را یونیزه می‌کند و سبب شکستن پیوندهای شیمیایی می‌شوند. در این فرایند انرژی پرتو فرودی توسط محیط، جذب شده و تغییرات فیزیکی ایجاد می‌شود [۱۸]. انرژی به ماده غذایی نفوذ و در حین عبور از آن رادیکال آزاد تولید می‌کند. رادیکال‌های آزاد تولید شده بسیار واکنش‌پذیر بوده و طول عمر بسیار کوتاهی دارند. علاوه بر این الکترون‌های آزاد که در نتیجه پرتودهی مانند پرتو گاما تولید می‌شوند، مواد حساس سلول را دچار تغییر ماهیت می‌کنند و بسیار موثر هستند. از مهم‌ترین مواد حساس درون سلولی می‌توان به DNA و RNA اشاره کرد. پرتودهی با تخریب پیوندهای هیدروژنی

موجود در ساختار DNA از رونویسی آن جلوگیری می‌کند و باعث مرگ سلول می‌شود (شکل ۳). درحالی‌که در بافت غیر زنده تاثیرات جزیی ایجاد می‌کند. موجودات زنده‌ای که DNA و RNA سالم نداشته باشند، عملکرد خود را از دست می‌دهند [۱۹].



شکل(۳): اثرتابش گاما در تخریب DNA و از بین رفتن باکتری‌های بیماری‌زا در مواد غذایی

به‌طور کلی سه روش برای پرتودهی با پرتوهای یون‌ساز وجود دارد که به‌ترتیب زیر می‌باشند:

۱. پرتودهی با پرتوهای گاما، که در این روش از فوتون‌های گاما حاصل از چشمه‌های پرتوزا کبالت- ۶۰ یا سزیم- ۱۳۷ استفاده می‌شود.

۲. در روش دوم، شتاب‌دهنده‌های الکترونی با انرژی جنبشی ۱۰ مگاالکترون ولت به‌کار می‌رود.

۳. در روش سوم، ماشین‌های مولد پرتو ایکس با حداکثر انرژی ۵ مگاالکترون ولت استفاده می‌شود.

روش‌های دوم و سوم بیشتر در زمینه تحقیقاتی استفاده می‌شود [۲۰]. نکته مهم این است که در محدوده انرژی‌های به‌کار گرفته شده، این سه روش، هیچ هسته پرتوزایی در ماده ایجاد نمی‌کند و صرفاً ایمنی زیستی و پایداری ماده در فرایند ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهد.

عموما پس از فرایند پرتودهی، بخشی از میکروب‌ها یا تمامی آن‌ها غیرفعال شده و در نتیجه ماندگاری محصول افزایش می‌یابد. سازوکار غیرفعال شدن میکروب‌ها، ناشی از آسیب مستقیم DNA یا به طور غیر مستقیم ناشی از ایجاد رادیکال‌های اکسنده‌ای است که از پرتودهی مولکول آب حاصل می‌شود [۲۱]. افزایش زمان ماندگاری دلیل اصلی پرتوفراوری مواد غذایی است. پرتودهی از روش‌های مؤثر فراوری و نگهداری مواد غذایی است که بیماری‌زاهای غذایی را غیرفعال می‌کند.

۴- مزایای پرتودهی مواد غذایی

پرتودهی با توجه به نوع ماده غذایی کیفیت آن را تا مدت‌ها ثابت نگه می‌دارد و در کنترل میکروارگانیسم‌های عامل فساد موثر است. در صورت نیاز، مواد غذایی را عاری از حضور میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، مخمرها، کپک‌ها و حشرات می‌کند. رسیدگی، پیری و جوانه‌زنی میوه‌ها و سبزی‌های تازه را کنترل می‌کند. تغییراتی در ترکیب مواد غذایی ایجاد می‌کند که می‌تواند مطلوب یا نامطلوب باشد. هیچ سمی در ماده غذایی باقی نمی‌گذارد و ارزش مواد غذایی را تقریباً حفظ می‌کند. فرایند پرتودهی جایگزین مناسبی برای روش‌های تدخینی جلوگیری از آلودگی توسط حشرات، در مواد غذایی و ترکیبات تشکیل دهنده آن‌ها با استفاده از مواد شیمیایی مختلف نظیر متیل بروماید، اتیلن بروماید و اتیلن اکساید است در بسیاری از کشورهای پیشرفته به دلایل سلامتی محیط و جلوگیری از تخریب لایه ازن، ممنوع یا محدود می‌باشد. به نظر بسیاری از دانشمندان علوم غذایی، پرتودهی مواد غذایی، می‌تواند جایگزین افزودنی‌های غذایی شود. مواد غذایی هنگام پرتودهی چندان گرم نمی‌شوند. پرتودهی مواد غذایی، تنها روش نگهداری برای غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در مواد غذایی منجمد می‌باشد. از مزایای دیگر پرتودهی امکان استفاده از آن بعد از بسته‌بندی است، از این رو از ایجاد آلودگی دوباره جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر پاستوریزه‌کردن گرمایی که برای میکروب‌زدایی مواد غذایی مایع، روشی مناسب است، برای مواد غذایی جامد، از جمله گوشت، ماکیان، غذاهای دریایی و مواد خشک یا غذاهای خام کاربرد ندارد. این‌گونه مواد نیازمند روشی هستند تا در طی فرایند ضدعفونی و میکروب‌زدایی، خصوصیات ظاهری‌شان تغییری نکند و مورد قبول مصرف‌کننده باشند. همچنین مواد غذایی گوشتی خام باید حتما میکروب‌زدایی شوند و تمام میکروارگانیسم‌ها و انگل‌های آن‌ها به‌خصوص سالمونلا، کمپیلوباکتر ژژووانی، توکسوپلاسما و غیره که مولد انواع بیماری‌ها و مرگ‌ومیر حاصل از آن هستند، از بین بروند. استفاده از مواد شیمیایی به‌دلیل وجود باقی‌مانده‌های سمی در ماده غذایی مورد قبول نمی‌باشد. همچنین بسیاری از این میکروب‌ها نسبت به انواع آنتی‌بیوتیک‌ها مقاوم هستند و در اثر حرارت، نمک زدن، نیترات‌ها، اسید و سرما و غیره نیز از بین نمی‌روند. پرتودهی مواد غذایی بسیاری از میکروارگانیسم‌ها را بدون تغییر در خواص ظاهری و فیزیکی- شیمیایی مواد غذایی از بین می‌برد [۲] (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۵). روش پرتودهی به‌صورت تجاری، به‌منظور بهبود کیفیت بهداشتی ادویه‌ها و سبزی‌ها، جایگزین ضدعفونی کننده‌های دیگر شده و از نظر هزینه با روش‌های دیگر قابل رقابت است (جداول

۱ و ۲). پرتودهی با کاهش بیماری‌های ناشی از غذا و هدر رفتن مواد غذایی پس از برداشت محصول، تجارت مواد غذایی را آسان‌تر کرده‌است. بیماری‌های ناشی از غذا، نه تنها سلامت جامعه را تحت تاثیر قرار می‌دهند، بلکه باعث کاهش بهره‌وری اقتصادی نیز می‌گردند. به‌عنوان مثال در آمریکا، بیماری‌های ناشی از مواد غذایی آلوده به سالمونلا، به تنهایی سالانه در حدود ۲/۵ میلیون دلار هزینه دربردارد. پرتودهی مواد غذایی با دُزهای پایین ۱±۴kGy، برای غیرفعال کردن باکتری‌های بیماری‌زا بدون اسپور و دُز ۱kGy برای از بین بردن انگل‌های ماده غذایی موثر است و هیچ نوع تغییر خاصی را نیز در خواص فیزیکی-شیمیایی و ظاهری محصولات به جای نمی‌گذارد. به‌طور کلی سیستم‌های پرتودهی در مقایسه با سایر روش‌ها، بسیار مقرون‌به‌صرفه هستند. هزینه‌های پرتودهی مواد، در مقایسه با هر روش دیگری بسیار اندک بوده و لذا پرتوفراوری، اقتصادی‌ترین روش محسوب می‌شود. به‌عنوان مثال سامانه پرتودهی با هدف حشره‌زدایی محصولات که با چشمه کبالت-۶۰ کار می‌کند، اگر توان عملیاتی آن لحاظ شود، پرتودهی هر کیلوگرم محصول تا دُز 10 kGy در حدود ۴۲۵۰۰ هزینه دارد. این هزینه در مقایسه با روش‌های دیگر قابل رقابت است و لذا پرتوفراوری، روشی اقتصادی محسوب می‌شود [۲۲].

جدول (۱): مقایسه عوامل مؤثر در روش‌های مختلف سترون‌سازی [۲۲]

روش / عوامل	گرمای خشک	گرمای مرطوب	فرمالدهید	اتیلن‌اکسید ETO	پرتودهی
پارامترهای فرایند مداوم/غیرمداوم	زمان، دما، فشار	دما، فشار، زمان، خلاء	دما، فشار، زمان، خلاء، رطوبت نسبی	دما، فشار، زمان، خلاء، رطوبت نسبی، غلظت ETO	زمان، دز
ابقاء سترونی	خیر	بله	بله	بله	بله
اعمال بعد از سترون‌سازی	کاهش دما	خشک کردن	هوادهی به‌منظور از بین بردن فرمالدهید	هوادهی به‌منظور از بین بردن ETO	ندارد
سمیت باقی‌مانده	ندارد	ندارد	دارد به‌دلیل HCHO	دارد بهدلیل ETO، ETG و ETCH	وابسته به ماده غذایی و مقدار دُز
واکنش با محصول	اکسایش، تجزیه	آبکافت	بسپارش	اتیله‌شدن هیدروکسیل	پرتوکافت*
آزمون سترونی	لازم	لازم	لازم	لازم	لازم نیست
چگالی محصول	تاثیر می‌پذیرد	تاثیر می‌پذیرد	تاثیر می‌پذیرد	تاثیر می‌پذیرد	کمی تاثیر می‌پذیرد
مشکلات نفوذ به محصول	دارد	دارد	کمی	دارد	ندارد
انتخاب بسته‌بندی	نازک	نازک	نازک	نازک	ضخیم
سترون‌سازی در بسته‌بندی نهایی	امکان‌پذیر نیست	امکان‌پذیر نیست	امکان‌پذیر نیست	امکان‌پذیر نیست	امکان‌پذیر است
نوع فرایند	دسته‌ای	دسته‌ای	دسته‌ای	دسته‌ای	مداوم
آلودگی محیط	وجود ندارد	وجود ندارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود ندارد
قابلیت اعتماد	نسبتا خوب	خوب	متوسط	نسبتا خوب	عالی

* پرتوکافت یا رادیولیز به فرایندی گفته می‌شود که در آن پرتوهای یون‌ساز (مثل پرتوهای ایکس، گاما) باعث شکستن مولکول‌ها و ایجاد تغییرات شیمیایی در ماده می‌شوند.

۵- معایب پرتودهی مواد غذایی

بعضی از میوه‌ها و سبزی‌ها هنگامی‌که در معرض پرتو قرار می‌گیرند، نرم می‌شوند و خصوصیات بافتی خود را از دست می‌دهند. چربی‌ها در اثر پرتودهی رادیکال‌های آزاد ایجاد می‌کنند. این رادیکال‌ها سبب اکسایش و تندشدن چربی می‌شوند. دُز بالای پرتو، طعم‌های نامطلوب شدید تولید می‌کند. پرتودهی به ویتامین‌ها آسیب می‌رساند. بعضی ویتامین‌ها مانند B_2، B_3 و D به پرتودهی حساس نیستند، اما ویتامین‌های A، B_1، E و K آسان‌تر از بین می‌روند. بنابراین همهٔ مواد غذایی به‌منظور پرتودهی مناسب نمی‌باشند. البته هیچ روش نگهداری وجود ندارد که برای همه‌ی انواع مواد غذایی کاربرد داشته باشد. تخم‌مرغ پوسته‌دار را نمی‌توان در معرض پرتو قرار داد. طعم شیر در اثر پرتودهی ناخوشایند می‌شود. بعضی از غذاها حتی در دُزهای پایین پرتودهی به‌طور نامطلوب واکنش نشان می‌دهند. شیر و سایر فرآورده‌های لبنی از حساس‌ترین مواد غذایی نسبت به پرتودهی هستند. دُز پرتو پایین در حدود ۰/۱kGy طعم نامطلوبی را در شیر ایجاد خواهد کرد، به‌طوری‌که اکثر مصرف‌کننده‌ها آن را غیر قابل پذیرش می‌دانند. فرآورده‌های لبنی نسبت به ایجاد طعم اکسایش در حین پرتودهی با پرتو یون‌ساز، مستعد هستند. پرتودهی برخی مواد غذایی در دُزهای پیشنهادی تمام میکروارگانیسم‌ها یا سم آن‌ها را حذف نمی‌کند. به‌کارگیری دُز بالای پرتودهی به‌منظور سترون‌سازی، تغییرات نامطلوبی را به‌طور ناخواسته در طعم گوشت ایجاد می‌کند. رنگ گوشت ویژگی دیگری است که می‌تواند در اثر پرتودهی تغییر کند. دُز پرتودهی بالاتر از ۱/۵kGy ممکن است باعث تغییر رنگ گوشت قرار گرفته در معرض هوا شود. دُز پایین پرتو تمام اسپورهای باکتریایی را تخریب نمی‌کند [۲۳]. پرتودهی اثرات نامطلوبی در میوه‌ها و سبزی‌ها مانند نرم‌شدن این فرآورده‌ها به‌علت تغییر ساختار پکتین و سلولز برجای می‌گذارد. دُز زیاد پرتو روی رنگدانه‌ها، مواد معطر و آنزیم‌های مفید اثر دارد. همچنین دُز زیاد باعث تغییر برخی خواص مواد بسته‌بندی مانند فیلم‌های پلاستیکی و لاک داخل قوطی می‌شود [۱۹]. در بالاترین حد دُز مجاز پیشنهاد شده نیز اسپور کلستریدیوم‌ها زنده می‌مانند. از معایب آشکار فرایند پرتودهی در مقایسه با فراوری حرارتی، عدم توانایی آن در جلوگیری از فعالیت آنزیمی می‌باشد. اگر فساد در مواد غذایی شروع شده باشد، پرتودهی نمی‌تواند کاری برای معکوس‌کردن این اتفاق انجام دهد. بزرگترین عیب پرتودهی مواد غذایی، «نام» آن است، پرتو یون‌ساز یادآور موارد نامطلوب در ارتباط با اثرات پرتوزایی ، خطرات هسته‌ای فناوری پیشرفته، جهش ژنتیکی و سرطان است [۲۴].

۶- بسته‌بندی مواد غذایی هنگام پرتوفراوری

بسته‌بندی مواد غذایی نقش مهمی را در تسهیل فرایند پرتودهی، محافظت غذاهای پرتودهی شده از آلودگی مجدد و نیز حفظ بهداشت و کیفیت ماده غذایی بر عهده دارد. مواد مورد استفاده برای بسته‌بندی مواد غذایی متنوع است. به‌طورکلی مواد بسته‌بندی ماده غذایی در فرایند پرتودهی نباید تأثیری بر ماده غذایی داشته باشد و باید هیچ نوع ماده سمی یا ناخواسته‌ای ایجاد نکند.

جدول (۲): مقایسه روش‌های پرتوی با روش متداول سترون‌سازی [۲۲]

روش / عوامل	پرتودهی گاما	باریکه الکترونی	اتیلن‌اکسید	بخار
نوع محصول	محدودیتی ندارد	محصولات با چگالی کم	محدودیت وجود حفره‌های مسدود شده در محصول	عدم انسداد منافذ و حفظ تخلخل مناسب در محصول ضروری است.
مواد تشکیل دهنده محصول	از بین رفتن رنگ برخی از مواد پلاستیکی و تجزیه بعضی از مواد	از بین رفتن رنگ برخی از مواد پلاستیکی و تجزیه بعضی از مواد	اغلب مواد بدون تغییر	ذوب شدن برخی از پلاستیک‌ها
بسته‌بندی محصول	عدم محدودیت، غیرقابل نفوذ	بسته‌بندی نازک محصولات، عدم محدودیت، غیرقابل نفوذ	مواد نفوذپذیر، مقاوم در برابر فشار و خلاء	مواد نفوذپذیر
پارامترهای کنترل شونده در فرایند	زمان	زمان	دما، فشار، زمان، خلاء، رطوبت نسبی، غلظت ETO	دما، فشار، زمان، خلاء، رطوبت نسبی
قابلیت اعتماد	عالی	عالی	نسبتا خوب	خوب
اعمال بعد از سترون‌سازی	مورد نیاز نیست	مورد نیاز نیست	هوادهی برای از بین بردن باقیمانده‌ها	خشک کردن محصولات
اقتصاد	خوب در حجم‌های کم و زیاد، سرمایه‌گذاری‌های کلان	خوب در حجم‌های کم و زیاد، سرمایه‌گذاری‌های کلان	خوب در حجم‌های کم و زیاد، سرمایه‌گذاری‌های کلان	خوب در حجم‌های کم و زیاد، سرمایه‌گذاری‌های ارزان

۷- انتخاب نوع بسته‌بندی مواد غذایی در فرایند پرتودهی

- پایداری برخی از مواد بسته‌بندی مواد غذایی در برابر پرتو و حفظ سترونی ماده غذایی پس از فرایند پرتودهی (جدول ۳)؛
- ساختار آن به‌گونه‌ای باشد تا باعث نفوذ پرتو به ماده غذایی شود ولی باکتری‌ها و رطوبت محیط را عبور ندهد؛
- دارای طراحی باشد که بدون خطر آلودگی به‌راحتی باز شود.
- مواد مجاز تهیه بسته‌بندی مواد غذایی همراه با دُزهای استاندارد پرتودهی [۲۵]؛
- فیلم‌های چند لایه با خصوصیات انتخابی:

درصورت پرتودهی مواد غذایی در بسته‌بندی پلی‌اتیلن با چگالی کم، در شرایط خلاء و حضور هیدروژن، هیدروکربن‌های اشباع و غیراشباع فرار تبخیر می‌شوند. از طرف دیگر درصورت پرتودهی در حضور اکسیژن، آلدئیدها، کتون‌ها، کربوکسیلیک اسیدها و هیدروکربن‌های اشباع فرار، تبخیر می‌شوند. دو اثر اصلی و متناقض پرتوهای یونساز روی پلیمرهای بسته‌بندی، شکستن زنجیره پلیمری و همچنین ایجاد اتصالات عرضی است که به نوع ماده بسته‌بندی بستگی دارد. شکسته شدن زنجیره پلیمری موجب از بین رفتن اتصالات مولکولی و در نهایت خارج شدن گازها می‌شود. ایجاد اتصالات عرضی در زنجیره پلیمری موجب تغییر خصوصیات فیزیکی ماده مورد نظر مانند افزایش قدرت کششی، سخت‌تر شدن، تغییر قدرت حلالیت و کاهش قدرت تحمل فشار می‌شود. حداکثر دُز مجاز برای مواد بسته‌بندی با مقاومت پایین مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیل‌کلراید، سلولز و پلی‌وینیلیدن‌کلراید، ۱۰kGyاست. شایع‌ترین فیلم‌های محافظ در مقابل بو و طعم در موادی مانند ادویه‌ها، نایلون و اتیلن وینیل الکل می‌باشند. پروپیلن، پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) و پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) از جمله فیلم‌های محافظ رطوبتی هستند. نایلون و یا پلی‌استر نیز از فیلم‌های جدید محافظتی در مقابل گاز هستند. غالبا فیلم‌های با قطر بیش از ۷۶ میکرومتر برای بسته‌بندی مواد غذایی طی فرایند پرتودهی استفاده می‌شوند [۲۶-۲۹].

۸- ابعاد بسته‌بندی محصولات و هندسه چشمه

اندازه بسته‌بندی محصولات با دُز مورد نیاز محصول بستگی دارد. توزیع دُز در کل محصول به‌صورت یکنواخت نیست و از یک مقدار بیشینه در سطح جانبی بسته‌بندی تا مقداری کمتر در سمت دیگر بسته‌بندی متغیر است. به‌همین دلیل باید محصولات از تمام جهات پرتودهی شوند تا بتوان دُز تقریباً یکنواختی در محصول ایجاد کرد. توزیع دُز در محصول به‌صورت یک منحنی تقریبا سهمی شکل است، به‌این‌صورت که عمق بسته‌بندی دارای دُز کمینه و سطح جانبی آن دارای دُز بیشینه می‌باشد. در پرتودهی، سایز بسته‌بندی باید به‌گونه‌ای باشد که در مرکز بسته‌بندی مقدار کمینه دُزی که مورد نیاز است تامین می‌شود. البته باید توجه کرد که ایجاد دُز کمینه در عمق باعث از بین رفتن محصولات در سطح جانبی بسته‌بندی نشود [۲۶-۲۹].

۹- اثرات پرتودهی بر مواد مغذی غذا

پرتوهای گاما، اشعه ایکس یا باریکه الکترون که در پرتودهی مواد غذایی استفاده می‌شوند می‌توانند پیوندهای شیمیایی و مولکولی را از بین ببرند؛ بنابراین یک سری از خواص مواد غذایی مانند حسی، ارزش غذایی، ویژگی‌های هضم و جذب و غیره را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۳۰]. تغییرات نامطلوبی که در برخی از مواد غذایی پرتودهی‌شده، ظاهر می‌شود، ممکن است به‌طور مستقیم به علت پرتو و یا به‌طور غیرمستقیم در نتیجه واکنش‌هایی که پس از

پرتودهی اتفاق می‌افتد ایجاد شود. درصورت انجام فرایند پرتودهی در شرایط بی‌هوازی تولید طعم و آرومای نامطلوب به حداقل می‌رسد، به‌منظور به حداقل رسانیدن طعم نامطلوب، لازم است فرایند پرتودهی در دمای انجماد انجام شود [۱۹].

جدول (۳): پایداری برخی از مواد بسته‌بندی در برابر پرتو (21CFR 179) [۳۱]

مواد	پایداری نسبی	واکنش غالب در غیاب اکسیژن	اثر مشاهده شده
کاغذهای سلولزی ساده و پوشش‌دار، مقوای قهوه‌ای، مقوای نازک، سلوفان‌های پوشش‌دار، سلولز استات	*	شکست زنجیره	زردشدن، از دست دادن مقاومت، ترد و شکننده شدن، کاهش شکسته شدن مشتقات سلولزی
پلی‌وینیلیدن‌کلراید (PVDC)	*	شکست زنجیره	تاریک شدن، تغییر بو، تبخیر HCl
پلی‌وینیل‌کلراید (PVC)	**	شکسته شدن	
کوپلیمرهای وینیل‌کلراید-وینیلیدن‌کلراید (Saran)	**	اتصالات ضربدری، شکست	زرد-قهوه‌ای شدن، تبخیر HCl
کوپلیمرهای وینیل‌کلراید-وینیل استات	**	غیراشباع شدن	کاهش قدرت کششی، کاهش قدرت الاستیکی
پلی‌پروپیلن، کوپلیمرهای پروپیلن/اتیل‌وینیل‌استات	*	اتصالات ضربدری، شکست، متصاعد شدن گاز	شکننده شدن، زرد شدن
کوپلیمرهای اتیلن-وینیل‌استات، کوپلیمر اتیلن‌بوتن-۱	**	اتصالات ضربدری	شکسته شدن
پلی‌اتیلن	***	اتصالات ضربدری	تغییر رنگ، سخت شدن، متصاعد شدن گازها، تغییر در نفوذپذیری و انعطاف‌پذیری، تغییر در قدرت کشش
پلی‌کربنات	***	شکست زنجیره	شکنندگی در دُزهای بالا
نایلون-۶	***	اتصالات ضربدری	سخت شدن،کاهش فعالیت، افزایش شکنندگی، مقاومت در برابر گرما
پلی‌استیرن	****	اتصالات ضربدری	زردشدن در دُزهای بالا
پلی‌اتیلن‌ترفتالات	****	اتصالات ضربدری	کاهش قدرت کششی، افزایش شکست در دُزهای بالا، زردشدن
فلزات (Al, Sn)	****		عدم تغییر خصوصیات

*: تاثیرات پرتودهی در دز ۱kGy مشهود و در دز ۱۰kGy معنی‌دار است.

**: تاثیرات پرتودهی در دز ۱۰kGy مشهوداست (تغییر تا حدود ۲۰ درصدی خواص مکانیکی).

***: تاثیرات پرتودهی در دز ۱۰۰kGy مشهوداست (تغییر بیش از ۲۰ درصدی خواص مکانیکی).

****: غالبا در دزهای کمتر از ۱۰۰kGy تغییر نمی‌کند.

۹-۱- پروتئین‌ها

علاوه برآب، پروتئین‌ها و سایر ترکیبات نیتروژن‌دار حساس‌ترین ترکیبات مواد غذایی نسبت به پرتودهی می‌باشند. دراثر پرتو، ساختار حلقوی اسیدامینه دچار تغییر می‌شوند [۱۹]. پروتئین‌ها از اسیدهای آمینه مختلفی تشکیل شده‌اند و ساختار پیچیده‌ای دارند. از آنجایی که زنجیره‌های جانبی، اسیدهای آمینه حاوی گوگرد و ساختارهای حلقه‌ای در پروتئین حساس‌ترین نسبت به پرتودهی هستند، رادیکال‌های آزاد تولید شده توسط پرتودهی می‌توانند باعث ایجاد یک سری واکنش‌ها روی پروتئین‌ها مانند دآمیناسیون، دکربوکسیلاسیون، اکسیداسیون، شکستن یا بازسازی پیوند دی‌سولفیدی، تخریب پیوند پپتیدی یا اتصال عرضی، شوند که منجر به تغییر در ساختار فضایی و حالت تجمع مولکولی پروتئین‌ها می‌شود، بنابراین بر خواص پروتئین (مانند حلالیت، رنگ، هضم و غیره) تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، اکثر پروتئین‌ها پس از پرتودهی، توسط بدن انسان آسان‌تر هضم و جذب می‌شوند، به این معنی که پرتودهی مزیت قابل توجهی در بهبود میزان استفاده از غذا دارد. توسط کوماری و همکاران اثر پرتودهی با پرتوهای گاما در کنترل آسیب اکسیداتیو پروتئین‌های سویا در طول ذخیره‌سازی و فراوری بررسی شده است. این مطالعه به وضوح نشان داد که پرتودهی با دُز ۱-۵kGy می‌تواند کدورت، آبگریزی سطحی و اکسیداسیون پروتئین‌های سویا را کاهش دهد و در عین حال حلالیت پروتئین و محتوای سولفیدریل را افزایش دهد. علاوه بر این، دانه‌های سویای پرتودهی‌شده پاسخ آنتی‌اکسیدانی بالاتری نشان دادند که در افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای فنل کل و فنل آزاد و افزایش توانایی مهار رادیکال‌های آزاد آشکار شد. بنابراین، دُز مناسب پرتودهی می‌تواند ایمنی غذا را تضمین کند و کیفیت غذا را به طور موثر بهبود بخشد [۳۰].

۹-۲- لیپیدها

پرتودهی لیپیدها و چربی‌ها به ویژه وقتی که پرتودهی و/یا نگهداری پس از آن در حضور اکسیژن انجام گیرد، منجر به تولید ترکیبات اکسیدکننده نظیر پروکسیدها می‌شود که باعث تندشدن طعم درچربی‌ها می‌شود. پرتودهی با دُزهای بیشتر از ۱۰ kGy، منجر به تولید طعم پرتوی در برخی از مواد غذایی به‌ویژه گوشت می‌شود [۱۹]. مطالعات نشان داده‌اند که مولکول‌های چربی موجود در مواد غذایی به راحتی تحت پرتودهی اکسید و تجزیه می‌شوند. به طور خاص، اسیدهای چرب غیراشباع به دلیل وجود پیوندهای دوگانه در ساختار، به راحتی اکسید می‌شوند و با افزایش دُز پرتودهی، درجه اکسیداسیون افزایش می‌یابد [۳۰]. پرتودهی گاما تا دُز ۵ kGy بر ویژگی‌های کیفی انواعی از گوشت نشان داد که ویژگی‌های کلی کیفی نمونه‌های پرتودهی‌شده، از جمله بافت، مقادیر تیوباربیتوریک اسید، ظرفیت نگهداری آب و افت در زمان پخت، به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار نگرفت، اما تشکیل ترکیبات فرار از اکسیداسیون لیپید به‌طور قابل توجهی ارتقاء یافت، به‌ویژه هگزانال، پنتانال و ۱-هگزانول، که به‌عنوان نشانگرهای مهم در بوی گوشت شناخته می‌شوند [۳۲]. همچنین پرتودهی در دُزهای بیش از ۷ کیلو گری، می‌تواند باعث ایجاد طعم بد در گوشت شود و اکسیداسیون لیپید را تقویت کند [۳۳]. پرتودهی همچنین می‌تواند باعث رادیولیز لیپید در غذاها شود. تقوایی و همکاران از ۲-

(2-DCB)[1]، سیکلوبوتانونی که از استرهای اسید پالمیتیک تشکیل شده است، برای ارزیابی درجه رادیولیز لیپید در تری پالمیتین و چربی مرغ تحت پرتودهی با دُزهای مختلف (۰-۵۰ کیلوگری) استفاده کرد. غلظت DCB-۲ به صورت خطی با افزایش دُز پرتودهی افزایش یافت و سرعت تشکیل DCB-۲ در چربی مرغ ۳/۵ برابر در تری پالمیتین بود که دلیل آن تنوع ترکیب اسید چرب طبیعی چربی مرغ و ساختار همگن تری پالمیتین بود. این مطالعه همچنین نشان داد که تجزیه رادیویی لیپیدها به صورت خطی با دُز پرتودهی افزایش می‌یابد، که می‌تواند مرجع مفیدی برای تیمار پرتودهی غذاهای غنی از چربی باشد [۳۴].

۹-۳-کربوهیدرات

پرتودهی همچنین می‌تواند باعث ایجاد یک سری تغییرات در کربوهیدرات‌ها در غذا شود که عمدتاً به تخریب مواد خام یا تولید محصولات جانبی تحت پرتودهی با دُز بالا اشاره دارد. از آنجایی که کریستال‌های قند به شدت به پرتودهی حساس هستند، انتقال انرژی پرتو به شبکه کریستالی می‌تواند باعث تجزیه پرتویی بلورها شود و CO، H_2O، CH_4، آلدئیدها، کتون‌ها و سایر ترکیبات تولید کند. از آنجایی که این مولکول‌های کوچک آلی می‌توانند برای سلامت انسان مضر باشند، تنظیم دقیق دُز پرتو هنگام تیمار پرتودهی غذاهای حاوی قند بسیار مهم است. محققان دریافته‌اند که کربوهیدرات‌هایی مانند کیتوزان، آلژینات سدیم، کاراگینان، سلولز و پکتین پس از پرتودهی به راحتی تجزیه می‌شوند. برخی از مشتقات کربوهیدرات، مانند کربوکسی متیل سلولز و کربوکسی متیل نشاسته، می‌توانند تحت پرتودهی به هم متصل شوند و هیدروژل زیست تخریب‌پذیر تولید کنند [۳۵].

۹-۴- سایر مواد فعال

علاوه بر پروتئین‌ها، لیپیدها و کربوهیدرات‌ها، مواد فعال زیستی دیگری مانند ویتامین‌ها، پلی‌فنل‌ها، لسیتین و غیره در مواد غذایی وجود دارد که در تیمار پرتودهی نیز تأثیر خواهند داشت. عسل سرشار از پلی‌فنول‌ها، ویتامین‌ها، اسیدهای آلی و غیره است که فعالیت بالای آنتی‌اکسیدان‌ها را نشان می‌دهد [۳۰]. تأثیر پرتودهی γ بر ارزش غذایی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی عسل نشان داد، پس از پرتودهی، محتوای خاکستر، مقادیر pH، کل مواد جامد محلول و قند در عسل اندکی تحت تأثیر قرار گرفت، در حالی که محتوای فنلی، فلاونوئیدها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به طور قابل توجهی افزایش یافت. در همین حال، پرتودهی با دُز ۱۰kGy به طور موثری رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها را مهار کرد، که نشان می‌دهد اشعه γ می‌تواند فعالیت ضد باکتریایی عسل را بهبود بخشد و در عین حال خواص ذاتی آن را حفظ کند [۳۶]. محتوای فلاونوئیدها بادیان ستاره‌ای در ۲ تا ۹ برابر تحت پرتودهی ۲ تا ۱۰ کیلوگری افزایش یافته است. از طریق تجزیه و تحلیل قطعات مشخصه، تجمع فلاونوئیدها ناشی از پرتودهی به دلیل شکستن پیوند گلیکوزیدی ایجاد شد. میوه توت‌فرنگی پرتودهی‌شده با دُز ۶۰۰ Gy دارای بالاترین محتوای فنلی کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی است و پرتودهی می‌تواند بیوسنتز برخی از ترکیبات فنلی را تحریک کند [۳۷]. ظرفیت نگهداری کلروفیل و ویتامین C در خیار پس از پرتودهی به ترتیب حدود ۳ و ۱/۴ برابر افزایش یافته است. در همین حال، دوره نگهداری حدود ۱ هفته بیشتر شد و آسیب ناشی از سرما کاهش یافت که نشان می‌دهد دُز مناسب پرتودهی می‌تواند کیفیت غذا را بهبود بخشد [۳۸]. برخی از مطالعات همچنین نشان دادند که پرتودهی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر مواد فعال زیستی در غذاها ایجاد کند. بنابراین انتخاب نوع پرتودهی، زمان فراوری و دُزهای مناسب با توجه به نوع غذا برای حفظ و بهبود کیفیت غذا بسیار مهم است. این مطالعات نشان داد که پرتودهی مواد غذایی می‌تواند باعث ایجاد تغییراتی در ساختار یا ترکیب مواد مغذی اصلی در غذا شود که ارتباط نزدیکی با دُز پرتودهی و همچنین نوع و وضعیت غذا دارد. در مقایسه با روش‌های فراوری جایگزین مانند دمای بالا، فشار بالا یا تخمیر، تغییرات ناشی از پرتودهی نسبتاً جزئی است. این نشان می‌دهد که پرتودهی مواد غذایی به عنوان یک فناوری سازگار با محیط زیست و امیدوارکننده برای فراوری مواد غذایی دارای پتانسیل است [۳۰].

۱۰- حذف مواد مضر در غذاها با پرتودهی

مواد مضر موجود در مواد غذایی از جمله پاتوژن‌های غذایی، بیوتوکسین‌ها، باقی‌مانده‌های سموم کشاورزی و دامپزشکی، آلرژن‌ها و غیره از عوامل مهم تأثیرگذار بر ایمنی غذا هستند. تنوع زیاد و محتوای کم مواد مضر و همچنین پیچیدگی ماتریس مواد غذایی، حذف یا کاهش چنین خطراتی را چالش برانگیز می‌کند. علاوه بر این، ویژگی‌های مصرف سریع مواد غذایی نیاز بالایی به سرعت فراوری دارد. پرتودهی مواد غذایی یک راه حل سریع و موثر برای حذف یا کاهش مواد مضر موجود در غذا ارائه می‌دهد، در حالی که کمترین تأثیر را بر ارزش غذایی و طعم آن دارد، و آن را در فراوری مدرن مواد غذایی بسیار سودمند می‌کند [۳۰].

[1] dodecylcyclobutanone

۱۰-۱- توکسین‌ها

سموم مواد سمی هستند که توسط ارگانیسم‌های بیولوژیکی ترشح، متابولیزه یا نیمه بیوسنتزی می‌شوند که یکی از عوامل مهم منجر به ناامنی غذایی است. آن‌ها معمولاً روی مولکول‌های هدف خاص (غشای سلولی، کانال‌های یونی، گیرنده‌ها، پروتئین‌های نوکلئوزومی و غیره) با حساسیت بالا عمل می‌کنند و سپس مستقیماً در فرایندهای متابولیک سیستم‌های زنده شرکت یا با آنها تداخل می‌کنند و در نتیجه اثرات سمی یا کشنده مختلفی ایجاد می‌کنند. سموم علاوه بر اینکه مستقیماً باعث مسمومیت انسان می‌شوند، می‌توانند ضرر و زیان زیادی به کشاورزی، دامداری و محیط زیست آب وارد کنند. مقیاس وسیع و آلودگی مداوم محصولات کشاورزی نیاز به سرمایه‌گذاری اقتصادی قابل توجهی در کنترل آلودگی دارد. فناوری پرتودهی روشی کارآمد و بدون آلودگی را برای تجزیه سموم موجود در داخل یا روی سطح غذا ارائه می‌کند، و از نیاز به عملیات شیمیایی معمولی یا فراوری مواد غذایی اجتناب می‌کند و مزایای قابل‌توجهی مانند دوستی با محیط‌زیست و کارآمدی انرژی را ارائه می‌دهد. سمومی مانند آفلاتوکسین (AF)، اکراتوکسین A (OTA) و زیرالنون (ZEA) تولید شده توسط قارچ ها در دماها و رطوبت بالا معمولا غلات، بادام‌زمینی، شیر و سایر غذاها را آلوده و خطر قابل توجهی برای سلامتی ایجاد می‌کنند. پرتودهی با پرتو یون‌ساز می‌تواند مستقیماً با مولکول‌های آلی سموم تعامل داشته باشد و ساختار مولکولی ترکیب را از طریق حمله رادیکال‌های آزاد، اکسیداسیون و واکنش‌های یونیزاسیون تخریب کند. این فرایند سمیت سموم را کاهش می‌دهد و آن‌ها را کمتر سمی یا حتی غیرسمی می‌کند. علاوه بر این، پرتودهی می‌تواند رشد و تکثیر میکروب‌های سمی را مهار کند، در نتیجه از تشکیل آلودگی سمی در منبع آن جلوگیری می‌کند، که برای فراوری و ذخیره‌سازی مواد غذایی بسیار مفید است. آفلاتوکسین (AF)، به عنوان یکی از معمول‌ترین سموم، بسیار سرطان‌زا و سرکوب‌کننده سامانه ایمنی است که به عنوان یک محرک اصلی سرطان دستگاه گوارش در نظر گرفته می‌شود و توسط آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان به عنوان سرطان‌زای کلاس IA طبقه‌بندی شده است. گزارش‌های جدی تأثیر مفید پرتودهی را به‌عنوان یک روش ضدعفونی برای AF تأیید کرده‌اند [۳۰]. پرتودهی ۷ می‌تواند جمعیت اسپور زنده *A. flavus* را در نمونه‌های پسته تا حدود ۵ log کاهش دهد و حداکثر تخریب AFB1 به ترتیب ٪۷۳/۲۶ و ٪۸۳/۳۶ در دُزهای ۴ و ۶ کیلوگری بود [۳۹]. پس از تجزیه و تحلیل ساختار محصولات رادیولیتیک AFB1، مشخص شد که اکثر محصولات، محصولات افزودنی AFB1 هستند. رادیکال‌های آزاد در درجه اول بر پیوند دوگانه در حلقه فوران انتهایی، که همچنین محل فعال سمی AFB1 و نقطه اتصال اولیه برای سرطان کبد است، عمل می‌کنند [۴۰]. دُز ۴/۵ کیلوگری می‌تواند تولید مایکوتوکسین‌ها را کاهش دهد. با این حال، برای دستیابی به حداکثر تخریب AF و OTA، دُز ۲۰ کیلوگری با نرخ تخریب زیر ٪۶۱/۱ ضروری بود. بنابراین، توصیه می‌شود دانه با پرتو ۶ کیلوگری گاما پرتودهی شود تا قارچ سمی قبل از تولید مایکوتوکسین از بین برود. علاوه بر این، بازده تخریب پرتودهی سموم به طور قابل توجهی بسته به بستر غذایی متفاوت است. در محلول‌های آبی، سرعت تخریب OTA در دُزهای تابش $\leq$ ۲/۵ کیلوگری بالاتر از ٪۹۰ بود و سمیت سلولی آن ۲ برابر کاهش یافت. با این حال، حذف OTA در ماتریس مواد غذایی دشوارتر شد، حتی اگر دُز پرتودهی ۳۰ کیلوگری باشد، تنها ٪۲۴ از OTA را حذف کرد. افزایش محتوای آب در ماتریس غذا به طور قابل توجهی راندمان تخریب OTA را بهبود نمی‌بخشد، که می‌توان استنباط کرد که OTA به پرتودهی در محلول آبی بسیار حساس است اما در برابر بستر غذای خشک مقاوم است [۴۱و۴۲]. اثرات سیتوتوکسیک و استروژنی ZEA نیز با افزایش دُز پرتودهی کاهش یافت، به ویژه در محلول آبی، که نشان می‌دهد رادیکال‌های آزاد تولید شده توسط آب پرتودهی‌شده واسطه فرایند تخریب سموم است [۴۳]. به طور خلاصه، پرتودهی یک اثر تخریب مطلوب روی سموم مختلف غذایی نشان می‌دهد. راندمان تخریب تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند گونه، محتوای آب، حالت و دُز پرتودهی قرار گرفت. به طور کلی، دُز پرتودهی بالا منجر به اثر تخریب بهتر می شود و مواد غذایی با رطوبت بالا می‌توانند تحت همان دُز پرتودهی اثرات بهتری داشته باشند. ترکیب پرتودهی با سایر تیمارها یک استراتژی بسیار موثر برای کاهش دُز مورد نیاز پرتودهی است، به ویژه زمانی که پرتودهی با دُز بالا مستعد ایجاد عوارض جانبی بیولوژیکی است. اثرات مهاری جداگانه و ترکیبی اسانس *Cananga odorata* (COED) و پرتودهی را بر رشد *Fusarium oxysporum* و تولید دئوکسی نیوالنول (DON) و ZEA در دانه‌های ذرت بررسی کرد. مشخص شد که COED و پرتودهی مجزا رشد قارچ و تشکیل مایکوتوکسین را به ترتیب در ۳/۹mg/g و ۷/۵kGy مهار می‌کنند و اثر وابسته به دُز دارند. تیمار ترکیبی COED و پرتودهی اثر بازدارندگی بسیار قوی‌تری نسبت به تیمارهای مجزا داشت و بهترین نتایج در غلظت ۲/۵ mg/g COED و دُز ۴ kGy پرتودهی مشاهده شد، که نشان می‌دهد تیمار ترکیبی پرتودهی و سایر روش‌های ضدعفونی عالی است و برای بهبود راندمان تخریب و تضمین ایمنی مواد غذایی اهمیت دارد [۴۴].

۱۰-۲-آفت‌کُش‌ها و داروهای دامپزشکی

آفت‌کُش‌ها (حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها، بازدارنده‌های رشد و غیره) و داروهای دامپزشکی (آنتی‌بیوتیک‌ها و غیره)، به‌طور گسترده در تولیدات کشاورزی و دامپروری مورد استفاده قرار می‌گیرند و به دلیل تهدیدهای بالقوه برای محیط‌زیست و سلامت انسان مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. به عنوان یک فناوری ضد آلودگی با کارایی بالا، پرتودهی در تخریب انواع آفت‌کُش‌ها و بقایای داروهای دامپزشکی استفاده شده است. به طور کلی، رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر (e-aq، •OH، •H، و غیره) تولید شده توسط پرتودهی می‌توانند روی آفت‌کُش‌ها و مولکول‌های داروی دامپزشکی اثر کنند و باعث ایجاد یک سری واکنش‌ها مانند اکسیداسیون، کاهش یا هیدرولیز شوند و ساختار مولکولی را از بین ببرند و در نهایت منجر به تخریب آفت‌کُش‌ها و داروهای دامپزشکی می‌شود. پرتودهی تجزیه‌پذیری آلاینده‌ها را بهبود بخشید و چشم‌انداز کاربرد گسترده‌ای در حذف یا کاهش بقایای آفت‌کُش‌ها و داروهای دامپزشکی در ماتریس‌های غذایی داشت. ارگانوفسفر و کاربامات‌ها حشره‌کش‌های بسیار سمی هستند که معمولاً در تولیدات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که می‌توانند فعالیت استیل کولین استراز را در بدن انسان مهار کنند و باعث سمیت عصبی شوند. این آفت‌کُش‌ها به راحتی در میوه‌ها، سبزیجات و محیط‌زیست نگهداری می‌شوند و خطرات بالقوه‌ای برای سلامت انسان به همراه دارند. ثابت شده است که پرتودهی یک استراتژی موثر برای حذف این بقایا از بسترهای مختلف است [۳۰]. تخریب چهار آفت‌کُش ارگانوفسفره (کلرفن وینفوس، دیازینون، دی‌متوات و پروفنوفوس) در آب‌های یون‌زدایی‌شده ، شیر و آب‌های زیرزمینی با استفاده از پرتودهی با پرتوهای گاما در دُزهای مختلف بررسی شد. مشخص شد که پرتودهی گاما می‌تواند تمام آفت‌کُش‌های ارگانوفسفره را در غلظت‌های کم ۰/۵ µg/ml و ۱ µg/ml به طور کامل حذف کند. با این حال، در غلظت بالا (۵ µg/ml میکروگرم در میلی‌لیتر)، به دلیل عملکرد ترکیبی کل مواد جامد محلول، پرتودهی گاما تنها می‌تواند آفت‌کُش‌ها را در آب یونیزه حذف کند و راندمان تخریب آفت‌کُش‌ها در آب لوله‌کشی و آب زیرزمینی کافی نیست [۴۵]. اثر پرتودهی گاما بر حذف دیازینون، فسفامیدون و فسفامید در نمونه‌های بادمجان را ارزیابی کردند. سطح آفت‌کُش‌ها با افزایش دُز پرتودهی کاهش یافت. در دُز ۰/۵ kGy ، نرخ تخریب دیازینون، کلرپیریفوس، و فسفامید از ٪ ۳۰ تا ٪۴۵ بود. با افزایش دُزهای پرتودهی به ۱ kGy ، میزان تخریب سه آفت‌کُش به ٪۸۰ تا ٪۹۵ رسید [۴۶]. راندمان تخریب پروفنوفوس با افزایش دُز باریکه الکترون (۴/۶ kGy، ۱۲، ۳۲) به طور مداوم بهبود می‌یابد و توانایی تجزیه پروفنوفوس در محلول آبی به طور قابل توجهی بیشتر از سبزیجات است. آفت‌کُش‌های تری آزول در محیط نیز یک تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم هستند [۴۷]. تخریب دو آفت‌کُش تری آزول (مایکلوبوتانیل و پنکونازول) را در محلول آبی توسط پرتودهی گاما بررسی شد. نتایج نشان داد که فرایندهای تخریب دو آفت‌کُش از مدل سینتیکی شبه مرتبه اول در دُزهای پرتودهی ۵۷۵ Gy و ۴۶۰ Gy پیروی می‌کند و نرخ تخریب هر دو بالای ٪۹۰ بود. اکثر محصولات تخریب محصولات هیدروکسیله بودند، و مطالعات سمیت موش هیچ افزایشی در سمیت نشان نداد که نشان می‌دهد پرتودهی γ روشی جایگزین برای حذف آفت‌کُش‌های تری آزول در آب آلوده است. تجزیه پرتویی علف‌کُش کم سمیت کویزالوفوپ-p اتیل (QPE) تحت دُز ۰/۵-۳ کیلوگری پرتودهی γ ارزیابی شد. نرخ حذف QPE به ترتیب ٪۹۸/۵ و ٪۷۳ با حضور اکسیژن و بدون حضور اکسیژن محلول بود. غلظت QEP با افزایش دُز پرتودهی به تدریج کاهش یافت و پس از پرتودهی ۳ کیلوگری به طور کامل تجزیه شد. از طریق شناسایی محصولات جانبی، مشخص شد که رادیکال‌های OH تولید شده توسط رادیولیز آب منجر به تخریب QPE می‌شوند. بنابراین، حذف این آفت‌کُش از آب و محیط زیست توسط پرتودهی γ امکان‌پذیر است. آنتی‌بیوتیک‌های دامپزشکی برای کنترل بیماری‌های دام، بهبود سرعت رشد حیوانات و راندمان تولید دام استفاده می شود. استفاده بیش از حد از آنتی‌بیوتیک‌ها می‌تواند منجر به افزایش مقاومت میکروارگانیسم‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها شود و همچنین باعث ایجاد اثرات منفی مانند واکنش‌های آلرژیک در انسان شود. پرتودهی با پرتوهای یون‌ساز پتانسیل زیادی به عنوان یک فرایند جایگزین برای تیمار غذاهای حاوی باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک دارد [۳۰].

استفاده از پرتودهی باریکه الکترون در تصفیه پساب برای از بین بردن آلاینده‌ها بررسی شد. محلول‌های استاندارد اکسی تتراسایکلین، انروفلوکساسین، اریترومایسین و سولفامتوکسازول (در غلظت‌های ppm ۱۰-۱۰۰) با دُزهای ۱۰-۵۰ کیلوگری پرتودهی شدند. افزایش دُز پرتودهی و غلظت آنتی‌بیوتیک به ترتیب باعث افزایش و کاهش راندمان تخریب شد. اکثر نمونه-های استاندارد آنتی‌بیوتیک، پرتودهی شده با دُز ۲۵kGy، راندمان تخریب بیش از ٪۹۰ را نشان دادند. اریترومایسین و انروفلوکساسین به‌عنوان دو مورد از آنتی‌بیوتیک‌های هدف، در پساب دارویی واقعی، شناسایی شدند و پس از پرتودهی با دُز ۲۵kGy به ترتیب راندمان تخریب ٪۱۰۰ و ٪۹۰ ، را نشان دادند. محصولات جانبی یافت‌شده توسط LC/MS در

نمونه‌های پرتودهی شده دارای سمیت قابل قبولی بودند. بنابراین، پرتودهی باریکه الکترون روشی کارآمد برای حذف آنتی‌بیوتیک‌ها از پساب دارویی است [۴۸].

فرایند تخریب پرتودهی آنتی‌بیوتیک سولفامتوکسازول (SMZ) را در محلول آبی مورد مطالعه قرار داد. مشخص شد که سرعت تخریب SMZ زمانی که غلظت اولیه ۲۶/۴ mg/l و دُز پرتودهی ۱/۱ kGy بود به ٪۹۹ رسید. فرایند تخریب SMZ از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند و می‌تواند با ٪۰/۳ H_2O_2 افزایش یابد در حالی که توسط CH3OH، ٪۰/۹ H_2O_2 و thiourea مهار می‌شود. شرایط اسیدی برای تخریب SMZ نسبت به محیط‌های خنثی یا قلیایی مساعدتر بود. ویژگی‌های تخریب آنتی‌بیوتیک‌های رایج (آموکسی‌سیلین، داکسی سایکلین، سیپروفلوکساسین) را از طریق پرتودهی، از جمله سینتیک، فعالیت ضد باکتریایی، و کاربرد عملی در ماتریس‌های غذایی، ارزیابی کردند. تخریب تمام اهداف آزمایش‌شده در محلول آبی، با نرخ حذف حداقل ٪۹۰ در دُز ۷ kGy از سینتیک شبه مرتبه اول پیروی کرد. آنتی‌بیوتیک‌های موجود در ماتریس‌های پیچیده مانند شیر، مرغ و تخم‌مرغ نیز می‌توانند به طور موثر حذف شوند، که چشم‌انداز کاربرد بسیار خوبی دارد. آنتی‌بیوتیک‌های β-لاکتام به دسته‌ای از آنتی‌بیوتیک‌ها اطلاق می‌شود که دارای حلقه بتالاکتام در ساختار شیمیایی خود هستند که دارای فعالیت باکتری‌کُش قوی و طیف وسیعی از نشانه‌ها هستند. این نوع آنتی‌بیوتیک اثرات بالینی بسیار خوبی دارد و به راحتی باکتری‌ها را برای ایجاد ویژگی‌های مقاومت تحریک می‌کند. فناوری پرتودهی برای تخریب آنتی‌بیوتیک β-لاکتام با طیف وسیع و از بین بردن فعالیت ضد میکروبی کارآمد بود. چن و همکاران دریافتند که پرتودهی γ می‌تواند به طور موثری آنتی‌بیوتیک β-لاکتام سفالوسپورین (CEP-C) C را تخریب کند و سرعت تخریب ارتباط نزدیکی با غلظت اولیه و مقدار pH محیط دارد. تخریب CEP-C به وضوح در حضور الکل tert-Butanol (t-BuOH) مهار شد، نشان می‌دهد که رادیکال $^{\bullet}OH$ عمدتا مسئول تخریب CEP-C بود. از طریق توصیف محصولات جانبی، نشان داده شد که موقعیت فعال CEP-C توسط پرتودهی از بین رفته است. مطالعه چو و همکاران، کشف کردند که وقتی پنی‌سیلین G در آب تصفیه شده پرتودهی می‌شود، ترکیباتی از جمله پنی‌سیلیک اسید وتیازولیدین به دلیل برش حلقه‌های β-لاکتام تولید می‌شود. بعلاوه، Fe^{2+} به طور قابل توجهی تخریب آنتی‌بیوتیک‌های پنی‌سیلین G ناشی از پرتو یون‌ساز در غذاهای قندی را افزایش می‌دهد، که رویکرد ارزشمندی برای تجزیه موثر آنتی‌بیوتیک‌های β-لاکتام از طریق پرتودهی فراهم می‌کند [۳۰].

۱۰-۳- آلرژن‌های غذایی

آلرژن‌های غذایی به برخی پروتئین‌های خاص در غذا اطلاق می‌شوند که می‌توانند پس از هضم توسط بدن انسان باعث پاسخ‌های ایمنی غیرطبیعی، آسیب بافتی یا اختلال در عملکرد اندام شوند که به آن «آلرژی غذایی» می‌گویند. با توسعه روش‌های فراوری مواد غذایی و ظهور مواد غذایی با منابع جدید، تنوع غذاهایی که می‌توانند باعث آلرژی شوند در حال افزایش است که منجر به افزایش چشمگیر تعداد افراد مبتلا به آلرژی غذایی در سال‌های اخیر شده است. از نظر آماری، ٪۹۰ از واکنش‌های آلرژیک توسط هشت غذای آلرژن اصلی، شامل بادام‌زمینی، آجیل درختی، شیر، صدف، سویا، تخم‌مرغ، گندم و ماهی ایجاد می‌شود. حذف یا کاهش آلرژن‌های غذایی و تولید غذاهای ضد حساسیت همیشه موضوع مهمی در تحقیقات مواد غذایی بوده است. پرتودهی مواد غذایی می‌تواند حساسیت‌زایی غذا را با القای تجمع یا تخریب پروتئین، تخریب اپی‌توپ و غیره کاهش دهد و فناوری امیدوارکننده برای تولید غذاهای با کیفیت بالا و آلرژنی کم است. در اوایل دهه ۱۹۶۰، مشخص شد که پرتودهی باریکه الکترون می‌تواند حساسیت‌زایی شیر را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. تا به حال، فناوری پرتودهی به طور گسترده برای از بین بردن انواع آلرژن‌های غذایی و تولید غذاهای کم آلرژیک استفاده شده است. سویا منبع مهمی از کنجاله پروتئینی است، اما تخمین زده شده است که ٪۰/۵ از جمعیت عمومی به دانه‌های سویا حساسیت دارند. سویا حاوی حداقل ۳۰ ماده حساسیت‌زا است که Gly m5 و Gly m6 مهم‌ترین آنها در نظر گرفته شده است. موریاما و همکاران دریافت که وقتی دُز پرتودهی کمتر از ۳۰ kGy باشد، محتوای β-کنگلیسینین، Gly m Bd 30 K، مهارکننده تریپسین سویا و Gly m 4 تقریباً تغییر نکردند. با این حال، مطالعه Mallikarjunan و همکاران تایید کرد که دُز پرتودهی ۱۰ kGy می‌تواند ساختار و عملکرد مهارکننده‌های تریپسین سویا را در محلول آبی به طور کامل از بین ببرد. در شرایط رطوبت ٪۵۰ و شرایط خشک، از دست دادن خواص عملکردی و ساختاری تنها در دُزهای بالا (۳۰ kGy و ۱۰۰) مشاهده شد، که به این معنی است که کاهش حساسیت‌زایی دانه‌های سویا در دُزهای پرتودهی ایمن (≥ ۱۰ kGy) دشوار است. علاوه بر سویا، گندم نیز یک آلرژن مهم است که بر ٪۰/۴ تا ٪۱ از کودکان در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. آلرژی‌زایی گندم ارتباط نزدیکی با گلیادین گندم و لکتین جوانه گندم دارد. گزارش شده است که فعالیت و آنتی‌ژنی اپی‌توپ‌های آلرژی‌زا آگلوتینین جوانه گندم پس از پرتودهی با دُز بالا کاهش یافته است که ناشی از تخریب و اتصال عرضی پروتئین است. با این حال، Leszczynska و همکاران

دریافتند که حساسیت‌زایی گلیادین گندم با افزایش دُز پرتودهی گاما (۲/۲ kGy – ۱۲/۸کیلوگری) افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد پرتودهی اثرات متفاوتی بر آلرژن‌های مختلف در گندم دارد. علاوه بر این، رنگ‌پذیری گلیادین گندم استخراج‌شده از آرد گندم پرتودهی‌شده بالاتر از گلیادین گندم خالص پرتودهی شده در همان دُز بود، که نشان می‌دهد سایر اجزای موجود در آرد گندم ممکن است بر حساسیت‌زدایی گلوتن گندم تحت پرتودهی تأثیر بگذارند. پرتودهی همراه با سایر روش‌های فراوری تأثیر قابل توجهی در حذف حساسیت پروتئینی دارد. کاسرا و همکاران پرتودهی با پرتوهای گاما γ به تنهایی (۲۵ kGy) هیچ تغییری در حساسیت‌زایی پروتئین‌های محلول و نامحلول در دانه‌های بادام‌زمینی ایجاد نکرد. با این حال، با جوشاندن نمونه‌ها در دمای ^{o}C ۱۲۱ به مدت min ۱۵ قبل از پرتودهی، غلظت و حساسیت‌زایی پروتئین آلرژیک به طور قابل توجهی کاهش یافت. یانگ و همکاران دریافتند که هم پرتودهی و هم تیمار فراصوت می‌توانند آلرژی‌زایی β-لاکتوگلوبولین گاوی (آلرژن اصلی شیر) را با تغییر ساختار ثانویه کاهش دهند و بیشترین کاهش در پرتودهی ناشی از پرتودهی قبل از تیمار فراصوت را داشته باشند. تحت دُز معینی از پرتودهی با پرتوهای گاما- (۱kGy-۲۰)، آلبومین سرم خوک (PSA، آلرژن اصلی در گوشت خوک) تغییر قابل توجهی نداشت. هنگامی که قبلاً با پپسین و تریپسین تیمار شد، غلظت PSA با افزایش دُز پرتودهی کاهش یافت. این نتایج نشان داد که ترکیب پرتودهی با فراوری کمکی ممکن است، روندی برای تولید غذاهای با کیفیت بالا و کم حساسیت باشد [۳۰].

۱۱- نتیجه‌گیری کلی

در اثر پرتودهی در دزهای کمتر از ۱۰ kGy، مواد غذایی خطرناک نمی‌شوند. دز سطوح پرتودهی مجاز در مواد غذایی، مقادیر ویتامین تیامین کمی کاهش می‌یابد، اما به اندازه کافی برای نقص کمبود ویتامین نیست. با پرتودهی مواد غذایی، تغییرات قابل توجهی در اسید آمینه، اسید چرب و ویتامین آن‌ها ایجاد نمی‌شود. در حقیقت، تغییرات ناشی از پرتودهی آن قدر کم است، که به‌آسانی قابل مشخص نیست که مواد غذایی پرتودهی شدند. مزیت بزرگ مواد غذایی پرتودهی شده این است که این یک فرایند غیرحرارتی و سرد است و غذا هنوز هم اساسا "خام" است. پرتودهی معادل پاستوریزاسیون برای غذاهای جامد است و ابزاری مهم در جنگ علیه بیماری و مرگ حاصل از بیماری‌های غذایی و موجب بهبود بهداشت مواد غذایی باشد. پرتودهی توسط پرتوهای گاما، ایکس و الکترون‌های شتاب‌دار تحت شرایط کنترل شده، مواد پرتوزا در مواد غذایی ایجاد نمی‌کند. نه پرتودهی و نه سایر تیمارهای مواد غذایی دیگر نمی‌تواند مواد غذایی فاسد را، قابل مصرف سازد. اگر غذا، ظاهر، بو، طعم یا هرگونه علایم فساد داشته باشد، نمی‌توان آن را با هیچ تیماری از جمله پرتودهی اصلاح کرد. در حال حاضر با روندی رو به رشد، سالانه، بیش از نیم میلیون تن از ۴۰ نوع ماده غذایی (معادل یک درصد از مواد غذایی مصرف شده سالانه) در سراسر جهان در بیش از ۴۰ کشور، با هدف حصول امنیت و ایمنی غذایی، پرتودهی می‌شود.

۱۲- مراجع

[۱] دانش‌پژوه، م، حاجی عبدالرحیم خباز، ن، کاربرد پرتودهی در صنایع غذایی، مجله نخبگان علوم و مهندسی، دوره ۵(۴)، صص۱۲۳-۱۲۷، ۱۳۹۹.

[۲] رفیعی، س ر، غلامی، ی، افتخاری‌زاده، ا، افزایش ایمنی و ماندگاری مواد غذایی با استفاده از پرتودهی گاما، کنفرانس دستاوردهای نوین در صنایع غذایی و تغذیه سالم، ۱۳۹۵.

[۳] اخوان، ح ر، برنجی اردستانی، س، فاضل نجف آبادی، م، اثر پرتودهی گاما بر ماندگاری و ویژگی‌های کیفی میوه زرشک تازه، مجله علوم و فنون هسته ای، دوره۷۳، صص ۸۱-۸۶، ۱۳۹۶.

[4] S. Esmaeili, M. Barzegar, M. A. Sahari, and S. Berenji Ardestani, "Effect of gamma irradiation under various atmospheres of packaging on the microbial and physicochemical properties of turmeric powder," Radiation Physics and Chemistry, vol.148, pp. 60-67, 2018.

[۵] بی‌نام. روزنامه دنیای اقتصاد، خبر شماره ۴۱۰۴۳۴۲، ۱۴۰۳.

[6] G. Pathak. "Global Food Production Loss Or Waste Is Over 30 Per Cent", IPA service, 2025.

[7] Th. Ohlsson, N. Bengtsson, "Minimal processing technologies in the food industry", Crc press, 2002.

[۸] برنجی اردستانی، س، احمدی‌روشن، م، اثرات پرتوفراوری گاما بر ویژگی‌های میکروبی و حسی-چشایی شوید و مرزه تازه، فصلنامه فناوری‌های جدید در صنعت غذا، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، دوره ۹(۱)، صص ۱۳-۲۶، ۱۴۰۰.

[۹] احمدی‌روشن، م، شیخ نصیری، س، جمالی، س س، سرابی،م، برنجی اردستانی، س، اثرات پرتوفراوری گاما بر ویژگی‌های میکروبی و حسی-چشایی تره و جعفری تازه، مجله علوم و فنون هسته‌ای، دوره ۹۸(۴)، صص ۱۱۰-۱۱۹، ۱۴۰۰.

[10] DAE. Ehlermann, "Four decades in food irradiation (Editorial), " Radiation physics and chemistry, vol.73, pp. 346-347, 2005.

[11] A.K., Kilonzo-Nthenge, "Gamma Irradiation for Fresh Produce, " Gamma Radiation, 2012 - intechopen.com, 2012.

[۱۲] فاطمی، ف، خلفی، ح، قنادی مراغه م. پرتودهی مواد غذایی: اصول و کاربردها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۳۸۶.

[13] Z. Berk, "Food process engineering and technology, " 1th edn. Oxford, UK. 603 p, 2009.

[۱۴] مصباحی، غ، اثر پرتودهی بر مواد بسته‌بندی محصولات غذایی. مجموعه مقالات چهارمین همایش ملی کاربرد فناوری هسته‌ای در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، صص ۶۵۶-۶۴۷، ۱۳۹۴

[۱۵] قورچی، ح، برزگر، م، سحری، م، عباسی، س، اثر پرتو گاما بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی، ترکیب‌های فراسودمند و خاصیت ضداکسایشی آب انار، مجله علوم و فنون هسته‌ای، دوره ۶۵، صص ۷۵-۶۵، ۱۳۹۲.

[16] B. F. Ozen, J. D. Floros, "Effects of emerging food processing techniques on the packaging materials, " Trends in food science & technology, vol.12 (2), pp. 60-67, 2001.

[۱۷] اهری مصطفوی، ح.، میرمجلسی، م.، میرجلیلی، م.، فتح اللهی، م.، منصوری پور، م.، و بابایی، م. تأثیر پرتو گاما بر جوانه‌زنی هاگ و رشد ریسه‌ای پنی‌سیلیم اکپانسیم

عامل بیماری پس از برداشت میوه سیب. مجله علوم و فنون هسته‌ای سازمان انـرژی اتمی ایران، دوره ۵۸، صص ۴۹-۵۴، ۱۳۹۰.

[18] C.H. Sommers, X. Fan, "Food Irradiation Research and Technology, " Blackwell Publishing, Ames, 472 p, 2006.

[19] S. Ioannis, "Irradiation of Food Commodities: Techniques, Applicatons, Detection, Legislation, Safty and Consumer opinion, " Academic Press publications, Elsevier, 2010.

[۲۰] رزداری، م، آ. رئیسی، م، ابراهیمی، ر، کیانی، ح، علـم پرتـودهی و تـأثیر آن در افزایش ماندگاری مواد غذایی، بیست و یکمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۲.

[21] V. Guillard, M. Mauricio-Iglesias, N.Gontard, "Effect of novel food processing methods on packaging: structure, Composition, and migration properties, " Critical reviews in food science and nutrition, vol.5-0(10), pp. 969-88, 2010.

[22] SN. Mahindru, "Food preservation and irradiation, " New Delhi, 2005.

[23] S. Brewer, "Irradiation effects on meat color, " Meat Science, vol.68, pp. 1–17, 2004.

[24] MS. Brewer, "Irradiation effects on meat flavor, " Meat Science, vol.81, pp. 1–14, 2009.

[25] KM. Morehouse, V. Komolprasert, "Irradiation of food and packaging: an overview, " ACS Publications, 2004.

[۲۶] صداقت، ن. تکنولوژی بسته‌بندی مواد غذایی. چـاپ اول، انتشـارات مـرز دانـش، مشـهد - خراسان رضوی، ۳۶۸ صفحه، ۱۳۸۵.

[27] AG. Chmielewski, inis.iaea.org, 2006.

[28] V. Komolprasert, "Packaging food for radiation processing, " Radiation Physics and Chemistry, vol.129, pp. 35-38, 2016.

[29] C F R. Ferreira, A L. Antonio, S Cabo Verde, "Food Irradiation Technologies: Concepts, Applications and Outcomes, " Chapter 8, Packaging for Food Irradiation, By Majid Jamshidian, Monique Lacroix, 2017.

[30] Z. Jiang, Z. Yang, Y. He, Sh. Wu, J. Li, Y.Ye, G.Jiang, L. Li, H. Li, Sh. Lu, T. Liu, F. Qiu, T. Tan, Zh. Wang, Sh. Zhang, , "Research on the degradation process of penicillin G after electron beam irradiation, " Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 334, pp. 679-688, 2025.

[31] U.S. Food and Drug Administration, Title 21 – Food and Drugs, Part 179, Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food. Code of Federal Regulations. Retrieved from https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-179, 2023.

[32] M. W. S, Cordeiro, D. M. M. Mouro, I. D. Dos Santos, , R. Wagner, , "Effect of Gamma Irradiation on the Quality Characteristics of Frozen Yacare Caiman (*Caiman Crocodilus* Yacare) Meat, " Meat Science, vol.185, pp. 10872, 2022.

[33] C. L. Li, L. C. He, G. F. Jin, S. M. Ma, W. MWu, L. Gai, "Effect of Different Irradiation Dose Treatment on the Lipid Oxidation, Instrumental Color and Volatiles of Fresh Pork and Their Changes During Storage, " Meat Science, vol.128, pp. 68–76, 2017, DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.02.009.

[34] M.Taghvaei, B.Tonyali, C.Sommers, O.Ceric,Z. Y.Linghu, J. S.Smith, U.Yucel, "Formation Kinetics of Radiolytic Lipid Products in Model Food-Lipid Systems with Gamma Irradiation, " Journal of the American Oil Chemists, vol.98 (7), pp. 737–746, 2021, DOI: 10.1002/aocs.12513.

[35] T.Kume, N.Nagasawa, F.Yoshii, "Utilization of Carbohydrates by Radiation Processing, " Radiation Physics and Chemistry, vol.63(3–6), pp. 625–627, 2002, DOI: 10.1016/s0969-806x(01)00558-8.

[36] A. A.Aly, R. W.Maraei, M. M.Abd-Allah, G.Safwat, "Evaluation of Physical, Biochemical Properties and Cell Viability of Gamma Irradiated Honey, " Journal of Food Measurement and Characterization, vol.15(5), pp. 4794–4804, 2021.

[37] R. W.Maraei, K. M. Elsawy, "Chemical Quality and Nutrient Composition of Strawberry Fruits Treated by Gamma-Irradiation, " Journal of Radiation Research and Applied Sciences., vol. 10(1), pp. 80–87.

[38] R.Khalili, N.Ayoobian, M.Jafarpour, B.Shirani, "The Effect of Gamma Irradiation on the Properties of Cucumber, " Journal of Food Science and Technology-mysore, vol.54(13), pp. 4277–4283, 2017

[39] M.Makari, M.Hojjati, S.Shahbazi, H.Askari, "Effect of Co-60 Gamma Irradiation on Aspergillus Flavus, Aflatoxin B-1 and Qualitative Characteristics of Pistachio Nuts (*Pistacia Vera* L.), " Journal of Food Measurement and Characterization, 15(6), 5256–5265, 2021, DOI: 10.1007/s11694-021-01060-z.

[40] F.Wang, F.Xie, X. F.Xue, Z. D.Wang, B.Fan, Y. M.Ha, "Structure Elucidation and Toxicity Analyses of the Radiolytic Products of Aflatoxin B-1 in Methanol-Water Solution, " Journal of Hazardous Materials, vol.192(3), pp. 1192–1202, 2011, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.06.027.

[41] Khalil, O. A. A.; Hammad, A. A.; Sebaei, A. S. (2021). Aspergillus Flavus and Aspergillus Ochraceus Inhibition and Reduction of Aflatoxins and Ochratoxin a in Maize by Irradiation. Toxicology, 198, 111–120. DOI: 10.1016/j. toxicon.2021.04.029.

[42] T.Calado, M. L.Fernandez-Cruz, S. C.Verde, A.Venancio, L.Abrunhosa, "Gamma Irradiation Effects on Ochratoxin A: Degradation, Cytotoxicity and Application in Food, " Food Chemistry, vol. 240, pp. 463–471, 2018, DOI: 10. 1016/j.foodchem.2017.07.136.

[43] T. Calado, L. Abrunhosa, S. C. Verde, L. Alte, A. Venancio, M. L. Fernandez-Cruz, "Effect of Gamma Radiation on Zearalenone-Degradation, Cytotoxicity and Estrogenicity," Foods, vol. 9(11), pp. 1687, 2020.

[44] N. K, V. Kalagatur, J. R. Mudili, Kamasani, C. Siddaiah, "Discrete and Combined Effects of Ylang-Ylang (*Cananga Odorata*) Essential Oil and Gamma Irradiation on Growth and Mycotoxins Production by Fusarium Graminearum in Maize, " Food Control, vol. 94, pp. 276-283, 2018, DOI:10.1016/j.foodcont.2018.07.030.

[45] T. Khedr, A. A. Hammad, A. M. Elmarsafy, E. Halawa, M. Soliman, "Degradation of Some Organophosphorus Pesticides in Aqueous Solution by Gamma Irradiation, " Journal of Hazardous Materials, vol. 373, pp. 23–28, 2019.

[46] M. A. Z. Chowdhury, I. Jahan, N. Karim, M. K. Alam, M. A. Rahman, M. Moniruzzaman, S. H. Gan, A. M, Fakhruddin, "Determination of Carbamate and Organophosphorus Pesticides in Vegetable Samples and the Efficiency of Gamma-Radiation in Their Removal, " BioMed Research International, 145159, 2014.

[47] F. T. Rodrigues, E. Marchioni, S. Lordel-Madeleine, F. Kuntz, A. Villavicencio, D. Julien-David, "Degradation of Profenofos in Aqueous Solution and in Vegetable Sample by Electron Beam Radiation, " Radiation Physics and Chemistry, vol. 166, pp. 108441, 2020, DOI:10.1016/j.radphyschem.2019.108441.

[48] S. Berenji Ardestani, A. Akhavan, H. Kazeminejad, M. Ahmadi-Roshan, A. Roozbahani, "Ionizing radiation effect on the removing of antibiotic pollutants from pharmaceutical wastewater: Identification of radio-degradation products, " Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2024.