

بررسی پرتوتابی با اشعه گاما بر عمر پس از برداشت محصولات کشاورزی

صفورا سعادت^{۱*} و اعظم برزویی

پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۱. مقدمه

هرساله مقادیر زیادی از محصولات کشاورزی در مراحل پس از برداشت و بسته‌بندی و تا قبل از مصرف، دچار آسیب می‌شوند. عوامل بیماری‌زای گیاهی و عوامل میکروبی با تخریب و فساد محصولات کشاورزی سبب افت کمی و کیفی آن‌ها می‌شوند. اکثر میوه‌ها و سبزی‌ها به علت دارا بودن آب فراوان، فسادپذیر بوده و پس از برداشت یا باید سریع به مصرف برسند و یا اینکه باید با روش‌های خاصی نگهداری شوند. کوتاهی در ایجاد شرایط بهینه نگهداری این محصولات منجر به بروز ضایعات بسیاری در محصول و ضرر اقتصادی زیادی خواهد شد. بسته‌بندی، نگهداری و حمل و نقل در حد استانداردهای بین‌المللی امکان صادرات محصول را به کشورهای دیگر افزایش داده و درآمد ارزی کشور را بالا می‌برد. با توجه به اینکه کشور ما از مناطق مهم تولید محصولات باغبانی به‌شمار می‌رود؛ بنابراین برای حفظ کیفیت محصول و کاهش ضایعات پس از برداشت و فراهم آوردن امکان صادرات محصول به کشورهای دیگر، رعایت استانداردهای بین‌المللی در زمینه فن‌آوری پس از برداشت ضروری است. ضایعات محصولات کشاورزی خسارت بزرگی برای منابع غذایی در جهان به‌شمار می‌آید و آشنایی با فیزیولوژی پس از برداشت، این امکان را فراهم می‌سازد تا از ضایعات محصولات باغی کاسته شود [۱]. امروزه کاهش ضایعات پس از برداشت محصولات کشاورزی با هدف افزایش امنیت غذایی و جلوگیری از هدررفت سرمایه، یکی از چالش‌های اساسی پیش روی جوامع است. طی سالیان نسبتاً طولانی استفاده از روش‌های شیمیایی مخصوصاً ترکیبات تدخینی نظیر متیل‌پروماید به‌عنوان مناسب‌ترین روش انبارداری و قرنطینه محصولات کشاورزی مطرح بود، اما بررسی‌های دهه‌های اخیر نشان داد که کاربرد مواد شیمیایی علاوه بر خطرات زیست‌محیطی موجب ایجاد بیماری‌های متعدد در مصرف‌کنندگان به‌دلیل انتقال باقیمانده سم به بدن آن‌ها خواهد شد. بنابراین؛ جهت‌گیری مدیریت روش‌های نگهداری محصولات غذایی به سمت کاهش و حذف مواد شیمیایی و تعیین جایگزین‌های مناسب حرکت کرده است، به‌نحوی که برای حذف تعدادی از مهمترین سموم تدخینی، محدوده زمانی معینی مقرر شد [۲،۳]. کاربرد پرتوهای یونیزه‌کننده به‌عنوان روشی جدید در راستای حفظ و نگهداری محصولات کشاورزی مطرح شده است [۴].

۲. تاریخچه پرتودهی محصولات کشاورزی

پرتودهی مواد غذایی پدیده‌ای است که پژوهش‌های بسیاری درباره آن صورت گرفته است و نسبت به برخی فرآیندهای جدید و نوآوری‌ها در زمینه نگهداری مواد غذایی بیشتر مورد بحث قرار گرفته است. در دنیا به‌طور گسترده‌ای از اشعه جهت استریل کردن تجهیزات پزشکی استفاده می‌شود. کشف اشعه X توسط رونتگن (Roentgen) در سال ۱۸۹۵ و کشف مواد پرتوزا توسط بکورل (Becquerel) یک سال بعد از آن، پژوهشگران را به‌سوی مطالعات وسیع و جدی در خصوص اثرات بیولوژیکی اشعه‌های یونیزه هدایت کرد. ابتدا اجازه استفاده از

چکیده: هرساله مقادیر زیادی از محصولات کشاورزی در مراحل پس از برداشت از لحاظ کمی و کیفی دچار آسیب می‌شوند. عوامل بیماری‌زای گیاهی و عوامل میکروبی با ایجاد تخریب و فساد در مرحله پس از برداشت محصولات کشاورزی، سبب افت کمی و کیفی آن‌ها می‌شوند. طی سالیان نسبتاً طولانی استفاده از روش‌های شیمیایی مخصوصاً ترکیبات تدخینی نظیر متیل‌پروماید به‌عنوان مناسب‌ترین روش انبارداری و قرنطینه محصولات کشاورزی مطرح بود، اما بررسی‌ها نشان داد که کاربرد مواد شیمیایی علاوه بر خطرات زیست‌محیطی موجب بروز بیماری‌های مختلف در مصرف‌کنندگان به‌دلیل انتقال باقیمانده سم به بدن آن‌ها خواهد شد. بنابراین، جهت‌گیری مدیریت روش‌های نگهداری محصولات غذایی به سمت کاهش و حذف مواد شیمیایی و تعیین جایگزین‌های مناسب حرکت کرده است. کاربرد پرتوهای یونیزه‌کننده (گاما، ایکس و الکترون) به‌عنوان روشی جدید در راستای حفظ و نگهداری محصولات کشاورزی مطرح است. پرتودهی با اشعه گاما با دوز مناسب با حفظ ارزش غذایی محصول و جلوگیری از رشد قارچ‌ها و عوامل بیماری‌زا سبب حفظ بازارپسندی و افزایش عمر پس از برداشت آن‌ها می‌شود.

کلید واژه‌ها: اشعه گاما، پرتودهی، پس از برداشت، کیفیت.

Study of gamma radiation on postharvest life of agricultural crops

Abstract: Every year, large quantities of agricultural products are damaged quantitatively and qualitatively in the post-harvest stages. Plant pathogens and microbial agents cause quantitative and qualitative decline by causing destruction and spoilage in the post-harvest stage of agricultural products. For relatively long years, the use of chemical methods, especially smoking compounds such as methyl bromide, has been considered as the most appropriate method of storage and quarantine of agricultural products, but studies have shown that the use of chemicals in addition to environmental hazards cause diseases Different in consumers due to the transfer of residual toxins to their body. Therefore, the management orientation of food preservation methods has moved towards reducing and eliminating chemicals and determining appropriate alternatives. The use of ionizing beams (gamma, x, and electron) is a new method for preserving agricultural products. Gamma-ray irradiation at the appropriate dose maintains the nutritional value of the product and prevents the growth of fungi and pathogens, maintaining marketability and increasing their post-harvest life

Keywords: Gamma rays, Irradiation, Postharvest, Quality.

غلات، کاهش میکروارگانیسم‌های عامل فساد، تأخیر در رسیدن میوه‌ها، بهبود خصوصیات حسی مواد غذایی و تخریب یا کاهش میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای غیرقابل اجتناب اشاره کرد [۶].

در پژوهشی پرتودهی میوه‌های گریپ‌فروت با پرتو گاما در دوزهای ۰/۳۰، ۰/۱۵ و صفر کیلوگری تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان مواد جامد محلول کل ایجاد نکرد. با این وجود، میزان اسید در طی نگهداری کاهش یافت. میوه‌هایی که با دوز ۰/۳ کیلوگری پرتودهی شدند در مقایسه با شاهد میزان اسید بالایی داشتند. علاوه بر این، پرتودهی با دوز پایین ۰/۳ کیلوگری میزان فلاونوئید را افزایش داده و یا ثابت نگه داشت [۸]. در پژوهشی دیگر فعالیت آنزیمی آب طالبی گلدن‌امپرس پس از پرتودهی با کبالت ۶۰ اندازه‌گیری شد. تعیین فعالیت آنزیمی بیانگر این بود که لیپواکسیژناز، پلی‌فنل‌اکسیداز و پراکسیداز به آسانی توسط پرتودهی غیرفعال می‌شوند. با این وجود، هر سه آنزیم تا دوز ۵ کیلوگری فعال بودند [۹].

اثر پرتوتابی گاما در دوزهای مختلف صفر، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ گری بر ماندگاری سیب رقم 'رد دلشیز' نشان داد که در نمونه‌های شاهد شیوع بیماری و کاهش شدید سفتی عامل محدودکننده عمر انبارمانی است، ولی اعمال پرتوتابی به‌خصوص در دوزهای ۳۰۰ و ۶۰۰ گری با ممانعت از شیوع بیماری و حفظ بهتر سفتی، تیمار مؤثر در حفظ کیفیت سیب‌های انبارشده در دمای سرد است [۱۰]. اثر پرتوتابی گاما روی کیفیت و ماندگاری آب پرتقال در دوزهای صفر و چهار کیلوگری نشان داد که نمونه‌های شاهد پس از سه روز کیفیت خود را از دست دادند ولی پرتوتابی با غیرفعال کردن باکتری‌های هوازی و کپک‌ها و با حفظ پلی‌فنل کل و ویتامین ث منجر به ماندگاری بهتر آب پرتقال شد [۱۱]. در پژوهشی دیگر نشان داده شده است که پرتودهی قارچ با اشعه گاما موجب کاهش سرعت پراکسیداسیون لیپید و نشت غشاء می‌شود و بدین طریق ظاهر تازه محصول مدت زمان بیشتری حفظ شده است [۱۲]. اما باید توجه داشت که استفاده از پرتودهی دارای دو خاصیت است به‌طوری‌که پرتودهی با دوزهای بالا اثرات تخریبی بر ساختار دیواره سلولی و در نتیجه آن نرمی بافت و کاهش کیفیت را به‌دنبال خواهد داشت (شکل ۱). احتمالاً کاهش سفتی محصول به‌دلیل تخریب مواد پکتینی محلول در اگزالات است. بر این اساس بایستی دوز مناسب پرتودهی برای پس از برداشت محصولات مختلف مشخص شود که این امر نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد [۱۳].

۴. انواع روش‌های پرتودهی در صنعت کشاورزی

پرتوهای مورد استفاده در صنایع غذایی را می‌توان به دو گروه پرتوهای یونیزه‌کننده مانند گاما، ایکس و پرتوهای الکترونی و پرتوهای غیر یونیزه‌کننده، مانند ماوراءبنفش، مادون قرمز و امواج رادیویی دسته‌بندی کرد. از بین این دو گروه، پرتوهای یونیزه‌کننده به‌دلیل قدرت نفوذ بالا و ویژگی‌هایی نظیر قابلیت استفاده آن‌ها برای حفظ محصولات کشاورزی بعد از عملیات بسته‌بندی و جلوگیری از آلودگی ثانویه این محصولات و همچنین قابلیت به‌کارگیری آن‌ها در سطوح تجاری، دارای

فرآیند پرتودهی جهت نگهداری مواد غذایی در سال ۱۹۰۵ برای دو دانشمند انگلیسی صادر شد. پرتودهی مواد غذایی ابتدا در سال ۱۹۲۱ در ایالات متحده برای غیرفعال کردن انگل انسانی تریشینلا اسپیرالیس (*Trichinella Spiralis*) در گوشت خوک استفاده شد. در دهه ۱۹۳۰-۱۹۲۰ میلادی مقالات متعددی پیرامون اثرات پرتودهی بر مواد غذایی و اجزای تشکیل‌دهنده آن چاپ شد [۵]. در سال ۱۹۴۰ میلادی پژوهش‌های بین‌المللی شدت و وسعت بیشتری پیدا کرد. در این زمان امکان استفاده از اشعه جهت نگهداری مواد غذایی امری بعید به نظر می‌رسید. در دهه ۱۹۵۰ هنگامی که مقادیر زیادی از ایزوتوپ‌های مصنوعی ارزان‌قیمت کشف شدند، استفاده از اشعه گسترش زیادی پیدا کرد. ایالات متحده در سال ۱۹۶۳ برای کنترل حشرات در گندم و آرد آن از این روش استفاده کرد. فضانوردان ایالات متحده نیز از سال ۱۹۷۲ از غذاهای پرتودهی‌شده استفاده می‌کردند. در آن زمان سرنشینان آپولو ۱۷ از همبرگر به‌عنوان اولین غذای پرتودیده در طی سفر فضایی استفاده کردند. افرادی که سیستم ایمنی نسبتاً ضعیفی دارند نیز از مزایای غذاهای پرتودیده بهره‌مند می‌شوند، زیرا این قبیل غذاها به کاهش خطر عفونت باکتریایی کمک می‌کنند. در سال ۱۹۸۷ مجمع اقتصادی اروپا به جز انگلستان و آلمان غربی استفاده از فرآیند پرتودهی را تنها برای مواد غذایی خاصی تصویب کرد [۶]. امروزه حدود ۴۰ کشور جهان از جمله ایران بیش از ۱۰۰ نوع غذای پرتودیده را به صورت مشروط و یا غیرمشروط برای مصرف و ۲۵ کشور از آن‌ها تولید تجاری این غذاها را نیز پذیرفته‌اند. اغلب این کشورها به‌منظور غیرفعال کردن کپک‌ها و یا باکتری‌ها در ادویه به کمک پرتودهی آن را سالم‌سازی می‌کنند. از جمله محصولات متداول پرتودیده می‌توان به سیب‌زمینی و پیاز (برای ممانعت از جوانه‌زنی)، غلات و آرد، میوه تازه و گوشت ماکیان اشاره کرد [۷].

۳. کاربرد پرتودهی در نگهداری محصولات کشاورزی

پرتودهی مواد غذایی یک روش ایمن، مؤثر، مطابق با محیط‌زیست و با بازده انرژی بالا برای رفع آلودگی مواد غذایی است. افزایش زمان انبارداری پس از برداشت، با حفظ ویژگی‌های کیفی می‌تواند به سود مصرف‌کننده و صنعت غذا باشد. افزایش عمر ماندگاری، یک عامل کلیدی است که برای صنعت غذا سودمند بوده و مبادلات بین‌المللی را افزایش می‌دهد. یک روند کلی در حفاظت ماده غذایی، تحقیق برای توسعه تکنیک‌های حفاظتی است که صدمه کمتری به کیفیت محصول وارد کند. پژوهش‌های گسترده‌ای برای یافتن مناسب‌ترین تکنولوژی برای حفاظت و فرآوری محصولات غذایی صورت گرفته است. پرتودهی مواد غذایی نوعی فرآیند «پاستوریزاسیون سرد» برای نگهداری غذا محسوب می‌شود، که در طول ۴۵ سال گذشته به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. این روش ضمن اینکه نتایج سودمندی به همراه دارد، ترکیبات سمی و یا رادیواکتیو در ماده غذایی ایجاد نمی‌کند. از جمله مزایای این روش می‌توان به افزایش زمان نگهداری محصولات ریشه‌ای، ضدعفونی کردن ادویه‌ها، میوه‌ها و

اهمیت چشمگیری است [۱۴].

۵. منابع پرتوهای یونیزه کننده

مواد غذایی معمولاً با پرتو گاما و از طریق یک منبع رادیوایزوتوپ، الکترون‌ها و یا پرتو ایکس تولیدشده از طریق یک شتاب‌دهنده الکترونی، پرتو دهی می‌شوند. برای تولید پرتوهای یونیزه مختلف باید از ابزار متفاوتی استفاده کرد، اما تغییرات شیمیایی که در اثر پرتوهای یونیزه مختلف ایجاد می‌شوند یکسان هستند. تنها اختلاف عملی مربوط به قدرت نفوذ آن‌ها، مقدار و تراکم ماده غذایی قابل فرآوری است [۱۴].

۱-۵. پرتو گاما

پرتو گاما، تشعشعات الکترومغناطیس است که از هسته‌های برانگیخته‌شده عناصری مانند کبالت ۶۰، رادیوایزوتوپی تولید می‌شود که در اغلب تجهیزات تجاری اشعه گاما به کار برده می‌شود. قسمت عمده اشعه گاما از طریق اشعه‌دهی کبالت طبیعی (۵۹) در کانادا تولید می‌شود. سزیم ۱۳۷ حاصل از سوخت‌های هسته‌ای مصرف‌شده را می‌توان جانشین منبع رادیوایزوتوپ کرد. البته در حال حاضر مصرف گسترده‌ای ندارد. جنبه‌های اقتصادی فرآوری با اشعه گاما قابل رقابت با سایر روش‌های فرآوری مواد غذایی است. از آنجا که عناصر تولیدکننده این اشعه، فرآورده تجزیه اتمی بوده و جزء ضایعات اتمی محسوب می‌شود، اشعه مذکور از ارزان‌ترین شکل اشعه جهت نگهداری مواد غذایی است و از قدرت نفوذ بسیار خوبی برخوردار است [۵].

۲-۵. پرتوهای الکترونی

شتاب‌دهنده‌های تجاری الکترون، پرتوهای الکترونی را با سطح انرژی مورد قبول در قوانین اشعه‌دهی مواد غذایی تولید می‌کنند. البته الکترون‌ها به‌طور عمقی در مواد اشعه داده شده نفوذ نمی‌کنند. پرتوهای الکترونی در فلزات سنگین متوقف شده و اشعه X تولید می‌کنند. این اشعه نفوذپذیری زیادی دارد، اما قسمت عمده انرژی پرتو به‌صورت گرما در فلز از بین می‌رود. شتاب‌دهنده‌های الکترونی معمولاً برای اشعه‌دهی لایه‌های نسبتاً نازک مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت کنترل کیفیت ترجیحاً تابش الکترون را از یک طرف انجام می‌دهند. زیرا هنگامی که به محصول تنها از یک طرف اشعه داده می‌شود برای آشکارسازی که در پشت محصول قرار دارد، امکان کنترل مداوم و اطمینان از نفوذ پرتو به داخل محصول فراهم می‌شود. اگر ضخامت محصول کم و ظرفیت ورودی آن زیاد باشد، تجهیزات پرتوهای الکترونی مزایای اقتصادی بیشتری نسبت به اشعه‌دهی با کبالت ۶۰ خواهند داشت. همچنین، منبع اشعه X را می‌توان هنگامی که مورد استفاده نیست خاموش کرد، اما منبع کبالت ۶۰ را حتی هنگامی که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد باید همچنان روشن نگاه داشت تا خود از بین برود.

بر پایه نتایج مطالعات بی‌شماری که در زمینه اثرات تطبیقی تشعشعات گاما و پرتوهای الکترونی، شدت بالای دوز با

شدت پایین دوز اشعه‌دهی صورت گرفته است، می‌توان گفت که اثرات بیولوژیکی پرتوهای الکترونی بر میکروارگانیسم‌ها و حشرات، اندکی کمتر از اثرات مربوط به اشعه گاما است. البته، تفاوت موجود در اثر دو نوع اشعه مذکور تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله تراکم اکسیژن و میزان آب قرار دارد. دو نوع اشعه مذکور بر واکنش‌های شیمیایی در مواد غذایی تأثیر تقریباً یکسانی دارند و عمده تفاوت آن‌ها بر اثرات بیولوژیکی بر میکروارگانیسم‌ها و حشرات است [۶]. از میان انواع اشعه‌های یونیزه اشاره شده، اشعه گاما دارای ویژگی‌های بیشتر و مناسب‌تر جهت نگهداری محصولات است. کیفیت مواد پرتو دیده با کاربرد پرتو گاما حفظ می‌شود، علاوه بر این هزینه پایین و صرف انرژی محدود و کم در مقایسه با سایر روش‌های متداول، استفاده از آن‌ها از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه کرده است [۵]. از مزایای دیگر روش پرتو دهی با گاما که آن‌ها را از سایر روش‌های نگهداری مواد غذایی (خشک کردن، منجمد کردن، استفاده از مواد شیمیایی، تخمیر کردن، استفاده از حرارت، کنسرو کردن، بسته‌بندی در خلأ) متمایز می‌سازد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- با استفاده از این روش می‌توان مواد غذایی را بعد از بسته‌بندی نهایی با انواع مختلف پوشش‌ها مانند کاغذ، پلاستیک، چوب و حتی فلز مورد پرتو دهی قرار داده و در نتیجه از آلودگی مجدد محصول جلوگیری به‌عمل آورد.

۲- حساسیت بسیاری از مواد غذایی به افزایش درجه حرارت، یکی از عواملی است که استفاده از حرارت را برای نگهداری مواد غذایی محدود می‌سازد. این محدودیت با استفاده از روش پرتو دهی برطرف می‌شود. تابشی معادل ۵۰ کیلوگری تنها ۱۲ درجه سلسیوس دمای محیط را افزایش می‌دهد.

۳- در روش پرتو دهی هیچ‌گونه ماده شیمیایی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، بنابراین هیچ‌گونه ماده سمی جذب مواد غذایی نخواهد شد؛ درحالی‌که در برخی روش‌های نگهداری مواد غذایی از انواع مواد شیمیایی مانند اتیلن اکساید، پروپیلن اکساید، اتیلن دی‌بروماید در صنعت مواد غذایی استفاده می‌شود که این مواد مقداری جذب ماده غذایی شده و علاوه بر ایجاد ترکیبات سمی، مقداری از خود سم نیز در ماده باقیمانده و به مصرف‌کننده انتقال می‌یابد.

۶. بسته‌بندی محصولات قبل از پرتو دهی

در ارتباط با به‌کارگیری تکنیک پرتوتابی به‌صورت عملی، هدف اصلی، کنترل میکروارگانیسم‌ها و آفات انباری به‌منظور افزایش زمان نگهداری محصول است. ذکر این نکته ضروری است که پرتوتابی هیچ‌گونه تضمینی را برای عدم آلودگی مجدد محصول فراهم نخواهد کرد. بدین معنی که همه عوامل مخرب موجود در محصول، در لحظه پس از پرتوتابی از بین رفته‌اند، اما با گذشت زمان باید شرایط لازم برای جلوگیری از آلودگی مجدد ماده غذایی فراهم شود. از این جهت است که کاربرد مؤثر این تکنیک همیشه مستلزم وجود بسته‌بندی مناسب برای ماده غذایی خواهد بود. به عبارت ساده، باید قبل از عملیات پرتو دهی،

نوع تابش تغییرات مختلفی را در ماده غذایی به وجود می آورد، ولی آن را تابش یونیزه کننده یا یون ساز نیز می نامند [۵]. برخلاف روش های عادی فرآیندهای حرارتی، مقدار ناچیزی از انرژی تابش صرف بالابردن انرژی گرمایی ماده غذایی می شود. انرژی لازم برای استریل کردن از طریق پرتودهی برابر با یک پنجاهم انرژی لازم برای استریل کردن توسط حرارت است. در این شرایط، درجه حرارت ماده غذایی فقط ۲ درجه سلسیوس افزایش می یابد و به همین دلیل است که این روش را استریلیزاسیون سرد نیز می گویند [۵]. علی رغم افزایش ناچیز درجه حرارت، تابش دهی سبب ایجاد تغییرات شیمیایی و بیولوژیک خاص و مهمی می شود. برآورد شده است که با به کارگیری دوز تابشی برابر ۱ کیلوگری، از هر ۱۰ میلیون پیوند شیمیایی موجود، کمتر از ۱۰ پیوند شکسته می شود. اگرچه چنین تغییری بسیار اندک، ولی اثرات بسیار چشمگیر و مهمی به همراه دارد [۵]. مثلاً شکسته شدن پیوندها در ملکول داکسی ریبونوکلئیک اسید (DNA) باعث از دست رفتن توانایی سلول در تولیدمثل می شود. باید توجه شود که ملکول DNA به دلیل اندازه بزرگ خود در معرض بیشترین آسیب توسط تابش نسبت به سایر اجزاء است. کمترین تغییر در ساختمان این ماده حیاتی مهم سبب مرگ سلول های باکتریایی می شود. اثر بر مواد ژنتیکی سلول، تأثیر اصلی تابش بر ماده غذایی بوده و اثر مستقیم این فرآیند محسوب می شود. نقش تابش در جلوگیری از جوانه زدن در جریان نگهداری یا انبارداری برخی اقلام غذایی و به تأخیر انداختن رسیدن میوه ها و سبزی ها نیز در اصل ناشی از همین اثر است [۱۵].

پرتودهی علاوه بر اثر مستقیم، دارای اثر غیر مستقیم نیز بر ماده غذایی است. در این مورد چنین استدلال می شود که پرتودهی موادی که دارای آب هستند، سبب یونیزه شدن قسمتی از ملکول های آب می شود و رادیکال های هیدروژن و هیدروکسیل که قابلیت واکنش شیمیایی بسیار زیاد دارند ایجاد می شوند. این رادیکال ها سبب به وجود آمدن آثار بیولوژیک در ماده مورد نظر می شوند. از این نظر در اینجا اثرات ثانوی یا غیر مستقیم ظهور می یابد که در اثر فعال شدن ملکول های آب به وجود آمده اند. پس دستاورد رادیولیز آب، تولید رادیکال های هیدروژن ($H^\bullet$) و هیدروکسیل ($OH^\bullet$) و یون های H^+ و OH^- است. رادیکال های آزاد هیدروژن و هیدروکسیل مولکول های بدون بار الکتریکی هستند که دارای الکترون های جفت نشده هستند و از دید شیمیایی بسیار فعال اند. این رادیکال ها ناپایدار و انرژی زیادی دارند که می توانند آن را به مولکول های دیگر منتقل کنند و باعث گسستگی پیوندهای مولکولی شوند. دو مولکول هیدروکسیل می توانند ترکیب شده و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) را که یک عامل اکسیدکننده قوی بوده و به منزله یک سم بیولوژیک است، تولید کنند. این مولکول برای زیست سلول زیان بار و سمی است. رادیکال هیدروژن نیز در ترکیب با اکسیژن، رادیکال پراکسید را به وجود می آورد. رادیکال های هیدروژن و هیدروکسیل تشکیل شده می توانند با یکدیگر، با اکسیژن محلول در آب و بسیاری از مولکول های آلی و معدنی

مراحل بسته بندی محصول به دقت انجام پذیرد. با توجه به اثرات گوناگون پرتوهای یونیزه کننده بر انواع مواد مختلف به کار گرفته شده در بسته بندی محصولات، پژوهش های زیادی نیز در این زمینه صورت گرفته است. برخی از مواد بسته بندی ها ممکن است در برابر تابش اشعه تخریب شده و موجبات آلودگی مجدد را فراهم آورند. بنابراین ضروری است وابسته به نوع هدف و میزان پرتوتابی، نوع مواد مورد استفاده برای بسته بندی هم تغییر کند [۱۴]. اثر تابش یونیزه کننده روی مواد پلیمری به دو روش صورت می گیرد:

۱) به عنوان یک تیمار افزایش دهنده وزن مولکولی (از طریق ایجاد اتصالات عرضی)

۲) به عنوان یک تیمار کاهش دهنده وزن مولکولی (از طریق تجزیه زنجیره پلیمرها).

در حالت کلی در بسته بندی مواد غذایی که در معرض پرتودهی قرار می گیرند می توان از بسته هایی با جنس های متفاوت استفاده کرد، اما به دلایل اقتصادی، کاربرد مواد پلاستیکی در بسته بندی مواد غذایی بسیار چشمگیرتر است.

۷. نحوه و مکانیسم اثر پرتودهی بر محصولات کشاورزی

تابش دهی با پرتوهای یونیزه می تواند باعث یونیزه شدن ماده شود. در این فرآیند، الکترون جدا می شود. بنابراین دو جزء، یکی با بار منفی و دیگری با بار مثبت به وجود می آید. این زوج را زوج یونی می نامند. تشکیل زوج های یونی در عملیات تابش دهی مواد غذایی حائز اهمیت است؛ زیرا تغییرات ایجاد شده در اثر تابش، به میزان زیادی مربوط به این پدیده است. عمل یونیزه شدن در مدتی کمتر از ۰/۰۰۱ ثانیه صورت می گیرد و الکترون های زیادی که در این حالت تشکیل می شوند ممکن است انرژی کافی داشته باشند و خود سبب تحریک سایر اتم ها و از این طریق باعث تولید یون های بیشتری شوند. بنابراین، علاوه بر موضوع مقدار نفوذ تابش به درون ماده غذایی، توانایی آن در ایجاد زوج های یونی دارای اهمیت خاصی است. پرتو گاما اگرچه نسبت به پرتو بتا دارای توانایی نفوذ بیشتری است، اما قدرت آن در تولید یون کمتر است. ذرات آلفا از قدرت ایجاد یون زیادی برخوردار هستند؛ اما توان کمتری برای نفوذ در ماده دارد که این ویژگی به منزله عاملی محدود کننده در جهت به کارگیری این ذرات مطرح است [۱۵]. چنانچه جریان تابش در حین برخورد با اجزاء غذایی دارای انرژی کافی باشد، می تواند سبب شکسته شدن پیوند میان اتم ها شود و رادیکال هایی را به وجود آورد. رادیکال به دلیل وضعیت خاص الکترونی خود ناپایدار است و آمادگی بسیار زیادی برای انجام واکنش با سایر رادیکال ها یا مولکول ها را دارد تا به شکل پایداری درآیند. به طور کلی اثر تابش بر ماده غذایی ناشی از تشکیل زوج های یونی و رادیکال های آزاد و همچنین ترکیب رادیکال های آزاد با سایر مولکول ها یا با یکدیگر می باشد. این واکنش ها مجموعاً اثرات یا تغییراتی را در ماده غذایی نظیر نابودی میکروارگانیسم ها و آنزیم ها و تجزیه بعضی از اجزاء غذایی به همراه دارد. اگرچه این

Preservation. In *Microbial Control and Food Preservation* (pp. 299-326). Springer, New York, NY.

7. Farkas, J., 1998. Irradiation as a method for decontaminating food: a review. *International journal of food microbiology*, 44(3), pp.189-204.

8. Vanamala, J., Cobb, G., Loaiza, J., Yoo, K., Pike, L.M. and Patil, B.S., 2007. Ionizing radiation and marketing simulation on bioactive compounds and quality of grapefruit (*Citrus paradisi* cv. Rio Red). *Food chemistry*, 105(4), pp.1404-1411.

9. Wang, Z., Ma, Y., Zhao, G., Liao, X., Chen, F., Wu, J., Chen, J. and Hu, X., 2006. Influence of gamma irradiation on enzyme, microorganism, and flavor of cantaloupe (*Cucumis melo* L.) juice. *Journal of food science*, 71(6), pp.M215-M220.

10. Mostafavi, H.A., Mirmajlessi, S.M., Mirjalili, S.M., Fathollahi, H. and Askari, H., 2012. Gamma radiation effects on physico-chemical parameters of apple fruit during commercial post-harvest preservation. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(6), pp.666-671.

11. Hussain, A. and Maxie, E.C., 1974. Effect of gamma rays on shelf life and quality of orange juice. *International Biodeterioration Bulletin*, 10(3), pp.81-86.

12. Ye, H., Chen, J., Yu, R., Chen, Q. and Liu, W., 2000. The effect of irradiation on stored straw mushroom and the physiological mechanism. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 14(1), pp.24-28.

13. Gupta, N., Baghel, B.S. and Mishra, S.P., 2016. Shelf life extension and post-harvest quality of mango fruits (*Mangifera indica* L.) cv. Dashehari as affected by gamma radiation and packaging material.

14. Arvanitoyannis, I.S., Stratakos, A.C. and Tsarouhas, P., 2009. Irradiation applications in vegetables and fruits: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 49(5), pp.427-462.

15. Majd, F. and Ardakani, M.R., 2004. Nuclear techniques in agricultural sciences. Second edition. University of Tehran Press, 381 pages. (In Persian)



شکل ۱. شرایط فیزیکی میوه‌های انبه پرتودهی شده با گاما پس از ۱۲ روز [۱۳].

و یون‌هایی که ممکن است در آب موجود باشند وارد واکنش شوند. رادیکال‌های هیدروکسیل و هیدروژن می‌توانند به ترتیب به‌عنوان یک عامل اکسیدکننده و احیاءکننده قوی وارد عمل شوند. البته طول عمر یا مدت بقای این رادیکال‌ها بسیار کوتاه (کمتر از 10^{-5} ثانیه) است. اما همین مدت برای نابودی سلول‌های باکتریایی کافی است. اثر غیر مستقیم تابش در مورد مواد غذایی منجمد کمتر است؛ زیرا در این حالت علاوه بر خارج شدن بخشی از آب از شکل مایع خود، امکان حرکت و پراکنده شدن رادیکال‌های تشکیل شده در ماده غذایی و ایجاد اثرات مربوطه کمتر است. انجام عمل پرتودهی تحت شرایط خلاء یا گاز بی‌اثر نیز به دلیل کمبود اکسیژن سبب می‌شوند که از اثر آن کاسته شود. همچنین، وجود عوامل مهارکننده رادیکال‌ها مثل اسیدآسکوربیک قادر است به‌منزله مانعی در برابر بروز اثر غیرمستقیم پرتودهی عمل کند [۱۵].

۸. نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه وضعیت ظاهری محصولات مهم‌ترین شاخص ارزیابی بازارپسندی آن‌هاست و وجود هر گونه علائم آلودگی، پوسیدگی و نرم شدن میوه باعث کاهش بازارپسندی محصول می‌شود؛ بنابراین هر عاملی که سرعت پیری را کاهش دهد و از رشد علائم پوسیدگی جلوگیری کند باعث حفظ کیفیت و کمیت محصولات خواهد شد. پرتودهی با اشعه گاما، با جلوگیری از رشد قارچ‌ها و عوامل بیماری‌زا و بروز فساد به طور مؤثری باعث افزایش عمر نگهداری محصولات و حفظ ارزش غذایی آن‌ها می‌شود. بنابراین کاربرد این فناوری با توجه به هزینه بسیار پایین آن در مقایسه با سایر روش‌های نگهداری محصولات پس از برداشت، از نظر اقتصادی کاملاً مقرون به‌صرفه است.

مراجع

1. Esna-Ashari, M. and Zokaee Khosroshahi, M. R., 2004. *Post-harvest physiology and technology*. First Edition. Hamadan University Press, 658 pages. (In Persian)
2. Babalar, M., Asghari, M., Talaei, A. and Khosroshahi, A., 2007. Effect of pre-and postharvest salicylic acid treatment on ethylene production, fungal decay and overall quality of Selva strawberry fruit. *Food chemistry*, 105(2), pp.449-453.
3. Cuevas, F.J., Moreno-Rojas, J.M., Arroyo, F., Daza, A. and Ruiz-Moreno, M.J., 2016. Effect of management (organic vs conventional) on volatile profiles of six plum cultivars (*Prunus salicina* Lindl.). A chemometric approach for varietal classification and determination of potential markers. *Food Chemistry*, 199, pp.479-484.
4. Gunes, G., Hotchkiss, J.H. and Watkins, C.B., 2001. Effects of gamma irradiation on the texture of minimally processed apple slices. *Journal of food science*, 66(1), pp.63-67.
5. Sommers, C.H. and Fan, X. eds., 2008. *Food irradiation research and technology*. John Wiley & Sons.
6. Orellana, L.E., de Lourdes Plaza, M., Pérez, F., Cedeño, Y. and Perales, O., 2017. *Non-thermal Methods for Food*