Scientific Journal of Passive Defence
Vol. 15, No. 2, Summer 2024, Serial No. 58
ISSN: 2980-8030 , E-ISSN: 2008-6849

Reduction of Radiation Pollution in the Agricultural Environment by Using Nuclear Defense

Kordi, Morteza* , Mojtaba Saadati

* Assistant Professor, Department of Animal Sciences, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

(Received: 13/03/2024, Revised: 23/04/2024, Accepted: 29/06/2024, Published: 15/08/2024)
DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.2.8.7

ABSTRACT

Using nuclear energy for peaceful purposes has many benefits. But, if it is not controlled, it can pose risks. It may cause health and environmental problems. A nuclear accident may follow an accidental nuclear explosion (Chernobyl, Ukraine, 1986), intentional (atomic bomb explosions in Hiroshima and Nagasaki, Japan, 1945), or leakage of radioactive material from damaged or worn-out reactors at power plants or facilities. Nuclear technology is the radioactive pollution from transporting, handling, and storing nuclear fuel and waste. After any nuclear accident, radioactive materials spread into the environment. They cause pollution, including in agricultural areas; the soil, plants, and crops. In this situation, it is necessary to take effective measures in the shortest possible time to reduce the transfer of radioactive contamination to the food chain. Among the effective tools in nuclear defense is non-nuclear defense, which does not need the use of weapons, and its implementation can prevent or reduce damage to the environment and human casualties. There are several defense methods to avoid or decontaminate the agricultural environment in the period before and during the fall of radioactive substances. By examining these methods, we can design countermeasures that will work in the short, medium, and long term after the accident. Also, they will have the highest degree of implementation capability and efficiency, and can prevent the largest amount of pollution in the shortest time.

Keywords: Passive Defense, Nuclear Pollution, Radioactive Materials, Agriculture

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

* Corresponding Author Email: m.kordi@yu.ac.ir

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، (پیاپی ۵۸): صص ۱۳۰-۱۱۳

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | **شاپای الکترونیکی:** ۸۰۳۰-۲۹۸۰

علمی – پژوهشی

کاهش آلودگی پرتویی در محیط‌زیست کشاورزی با استفاده از پدافند هسته‌ای

مرتضی کردی*[۱]، مجتبی سعادتی[۲]

DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.2.8.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

چکیده

استفاده از انرژی هسته‌ای برای مصارف صلح‌آمیز، منافع و مزایای بسیاری برای کشورها به دنبال دارد. امّا زمانی که به‌کارگیری آن از قالب کنترل شده خارج شود و اصول ایمنی و حفاظتی مربوطه رعایت نشود، ممکن است خطرات و چالش‌های بهداشتی و محیط زیستی متعددی را با خود در پی داشته باشد. یک حادثهٔ هسته‌ای ممکن است به دنبال یک انفجار هسته‌ای ناخواسته (حادثه نیروگاه چرنوبیل اوکراین، ۱۹۸۶) یا تعمدی (انفجار بمب اتمی در هیروشیما و ناکازاکی ژاپن، ۱۹۴۵)، نشت مواد رادیواکتیو از راکتورهای آسیب دیده یا فرسوده در نیروگاه‌ها یا مراکز فناوری هسته‌ای، بروز آلودگی رادیواکتیو در حین حمل، جابجایی و ذخیره‌سازی سوخت و زباله‌های اتمی رخ بدهد. درهرحال، پس از بروز هر حادثه هسته‌ای مواد پرتوزا در محیط اطراف پراکنده شده و باعث آلودگی محیط‌زیست، از جمله محیط‌زیست کشاورزی، خاک، گیاهان و محصولات کشاورزی می‌گردند. در این شرایط ضروری است تا در کوتاه‌ترین زمان ممکن، اقدامات مؤثری در جهت کاهش انتقال آلودگی‌های رادیواکتیو به زنجیرهٔ غذایی انجام شوند. از جمله ابزارهای کارآمد در دفاع هسته‌ای پدافند غیر عامل هسته‌ای است که نیازمند به‌کارگیری جنگ‌افزار نیست و اجرای آن می‌تواند از واردشدن خسارات به محیط‌زیست، و تلفات انسانی جلوگیری کند یا بکاهد. روش‌های پدافندی متعددی جهت پیشگیری یا رفع آلودگی محیط‌زیست کشاورزی در دوره قبل و حین بارش مواد پرتوزا، و دوران کوتاه مدت، میان‌مدت و بلندمدت بعد از حادثه وجود دارند که با بررسی این روش‌ها، می‌توان اقدامات متقابل پدافندی را طراحی نمود که از نظر کارآیی دارای بالاترین درجه از قابلیت اجرایی هستند و بکارگیری آنها می‌تواند در کوتاه‌ترین زمان، از بیشترین حجم آلودگی جلوگیری نماید.

کلیدواژه‌ها: پدافند غیرعامل، آلودگی‌های هسته‌ای، مواد پرتوزا، کشاورزی

[۱] استادیارگروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران(m.kordi@yu.ac.ir)- نویسنده مسئول

[۲] استاد گروه زیست‌شناسی دانشگاه جامع امام حسین (ع) ، تهران، ایران

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) © نویسندگان

۱- مقدمه

پرداختن به جوانب زیست‌محیطی، کنترل آلودگی‌های هسته‌ای ناشی از حوادث احتمالی در سایت‌های هسته‌ای و تدوین سامانه پدافند و پاسخ سریع زیست‌محیطی در شرایط اضطراری هسته‌ای در کشور دارای اهمیّت راهبردی بالایی است. آلودگی‌هایی که ممکن است از طریق محیط‌زیست کشاورزی به انسان منتقل گردد، باید با اجرای پروتکل‌های سازمان پدافند نسبت به رفع این آلودگی‌های زیست‌محیطی اقدام نمود. در این میان باتوجه‌به پیشرفت‌های صورت‌گرفته در ایران در بحث فناوری‌های هسته‌ای و به‌تبع آن خطرات احتمالی که ممکن است کشور را از نظر آلودگی‌های هسته‌ای مورد تهدید قرار دهند، باتوجه‌به این که محیط‌های کشاورزی از این نظر که هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت با تأمین مواد غذایی موردنیاز مردم، با سلامت عمومی جامعه در ارتباط هستند، از درجهٔ بالاتری از اهمیّت برخوردار هستند [۱-۲].

ارزیابی میزان انتقال مواد پرتوزا به گونه‌های مختلف گیاهی و زنجیره غذایی انسان امری ضروری و با اهمیت است، امّا آنچه که این امر را محدود می‌کند این است که در واقع داده‌های جمع‌آوری شده در این زمینه، همهٔ گونه‌های گیاهی (حتّی گونه‌های راهبردی) را تحت پوشش قرار نمی‌دهد. بعد از حوادث هسته‌ای عظیمی چون چرنوبیل (۱۹۸۶) و فوکوشیما (۲۰۱۱) و سایر حوادث رخ داده در جهان، مطالعات زیادی در ارتباط با رسوب مواد پرتوزا در مناطق اطراف محل حادثه انجام شده است، امّا با وجود حجم زیاد اطّلاعات جمع‌آوری شده، اطّلاعات مفید کمی برای استفاده در حطیه کشاورزی موجود است. برای مثال، بعد از حادثه فوکوشیما، باتوجه‌به اینکه بیش از ۸۰ درصد مناطق آلوده مربوط به نواحی کشاورزی بوده است، امّا بیشترین توجه و نظارت تنها صرف بررسی غلظت مواد پرتوزا در مکان‌های مختلف و غذاها شده بود. بنابراین درحال حاضر اطّلاعات دقیقی مبنی بر اینکه مثلاً ذرات پرتوزا در گیاهان کجا و چگونه تجمع می‌یابند وجود ندارد و دقیقاً مشخص نیست که یک ماده پرتوزا مثل رادیوسزیم در گیاهان از چه راهی برداشت می‌شود [۳].

از جمله ابزارهای کارآمد در دفاع هسته‌ای پدافند غیرعامل است. پدافند غیرعامل هسته‌ای نقطه مقابل تهدیدات هسته‌ای است. در واقع محیط‌زیست یکی از مباحث جدید در پدافند غیرعامل است که در این میان، محیط‌زیست کشاورزی بنا بر اهمیت آنها در حوزهٔ تأمین مواد غذایی موردنیاز انسان باید بیشتر مورد توجه قرار بگیرند. پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که نیازمند به‌کارگیری جنگ‌افزار نیست و با اجرای آن می‌توان از واردشدن خسارات مالی به محیط‌زیست، تجهیزات و تأسیسات حیاتی و حساس و تلفات انسانی جلوگیری کرده و یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. ازاین‌رو، وظیفه قرارگاه پدافند غیرعامل هسته‌ای، رصد و پایش این نوع تهدیدات و کنترل این تهدیدات در مواقع ضروری است [۴].

ازاین‌رو، برای مقابله با آلودگی‌های هسته‌ای در مواقع لزوم باید روش‌های مختلف پدافندی باتوجه‌به موقعیت و ظرفیت‌های مناطقی از کشور که در معرض تهدیدات هسته‌ای هستند طراحی و تدوین گردند. درهرحال به علّت عظیم بودن ابعاد حادثه در مقیاس وسیع، در حوادثی چون چرنوبیل و فوکوشیما، این حوادث به‌عنوان موارد پژوهشی جامع در زمینه‌های مختلف موردتوجه و مطالعه قرار گرفتند و بیشتر اطّلاعات موجود در زمینه‌ی اثر مواد پرتوزا بر محیط‌زیست با مطالعهٔ این دو حادثه به دست آمده‌اند که می‌توانند دررابطه‌با شناخت پیامدهای محیط زیستی ناشی از تشعشعات هسته‌ای و راه‌های مقابله با آنها، راه‌حل‌های مفیدی را ارائه دهند.

بنابراین، هدف از این مطالعه شناسایی مسیرهای انتقال آلودگی‌های پرتوی و اثرات آنها بر محیط‌زیست کشاورزی و استفاده از این اطلاعات برای طراحی و طبقه‌بندی راهکارهای و روش‌های پدافندی مناسب برای پیشگیری، کاهش یا رفع آلودگی‌های هسته‌ای در خاک، گیاهان و محصولات کشاورزی بوده است، تا در مواقع لزوم بتوان میزان انتقال این مواد به زنجیره غذایی را با واکنش سریع پس از وقوع یک حادثهٔ هسته‌ای، به حداقل رساند.

۲- روش تحقیق

برای شناخت مسیرهای انتقال آلودگی‌های پرتویی و اثرات آنها بر محیط‌زیست کشاورزی و راهکارهای رفع آلودگی، از مطالعات کتابخانه‌ای استفاده شد و حوادث هسته‌ای مختلف در سراسر جهان، خصوصاً حادثهٔ چرنوبیل (۱۹۸۶) و فوکوشیما (۲۰۱۱)، که مقالات آنها در پایگاه‌های اطلاعاتی Science direct، Scopus، Web of science، SID، و یا ISC منتشر شده بودند، بررسی شدند، و در نهایت نتایج این مطالعات جمع‌بندی و در قالب این مقاله ارائه شدند.

۳- انتقال مواد پرتوزا به محیط‌زیست زمینی

مواد پرتوزای مختلف رفتارهای متفاوتی را در محیط‌زیست از خود نشان می‌دهند. برخی از مواد پرتوزا مانند رادیوسزیم و رادیو استرانسیوم در محیط‌زیست متحرک هستند و به‌آسانی و تحت

شرایط خاص محیط زیستی به مواد غذایی منتقل می‌شوند. در مقابل، مواد پرتوزا با حلالیت پایین مانند اکتینیدها نسبتاً بی‌حرکت هستند و تا حد زیادی در خاک باقی می‌مانند. مسیرهای اصلی چرخه مواد پرتوزا و راه‌های ممکن برای انتقال آنها به انسان در شکل (۱) نشان‌داده‌شده است [۵].

شکل(۱): مسیرهای اصلی مواد پرتوزا در محیط‌زیست زمینی [۵].

عوامل مختلفی بر میزان انتقال مواد پرتوزا از طریق مسیرهای محیط زیستی اثر دارند. اگر میزان انتقال مواد پرتوزا به یک محیط‌زیست خاص بالا باشد به آن محیط، محیط‌زیست حساس به مواد پرتوزا می‌گویند، زیرا انتقال مواد پرتوزا می‌تواند منجر به‌قرار گرفتن در معرض پرتوهای رادیولوژیکی نسبتاً بالا شود. از بین مواد پرتوزای رسوب‌کرده بعد از حادثه چرنوبیل، در طول دوره کوتاه‌مدت (۰-۲ ماه) رادیوئید مهم‌ترین ماده پرتوزایی بود که انسان از طریق زنجیره‌های محصولات کشاورزی در معرض آن قرار گرفت و در طول دوره بلندمدت، رادیوسزیم (و به میزان بسیار کمتر رادیواسترانسیوم) مهم‌ترین آنها بوده است [۵-۶].

به‌طورکلی حساسیت‌های رادیولوژیک به رادیوسزیم در اکوسیستم‌های نیمه‌طبیعی بالاتر از اکوسیستم‌های کشاورزی است که گاهی اوقات مقدار آن به چند ده برابر نیز می‌رسد. این تفاوت به دلیل عوامل متعددی ایجاد می‌شود که مهم‌ترین آنها شامل رفتار فیزیکی و شیمیایی در خاک و عدم رقابت بین سزیم و پتاسیم، سبب انتقال بیشتر رادیوسزیم در اکوسیستم‌های فقیر از مواد مغذی می‌شود و با حضور در مسیرهای خاصِ زنجیرهٔ غذایی منجر به تولید اکوسیستم‌های نیمه‌طبیعی بسیار آلوده می‌شود. همچنین، خاک‌های جنگلی اساساً با خاک‌های کشاورزی متفاوت بوده و دارای ساختار عمودی چندلایه با یک‌لایه معدنی فقیر از رُس هستند که با یک‌لایه آلی غنی از مواد آلی پشتیبانی می‌شود. در مقابل، به‌طورکلی خاک‌های کشاورزی دارای مواد آلی کمتر و مقدار رُس بیشتری هستند [۵].

۴- اثر مواد پرتوزا بر محیط‌زیست کشاورزی بعد از یک حادثه هسته‌ای

در حوادث مختلف هسته‌ای از جمله چرنوبیل (۱۹۸۶)، در مراحل اولیه‌ی بعد از حادثه، رسوب خشک مواد بر روی برگ گیاهان و بارش، مسیرهای اصلی آلودگی محیط‌زیست بود. در دوران میان‌مدت و بلندمدت بعد از حادثه نیز، جذب مواد پرتوزا از طریق ریشه مهم‌ترین مسیر آلودگی گیاهان بوده است. محتوای مواد پرتوزا در گیاهان و حیوانات تا حد زیادی بر اساس تعامل بین مواد پرتوزا و ترکیبات مختلف خاک تعیین می‌شود، چرا که خاک مخزن اصلی سکونت طولانی‌مدت مواد پرتوزای رسوب‌کرده در اکوسیستم‌های زمینی می‌باشد. این فرآیند، زیست فراهمی مواد پرتوزا برای جذب در گیاهان و حیوانات و همچنین اثرات مهاجرت مواد پرتوزا به ستون‌های پایینی خاک را کنترل می‌کند [۵].

۴-۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد پرتوزا در سیستم گیاه- خاک

گیاهان مواد مغذی و مواد آلاینده محلول در خاک را برداشت می‌کنند. غلظت فعالیّت مواد پرتوزا در محلول خاک نتیجه فعل‌وانفعالات فیزیکی و شیمیایی این مواد با ماتریکس خاک است که مکانیسم غالب آن رقابت تبادل یونی است. غلظت و ترکیب عناصر اصلی و رقابتی موجود در خاک برای تعیین توزیع مواد پرتوزا بین خاک و محلول خاک از درجه اوّل اهمیّت برخوردار است. بسیاری از داده‌ها پس از حادثه چرنوبیل نشان می‌دهند که مقدار و طبیعت مواد معدنی خاک رُس موجود در خاک‌ها از عوامل کلیدی‌ای هستند که در تعیین حساسیت‌های رادیولوژیک با درنظرگرفتن رادیوسزیم، نقش دارند. این ویژگی‌ها برای درک رفتار رادیوسزیم، به‌ویژه در نواحی دور از منطقه حادثه چرنوبیل که سزیم-۱۳۷ در ابتدا به شکل متراکم و محلول در آب رسوب کرد، بسیار اهمیّت دارد. در نزدیکی محل حادثه چرنوبیل، مواد پرتوزا در ماتریکس ذرات سوخت رسوب‌کرده و به آرامی در طی زمان در هم حل شدند، که این فرآیند تا به امروز هم کامل نشده است. مهم‌ترین عامل مؤثر بر سرعت انحلال ذرات سوخت در خاک، اسیدیته محلول خاک و خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات آن (به ویژه درجه اکسیداسیون) است. در اسیدیته پایین (pH=۴)، زمان لازم برای انحلال ۵۰ درصد ذرات حدود یک سال بود، درحالیکه برای اسیدیته بالاتر از ۷، ۱۴ سال زمان نیاز بود. بنابراین، در نواحی چرنوبیل در خاک‌های اسیدی بیشتر ذرات

سوخت حل شده‌اند. در خاک‌های خنثی، میزان حرکت استرانسیوم-۹۰ آزاد شده از ذرات سوخت در حال افزایش است و این روند تا ۱۰-۲۰ سال آینده ادامه خواهد داشت. علاوه بر مواد معدنی خاک، میکروارگانیسم‌ها نیز می‌توانند به طور قابل توجهی سرنوشت مواد پرتوزا در خاک‌ها را تحت تأثیر قرار بدهند. آنها می‌توانند بر مواد معدنی و آلی خاک اثر کنند و در نتیجه بر زیست فراهمی مواد پرتوزا تأثیر بگذارند. در مورد حالت خاص قارچ مایکوریزال، میکروارگانیسم‌های خاک حتی ممکن است به عنوان یک عامل حمل و نقل مواد پرتوزا از محلول خاک به گیاه عمل کنند [۵].

۴-۲- انتقال مواد پرتوزا از خاک به محصولات کشاورزی

جذب مواد پرتوزا توسط ریشه گیاهان، همانند سایر عناصر کمیاب، یک فرایند رقابتی فیزیولوژیک در گیاه است. برای رادیوسزیم و رادیو استرانسیوم، عناصر اصلی‌ای که در طی جذب با آنها در رقابت هستند به ترتیب پتاسیم و کلسیم هستند. از جمله مهم‌ترین فرایندهایی که بر روی مکانیسم انتقال مواد پرتوزا از طریق سامانه ریشه به گیاه اثرگذار هستند و باید موردتوجه قرار گیرند شامل نوع گیاه، کودهای مصرفی، مایکوریزاهای ریشه (ریشه قارچ)، حلالیت خاک، میکروارگانیسم‌های خاک، ماتریکس مواد آلی و مواد معدنی خاک هستند. اگرچه اهمیّت نسبی هر یک از مؤلفه‌ها باتوجه‌به نوع ماده پرتوزا و نوع خاک متفاوت است. میزان مواد پرتوزای برداشت شده توسط ریشه گیاه باتوجه‌به نوع خاک متفاوت است. برای همهٔ انواع خاک‌ها و گیاهان، میزان جذب پلوتونیوم از طریق ریشه در مقایسه با آلودگی مستقیم برگ‌ها توسط ذرات خاک پرتاب شده در اثر برخورد قطرات باران با زمین، بسیار ناچیز است [۱].

بیشترین برداشت سزیم-۱۳۷ از خاک، توسط ریشه گیاهان در خاک‌های ذغال سنگی نارس و باتلاقی (خَلاش) رخ می‌دهد و مقدار آن ۱۰۰-۱۰ برابر بیشتر از خاک‌های شنی است. این برداشت اغلب در گیاهانی که در خاک‌های حاصلخیز کشاورزی در حال رشد هستند تا ۳۰۰ برابر نیز افزایش می‌یابد. بعد از حادثه چرنوبیل، برداشت زیاد رادیوسزیم از خاک‌های نارس ذغال سنگی اهمیّت پیدا کرد، زیرا از این قبیل خاک‌ها در بسیاری از کشورهای اروپایی در مراتع مدیریت نشده برای چرای نشخوارکنندگان و تولید علوفه استفاده می‌شده است. مقدار رادیوسزیم در محصولات کشاورزی در دورهٔ میان‌مدت و دراز مدت بعد از حادثه، تنها به حجم آلودگی بستگی ندارد؛ بلکه به نوع خاک، رطوبت خاک، بافت خاک و خواص شیمیایی خاک و نوع گونه‌های گیاهی وابسته است. غالباً فعالیّت‌های کشاورزی، انتقال مواد پرتوزا از خاک به گیاه را با رقیق‌سازی فیزیکی (شخم زدن) یا افزودن عناصر رقابتی (اضافه کردن کود به خاک) کاهش می‌هند. بین گونه‌های گیاهی مختلف در برداشت مواد پرتوزا از خاک اختلاف وجود دارد. هر چند ممکن است در اثر تفاوت‌های بین گونه‌ای، انتقال رادیوسزیم بین خاک و گیاه ۱۰ برابر یا حتی بیشتر از آن افزایش یابد، امّا اغلب تفاوت حساسیت‌های رادیولوژیک خاک‌های مختلف برای توجیه تغییر فضایی انتقال رادیوسزیم در سامانه‌های کشاورزی از اهمیّت بیشتری برخوردار است. اثر سایر فاکتورهایی که به عنوان عوامل مؤثر بر جذب مواد پرتوزا توسط ریشه عنوان شده‌اند (مثل رطوبت خاک) خیلی مشخص نمی‌باشد و یا ممکن است توسط مکانیسم‌های اساسی که در بالا بحث شده‌اند توضیح داده شوند. برای مثال، تجمع رادیوسزیم درون محصولات کشاورزی و علوفه‌های مرتعی با بافت خاک در ارتباط است. در خاک‌های شنی، برداشت رادیوسزیم توسط گیاهان تقریباً دو برابر بیشتر از خاک لوم است، امّا این اثرات عمدتاً به این دلیل است که غلظت عنصر پتاسیم که برای جذب توسط ریشه گیاهان با رادیوسزیم در رقابت است، در شن و ماسه پایین‌تر می‌باشد. فرآیند اصلی کنترل کننده برداشت رادیوسزیم توسط ریشه گیاهان، تعامل بین ماتریکس خاک و محلول خاک است که در درجه اوّل به ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بستگی دارد. برای خاک‌های معدنی، این عامل تحت تأثیر غلظت و نوع مواد معدنی رُسی و غلظت کاتیونهای رقابت کننده اصلی بویژه پتاسیم و آمونیوم قرار می‌گیرد.

بنابراین، این تفاوت‌ها در حساسیت رادیولوژیک خاک می‌تواند توجیه کند که چرا در یک ناحیه با رسوب پایین مواد پرتوزا، گیاهان و قارچ‌هایی با غلظت‌های بالای رادیوسزیم یافت می‌شوند و یا در مقابل، چرا در مناطقی با رسوب بالای مواد پرتوزا، گیاهانی با غلظت‌های اندک رادیوسزیم وجود دارند [۵].

۴-۳- ورود مواد پرتوزا به درون گیاهان

نحوهٔ رسوب مواد پرتوزا به دو صورت رسوب خشک و رسوب مرطوب تقسیم‌بندی می‌شود. در رسوب خشک، ذرات به طور مستقیم بر روی سطوح رسوب می‌کنند و انتقال ذرات رادیواکتیو به گیاهان از طریق جذب، گیرافتادن[1] و ته‌نشینی در آب انجام می‌شود [۷]. در رسوب مرطوب، ذرات رادیواکتیو کوچک‌تر هستند و زمانی که تگرگ، باران یا برف ببارد رسوب می‌کنند. در رسوب مرطوب انتقال ذرات رادیواکتیو از اتمسفر با نرخ بالاتری انجام می‌شود. برداشت مواد پرتوزا توسط گیاهان در رسوب مرطوب یا خشک توسط فاکتورهای مختلفی کنترل می‌شوند که شامل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات رادیواکتیو، مرحلهٔ رشد محصولات کشاورزی در زمان آلودگی، مقدار کل بارش رادیواکتیو، شدت بارش رادیواکتیو و توانایی تاج‌پوششی گیاهان

[1] impaction

برای نگهداری آب هستند. برداشت مواد پرتوزا توسط گیاهان بسته به مرحله رویشی محصولات کشاورزی مختلف است. در مرحله‌ای که گیاه به طور کامل توسعه‌یافته باشد، اکثر مواد پرتوزا مستقیماً بر روی برگ‌ها رسوب می‌کنند. نسبت مواد پرتوزای موجود در بارش که می‌تواند توسط تاج‌پوششی گیاه نگهداری شود، زمانی که ظرفیت خارجی ذخیره‌سازی آب‌ها توسط تاج گیاه به حداکثر خود رسیده باشد، میزان آلودگی در آن محصول به حداکثر می‌رسد. بااین‌حال، اگر پس از آنکه ظرفیت خارجی ذخیره‌سازی آب توسط گیاه به حداکثر میزان خود رسید آلودگی همچنان روبه‌افزایش باشد، ذرات رادیواکتیو از طریق سطح برگ‌ها جذب می‌شوند. میزان برداشت مستمر مواد رادیواکتیو توسط گیاهان به شکل شیمیایی ماده پرتوزا مرتبط است [۷].

۵- روش‌های پدافندی رفع آلودگی‌های هسته‌ای در محیط‌زیست کشاورزی

طیف گسترده‌ای از اقدامات وجود دارند که می‌توانند از انتقال مواد پرتوزا به انسان از طریق زنجیرهٔ غذایی جلوگیری کنند. اقدامات متقابل از نظر کارایی و اثربخشی، اقتصادی و اثرات محیط زیستی و اجتماعی دارای پیامدهای مختلفی هستند. برخی از اقدامات متقابل دارای قابلیت اجرایی بالایی هستند، ولی برخی دیگر از قابلیت اجرایی کمتری برخوردار هستند. در این قسمت تأکید بر اقدامات متقابلی است که دارای قابلیت اجرایی بالا بوده و از مصرف مواد غذایی آلوده توسط مصرف‌کننده پیشگیری می‌کنند [۱].

باید توجه داشت که اجرای اقدامات رفع آلودگی در بخش کشاورزی محدودیت‌های جدی‌ای را در آزادی اختیارات کشاورزان دررابطه‌با حیوانات و زمین‌هایشان ایجاد می‌کند. این موضوع را باید در نظر داشت که مزرعه و زمین کشاورزی کل زندگی و دارایی یک کشاورز است، بنابراین ضمن انجام اقدامات متقابل برای کاهش و یا رفع آلودگی‌ها باید ملاحظات اخلاقی و اجتماعی را نیز به‌طورجدی مدنظر قرارداد. این نکته بسیار حائز اهمیّت است که در این موقعیت‌ها، کشاورزان برای حفظ رفاه حیوان خود مضطرب خواهند بود، بنابراین اقدامات متقابل برای رفع آلودگی محیط‌زیست باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که علاوه بر داشتن قابلیت اجرایی، از طرف مردم جامعه نیز قابل‌پذیرش باشند [۸].

ازآنجایی‌که ممکن است انواع مختلفی از مواد غذایی در یک منطقهٔ آلوده شده تولید شوند، لذا استراتژی‌های بکار گرفته شده باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند تا بتوان در کوتاه‌ترین زمان، از بیشترین حجم آلودگی جلوگیری کرد [۸ و ۹]. ممکن است اقدامات متقابل مؤثر برای کاهش جذب یک ماده پرتوزا توسط گیاهان موجب افزایش تحرک و جذب ماده پرتوزای دیگری شود، در نتیجه قبل از تصمیم‌گیری در مورد استراتژی مدیریت زمین‌های کشاورزی باید چنین عواملی در نظر گرفته شوند. هر چند می‌توان توصیه‌های عمومی‌ای را برای کاهش آلودگی‌های هسته‌ای ارائه کرد، امّا ارزیابی محل‌های خاص برای به‌کارگیری موارد پیشنهادی همیشه لازم و ضروری است [۱۰]. عوامل مختلفی وجود دارند که بر انتخاب استراتژی اقدام متقابل اثر می‌گذارند که این فاکتورها شامل موارد زیر هستند: ۱- دوز کلی قابل دفع، ۲- هزینه‌های مالی، ۳- امکان‌سنجی فنی موردنیاز (مانند، ماشین‌آلات و پرسنل)، ۴- قانون‌های محدودکننده، به‌عنوان‌مثال، حداکثر غلظت مجاز رادیونوکلئید موجود در مواد غذایی برای خریدوفروش، ۵- اثرات محیط زیستی، ۶- تأثیرات و مقبولیت اجتماعی [۸].

۵-۱- روش‌های پیشگیری از آلودگی محصولات کشاورزی قبل و در حین بارش مواد پرتوزا

اقداماتی که در زمان‌های اولیهٔ بعد از حادثه و در کوتاه‌مدت امکان اجرای آن‌ها وجود داشته باشد، محدود هستند و به دسترسی اطّلاعات دررابطه‌با ماهیّت و وسعت حادثه وابسته هستند. در فاز اولیهٔ قبل از رسوب و بعد از انتشار مواد پرتوزا، احتمالاً اطّلاعات کمی دربارهٔ میزان و ترکیب باران رادیواکتیو و همچنین نرخ بارش آنها وجود خواهد داشت. بااین‌حال، ممکن است به‌کارگیری اقدامات متقابل مناسب در این مرحله، در پیشگیری یا کاهش مشکلات بلندمدت بعد از حادثه مؤثر باشد و باید به طور شایسته‌ای موردتوجه قرار گیرد. هدف اصلی پاسخ در برابر حادثه در زمان قبل از ریزش مواد پرتوزا، جلوگیری از آلودگی محصولات کشاورزی توسط نشست مستقیم مواد است. بنابراین، برداشت محصولاتی که رسیده و آماده برای برداشت هستند، بخصوص برداشت آن دسته از محصولاتی که انتظار می‌رود تا مقادیر نسبتاً بالایی از آلودگی را دریافت کنند (مانند سبزیجات برگ‌دار و محصولات دانه‌ای (غلّات و حبوبات))، از اهمیّت خاصی برخوردار است [۱].

اقداماتی که در زیر بیان می‌شوند، به‌طورکلی از لحاظ عملیاتی آسان بوده و در برخی موارد ارزان هستند. چنین ملاحظاتی در این مرحله بسیار مهم است، زیرا اطمینان از اینکه مواد پرتوزا در چه مکانی و با چه وسعتی نشست خواهند کرد، امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، بر اساس تمام اطّلاعات موجود، تصمیم‌گیری‌های سریع، باید صورت بگیرد تا مشخص شود که در این مرحلهٔ خاص از حادثه، باید اقدامی خاص مورداستفاده قرار بگیرد یا بهتر است از اقدامی دیگر بهره گرفت [۱].

برقراری تعادل بین مزیت‌ها و معایب بالقوهٔ یک اقدام متقابل، در انتخاب آن برای به‌کارگیری، از اهمیّت خاصی برخوردار است،

از جمله آن که باید میزان پرتوگیری احتمالی افرادی کـه وظیفـهٔ اجرای یک اقدام خاص را برای رفع آلـودگی در یـک منطقـهٔ بـر عهده دارند، در نظر گرفته شود. همچنین باید هزینه‌های مختلف اثربخشی یک عملیات موردتوجه قرار بگیرد. از جمله، باید اثـرات بالقوهٔ مضر اجتماعی که ممکن است در اثر استفاده بـیش از حـد یک اقدام بروز یابد، خصوصاً هنگامی که اطّلاعات کمی دررابطه‌بـا اثرات آن اقدام در دسترس باشد، موردتوجه قرار گیرند [۱].

در زیـر روش‌هـای گونـاگون و برخـی اقـدامات کـاربردی و عملیاتی که به‌صورت عمومی می‌تـوان از آنهـا در جهـت کـاهش آلودگی‌های هسته‌ای دام‌ها و محصولات کشاورزی اسـتفاده کـرد بیان می‌شوند که میزان قابلیت اجرایی آنها به‌صـورت زیـر نشـان داده می‌شود:

A: دارای قابلیت اجرایی بالا اسـت؛ B: روشـی مـؤثر اسـت؛ ولـی ممکن است منابع موردنیاز در دسترس نباشد؛ C: از لحاظ فنی و تکنیکی مؤثر به نظر می‌رسد؛ ولـی نیازمنـد تجهیـزات تخصصـی است که ممکـن اسـت بـه‌آسـانی در دسـترس نباشـند؛ D: روش موردنظر توصیه نمی‌شود (به میزان کافی مورد آزمون قرار نگرفته یا ارزش اجرایی ندارد) [۱].

۵-۱-۱- جلوگیری از مصرف علوفه‌ها و مراتـع آلـوده توسط حیوانات

- قابلیت اجرایی: A

- اثربخشی: اثربخشی ایـن روش بـالا بـوده و بـا اسـتفادهٔ از ایـن تکنیک تا ۱۰۰ درصد امکان جلوگیری از آلـوده شـدن حیوانـات وجود دارد [۱].

- ملاحظـات: محصـور کـردن حیوانـات در مکـان‌هـای بسـته و جلوگیری از چرای آن‌هـا در مراتـع و علوفـه‌هـای آلـوده و تهیـهٔ علوفه‌های غیرآلوده برای آن‌ها، می‌تواند از آلودگی شیر، گوشت و سایر محصولات دامی تولیدی از این حیوانـات جلـوگیری نمایـد. برای این منظور، وجـود سـاختمان‌هـا و اسـطبل‌هـایی موردنیـاز هستند، امّا اگر چنین مکان‌هایی در دسـترس نباشـند، مـی‌تـوان حیوانات را در محیط‌هایی با نرده‌کشی محصور کرد تـا دسترسـی آن‌ها به مراتع آلوده را محـدود کـرده و آنهـا را بـا خـوراک‌هـای غیرآلوده تغذیه نمود. در صورت امکان، حیوانات نباید از آب باران و یا آب‌های سطحی استفاده کننـد. دسترسـی بـه خـوراک‌هـای غیرآلودهٔ ذخیره شده، باتوجه‌به فصل سال متفاوت است و ممکـن است فقط به دورهٔ قبـل از زمـان معمـول بـرای برداشـت علوفـه محدود شود. اگر نیاز است تا حیوانات از مراتع خارج شـوند، بایـد به پرتوگیری افرادی که می‌خواهند حیوانـات را از منطقـهٔ آلـوده خارج کنند، توجه شود. این اقـدام بـه‌عنـوان یـک اقـدام متقابـل کوتاه‌مدت، به‌ویژه زمانی که سطح بـالایی از یُـد-۱۳۱ در منطقـه وجود داشته باشـد، قابـل اجراسـت و مـی‌توانـد میـزان دریافـت دوزهای تابشـی سـاطع شـده ناشـی از یُـد-۱۳۱ را توسـط غـدهٔ تیروئید دام‌ها کاهش دهد. همچنـین مـی‌تـوان از ایـن اقـدام بـه عنوان یک اقدام متقابل میان‌مدت یا دراز مدت نیز اسـتفاده کـرد [۱].

۵-۱-۲- جلوگیری از آلـودگی مسـتقیم محصـولات کشاورزی

الف: پوشاندن انبار مواد خوراکی بدون پوشش و منابع آب روباز با ورق‌ها و پوشش‌های ضد آب

- قابلیت اجرایی: A

- اثربخشی: ۱۰۰ درصد

- ملاحظـات: پوشـاندن سـطح مـواد خـوراکی بـا پوشـش‌هـای پلاستیکی برای جلـوگیری از آلـودگی مسـتقیم آن‌هـا از طریـق ممانعت از نشست و رسوب مواد پرتوزا بر روی آنهـا مـؤثر بـوده و برای مناطقی که دسترسی به پوشش مناسب برای عموم امکـان-پذیر باشد، امری نسبتاً آسان است. این روش برای رسوب مرطوب بیشتر می‌تواند مؤثر باشد، زیرا در رسوب مرطوب علاوه بر سـطح مواد، مواد پرتوزا می‌توانند به لایه‌های پائین‌تر مواد خوراکی انبـار شده‌ای که بدون پوشش هستند، نیز نفوذ نمایند [۱].

ب- برداشت محصولات رسیده قبل از آلودگی آن‌ها

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: ۱۰۰ درصد

- ملاحظات: با برداشت محصولات کشاورزی رسیده که در سـطح زمین وجود دارند، می‌توان از آلودگی آنها با مواد پرتوزا جلوگیری کرد. این فرایند باید سریع و در طی مدت‌زمان کوتاه انجام شـود، بنابراین ممکن است از لحاظ نیروی کار، تجهیزات برداشت و فضا برای ذخیره‌سازی محدودیت‌هایی وجود داشـته باشـد. در حالـت ایده‌آل، پاسخ باید بر اساس توجه به جلوگیری از انتقال دوزهـای تابشی باشد، ولی در عمل، احتمـالاً کشـاورزان بـرای محصـولات باارزش، اولویت بیشتری قائل می‌شوند [۱].

ج- پوشاندن مناطق کشت شده با پوشش‌های ضد آب

- قابلیت اجرایی: B

- اثربخشی: ۱۰۰ درصد

- ملاحظات: پوشاندن نواحی وسیع از زمین‌های کشـت شـده بـا پوشش‌های پلاستیکی یا هر پوشش دیگر از لحـاظ اقتصـادی پـر هزینه می‌باشد و فقط باید برای محصولات دارای ارزش اقتصادی بالا مانند برخی از سبزیجات، میوه‌ها و علوفه‌هـا موردتوجـه قـرار بگیرد. ممکن است دراین‌رابطه دسترسی به پوشش‌هـای مناسـب برای پوشاندن زمین، اجرای این اقدام را با محدودیت مواجه نماید و همچنین ممکن است پوشـاندن روی محصـولات کشـاورزی بـا پوشش‌های ضدآب برای این محصولات، به‌ویـژه در هـوای گـرم، اثرات مضر و مخربی را به دنبال داشته باشـد و سـبب سـوختگی

محصولات شود. علاوه بر این، رفع آلودگی و دفع این ورق‌های پوششی نیز در مراحل بعدی باید در نظر گرفته شود [۱].

۵-۲- رفع آلودگی محصولات کشاورزی در هفتهٔ اوّل بعد از نشست مواد پرتوزا

ازآنجایی‌که میزان تأثیرگذاری اقدامات انجام شده برای رفع آلودگی محصولات غذایی بعد از حادثه چرنوبیل و فوکوشیما مورد ارزیابی قرار گرفته است، بنابراین می‌توانند اُلگوهای مناسبی را برای انتخاب روش‌های کارآمد رفع آلودگی در مراحل اولیه و دوران بلندمدت بعد از حادثه ارائه کنند [۱].

در هفتهٔ اوّل بعد از حادثه چرنوبیل مهم‌ترین اقدامات انجام شده در جهت جلوگیری از مصرف شیرهای آلوده شده توسط مردم و کاهش غلظت یُد-۱۳۱ در شیر بوده است. برای رسیدن به این اهداف پیشنهادهایی ارائه شد که عبارتند از:

۱- بررسی میزان تشعشعات شیرهای جمع‌آوری شده در کارخانه‌های فرآوری شیر و حذف شیرهایی که میزان غلظت یُد-۱۳۱ در آنها بالاتر از سطح ایمنی برای سلامتی بوده است (۳۷۰۰ بکرل در لیتر).

۲- فرآوری شیرهای حذف شده (تبدیل شیر به فرآورده‌های انبارشدنی مانند کره، خامه و ...).

۳- حذف علوفه‌های مرتعی آلوده از جیرهٔ حیوانات و تغییر روش تغذیه از مراتع به محیط‌های مسقف و تغذیه با خوراک‌های غیر آلوده [۱۱].

انجام این قبیل اقدامات رفع آلودگی، بیشتر برای شیرهای جمع‌آوری شده امکان‌پذیر می‌باشد. مطلب مهم و قابل‌توجه دراین‌رابطه این است که در چنین موقعیت‌هایی بیشتر اقدامات منحصر به همکاری با کارخانه‌های پیشرفتهٔ جمع‌آوری شیر و یا مقامات محلی است و سامانه‌های کشاورزی در جمعیت‌های روستایی از این اقدامات بی‌بهره می‌مانند. در نتیجه غالباً استفاده از روش‌های رفع آلودگی در مناطق روستایی به تعویق می‌اُفتد و بنابراین اثر اقدامات متقابل رفع آلودگی در برخی مناطق کمتر مشاهده می‌شود. این امر منجر می‌شود تا در همان روزهای اوّل بعد از حادثه، یُد زیادی توسط شیر جذب شود و در نتیجه تعداد زیادی از مردم ساکن در مناطق آلوده شده دچار مشکلات تیروئیدی شوند. این موضوع دلیل اصلی سرطان تیروئید در میان جمعیت‌های آسیب‌دیده بعد از حادثه چرنوبیل بوده است [۱۱].

تغذیه حیوانات با علوفهٔ تمیز در کاهش محتوای سزیم-۱۳۷ در گاوها بسیار مؤثر بوده است و سبب شد تا سطح سزیم-۱۳۷ در گاوها در طی چند ماه اول بعد از حادثه چرنوبیل در سطوح قابل قبولی باقی بماند. در مناطقی که به شدت آلوده شده بودند، نگهداری گاوهای شیری ممنوع شد. برای کاهش سطح آلودگی در محصولات کشاورزی تأخیر و به عقب انداختن زمان برداشت علوفه و محصولات کشاورزی روش مؤثری بوده است [۱۱]. نکته مهم این است که در هر مرحله از تولید، ذخیره‌سازی و فرآوری خوراک، باید سطح آلودگی محصولات به دقت مورد بررسی قرار بگیرد. سایر روش‌هایی که در ماه‌های اوّل بعد از حادثه چرنوبیل برای کاهش جذب سزیم-۱۳۷ توسط محصولات کشاورزی بکار گرفته شده‌اند شامل موارد زیر هستند:

۱- ممنوعیت کشتار گاوها در مناطقی که سطح رسوب سزیم-۱۳۷ بیش از ۵۵۵ (kBq/m^2) بوده است. در این مناطق سعی شد تا حیوانات تا ۴۵ روز قبل از کشتار با خوراک‌های نسبتاً غیرآلوده و تمیز تغذیه شوند.

۲- به حداقل رساندن قرار گرفتن در معرض تابش‌های خارجی مواد پرتوزا و کاهش تشکیل گرد و غبارهای آلوده از طریق حذف برخی روش‌های معمول در تولید محصولات کشاورزی.

۳- محدودیت استفاده از کودهای حیوانی آلوده برای کوددهی زمین‌های کشاورزی.

۴- آماده‌سازی سیلو از ذرت به جای یونجه (جذب مواد پرتوزا در ذرت علوفه‌ای کمتر از گیاهان علفی است).

۵- محدودیت مصرف شیرهای تولید شده توسط دامداران سنتی و خصوصی در سامانه‌های غیر قابل کنترل.

۶- اجباری نمودن بررسی رادیولوژیک محصولات کشاورزی.

۷- اجباری نمودن فرآوری شیر [۱۱].

رادیونوکلئیدهای دارای نیمهٔ عمر فیزیکی کوتاه، فقط مشکلات گذرا و ناپایدار ایجاد می‌کنند. مهم‌ترین مثال، انتقال سریع یُد-۱۳۱ به شیر می‌باشد. برای بسیاری از رادیونوکلئیدها و گیاهان، بیشتر رادیواکتیویته بر روی سطح گیاهان ابقاء می‌شود و در اوّلین ماه پس از رسوب مواد پرتوزا از طریق فرآیندهای فرسایش در هوا، از بین می‌روند. علاوه بر این، غلظت مواد پرتوزا بر روی سطوح گیاهان، همراه با رشد آن‌ها رقیق می‌شود. علی‌رغم مقیاس زمانی کوتاه، اجرای اقدامات متقابل مؤثر و کارآمد در بسیاری از موقعیت‌ها امکانپذیر است. همچنین باید توجه داشت که در اثر بارش رادیواکتیو، معمولاً بیش از یک مادهٔ پرتوزا به سطح زمین می‌رسد و برخی از آنها دارای نیمه عمر طولانی‌تری هستند. بنابراین، اقدامات متقابلی که در این مرحله بکار گرفته می‌شوند، باید برای دفع طیف وسیعی از مواد پرتوزای مختلف کارآمد و مؤثر باشند. این قبیل اقدامات متقابل باید از لحاظ اجرایی و عملیاتی ساده و آسان باشند تا بتوانند توسط تعداد زیادی از کشاورزان، با کمی آموزش و با استفاده از منابع و ابزارهایی که به طور معمول در دسترس هستند، به اجرا درآیند [۱]. در زیر برخی از اقدامات متقابلی که می‌توان از آنها برای رفع آلودگی مواد پرتوزا در حوزهٔ کشاورزی در دوران اولیهٔ بعد از حادثه بهره گرفت، شرح داده می‌شوند.

۵-۲-۱- محصور کردن حیواناتی که به طور معمول در محیط آزاد چرا می‌کنند و فراهم کردن علوفه غیرآلوده برای آن‌ها

- قابلیت اجرایی: A

- اثربخشی: تا ۱۰۰ درصد

- ملاحظات: همانند آنچه که دررابطه‌با اقدامات متقابل در زمان کوتاه بیان شد، دسترسی به انبار و مواد خوراکی غیرآلوده می‌تواند بیشترین محدودیت را برای عملی‌شدن این اقدام در یک دورهٔ چندهفته‌ای، ایجاد نماید. ممنوعیت چرا در مراتع باید تنها زمانی لغو شود که اطّلاعات دقیقی دررابطه‌با ماهیّت و میزان رسوب رادیونوکلئیدها در مرتع به‌دست‌آمده باشد تا نشان دهد که سطوح باقی‌ماندهٔ مواد پرتوزا در مرتع به‌اندازه‌ای است که در صورت چریدن حیوانات در آن مرتع، منجر به تولید شیر حاوی غلظت‌های پائین مواد پرتوزا می‌شود، به‌گونه‌ای که سلامت مصرف‌کننده را تهدید نکند [۱].

۵-۲-۲- برداشت محصولات کشاورزی یا علوفه‌ها برای دفع یا ذخیره

- قابلیت اجرایی: A/B

- روش: برداشت محصولات کشاورزی و علوفه‌های مرتعی در کوتاه‌ترین زمان بعد از نشست مواد پرتوزا، برای دفع یا ذخیرهٔ آنها، ممکن است شرایطی را برای فروپاشی فیزیکی رادیونوکلئیدهای دارای نیمه‌عمر فیزیکی کوتاه‌مدت (یُد-۱۳۱) فراهم نماید. بسته به سطوح آلودگی، ممکن است محصولات برداشت شده با افزودن مواد شیمیایی جاذب مختلف به آنها و به منظور جلوگیری از جذب رادیونوکلئیدها در دستگاه گوارش حیوان برای تغذیه دام و یا به همان صورت برای تغذیه انواع مناسبی از حیوانات (مانند حیوانات پرواری که در کوتاه مدت قصد کشتار آنها وجود ندارد) استفاده شوند. همچنین محصولات کشاورزی برداشت شده را می‌توان با انجام فرآوری‌های مناسب بر روی آنها، رفع آلودگی نمود. علاوه بر این، ممکن است از دانه‌های آلوده برای تولید الکل استفاده شود یا در برخی موارد به عنوان بذر ذخیره شوند [۱].

- اثربخشی: در این مورد، عامل اصلی در تعیین بهره‌وری، فاصلهٔ زمانی بین زمان نشست مواد پرتوزا و برداشت محصولات می‌باشد. علاوه بر این، کارایی حذف رادیواکتیویته از محیط‌زیست، به نسبتی از آن که توسط پوشش گیاهی جلوگیری شود و میزانی که در اثر فرایندهای فرسایش در هوا از بین می‌رود، بستگی دارد. ممانعت اوّلیه از رسوب مواد پرتوزا توسط پوشش گیاهی، به عواملی مانند میزان زیست‌تودهٔ موجود در واحد سطح، مساحت کلّی پوشیده شده با پوشش‌های گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی شاخ‌وبرگ گیاهان بستگی دارد. در ارتباط با محصولات کشاورزی، حدود ۵۰-۲۵ درصد آلودگی‌های نشست کرده را می‌توان اغلب با برداشت پوشش گیاهی از روی سطح زمین حذف نمود، امّا برای زمین‌های دارای پوشش گیاهی متراکم، این مقدار می‌تواند تا به ۸۰ درصد نیز برسد. میزان اثربخشی این روش، بستگی به آن دارد که از مواد برداشته شده برای چه منظوری استفاده شود [۱].

- ملاحظات: با حذف مستقیم پوشش‌های گیاهی می‌توان در نتیجهٔ هوازدگی مواد پرتوزا از روی سطح گیاهان، از آلودگی بیشتر زمین جلوگیری کرد و مانع از جابه‌جایی مواد پرتوزا از روی برگ گیاهان به ریشهٔ آن‌ها شد. همچنین برداشت و دفع گیاهان مرتعی میزان مصرف مواد پرتوزا توسط دام‌های چراکننده در مراتع را کاهش می‌دهد. درهرحال، حذف گیاهان مرتعی زمانی می‌تواند موردتوجه قرار بگیرد که خوراک‌های جایگزین در دسترس باشند. برای اجرای این تکنیک، دسترسی به نیروی کار می‌تواند عامل محدودکننده به‌حساب آید [۱].

اگر پوشش‌های گیاهی قبل از آن که مواد پرتوزای رسوب یافته از روی گیاهان حذف شوند، برداشت گردند، می‌توان از رسیدن مقدار قابل‌توجه، امّا بسیار متغیر از نسبت کل مواد پرتوزای رسوب یافته به سطح زمین جلوگیری کرد. کارایی و میزان مزیت این تکنیک باتوجه‌به زمان و میزان رسوب، مرحلهٔ رشد گیاهان و نوع مصارف بعدی از محصولات برداشت شده، تغییر می‌کند. به‌عنوان‌مثال، نشست مواد پرتوزا درست قبل از زمان برنامه‌ریزی شده برای برداشت بر روی سطح علوفه‌هایی که خیلی بلند هستند، می‌تواند سبب تخریب پوشش گیاهی شود. معمولاً دفع این مواد از طریق دفن کردن انجام می‌شود، هر چند این روش تنها برای مواد پرتوزای دارای نیمه‌عمر فیزیکی کوتاه و یا حلالیت کم و یا در خاک‌هایی که تحرک مواد پرتوزا در آنها بسیار پائین و یا حتی صفر هستند و در مکان‌هایی که در آینده هیچ خطری برای جذب مواد پرتوزا از طریق ریشه در آنجا وجود ندارد، توصیه می‌شود. برای مثال، خاک‌های رُسی به طور خاصی در جلوگیری از تحرک سزیم مؤثر هستند، امّا خاک‌های زغال‌سنگی این‌گونه نبوده و بنابراین باید از دفن گیاهان آلوده در این نوع خاک‌ها پرهیز کرد. ازاین‌رو، دسترسی به یک مکان مناسب برای دفن پوشش‌های گیاهی آلوده، می‌تواند یک عامل محدودکننده برای اجرای آن باشد [۱].

علاوه بر این، واکنش مواد پرتوزای رسوب یافته بر روی سطح گیاهان برداشت شده و تابش دوزهای خارجی از جمله مشکلات بالقوه‌ای است که می‌تواند برای افرادی که وظیفهٔ حمل و انتقال پوشش‌های گیاهی آلوده برای دفن را برعهده دارند، مخاطره‌آمیز باشد و در این مورد باید اقدامات احتیاطی مناسبی به‌کارگیری شود [۱].

۵-۲-۳- تأخیر در برداشت علوفه‌ها یا محصولات کشاورزی

- قابلیت اجرایی: A (گاهی اوقات B)

- ملاحظات: اگر رسوب مواد پرتوزا درست قبل از زمان طبیعی برداشت اتفاق بیفتد، توصیه می‌شود تا به‌منظور کاهش آلودگی مواد پرتوزا در اثر فرایند هوازدگی و رقیق‌شدن آلودگی در اثر رشد گیاهان، زمان برداشت به تأخیر بیفتد. میزان اتلاف مواد پرتوزای رسوب یافته بر روی سطح گیاهان ممکن است حتی با استفاده از باران شبیه‌سازی شده یا آبیاری بارانی، برای شستن آلودگی‌ها، افزایش یابد. امّا درهرحال این عمل سبب آلوده‌شدن خاک شده و می‌تواند سبب بروز مشکلات وخیم‌تر در درازمدت شود. زمان برداشت محصولات باید بر اساس میزان مواد پرتوزای باقی‌مانده بر روی سطح گیاهان تعیین شود. این اقدام مخالف با مواردی است که در بخش قبلی اشاره شد. این تضاد ظاهری بر اهمیّت اطّلاعات مربوط به مقدار و ترکیب مواد پرتوزای رسوب یافته، تأکید دارد [۱].

۵-۲-۴- ممنوعیت شکار، ماهیگیری، جمع‌آوری قارچ و مصرف سبزیجات و آب‌های سطحی و آب باران

- قابلیت اجرایی: A

- ملاحظات: جانوران شکاری، ماهی‌ها، قارچ و سبزیجات می‌توانند به طور خاصی حاوی سطوح بالایی از برخی مواد پرتوزا باشند و در صورت فقدان اطّلاعات دررابطه‌با سطوح آلودگی‌ها، ممنوعیت می‌تواند یک اقدام کوتاه‌مدت مؤثر در جهت کاهش انتقال آلودگی‌ها به انسان باشد. این امر می‌تواند از لحاظ اجتماعی مخرب و گران‌قیمت باشد، زیرا مصرف محصولاتی با ممنوعیت مواجه می‌شود که می‌توانند از اجزاء مهم رژیم غذایی مردم باشند. همچنین ممکن است دررابطه‌با ارائه منابع جایگزین برای آب و غذا مشکلات و محدودیت‌هایی وجود داشته باشد [۱]. درهرحال، باید دقت نمود که خصوصاً در دوران کوتاه‌مدت بعد از نشست مواد پرتوزا در محیط‌زیست کشاورزی، از آب‌های سطحی و آب باران جهت آبیاری مزارع گیاهان و سبزیجات استفاده نشود [۱۲].

۵-۳- رفع آلودگی محصولات کشاورزی در دوران میان و بلندمدت بعد از حادثه

هنگامی که آلودگی در سراسر بیوسفر توزیع می‌شود، دامنه اقدامات متقابل متناسب نیز همانند مقیاس زمانی اجرای آنها، افزایش می‌یابد. اقدامات متقابل قابل‌استفاده در راستای رفع آلودگی خاک به چند دسته طبقه‌بندی می‌شوند که شامل؛ حذف لایه‌ی بالایی آلوده خاک، شخم‌زدن، آهک زنی، استفاده از کودهای معدنی، بهسازی بنیادی یا سطحی مراتع و تغییر کاربری زمین یا محصول تولیدی در زمین، هستند [۸-۱۳]. ازاین‌رو، حذف و دفع یک‌لایهٔ خاک‌آلوده ساده بوده و انجام آن طولی نمی‌کشد؛ ولی دارای اثرات طولانی می‌باشد، درحالی‌که تغییر کاربری زمین از لحاظ تکنیکی، اقتصادی و اجتماعی پیچیده بوده و اجرای آن به زمان طولانی نیازمند می‌باشد [۱].

رویکرد کلّی مورداستفاده برای توسعهٔ اقدامات متقابل رفع آلودگی خاک این است که روش‌های بکار رفته باید با درنظرگرفتن توسعه پایدار و سازگاری با محیط‌زیست، اصول حفاظتی اضافه‌ای را برای روش‌های معمول کشاورزی تأمین نمایند. چنین رویکردی چندین هدف را مدنظر قرار می‌دهد: ۱- ارزان و توجیه‌پذیر نمودن اقدامات متقابل رفع آلودگی خاک؛ ۲- فراهم کردن امکان‌سنجی روش‌ها و استفادهٔ آنها توسط مردم؛ ۳- به حداقل رساندن اثرات محیط زیستی ثانویهٔ بلندمدت برای خاک‌ها و تنوع زیستی، بخصوص در اکوسیستم‌های نیمه طبیعی [۱].

ازآنجایی‌که غالباً بلافاصله پس از بروز یک حادثه هسته‌ای محصولات کشاورزی به طور مستقیم آلوده می‌شوند، بنابراین از چنین اقدامات متقابلی در دوران میان‌مدت و درازمدت پس از حادثه استفاده می‌شود. بیشتر تلاش‌های انجام شده در قالب اقدامات متقابل رفع یا کاهش آلودگی به رادیوسزیم و رادیو استرانسیوم اختصاص داده می‌شود، زیرا این مواد پرتوزا در میان‌مدت و درازمدت بیشترین نقش را در آلوده‌کردن محصولات کشاورزی ایفا می‌کنند و دارای بیشترین نیمه‌عمر رادیواکتیویته نیز هستند [۹].

۵-۳-۱- رفع آلودگی زمین از طریق فرآیندسازی مکانیکی خاک

بسیاری از رادیونوکلیئدهایی که در سطح خاک ذخیره می‌شوند، در چند سانتی‌متری روی خاک باقی می‌مانند و حرکت رو به پائین آنها در مقطع عمودی خاک آهسته می‌باشد. پس از گذشت بیش از ۳۰ سال از پایان آزمایشات سلاح‌های هسته‌ای در سطح زمین، مواد رادیواکتیو آزاد شده عمدتاً در ۱۵ سانتی‌متری بالای بیشتر انواع خاک، باقی‌مانده و ابقا شده بود. تحرک استرانسیوم در خاک تا حدودی بیشتر از سزیم می‌باشد، امّا پلوتونیوم و آمریسیوم در خاک تقریباً بی‌تحرک هستند. ابقا رادیونوکلئیدها در خاک هم دارای مزیت می‌باشد و هم می‌تواند در مواردی مضر باشد. معایب اصلی ابقا مواد پرتوزا در خاک عبارتند از؛ ۱- این مواد پرتوزا به طور بالقوه برای جذب توسط ریشهٔ گونه‌های گیاهی دارای ریشهٔ کم‌عمق مانند علوفه‌ها، در دسترس هستند. ۲- یک منبع نسبتاً محافظت نشده ساطع‌کنندهٔ دوزهای تابشی خارجی هستند. ۳- درصورتی‌که مجدداً به‌صورت

معلق در خاک درآیند، پتانسیل آن را دارند که انسان‌ها را در معرض تشعشعات هسته‌ای قرار دهند [۱].

سطح آلودگی در زمین‌های کشاورزی، بر اساس غلظت رادیوسزیم در لایهٔ شخم زده (۱۵-۰ سانتی‌متری)، به ۴ گروه تقسیم می‌شوند: ۱- زیر ۵۰۰۰ بکرل در کیلوگرم؛ ۲- ۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ بکرل در کیلوگرم؛ ۳- ۱۰۰۰۰-۲۵۰۰۰ بکرل در کیلوگرم؛ ۴- بالاتر از ۲۵۰۰۰ بکرل در هرکیلوگرم خاک (۱۵). برای خاک‌های دارای غلظت آلودگی بیش از ۵۰۰۰ (Bq/kg)، حذف و جمع‌آوری خاک‌های بالایی (۵-۰ سانتی‌متر) پیشنهاد می‌شود. وقتی غلظت آلودگی به بیش از ۲۵۰۰۰ (Bq/kg) برسد، اَعمالی چون پاشیدن رِزین برای سفت کردن و استحکام خاک‌های بالایی جهت جلوگیری از پراکندگی ذرات خاک‌های آلوده، قبل از جمع‌آوری و حذف این خاک‌ها امری ضروری است. برای خاک‌هایی که غلظت آلودگی آنها بین ۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ (Bq/kg) می‌باشد، جایگزین کردن خاک‌های بالایی با خاک‌های زیرسطحی از طریق برگرداندن خاک‌های سطحی با شخم‌زدن عمیق روشی است که می‌تواند به منظور جدا کردن خاک آلوده از ناحیهٔ ریشهٔ گیاهان مورد استفاده قرار بگیرد [۱۳].

در هرحال، مهم‌ترین مزیت حفظ مواد پرتوزا در سطوح بالایی خاک آن است که به دلیل تحرک کم آنها، می‌توان با حذف یک‌لایهٔ نسبتاً کم‌عمق از خاک بالایی، بخش عمده‌ای از مواد پرتوزای موجود در خاک را به طور مؤثری حذف نمود، در این بخش روش‌های مکانیکی حذف مواد پرتوزا از خاک، از جمله حذف خاک، شخم‌زدن یا جلوگیری از توزیع مجدد مواد پرتوزا در خاک موردبحث قرار می‌گیرد [۱].

۵-۳-۱-۱- شخم‌زدن خاک برای رقیق‌سازی مواد پرتوزا در لایهٔ سطحی کم عمق

شخم‌زدن موجب می‌شود تا خاک‌های آلودهٔ بالایی با خاک‌های غیرآلوده زیرسطحی مخلوط شوند [۱۵] و آلودگی‌های رادیواکتیویته‌ای را که قبلاً در لایهٔ بالایی خاک قرار گرفته بودند را رقیق می‌کند [۱۰]. اثربخشی شخم‌زدن از نظر کاهش انتقال مواد پرتوزا به گیاهان از کاهش ۲ برابری در شخم‌زنی کم‌عمق تا ۱۵ تا ۲۰ برابری برای روش شخم‌زدن سطحی و دفن کردن[1] متغیر می‌باشد و این اثرات تا سال‌های زیادی همچنان ادامه خواهد داشت [۸-۱۵].

۱- روش اوّل: شخم‌زدن معمولی

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: کارایی این روش به نوع و عمق خاک و نوع محصول زراعی و به‌ویژه عمق ریشه‌زنی گیاهان بستگی دارد.

- ملاحظات: ازآنجایی‌که شخم‌زدن معمولی زمین به عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری یکی از روش‌های معمول زراعی برای کشت محصولات کشاورزی می‌باشد، این تکنیک یک روش مفید و با ارزش در جهت رفع آلودگی زمین می‌باشد، زیرا در مناطق کشاورزی، گاوآهن و تراکتور به آسانی در دسترس هستند و در باروری خاک نیز هیچگونه کاهشی رخ نمی‌دهد. هر چند با اجرای این روش، ممکن است آلودگی در ۲۰-۳۰ سانتی‌متری عمق زمین همچنان باقی بماند، ولی غلظت آلودگی کاهش می‌یابد. بنابراین هرچند ممکن است مواد پرتوزای باقی مانده، توسط بیشتر محصولات جذب شوند، امّا میزان مواد پرتوزای جذب شده کمتر از زمان قبل از شخم‌زدن خواهد بود. البته شخم‌زدن‌های بعدی می‌تواند مجدداً آلودگی را به سطح خاک برگرداند. گاو آهن‌ها، از قبیل انواع دیسک‌ها و خیش‌هایی که نمی‌توانند قطعه شیارهای ایجاد کرده در زمین را به حالت معکوس برگردانند، کمتر مؤثر خواهند بود. در جاهایی که گاوآهن‌ها توسط حیوانات کشیده می‌شوند، باید تماس افرادی که در حال کار کردن با این وسایل هستند با خاک‌های آلوده مورد توجه قرار بگیرد و بهتر است تا این افراد از چکمه‌هایی برای پوشاندن پاهای خود و ممانعت از تماس پاها با خاک‌های آلوده استفاده کنند [۱].

۲- روش دوم: شخم‌زدن و غرقاب کردن زمین

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: کارایی این روش برای رفع آلودگی به قابلیت پراکندگی خاک وابسته است. ازآنجایی‌که در این روش فقط ذرات ریز حذف می‌شوند، کارایی رفع آلودگی آن پایین‌تر از زمانی است که کل لایه خاک حذف می‌شوند، امّا در این روش مقدار خاک زائد کمتری تولید خواهد شد. علاوه بر این، در این روش حذف ذراتِ خاکِ معلق در آب دارای این مزیت است که کارایی رفع آلودگی در مزارع برنج پس از کشت کاهش نمی‌یابد [۱۴].

- ملاحظات: در این روش مزارع برنج به‌گونه‌ای ساخته می‌شوند که آب‌های سطحی سرریز نشوند و در نتیجه آب‌ها به‌صورت غرقاب در زمین باقی می‌مانند. قبل از نشا برنج، سطح خاک به‌واسطه آبیاری به‌صورت گل‌آلود در می‌آید. این روند منجر به پراکندگی ذرات خاک شده و ذرات ریزتر خاک بعد از بالا و پایین شدن در آب، تمایل دارند تا به‌صورت معلق درآیند. پس از آنکه ذرات درشت‌تر خاک رسوب یافتند، آب گل‌آلودِ دارای ذرات ریزتر خاک با غلظت بالاتر رادیوسزیم به بیرون پمپ می‌شوند و در نتیجه ذرات خاک دارای غلظت بالای رادیوسزیم به‌صورت انتخابی حذف خواهند شد. در یک زمین آزمایشی با استفاده از این روش، ۳۶ درصد رادیوسزیم از لایهٔ شخم‌زده شده با عمق ۱۵ سانتی‌متر حذف شدند [۱۴].

[1] skim & burial ploughing

۵-۳-۲- تغییر کاربری زمین

تغییر کاربری زمین، از جمله انتخاب محصول زراعی، می‌تواند به‌عنوان اقدامات متقابل میان‌مدت و یا طولانی‌مدت مؤثر برای جلوگیری از آلودگی محصولات زراعی مورداستفاده قرار بگیرد [۱]. تغییر کاربری زمین به‌عنوان یک اقدام متقابل، شامل تغییر و اصلاح اَعمال کشاورزی از قبیل تغییر محصولات تولیدی در زمین، از نظر رادیولوژیکی قابل‌قبول می‌باشد. تحقیقات در مورد تأثیر تغییر کاربری زمین در مناطق آلوده شده توسط حادثه چرنوبیل نشان داد که انتخاب گونه‌های دیگر از محصولات مشابه یا قابل‌مقایسه با محصول رایجی که در زمین در دوران قبل از آلودگی کشت می‌شد، غلظت فعالیّت مواد رادیواکتیو را به‌اندازه ۲-۴ فاکتور انتقال و با تغییر کشت غلات به‌جای سبزیجات تقریباً به اندازهٔ ۱۰ فاکتور انتقال کاهش داد. در مورد محصولاتی که برای تولید شکر یا روغن کشت می‌شوند، انتظار می‌رود که میزان آلودگی در محصول نهایی (روغن یا شکر) نسبت به محصول برداشت شده (دانه روغنی، نیشکر یا چغندرقند)، بیش از ۱۰ برابر کاهش یابد [۱۰].

گیاهان مختلف با چهار نوع اصلی از انواع کاربری زمین در ارتباط هستند. مراتع نیمه‌طبیعی که دارای علوفه‌های طبیعی هستند، مراتع کشت شده که معمولاً دارای علوفه‌های غیربومی هستند، زمین‌های کشاورزی که یا برای کاشت علوفهٔ سیلویی (غالباً ذرت) استفاده می‌شوند و یا برای تولید محصولات کشاورزی مختلف که معمولاً غلات، سیب‌زمینی و محصولات جالیزی هستند، استفاده می‌شوند. برخی از گیاهان رادیوسزیم بیشتری نسبت به سایر گیاهان برداشت می‌کنند که این تفاوت می‌تواند به فاکتورهای زیادی در ارتباط با خصوصیات خاک و گیاه وابسته باشد [۱۱].

تغییر کاربری زمین، تغییرات نسبتاً جزئی، مانند تغییر واریتهٔ محصولات زراعی یا تغییر گونهٔ حیوانات چراکننده تا تغییرات اساسی مانند تبدیل سامانه‌های کشاورزی و دامداری به جنگلداری را شامل می‌شود. در زیر به انواع مختلف روش‌های تغییر کاربری زمین در جهت کاهش انتقال آلودگی مواد پرتوزا به انسان، اشاره خواهد شد.

۱- انتخاب واریته‌های مناسبی از یک محصول زراعی که نسبت به واریته معمولی کشت شده در منطقه، سطوح کمتری از آلودگی‌های رادیونوکلئیدی در آنها تجمع می‌یابند.

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: اثربخشی این روش متغیر بوده، امّا می‌تواند ۴ تا ۵ برابر میزان تجمع مواد پرتوزا در محصولات زراعی را کاهش دهد [۱].

- ملاحظات: این روش دارای پیامدهای اجتماعی و اقتصادی بسیار کمی بوده، ولی می‌تواند به طور قابل‌توجهی سطح آلودگی‌های رادیواکتیویته در محصولات زراعی را کاهش دهد. در واقع، انتخاب واریتهٔ مناسب یک گیاه، یکی از مؤثرترین و درعین‌حال ساده و ارزان‌ترین روشی است که می‌تواند برای کاهش سطح آلودگی‌ها در محصولات کشاورزی استفاده شود [۱].

۲- جایگزین کردن محصولات کشاورزی قابل مقایسه با محصولات زراعی که به طور معمول کشت می‌شوند، ولی میزان تجمع مواد پرتوزا در آنها کمتر از محصولات زراعی معمول می‌باشد.

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: اثربخشی این تکنیک متغیر بوده، امّا می‌توان سطح آلودگی در محصولات کشاورزی را با استفاده از این روش تا ۳ برابر کاهش داد [۱].

- ملاحظات: استفاده از این روش در کشورهای جماهیر شوروی بعد از حادثهٔ چرنوبیل سبب شد تا سطح آلودگی رادیوسزیم در محصولات کشاورزی به طور قابل‌توجهی کاهش یابد. چنین جایگزینی‌های، برای مثال، انتخاب یک محصول غده‌ای به‌جای محصول دیگر، روشی ساده و مقرون‌به‌صرفه بوده و به‌راحتی قابل‌اجرا می‌باشد و جوامع کشاورزی را برای کشت و عملیات کشاورزی با اختلال و سردرگمی زیادی روبرو نمی‌کند [۱].

۳- کشت محصولاتی مانند چغندرقند و دانه‌های روغنی که خوراکی بوده و با انجام روش‌های فرآوری مختلف، میزان آلودگی رادیواکتیویته در آنها کاهش می‌یابد.

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: اثربخشی این تکنیک متغیر بوده ولی می‌توان میزان غلظت مواد پرتوزا در محصول نهایی فراوری شده را تا ۱۰ برابر کاهش داد [۱].

- ملاحظات: این تکنیک روشی بالقوه مؤثر بوده که سبب حفظ کاربری زمین برای تولید مواد غذایی می‌شود. اغلب فراوری‌ها و تخلیص سازی‌های صنعتی سبب حذف بسیاری از رادیونوکلئیدها از محصولات فراوری شده می‌شوند و قبل از آنکه محصول نهایی وارد زنجیرهٔ غذایی انسان شود، می‌توان با این روش‌ها مواد پرتوزا را از آنها جدا کرد. در مورداستفاده از ضایعات بسیار آلودهٔ حاصل از فراوری این محصولات، باید دقت کرد تا ایمنی حفظ شود. به‌عنوان‌مثال، ممکن است این مواد برای تغذیهٔ حیوانات نشخوارکننده نامناسب باشد [۱].

۴- انتخاب محصولاتی که سطوح کمتری از مواد پرتوزا در آنها تجمع می‌یابند.

- قابلیت اجرایی: A/B

- اثربخشی: اثربخشی این روش متغیر بوده ولی می‌توان با استفاده از این روش غلظت مواد پرتوزا در محصولات زراعی را تا ۸ برابر کاهش داد [۱].

- ملاحظات: میزان جذب مواد پرتوزا از خاک در بین گونه‌های مختلف گیاهی به طور قابل‌توجهی متفاوت است. همچنین توزیع مواد پرتوزا در بخش‌های خوراکی و غیرخوراکی گیاهان متفاوت است. بنابراین، کشت محصولاتی که از لحاظ گیاه‌شناسی تفاوت زیادی با محصولات زراعی معمول دارند، می‌تواند به طور قابل‌توجهی انتقال مواد پرتوزا به مصرف‌کننده‌ها را کاهش دهد. به‌عنوان‌مثال، غلات در مقایسه با سبزیجات برگ‌دار، تا ۵ برابر کمتر با مواد پرتوزا آلوده می‌شوند، زیرا جذب مواد پرتوزا توسط دانه‌ها کم است. بنابراین، می‌توان در زمین‌هایی که سبزیجات برگ‌دار با آلودگی بالا تولید می‌شوند، غلات کشت کرد. درهرحال، تغییر محصول زراعی به کشت غلات از عمده‌ترین تغییرات در کاربری زمین می‌باشد که می‌تواند پیامدهای اجتماعی و اقتصادی زیادی را به دنبال داشته باشد. میانگین ضریب انتقال مواد پرتوزا از خاک به گیاه برای گیاهان مختلف رشدیافته در یک نوع خاک یکسان به‌صورت زیر می‌باشد [۱].

سبزیجات برگ‌دار > گیاهان لگومینه > غده‌ها > علوفه‌ها > ریشه‌ها > غلات

سری دیگری از این‌گونه مقایسه بین گونه‌های گیاهی مختلف در ارتباط با میزان جذب رادیو استرانسیوم وجود دارد که به‌صورت زیر می‌باشد [۱]:

سبزیجات برگ‌دار > علوفه‌ها > دانه‌ها > گیاهان لگومینه > ریشه‌ها > غده‌ها > غلات

۵- توقف کاشت محصولات زراعی خوراکی و کشت محصولات کشاورزی غیرخوراکی قابل فرآوری مانند کتان، پنبه و دانه‌های روغنی، یا گیاهان زینتی

- قابلیت اجرایی: A/B

- ملاحظات: با استفاده از این روش، زمین همچنان برای کشت محصولات زراعی استفاده خواهد شد، ولی آن محصولات زراعی، خوراکی نیستند. محصولات زراعی تزیینی را می‌توان تنها در مقیاس‌های نسبتاً کوچک کشت کرد. وقتی مناطق وسیعی از زمین‌های کشاورزی آلوده شوند، کشت گیاهانی مانند کتان، پنبه یا دانه‌های روغنی ترجیح داده می‌شوند. قبل از پیشنهاد اجرای این تکنیک، باید اطمینان یافت که این محصولات غیرخوراکی سبب گسترش سطوح غیرقابل‌قبول تابش‌های پرتوزا نمی‌شوند و تقاضای مناسب برای فروش آنها در بازار وجود دارد. همچنین تجهیزات لازم برای فراوری محصولات تولیدی باید در دسترس باشد و باید بتوان مواد زائد تولیدی را که ممکن است با سطوح بالایی از مواد پرتوزا آلوده باشند، به‌راحتی و به‌صورت ایمن دفع کرد [۱].

۶- تغییر کاربری زمین از زراعت به جنگل

- قابلیت اجرایی: A/B

- ملاحظات: به‌طورکلی محصولات چوبی حدود ۱۰۰ برابر کمتر از محصولات خوراکی با مواد پرتوزا آلوده می‌شوند و برای برخی از برنامه‌های کاربردی، آلودگی بیشتر محصولات چوبی قابل قبول‌تر از محصولات خوراکی است. هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی بالقوه تبدیل زمین‌های کشاورزی یا سامانه پرورش دام به جنگل بالا می‌باشد. بنابراین باید توجه داشت که این تغییر زمانی اجرایی شود که زمین با سطوح بالایی از مواد پرتوزا آلوده شده باشد و استفاده بیشتر از آن برای کشت محصولات زراعی، حتّی با استفاده از اجرای اقدامات متقابل مناسب امکانپذیر نمی‌باشد [۱].

۵-۳-۳- استفاده از مواد شیمیایی و کودهای مختلف برای کاهش انتقال مواد پرتوزا از خاک به گیاه

ممکن است به‌منظور کاهش جذب و محدودکردن دوز مصرفی مواد پرتوزا توسط گیاهان در خاک‌های زراعی و مراتع از مواد شیمیایی کشاورزی استفاده شود. اثربخشی استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی به‌عنوان روشی برای کاهش آلودگی محصولات کشاورزی بر پایه دو نکته اساسی استوار است: ۱- افزایش سطح مواد مغذی آنالوگ پایدار (پتاسیم (k^+) برای سزیم (Cs^+) و کلسیم (Ca^{2+}) برای استرانسیوم (Sr^{2+})) در خاک و محلوک خاک بگونه‌ای که نسبت رادیونوکلئید به یون آنالوگ کاهش یابد؛ ۲- تثبیت رادیونوکلئید در فرم قابل دسترس یا کمتر در دسترس. اثر ویژهٔ این تغییرات تا حد زیادی به بافت خاک، محتوا و ترکیب مواد معدنی رُسی، مقدار مادهٔ آلی، ظرفیت بافری و اشباع بازی خاک بستگی دارد [۱۰].

الف- اقدامات متقابل برای رفع آلودگی همهٔ ترکیبات رادیونوکلئیدی

۱- افزودن آهک به خاک

- قابلیت اجرایی: A

- اثربخشی: اثربخشی این تکنیک بالا ولی باتوجه‌به اسیدیتهٔ اولیهٔ خاک متغیر می‌باشد، و با استفاده از آن انتقال استرانسیوم-۹۰ از خاک به گیاه تا ۱۰ برابر (به طور میانگین ۳-۲ برابر) و برای سزیم-۱۳۷ تا ۳ برابر کاهش می‌یابد [۱].

- ملاحظات: آهک زنی معمولاً برای خاک‌های معدنی اسیدی استفاده می‌شود (۶) و برای خاک‌هایی که محتوای کلسیم آنها کمتر از (meq)۱۰ در هر ۱۰۰ گرم خاک باشد، مفید خواهد بود. آهک‌زنی با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، جذب رادیوسزیم و رادیواسترانسیوم توسط گیاه را کاهش می‌دهد [۱]. از آنجایی که انتقال سزیم و استرانسیوم به گیاهان تحت تأثیر اسیدیته قرار می‌گیرد، استفاده از آهک برای نگه‌داشتن اسیدیته

محلول خاک در محدودهٔ خنثی، انتقال رادیوسزیم و رادیو استرانسیوم به گیاهان را کاهش می‌دهد [۱۱]. میزان استفاده از آهک در مناطق آلوده شده بعد از حادثه چرنوبیل، بسته به اسیدیته خاک، نوع خاک و نوع محصول زراعی متفاوت بوده است. بعد از حادثه چرنوبیل، آهک در هر ۵-۴ سال یکبار و معمولاً بین ۲-۱۰ تن در هر هکتار مورد استفاده قرار گرفت که به طور میانگین غلظت رادیونوکلئیدها در گیاهان را ۳-۱/۵ برابر کاهش داد. آهک‌زنی خاک‌های اسیدی در همهٔ حالات آلودگی گیاهان را کاهش می‌دهد، امّا بیشترین اثر آن زمانی می‌باشد که همزمان با افزودن کود به خاک مورد استفاده قرار بگیرد [۱۱]. بهره‌وری‌های گزارش شده برای کاهش انتقال مواد پرتوزا به گیاهان با استفاده از آهک زنی، به اندازه ۵-۰ فاکتور هستند. آهک‌دهی ممکن است انتقال سزیم به گیاه را به اندازهٔ ۲ فاکتور کاهش دهد [۱۰]. از لحاظ عملیاتی اجرای این روش معمولاً ارزان و از لحاظ اجرایی ساده می‌باشد [۱].

در خاک‌های حاوی مواد آلی که جذب Ca^{2+} در اولویت می‌باشد، این امر قابل‌تصور است، امّا بعید است که آهک بتواند رادیو استرانسیوم را از محل‌های تبادل جدا کند و دسترسی آن را افزایش دهد. آهک زنی زمانی که با افزودن پتاسیم در خاک همراه باشد، در ممانعت از جذب رادیوسزیم توسط ریشه بیشتر مؤثر واقع می‌شود. این امر، زمانی که در خاک‌های آلی به‌کارگیری شود، بیشتر مؤثر خواهد بود [۱].

۲- استفاده از ساپروپل

- قابلیت اجرایی: B

- اثربخشی: اثربخشی این روش بالا بوده و ضریب انتقال تا ۶ برابر برای سزیم و تا ۵ برابر برای استرانسیوم کاهش می‌یابد [۱].

- ملاحظات: ساپروپل از رسوبات کف دریاچه‌های طبیعی و اقیانوس‌ها سرچشمه می‌گیرد و متشکل از بقایای گیاهی تجزیه شده در شرایط بی‌هوازی می‌باشد. ساپروپل جذب سدیم و استرانسیوم توسط گیاهان را کاهش می‌دهد. در مکان‌هایی که این ماده در دسترس باشد، قیمت آن ارزان بوده و استفاده از آن آسان است و افزودن آن به خاک سبب افزایش غلظت مواد مغذی و عناصر کم‌مصرف در خاک شده، و در نتیجه سبب افزایش تولید محصولات زراعی می‌شود. بااین‌حال، حمل‌ونقل ساپروپل مرطوب برای مسافت‌های طولانی از لحاظ عملیاتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. اثربخشی استفاده از ساپروپل برای چندین سال در زمین‌های آلودهٔ ناشی از حادثهٔ چرنوبیل در کشورهای جماهیر شوروی، ثابت شده است. برای رادیوسزیم، استفادهٔ از ساپروپل هنگامی مؤثر است که در خاک با سطوح پایین پتاسیم تبادل‌پذیر استفاده شود. این ماده زمانی که در مقادیر بالا (بیشتر از ۵۰ تن در هکتار) استفاده شود، برای گیاهان مضر نمی‌باشد. هر چند این ماده شامل کلسیم می‌باشد، اگر از ساپروپل در اسیدیته کمتر از ۵ استفاده شود، باید همراه آن آهک نیز به خاک اضافه گردد [۱].

ب- اقدامات متقابل اختصاصی برای رفع آلودگی رادیوسزیم در گیاهان

۱- استفاده از کودهای پتاسیمی

- قابلیت اجرایی: B

- اثربخشی: اثربخشی این روش زمانی که در خاک‌های حاوی سطوح پایین پتاسیم تبادل‌پذیر استفاده شود و غلظت پتاسیم در محلول خاک کمتر از ۲۰μM باشد، بالا است و می‌تواند ضریب انتقال را تا ۵ برابر کاهش دهد [۱].

- ملاحظات: یکی از روش‌های بالقوه برای کاهش آلودگی محصولات مواد غذایی گیاهی، افزودن کود به خاک‌های زراعی برای کشت محصولات کشاورزی عنوان شده است. انتظار می‌رود که این روش در خاک با ظرفیت نگهداری پایین و خاک‌هایی که باروری آنها کاهش‌یافته است (به‌ویژه خاک با غلظت‌های پایین کلسیم و پتاسیم) بیشتر مؤثر واقع شود. در واقع، تمرکز بر روی ترکیب محلول خاک، روشی کارآمد را برای شناخت این قابلیت فراهم می‌کند [۲]. برای مثال، بیشترین اثر استفاده از این تکنیک در خاک‌هایی است که دارای سطوح پایین از پتاسیم قابل‌دسترس هستند و کودهای پتاسیمی تنها می‌توانند در خاک‌های دارای ذخیره پایین پتاسیم (<۱۰μM) و محلول خاک با غلظت پایین پتاسیم، برداشت سزیم را به طور مؤثری (<۲۰μM) کاهش دهند [۱۰].

پس بنابراین، استفاده از کودهای پتاسیمی از طریق کاهش نسبت سزیم به پتاسیم در محلول خاک، جذب رادیوسزیم توسط گیاهان را کاهش دهد. استفاده از کودهای پتاسیمی ارزان بوده و از لحاظ عملیاتی نیز نسبتاً آسان است. پتاسیم یک آنالوگ شیمیایی برای سزیم بوده و برای جذب توسط ریشهٔ گیاه با رادیوسزیم در رقابت می‌باشد. مقادیر بالای کودهای پتاسیمی می‌توانند سبب ممانعت از اتصال رادیوسزیم به سایت‌های تبادل یونی شده و بنابراین جذب رادیوسزیم توسط ریشهٔ گیاه افزایش می‌یابد. توصیه می‌شود بیش از ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، از کودهای پتاسیمی استفاده نشود [۱].

۲- استفاده از آلومینوسیلیکات‌ها

- قابلیت اجرایی: B/D

- اثربخشی: اثربخشی این روش محدود بوده و می‌تواند ضریب انتقال مواد پرتوزا را تا ۲ کاهش دهد [۱].

ملاحظات: آلومینوسیلیکات‌ها ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داده و بنابراین جذب سطحی رادیوسزیم در خاک را افزایش می‌دهند. درهرحال، این ماده نسبتاً گران بوده و حدود چند تُن در هکتار موردنیاز است و در همهٔ نواحی و کشورها در

دسترس نمی‌باشد [۱]. ممکن است افزودن آلومینوسیلیکات‌ها انتقال سزیم را بیش از ۲ تا ۱۰ فاکتور انتقال کاهش دهد [۱۰].

ج- اقدامات اختصاصی برای رفع آلودگی رادیو استرانسیوم در گیاهان

۱- استفاده از کودهای آلی مانند کودهای حیوانی

- قابلیت اجرایی: A

- اثربخشی: این روش می‌تواند تا ۵ برابر ضریب انتقال رادیواسترانسیوم به گیاهان را کاهش دهد.

- ملاحظات: کودهای آلی معمولاً ارزان بوده و کاربرد آنها در زمین آسان است و می‌توان آنها را به طور مؤثری جایگزین کودهای غیرآلی نمود و با افزودن آن به خاک، به علّت افزایش غلظت مواد مغذی و عناصر کم‌مصرف به خاک، سبب افزایش عملکرد تولیدی گیاهان زراعی خواهد شد. کودهای آلی می‌توانند به طور مؤثری میزان جذب استرانسیوم-۹۰ را در خاک‌های معدنی کاهش دهند، امّا باید توجه شود که استفاده از مواد آلی سبب افزایش جذب رادیوسزیم توسط ریشهٔ گیاهان می‌شود و بنابراین زمانی که زمین‌های کشاورزی هم با رادیواسترانسیوم و هم با رادیوسزیم آلوده شده باشد، استفاده از کودهای آلی توصیه نمی‌شود. همچنین قبل از استفاده از کودهای حیوانی در زمین، باید مطمئن بود که این کودها در اثر حادثهٔ هسته‌ای یکسان، با مواد پرتوزا آلوده نشده باشند [۱].

۲- استفاده از کودهای پتاسیمی محلول

- قابلیت اجرایی: A

- اثربخشی: این روش می‌تواند ضریب انتقال رادیو استرانسیوم به گیاهان را تا ۱۰ برابر کاهش دهد.

- ملاحظات: ازآنجایی‌که فسفات استرانسیوم نسبتاً محلول می‌باشد، استفاده از کودهای پتاسیمی می‌تواند از طریق ته‌نشینی، از قابلیت دسترسی فسفات استرانسیوم توسط گیاه بکاهد. درهرحال، استفاده از فسفات‌ها (یا سولفات‌ها و سیلیکات‌ها) می‌تواند دسترسی به ریزمغذی‌های ضروری را کاهش دهد، چرا که فسفات‌ها نیز دارای حلالیت پایین هستند [۱].

۳- استفاده از کودهای کلسیمی

- قابلیت اجرایی: A

- ملاحظات: به علّت شباهت‌های شیمیایی بین Ca^{2+} و Sr^{2+}، استفاده از کودهای کلسیمی نیز جذب استرانسیوم توسط گیاه را با کاهش نسبت Sr^{2+}/Ca^{2+} در محلول خاک، کاهش می‌دهد. بنابراین با فراهم‌کردن غلظت‌های پایینی از کلسیم تبادل‌پذیر با یک درصد اشباع بازی پایین (خاک $<10_{meq}Ca^{2+}/100g$) می‌توان به بالاترین کارایی دست‌یافت. امّا همیشه در خاک‌های دارای سطوح (خاک $<10_{meq}Ca^{2+}/100g$) از کلسیم تبادل‌پذیر مؤثر می‌باشد. این امر در مورد خاک‌های معدنی که در آن جذب Sr^{2+} سریع‌تر از Ca^{2+} انجام می‌شود، قابلیت اجرایی دارد [۱].

۶- راهبردهای پدافندی جهت کاهش آلودگی‌های هسته‌ای در محیط‌زیست کشاورزی

از جمله اقدامات پدافندی که می‌توان برای کاهش و یا رفع آلودگی‌های محیط زیستی بکار گرفت آموزش نیروهای امدادی مردمی و یا نظامی جهت اجرای اقدامات متقابل ارائه شده است. در راستای اجرای اقدامات رفع آلودگی‌های محیط زیستی می‌توان از ظرفیت‌های بسیج مردمی زیر نظر تیم‌های تخصصی با آموزش‌های لازم به‌منظور شناسایی، جمع‌آوری داده و کنترل خسارات ناشی از آسیب‌های هسته‌ای و جلوگیری از انتشار اثرات مخرب آن، به‌خوبی بهره گرفت. بر همین اساس، آموزش عمومی برای آحاد جامعه می‌تواند در کاهش خسارات بسیار مؤثر باشد.

ازاین‌رو، باتوجه‌به روش‌هایی که در بخش قبل ارائه شدند، می‌توان به‌منظور جهت‌دهی و هم‌افزایی فعالیت‌های گروه‌ها و هسته‌های فعال در مناطق بحران‌زده، راهبردهای پدافندی مختلفی را برای اجرایی‌شدن هر چه‌بهتر این روش‌ها طراحی و پیشنهاد کرد. این در حالی است که ممکن است یک روش خاص در دو یا چند راهبرد مختلف به طور مستقیم یا غیرمستقیم کارایی داشته باشد که در ذیل به آنها اشاره خواهد شد.

۶- ۱- رفع آلودگی خاک محیط آلوده با فرآیندهای استاندارد با مشارکت جمعی نیروهای مردمی در قالب همیاران بسیج تحت نظارت تیم‌های تخصصی تا زمان رفع آلودگی به میزان سطح استاندارد.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

- باتوجه‌به هوازدگی، واپاشی فیزیکی، انتقال رادیونوکلئیدها به ستون‌های پایین خاک و کاهش زیست‌فراهمی مواد پرتوزا در خاک انتظار می‌رود در انتقال مواد پرتوزا به گیاهان و حیوانات کاهش قابل‌توجهی به وجود آید
- رفع آلودگی زمین از طریق فرایندسازی مکانیکی خاک
- شخم‌زدن خاک برای رقیق‌سازی مواد پرتوزا در لایهٔ سطحی کم‌عمق
- حذف یک‌لایهٔ سطحی کم‌عمق از خاک‌آلوده
- استفاده از یک ماشین چمن‌زنی برای حذف یک‌لایهٔ کم‌عمق خاک
- تثبیت خاک‌های سطحی به‌منظور جلوگیری از احیاء مجدد آنها
- افزودن یک‌لایهٔ جاذب به خاک برای جلوگیری از مهاجرت ضایعات رادیواکتیویته

• رفع آلودگی به معنی برداشت خاک سطحی حداقل با عمق ۲ سانتیمتر به‌وسیله کارگران ساختمانی و تجهیزات شهرداری‌های محلی و پیمانکاران ساختمانی

• اصلاح شیمیایی خاک (آهک‌دهی، کودهای شیمیایی و ...) به‌منظور کاهش انتقال مواد پرتوزا به گیاهان جنگلی

• شخم‌زدن زمین بعد از بریدن درختان و قبل از درختکاری مجدد

۶- ۲- شناسایی تخصصی محیط آلوده گیاهی (جنگل‌ها، باغ‌ها، باغچه‌ها، مراتع، و...) به وسیله تیم‌های تخصصی و سنسورهای گیرنده و تشخیص ابعاد آلودگی به منظور اِعمال محدودیت‌های لازم در دسترسی افراد به محیط آلوده و در درجه دوم محیط مستعد تا زمان رفع آلودگی محیطی به میزان استاندارد.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• محدودیت استفاده از کودهای حیوانی آلوده برای کوددهی زمین‌های کشاورزی

• به‌حداقل‌رساندن قرارگرفتن در معرض تابش‌های خارجی مواد پرتوزا و کاهش تشکیل گردوغبارهای آلوده از طریق حذف برخی روش‌های معمول در تولید محصولات کشاورزی

• توقف کاشت محصولات زراعی خوراکی و کشت محصولات کشاورزی غیرخوراکی

• پرهیز از جمع‌آوری میوه‌های جنگلی دارای آلودگی بالا در محدودهٔ خارج از ۲۰ کیلومتری محل حادثه

۶-۳- کنترل کاشت، داشت و برداشت محصولات گیاهی و بهره‌برداری از محیط‌های کشاورزی به وسیله ناظرین آموزش دیده محلی تحت نظارت ستادهای بحران مستقر در مناطق تا زمان رفع آلودگی محیطی به میزان استاندارد برابر تشخیص مراجع ذیصلاح.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• کاشت دانه‌های خشک با حداقل حساسیت و پرهیز از مصرف مریستم‌های نوک ریشه گیاه مانند جوانه‌های گیاهی که دارای بیشترین حساسیت نسبت به پرتوهای یونیزان هستند

• برداشت محصولاتی که رسیده و آماده برای برداشت هستند، بخصوص برداشت آن دسته از محصولاتی که انتظار می‌رود تا مقادیر نسبتاً بالایی از آلودگی را دریافت کنند (مانند سبزیجات برگ‌دار و محصولات دانه‌ای (غلات و حبوبات))

• برداشت و دفع گیاهان و محصولات در سریع‌ترین زمان پس از آلودگی

• برداشت محصول قبل از ریزش و رسوب مواد پرتوزا

• پوشاندن زمین و محصولات کشاورزی برای محافظت در برابر رسوب قریب‌الوقوع مواد پرتوزا

• عدم استفاده از سبزیجات دارای برگ‌های سبز به مدت معین

• جایگزین‌کردن محصولات کشاورزی قابل‌مقایسه با محصولات زراعی که به طور معمول کشت می‌شوند، ولی میزان تجمع مواد پرتوزا در آنها کمتر از محصولات زراعی معمول می‌باشد

• انتخاب واریته‌های مناسبی از یک محصول زراعی که نسبت به واریته معمولی کشت شده در منطقه، سطوح کمتری از آلودگی‌های رادیونوکلئیدی در آنها تجمع می‌یابند

• کشت محصولاتی مانند چغندرقند و دانه‌های روغنی که خوراکی بوده و با انجام روش‌های فراوری مختلف، میزان آلودگی رادیواکتیویته در آنها کاهش می‌یابد

• توقف کاشت محصولات زراعی خوراکی و کشت محصولات کشاورزی غیرخوراکی

• استفاده از مواد شیمیایی و کودهای مختلف برای کاهش انتقال مواد پرتوزا از خاک به گیاه

• پرهیز از جمع‌آوری میوه‌های جنگلی دارای آلودگی بالا در محدودهٔ خارج از ۲۰ کیلومتری محل حادثه

۶-۴- رفع آلودگی‌های ناشی از آسیب‌های هسته‌ای در کوتاه‌ترین زمان ممکن (هفته اول آلودگی) در سطح منطقه محدود شده‌ی آلوده و در درجه دوم محیط مستعد، به وسیله تیم‌های متخصص ذیصلاح به همراه تیم‌های مردمی آموزش دیده همیار در چندین نوبت تا سطح کاهش آلودگی به میزان استاندارد و جلوگیری از انتشار اثرات به محیط‌های سالم و امن اطراف.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• رفع آلودگی محصولات کشاورزی در هفتهٔ اول بعد از نشست مواد پرتوزا

• پوشاندن زمین و محصولات کشاورزی برای محافظت در برابر رسوب قریب‌الوقوع مواد پرتوزا

• رفع آلودگی در دوران میان و بلندمدت بعد از حادثه در حوزهٔ کشاورزی

• اقدامات متقابل اختصاصی برای رفع آلودگی رادیوسزیم در گیاهان مانند استفاده از کودهای پتاسیمی یا استفاده از آلومینوسیلیکات‌ها در مورد محصولاتی مثل برنج، چای، سویا، و علوفه

• اقدامات اختصاصی برای رفع آلودگی رادیو استرانسیوم در گیاهان مانند استفاده از کودهای آلی مانند کودهای حیوانی و استفاده از کودهای پتاسیمی محلول و استفاده از کودهای کلسیمی

• رفع آلودگی زمین‌های کشاورزی با کشت محصولات کشاورزی و استفاده از باکتری‌ها

• رفع آلودگی مکانیکی (پوست کندن، شستشو و حذف برگ‌های بیرونی) میوه‌ها و سبزیجات تازه و دانه غلات

۶-۵- بسیج تیم‌های مردمی همیار و آموزش دیده زیر نظر کارشناسان مرتبط در زدودن سطوح آلوده به عمق لازم و جمع‌آوری موارد آلوده باقیمانده از بارش-ها و تشعشعات هسته‌ای در مناطق گیاهی مورد نظر و انتقال به نقاط جمع‌آوری مشخص به منظور کنترل محیط امن برای آینده منطقه.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• تشکیل انجمن‌ها، گروه‌ها و تیم‌های سازمان‌یافته با طی آموزش‌های فشرده و کوتاه‌مدت مناسب برای همیاری تخصصی و شرکت در سطوح راهبردی، عملیاتی و اجرایی فعالیت‌های همیاری

• استفاده از اهالی و پرسنل آموزش‌دیده برای هرس‌کردن و قطع سر شاخه‌ها با تجهیزات خاص مانند انواع اره‌های دستی و برقی و قیچی‌های باغبانی و همچنین ماشین‌آلات بالابر

• استفاده از تیم‌های همیاری تخصصی برای محدودکردن دسترسی افراد عادی و کارگران به جنگل‌های آلوده

• همیاری محیط‌بانان مردمی برای مراقبت و پیشگیری از آتش-سوزی در جنگل‌ها، خصوصاً در مناطقی که مواد پرتوزا به طور گسترده‌ای در آن مناطق رسوب کردند، به‌منظور جلوگیری از آلودگی ثانویهٔ محیط‌زیست

• کندن باغ‌های کوچک به عمق یک بیل توسط اهالی محلی و بسیج مردمی

• بسیج مردمی برای رفع آلودگی مکانیکی (پوست کندن، شستشو و حذف برگ‌های بیرونی) میوه‌ها و سبزیجات تازه و دانه غلات

• مدیریت مراتع با کمک بسیج مردمی و انجمن‌های مردم‌نهاد

۶-۶- استفاده از گونه‌های گیاهی با حساسیت کم در مقابل جذب تشعشعات مضر برای مدت کوتاه در محیط‌های پاکسازی شده به منظور سرسبز نمودن مناطق مذکور برای شادابی و ایجاد جو روانی سالم برای زندگی تا زمان عادی شدن شرایط برای احیای محیط گیاهی لازم در هر منطقه.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• برای گیاهان، گونه‌های چوبی بیشترین حساسیت را نسبت به پرتوهای یونیزان دارا می‌باشند. درخت کاج حساس‌ترین گونه گیاهی نسبت به پرتوهای یونیزان بر روی زمین است. بعد از آن به ترتیب این حساسیت در جنگل درختچه‌های همیشه‌سبز، جنگل‌های بارانی گرمسیری، توده‌های گیاهی روییده بر روی صخره‌ها و گونه‌های گیاهی روییده در زمین‌های زراعی متروکه به طور فزاینده‌ای کاهش می‌یابد

• گیاهان ساده و ابتدایی از قبیل خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها دارای کمترین حساسیت نسبت به پرتوهای یونیزان هستند

• در بین اجزای مختلف گیاه، دانه‌های خشک حداقل حساسیت و مریستم‌های نوک ریشه گیاه دارای بیشترین حساسیت نسبت به پرتوهای یونیزان هستند

• محصولات مختلف زراعی، خصوصاً سبزیجات دارای برگ‌های سبز با درجات مختلفی به مواد پرتوزا آلوده خواهند شد که میزان سطح آلودگی به میزان رسوب مواد پرتوزا بر سطح گیاه و مرحله رویشی گیاه وابسته می‌باشد. نشست و رسوب مستقیم مواد پرتوزا بر سطح گیاهان برای مدت حدود دو ماه، استفاده از آنها را دچار مشکل می‌کند

• به‌حداقل‌رساندن قرارگرفتن در معرض تابش‌های خارجی مواد پرتوزا و کاهش تشکیل گردوغبارهای آلوده از طریق حذف برخی روش‌های معمول در تولید محصولات کشاورزی

• انتخاب واریته‌های مناسبی از یک محصول زراعی که نسبت به واریته معمولی کشت شده در منطقه، سطوح کمتری از آلودگی‌های رادیونوکلئیدی در آنها تجمع می‌یابند

• کشت محصولاتی مانند چغندرقند و دانه‌های روغنی که خوراکی بوده و با انجام روش‌های فراوری مختلف، میزان آلودگی رادیواکتیویته در آنها کاهش می‌یابد

۶-۷- تغییر در تولید معمول محصولات کشاورزی و زراعی با رویکرد کم نمودن میزان جذب اثرات مخرب در محصولات با استفاده از اطلاعات متخصصین مربوطه در طول مدت معین به منظور استمرار امنیت غذایی ساکنین مناطق آسیب دیده

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• تولید محصولات با دانه‌های خشک با حداقل حساسیت

• محصولات مختلف زراعی، خصوصاً سبزیجات دارای برگ‌های سبز با درجات مختلفی به مواد پرتوزا آلوده خواهند شد که میزان سطح آلودگی به میزان رسوب مواد پرتوزا بر سطح گیاه و مرحله رویشی گیاه وابسته می‌باشد. نشست و رسوب مستقیم مواد پرتوزا بر سطح گیاهان برای مدت حدود دو ماه، استفاده از آنها را دچار مشکل می‌کند.

• جایگزین‌کردن محصولات کشاورزی قابل‌مقایسه با محصولات زراعی که به طور معمول کشت می‌شوند، ولی میزان تجمع مواد پرتوزا در آنها کمتر از محصولات زراعی معمول می‌باشد

• انتخاب واریته‌های مناسبی از یک محصول زراعی که نسبت به واریته معمولی کشت شده در منطقه، سطوح کمتری از آلودگی‌های رادیونوکلئیدی در آنها تجمع می‌یابند.

• کشت محصولاتی مانند چغندرقند و دانه‌های روغنی که خوراکی بوده و با انجام روش‌های فراوری مختلف، میزان آلودگی رادیواکتیویته در آنها کاهش یابد.

• توقف کاشت محصولات زراعی خوراکی و کشت محصولات کشاورزی غیرخوراکی

۶-۸- تاکید بر انجام فرآوری خاص محصولات کشاورزی پس از برداشت در پایان دوره‌ی محدودیت تحت نظارت مراجع ذیصلاح و صنایع مرتبط مطابق با استانداردهای لازم در مدت تعیین شده توسط تیم-های تخصصی.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• کشت محصولاتی مانند چغندرقند و دانه‌های روغنی که خوراکی بوده و با انجام روش‌های فراوری مختلف، میزان آلودگی رادیواکتیویته در آنها کاهش یابد

• فراوری محصولاتی مانند کتان، پنبه و دانه‌های روغنی، یا گیاهان زینتی

۶-۹- تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی به جنگل‌ها در طول مدت معین برای کاهش اثرات آلودگی و تقلیل محیط‌های مستعد و حساس و کوتاهی دوره رفع آلودگی محیطی با نظارت تیم‌های تخصصی تحت مدیریت یکپارچه کشوری.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• جایگزین‌کردن محصولات کشاورزی قابل‌مقایسه با محصولات زراعی که به طور معمول کشت می‌شوند، ولی میزان تجمع مواد پرتوزا در آنها کمتر از محصولات زراعی معمول می‌باشد

• کشت محصولاتی مانند چغندرقند و دانه‌های روغنی که خوراکی بوده و با انجام روش‌های فراوری مختلف، میزان آلودگی رادیواکتیویته در آنها کاهش یابد

• تغییر کاربری زمین از زراعت به جنگل

۶-۱۰- ایجاد و انجام برنامه‌های آموزشی و پرورشی برای محققان، کارمندان اداری، جمعیت‌های روستایی و عموم مردم توسط تیم‌های تخصصی ذیصلاح و کنترل عملکرد آنان تحت نظارت سازمان‌های ذیربط در محیط‌زیست به منظور کمک به ایجاد و توسعهٔ برنامه‌های اضطراری برای پاسخ به آلودگی‌های گستردهٔ رادیواکتیویته در محیط.

شیوه‌های اجرای راهبرد:

• تولید سند بالادستی جامع برای هدایت آموزش و تربیت نیروهای مردمی در زمان پیش از بحران

• تشکیل کارگاه‌های آموزشی کوتاه‌مدت در مناطق مستعد تهدیدات

• تشکیل بانک اطلاعاتی جامع از مدرسان و آموزشیاران

• تولید نشریات کاربردی و بولتن‌های آموزشی از دوره‌های مذکور

• نگارش طرح‌های عملیاتی زمان بحران به تفکیک اقدامات لازم برای اجرا و نصب نسخه‌ها در تمامی دهیاری‌ها، بخشداری‌ها، شهرداری‌ها، فرمانداری‌ها و استانداری‌ها و پایگاه‌های بحران

• ایجاد هسته‌های عملیاتی مردمی در بسیج هر منطقه جهت پاسخ‌گویی به نیازهای ضروری

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه مشخص شد که مواد پرتوزای مختلف رفتارهای متفاوتی را در محیط‌زیست از خود نشان می‌دهند. برخی از مواد پرتوزا مانند رادیوسزیم و رادیو استرانسیوم در محیط‌زیست متحرک هستند و به‌آسانی و تحت شرایط خاص محیط زیستی به مواد غذایی منتقل می‌شوند. همچنین عوامل مختلفی بر میزان انتقال مواد پرتوزا از طریق مسیرهای محیط زیستی اثر دارند. در مراحل اولیه‌ی بعد از حادثه، رسوب خشک مواد بر روی برگ گیاهان و بارش، مسیرهای اصلی آلودگی محیط‌زیست هستند. در دوران میان‌مدت و بلندمدت بعد از حادثه نیز، جذب مواد پرتوزا از طریق ریشه مهم‌ترین مسیر آلودگی گیاهان هستند. محتوای

مواد پرتوزا در گیاهان و حیوانات تا حد زیادی بر اساس تعامل بین مواد پرتوزا و ترکیبات مختلف خاک تعیین می‌شود، چرا که خاک مخزن اصلی سکونت طولانی‌مدت مواد پرتوزای رسوب‌کرده در اکوسیستم‌های زمینی است. این فرایند، زیست‌فراهمی مواد پرتوزا برای جذب در گیاهان و حیوانات و همچنین اثرات مهاجرت مواد پرتوزا به ستون‌های پایینی خاک را کنترل می‌کند. همچنین در این مطالعه مشخص شد که با شناخت مسیرهای انتقال مواد پرتوزا به خاک، گیاهان و محصولات کشاورزی، می‌توان راهکارهای پدافندی مختلفی را طراحی و پیشنهاد کرد که بتوان در کوتاه‌ترین زمان، از بیشترین حجم آلودگی جلوگیری نمایند. در واقع، اقدامات متقابل متفاوتی متناسب بافاصله زمانی از شروع حادثه وجود دارند که باتوجه‌به اینکه چقدر از زمان شروع حادثه هسته‌ای گذشته باشد، روش پیشگیری، رفع و یا کاهش آلودگی مواد پرتوزا در محیط‌زیست کشاورزی انتخاب و بکار گرفته می‌شوند.

۸- مراجع

[1] IAEA and FAO, "Guidelines for Agricultural Countermeasures Following an Accidental Release of Radionuclides," International Atomic Energy Agency, Vienna, 1994.

[2] F. Bréchignac, L. Moberg, and M. Suomela, "Long-term environmental behavior of radionuclides," IPSN-CEC Association Final Report, 2000.

[3] R. Miller, "Effects of Radiation on Plants," Stanford University, 2015.

[4] M. Kordi and M. Saadati, "Nuclear Defense and its Effect on Reducing Contamination of Farm Animals and Livestock Products, " Passive Defense, vol. 12(1), pp. 21-34, 2021. (In Persian). DOR:20.1001.1.20086849.1400.12.1.3.9.

[5] L.R. Anspaugh, "Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience, " No. IAEA-CN--141/CD, 2005.

[6] S. A. Geraskin, S. V. Fesenko, and, R. M. Alexakhin, "Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident," Environ. Int., vol. 34(6), pp. 880-897, 2008. DOI:10.1016/j.envint.2007.12.012.

[7] S. B. Bengtsson, "Interception and storage of wet deposited radionuclides in crops," Ph.D. Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2013.

[8] M. Brink, B. Lauritzen, and D. P. Directorate, "Agricultural countermeasures in the Nordic countries after a nuclear accident (No. NKS--51)," Nordisk Kernesikkerhedsforskning, 2001.

[9] A. O. Adeola, K. O. Iwuozor, K. G. Akpomie, K. A. Adegoke, K. O. Oyedotun, J. O. Ighalo, J. F. Amaku, C. Olisah, and J. Conradie, "Advances in the management of radioactive wastes and radionuclide contamination in environmental compartments: a review," Environ. Geochem. Health., vol. 45(6), pp. 2663-2689, 2023. DOI: 10.1007/s10653-022-01378-7.

[10] H. Vandenhove and C. Turcanu, "Agricultural land management options following large scale environmental contamination," IEAM., vol. 7(3), pp. 385-387, 2011. DOI:10.1002/ieam.234.

[11] S. V. Fesenko, R. M. Alexakhin, M. I. Balonov, I. M. Bogdevitch, B. J. Howard, V. A. Kashparov, N. I. Sanzharova, A. V. Panov, G. Voigt, and Y. M. Zhuchenka, "An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident, " Sci. Total Environ., vol. 383 (1), pp. 1-24, 2007. DOI:10.1016/j.scitotenv.2007.05.011.

[12] M. B. Adedokun, M. A. Aweda, P. P. Maleka, R. I. Obed, and A. Z. Ibitoye, "Evaluation of natural radionuclides and associated radiation hazard indices in soil and water from selected vegetable farmlands in Lagos," Nigeria. Environ. Forensics., vol. 23(3-4), pp. 301-313, 2022. DOI:10.1080/15275922.2020.1850557.

[13] M. Sato, K. Abe, H. Kikunaga, D. Takata, K. Tanoi, T. Ohtsuki, and Y. Muramatsu, "Decontamination effects of bark washing with a high-pressure washer on peach [Prunus persica (L.) Batsch] and Japanese persimmon (Diospyros kaki Thunb.) contaminated with radiocaesium during dormancy, " Hort. J., vol. 84(4), pp. 295-304, 2015. DOI:10.2503/hortj.MI-054.

[14] N. Yamaguchi, I. Taniyama, T. Kimura, K. Yoshioka, and M. Saito, "Contamination of agricultural products and soils with radiocesium derived from the accident at TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: monitoring, case studies and countermeasures," J. Soil Sci. Plant Nutr., vol. 62(3), pp. 303-314, 2016. DOI:10.1080/00380768.2016.1196119.

[15] K. Miyashita, "Minimizing the Contamination of Agricultural Environment Toward Food Safety: With Primary Focus on the Fukushima Nuclear Disaster," Food and Fertilizer Technology Center, 2012. doi:10.5555/20143264110.