

طب نظامی

بهار ۱۳۸۲، شماره ۵ (۱)

صفحات: ۴۷-۵۶

## آلودگی رادیواکتیو حاصل از حمله هسته‌ای در منابع گیاهی

عباس عزیزی B. Sc.

آدرس مکاتبه: دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مرکز تحقیقات علوم و فن آوری زیستی

گروه رادیوبیولوژی-تهران - ایران

### خلاصه

پس از یک حمله هسته‌ای یا حادثه مشابه آن، مواد رادیواکتیو در محیط پخش شده و باعث آلودگی می‌گردد. این آلودگی وارد هوا، آب، خاک و نیز گیاهان و جانوران می‌شود. انسان به‌عنوان مهم‌ترین جزء محیط هم از طریق محیط فیزیکی اطراف و هم از طریق منابع گیاهی و جانوری آلوده در معرض آلودگی رادیواکتیو پخش شده در محیط می‌باشد و تحت تأثیر سمیت شیمیایی و نیز سمیت تشعشعی این مواد قرار می‌گیرد.

در این میان گیاهان به‌عنوان منبع اصلی پایه غذایی انسان که به‌صورت مستقیم پردازش شده، و یا با واسطه مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند. بنابراین، بررسی آلودگی رادیواکتیو قابل جذب در محیط گیاهی، رادیونوکلئیدهای مهم جذبی، کمیت و کیفیت جذب آنها در گیاهان مختلف، پارامترهای مؤثر در جذب، تجمع رادیونوکلئیدی در گیاه، سرعت و نحوه انتقال آلودگی به جانوران، انتقال آلودگی به محصولات دامی، انتقال آلودگی به انسان به‌ویژه از طریق محصولات غذایی گیاهی، از جمله مواردی هستند که قابل توجه می‌باشند.

شناخت کمی و کیفی این موارد در مجموع، به مردم به‌طور اعم و به ارگان‌ها و سازمان‌های مسئول و تصمیم‌گیرنده به‌طور اخص، این توانایی را می‌دهد که در جریان یک جنگ هسته‌ای، استراتژی خود را در قبال منابع گیاهی مختلف که تأثیر زیادی در ابعاد مختلف زندگی انسان دارند، تعیین کنند و در کوتاه مدت و بلند مدت نحوه استفاده از این منابع را مشخص نمایند.

**واژه‌های کلیدی:** حمله هسته‌ای، رادیونوکلئید، آلودگی رادیواکتیو، آلودگی گیاهی

### مقدمه

زیست شامل: محیط فیزیکی و محیط بیولوژیک شده و بر آنها تأثیر می‌گذارند.

مراحل مختلفی در انتقال آلودگی رادیواکتیو درزنجیره

غذایی موجود در طبیعت وجود دارد که اهم آنها عبارتند از:

آلودگی رادیواکتیو تولید شده در جریان یک انفجار و یا حمله هسته‌ای، متشکل از رادیونوکلئیدهای مختلف با خواص فیزیکی و

شیمیایی متفاوت می‌باشد. این عناصر رادیونوکلئیدی وارد محیط

بیشتری نسبت به جذب از خاک دارد. ولی باید توجه داشت که مقدار استرانسیوم که با آلودگی مستقیم از برگ‌ها به گیاه منتقل می‌شود نیز زیاد نیست و از طرفی این عنصر در خود گیاه نیز تحرک زیادی ندارد، به‌ویژه حرکت آن از موضع آلودگی سطحی در جهت پایین قابل صرف‌نظر است.

در گیاهانی نظیر کلم و کاهو که قسمت‌های خوراکی با برگ‌های بیرونی محافظت می‌شود، آلودگی مستقیم استرانسیومی، با جدا کردن برگ‌های بیرونی به راحتی حذف می‌شود و بعد از آن، گیاه عاری از آلودگی خواهد بود. بنابراین شستشوی میوه و سبزیجات مؤثر است.

در مورد گیاهان ریشه‌ای نیز باید گفت که تقریباً به‌وسیلهٔ  $Sr^{90}$  حاصل از ترسیب مستقیم تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند و برای آنها آلودگی برگی مستقیم با  $Sr^{90}$ ، در مقایسه با آلودگی ریشه‌ای، قابل توجه نیست. در مراتع با محصول کم، به دلیل تماس گیاه با حجم بیشتری از آلودگی اهمیت نسبی بیشتری برای آن متصور است. استرانسیم رسیده به ریشهٔ گیاه هم از لیچینگ آلودگی برگی و هم ترسیب مستقیم بر روی ساقه و ریشه می‌تواند حاصل شود. به‌ویژه در مراتع دایمی، این عنصر برای دورهٔ قابل ملاحظه‌ای ممکن است در این بستر بماند و جذب از ریشهٔ گیاه انعکاسی از ترسیب حاصل از زمان‌های قبل باشد.

استرانسیوم ۹۰ از نظر رفتاری شبیه به کلسیم عمل می‌کند، پس تا حدودی در خاک و ساختمان گیاه و یا در غذاها جای کلسیم را می‌گیرد. به‌عنوان مثال نسبت  $Sr/Ca$  در کشور کانادا بر اثر حوادث هسته‌ای مولد  $Sr^{90}$ ، در غلات یک دوم تا یک سوم و در سبوس یک چهارم می‌باشد.

روش‌های چندی برای کاهش جذب استرانسیوم توسط ریشه گیاه ارائه شده است. نظیر استفاده از آهک، بارورکننده‌های خاص و بعضی از مواد آلی. این روش‌ها حداکثر تا ۵۰٪ جذب استرانسیوم را کاهش می‌دهند.

۱- جذب رادیونوکلئیدها توسط گیاهان به‌وسیلهٔ برگ یا ریشه و انتقال آنها از برگ و ریشه به میوه و یا در مورد غله و حبوبات به دانه  
۲- بازداری رادیونوکلئیدی در گیاه، که به فاکتورهای متفاوتی مربوط است

۳- انتقال رادیونوکلئیدها از گیاه و علوفه به حیوان و محصولات حیوانی

بنابراین انسان در چرخهٔ بیولوژیک، هم از طریق گیاهان و هم محصولات حیوانی آلوده می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. لذا، توجه به آلودگی گیاهان از نظر رادیواکتیویته و مکانیسم‌های جذب آن ضروری می‌نماید.

مقدار آلودگی رادیواکتیو در گیاهان و مواد غذایی مختلف با توجه به استعداد جذب آنها متفاوت است. رژیم غذایی مصرف شده، مقدار مصرف، محل تهیه، و راه‌های تهیهٔ غذا خواه گیاهی و خواه حیوانی در تأثیراتی که آلودگی گیاهی می‌تواند بر انسان بگذارد، دخالت دارند که باید مورد توجه قرار گیرند.

با توجه به این که هدف عمده از بررسی آلودگی رادیواکتیو در منابع گیاهی، تأثیر بر انسان می‌باشد، اهمیت مطالب فوق مشخص می‌شود [۱، ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۹، ۲۵].

## رادیونوکلئیدهای عمده در محیط گیاهی

پس از یک انفجار هسته‌ای، تعداد زیادی از رادیونوکلئیدهای تولید شده، در زمین و روی گیاهان رسوب می‌کنند و وارد گیاه و زنجیرهٔ غذایی وابسته به آن می‌شوند. عمده‌ترین آنها را می‌توان  $I^{131}$  و  $Sr^{90}$  و  $Cs^{137}$  ذکر کرد.

رادیونوکلئیدها وارد چرخه‌های مختلف محیطی شده و در آنها تأثیرات سوء رادیواکتیویته بر جای می‌گذارند ولی کمیت و کیفیت این تأثیرات متفاوت خواهد بود که همین تفاوت‌ها تعیین‌کنندهٔ اهمیت رادیونوکلئید مورد نظر می‌باشند.

## استرانسیوم ( $Sr^{90}$ )، یک آلایندهٔ مهم گیاهی

$Sr^{90}$  یکی از رادیونوکلئیدهای مصنوعی است که خاک و گیاهان را آلوده می‌کند. چون استرانسیوم در خاک نسبتاً غیرمتحرک است، ترسیب آن بر روی گیاه و آلودگی ناشی از آن برای گیاه اهمیت

محافظت شده رشد می‌کنند، دارای تجمع سزیمی بیشتری می‌باشند. در مورد این عنصر، آلودگی حاصل از ترسیب سطحی (Rate Dependent)، نسبت به نوع دیگر آلودگی یعنی تجمعی ریشه‌ای (cumulative-dependent)، ارجح می‌باشد.

بازداری سزیم و فاکتورهای از دست‌دهی منطقه‌ای آن در گیاهان، تقریباً مشابه استرانسیوم است. جذب از طریق ریشه گیاه، یکی از عوامل عمده ورود سزیم به گیاه می‌باشد. اگرچه ممکن است نسبت به استرانسیوم بازدهی کمتری داشته باشد. در مناطقی که درصد مواد آلی خاک، به‌ویژه در لایه سطحی آنها زیاد است. مانند مناطق قطبی و سرد. ممکن است جذب سزیم به‌وسیله ریشه گیاه مهم‌تر باشد زیرا بعد از ورود آن به خاک دسترسی به آن زیاد می‌شود. در مواردی نظیر گل‌سنگ‌ها، برگ‌ها و ریشه گیاه، نقش واحدی دارند و در واقع به یک صورت عمل می‌کنند.

سزیم، در مقایسه با استرانسیوم، قدرت حرکت بیشتری در گیاه دارد و به راحتی در داخل گیاه انتقال می‌یابد به طوری که جذب مستقیم سطحی منجر به آلودگی وسیعی در قسمت‌های دیگر می‌شود. حرکت سزیم ۱۳۷ از خاک تا گیاه ارتباط نزدیکی با pH خاک دارد. برای گروه‌های مختلف خاک که دارای pH های متفاوتی می‌باشند، ضرایب حرکت و انتقال برای دانه‌های کشاورزی عمده ۳ تا ۲۹ برابر تغییر می‌کند که با تغییر نوع دانه‌ها، این اختلاف به ۴۵ برابر می‌رسد. مقدار متوسط ضرایب انتقال سزیم ۱۳۷ در منطقه kief طی سال‌های ۸۹-۱۹۸۷، به شرح جدول ۱ می‌باشد

### ۱۳۱ ید

دیگر آلاینده گیاهی ید ۱۳۱ است نیمه عمر ید رادیواکتیو یعنی I131، کوتاه است (۸ روز) و به همین علت یک آلاینده چندان مهم محسوب نمی‌شود.

در واقع زمان تلاشی آن نسبت به مدت عمر و رشد گیاه، کوتاه است ولی به خاطر ضریب انتقال بالایی که دارد، دارای اهمیت می‌باشد.

اهمیت جانوری ید مربوط به این امر است که برای کار هورمون‌های تیروئید لازم است. خطر ید رادیواکتیو مربوط به چند مورد است:

در مبحث بازداری رادیونوکلئیدی، بازداری اولیه Sr90 در علفه مراتع ۳۰-۱۵٪ و به‌طور متوسط ۲۲٪ از ترسیب کل رادیونوکلئیدی بر واحد سطح، تخمین زده می‌شود.

فاکتور از دست‌دهی منطقه‌ای، برای حدود دوهفته، ۵۰٪ می‌باشد که بر اساس واحد سطح زمین بیان می‌شود. این فاکتور، بر اساس واحد وزن گیاه حدود ۹ روز است.

### سزیم ۱۳۷، یک آلاینده گیاهی دیگر

سزیم ۱۳۷ به صورت محکم، به خاک معدنی رسی که در دسترس گیاه قرار دارد، می‌چسبد. به همین دلیل جذب ریشه‌ای آن کم است، اما جذب برگ‌ها آن به خصوص وقتی که ریزش اتمی در جریان است، مهم می‌باشد. سزیم، همزاد (congener) پتاسیم می‌باشد. همان‌طور که استرانسیوم همزاد کلسیم است، اما برخلاف نسبت ثابت Sr/Ca، نسبت Cs/K ثابت نیست. جذب سزیم با میزان پتاسیم خاک نسبت عکس دارد. تجربه نشان داده است، انتقال سزیم ۱۳۷ از طریق جذب ریشه‌ای آنقدر کم است که می‌توان از آن صرفه نظر کرد. بنابراین ترسیب آن روی گیاه اهمیت بیشتری دارد و با توجه به این که روش مقابله با این نوع ترسیب و آلودگی چنانکه قبلاً گفته شد در شستشوی گیاه و یا پوست گرفتن میوه و دانه‌هایی مانند گندم می‌باشد، تا حدودی خطر آن را می‌توانیم کاهش دهیم.

این عنصر تمایل به تجمع در گونه‌هایی خاص از قارچ‌ها از جمله گونه‌های Edible دارد. غلظت آن در گیاهان آونددار گل‌دار، نسبت به انواع بدون گل و نهانزاد ۱۰٪ و یا کمتر دیده شده است.

گل‌سنگ‌ها به عنوان جزء اصلی و مهم بعضی اکوسیستم‌ها نظیر اکوسیستم‌های آلی، محل تجمع این عنصر محسوب می‌شوند. تفاوت زیادی که در جذب آن بین گونه‌های مختلف گل‌سنگ مشاهده می‌شود، عموماً مربوط به محل رشد آنها می‌باشد. گونه‌هایی که در برونزدهای سنگی و در محل‌هایی در معرض باد رشد می‌کنند، دارای بیشترین حجم سزیم ۱۳۷ می‌باشند.

گیاهانی که در قسمت‌های برآمده کوه (تیغه کوه) رشد می‌کنند (نظیر خزه و گل‌سنگ)، نسبت به آنها که در مناطق

تریتیم و کربن ۱۴ با توجه به ساختار شیمیایی DNA می‌توانند در آن نفوذ کرده و با آن ترکیب شوند و از این طریق، علاوه بر حضور در ساختار گیاه، تأثیرات ژنتیکی شدیدی روی آنها گذاشته و میزان جهش DNA را تسریع نمایند.

در مورد  $^{131}\text{I}$ ،  $^{90}\text{Sr}$  و  $^{137}\text{Cs}$ ، هر چند جذب گیاهی خوبی دارند ولی نه به صورت نفوذ در شبکه DNA بلکه با پرتو دهی که دارند، اثرات ژنتیکی ایجاد می‌کنند [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴].

### مکانیسم‌های جذب رادیونوکلئیدها توسط گیاه

گیاهان معمولاً با دو مکانیسم رادیونوکلئیدها را جذب می‌کنند:

#### ۱- جذب مستقیم گیاهی

مواد رادیواکتیو می‌توانند به وسیله ترسیب مستقیم از هوا، گیاهان را آلوده کنند و بعد از ترسیب سطحی، به صورت مستقیم یا متابولیکی، بر حیوانات علف‌خوار و انسان‌ها تأثیر بگذارند. این مواد وقتی روی زمین رسوب می‌کنند نیز می‌توانند علاوه بر جذب ریشه‌ای، گیاهان را با مکانیسم پاشیدن و پرتاب شدن از سطح زمین (Rain Splash) همچون ترشح سیلابی - آلوده کنند. ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر می‌توانند تا ارتفاع ۴۰ cm به وسیله اصابت قطرات باران، به بالا پرتاب شده و در سطح گیاه رسوب کنند. این مکانیسم در بعضی موارد مانند رادیواکتیو که نیمه‌عمر کمی دارد (۸ روز) و قبل از این که توسط گیاه جذب و تحلیل شود و

پاشی می‌کند که معمولاً مهم‌تر از مسیر خاکی است.

در آلودگی مستقیم دوفاز مطرح است. فاز اول هنگامی است که آلودگی جذب سطح می‌شود و فاز دوم موقعی است که آلودگی جذب بافت‌های گیاه می‌گردد که گاهی اوقات این دوفاز با یکدیگر مخلوط می‌شوند. در ترسیب مداوم (continuous) اثر کلی هر دو فاز دیده می‌شود. بر اساس این که دوفاز مخلوط بشوند یا نه اثر حاصل از آلودگی مستقیم در گیاه می‌تواند تشخیص داده شود یا نشود.

۱- مواردی که رسوبات دارای ید رادیواکتیو، روی مواد غذایی (برگ‌ها) نشسته باشند و مستقیماً خورده شده و مورد مصرف قرار گیرند  
 ۲- مواردی که این آلودگی بر روی گیاه بنشیند یا جذب گیاه شود و حیوان علف‌خوار از آن استفاده نماید و در محصولات حیوانی ظهور یابد

جدول ۱: Bq / kg محصول طبیعی بر  $\text{km}^2$  از خاک

درجه اختلاف	گروه خاک با pH های مختلف			نوع محصول
	pH ۶/۶ - ۷/۵	pH ۵/۶ - ۶/۵	pH ۴/۵ - ۵/۵	
-	-	-	-	-
۹	۰/۱	۰/۲	۰/۹	یونجه
۲۹	۰/۱	۰/۳	۰/۸-۲/۹	شیدر
۲۲	۰/۲	۰/۴	۱/۱-۴/۵	ماش
۲/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۵	نخود
۶	۰/۲	۰/۳	۰/۶	علف سبز
۱۰	۰/۰۵	۰/۲	۰/۵	گندم زمستانی
۶/۸	۰/۰۷	۰/۱	۰/۴	گندم سیاه زمستانی
۱۰	۰/۰۶	۰/۳	۰/۶	چغندر
-	۱۰	۸	۴۵	(درجه اختلاف)

حدوداً ۱۰٪ از ید ۱۳۱ موجود در خاک جذب گیاه می‌شود ولی به خاطر نیمه‌عمر کوتاه آن، محدودیت رادیولوژیکی معنی‌داری پیدا می‌کند و تصفیه آن از گیاه (تصفیه مجازی) سریع صورت می‌گیرد. میوه و سبزیجات، قابلیت زیادی برای جذب و تجمع این رادیونوکلئید دارند.

#### اورانیوم و عناصر اکتینید ترانس اورانیک

فهم رفتار اورانیوم، توریم و عناصر ترانس اورانیک اکتینیدی که به طور مصنوعی تولید می‌شوند، از این لحاظ مهم است که، نیمه عمر طولانی دارند و گسیل‌کننده آلفا می‌باشند. این عناصر در طبیعت وجود ندارند. معمولاً در منابع گیاهی جذب کمی دارند ولی به عنوان یک سری آلاینده رادیواکتیو گیاهی، هر چند با غلظت کم، قابل بررسی می‌باشند.

#### تأثیر تریتیم و کربن ۱۴ در گیاه

همه اکتیویته‌ای که در ابتدا بر روی گیاه رسوب می‌کند به شکلی باقی نمی‌ماند که توسط حیوانات خورده شود. براساس اندازه‌گیری‌های واقعی انجام شده، بعد از یک روز از ترسیب اولیه فقط ۱/۴ از آن روی گیاه باقی می‌ماند و بخش مهم آن به وسیله باد یا حرکاتی که دیگر جانوران به گیاه می‌دهند، از آن جدا می‌شوند. آب باران می‌تواند آلودگی روی گیاه را لیچینگ نماید که به وسیله این فرآیند و تشکیل محلول فقط بخش کوچکی از اکتیویته می‌تواند به سرعت جذب گیاه شود و بقیه شسته می‌شود. در هر حال، توانایی بخش‌های مختلف گیاه در نگهداری آلودگی ممکن است، متفاوت باشد.

### فاکتور گیراندازی در جذب مستقیم

فاکتور گیراندازی به صورت نسبت کل رسوب جذبی چه به صورت خشک و چه به صورت تر به وسیله biomass گیاهی منطقه تعریف شده و به شکل ذیل محاسبه می‌شود:

$$r = 1 - \exp(-u \cdot Yv)$$

که در آن:

ثابت جذب بر حسب  $kg / m^2$  وزن خشک گیاه  
 $=$  (بیومس منطقه‌ای)  $u$

$Yv$  = چگالی وزن خشک بیومس منطقه‌ای بر حسب  $kg/m^2$  از سطح خاک

بنابراین  $0 < r < 1$  تغییر می‌کند. این فاکتور به عنوان فاکتور جذب فرا زمینی (above ground interception) نیز معروف است. این ثابت جذب برای سبزیجات پر برگ مانند کلم نسبت به گیاهان کم برگ مثل گوجه‌فرنگی و پیاز بزرگتر است. چون محصولات گیاهی معمولاً به صورت تازه مصرف می‌شوند. برای اجتناب بیشتر از آلودگی، تنها باید میوه گیاهان گوجه‌ای، درختان میوه سیبی، درختان با میوه‌های مغزدار مثل بادام و پسته مصرف شود.

مقدار  $r$  بسته به شرایط مختلف متفاوت بوده و تغییر می‌کند، برای رسوب مرطوب  $r >$  برای رسوب خشک است.

این موضوع همچنین تابعی از رفتار مربوط به نوع عنصر نیز می‌باشد، مگر هنگامی که فاکتور زمان این دو را بتواند کاملاً از هم جدا کند. کیفیت فیزیکی ریزش اتمی نیز در جذب مستقیم آلودگی از هوا، به وسیله گیاه مؤثر است. اغلب این آلودگی توسط آب باران حل شده و پایین آورده می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که در سطوح تر، بیشتر موجود باشد. ریزش با باران بهترین حالت برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی می‌باشد که با اسپری یک محلول رادیواکتیو روی گیاه امکان پذیر است.

گیاهان در جذب مستقیم، در سه موضع می‌توانند آلوده شوند: برگ‌ها، گل‌ها، ریشه‌های سطحی و ساقه گیاه. این مواضع به صورت Plant-base، floral، foliar معرفی می‌شوند.

اهمیت نسبی هر موضوع با نوع رادیونوکلید آلاینده، نوع گیاه (فاکتور طول عمر آن) و نیز آب و هوا تغییر می‌کند. آلودگی گل و دانه به ویژه برای دانه حبوبات و غله مهم است، زیرا در این موارد قسمت محصول و دانه گیاه خورده می‌شود. آلودگی برای مراتع دایمی از محل ریشه و ساقه گیاه مهم تر از بقیه مواضع است زیرا زمین مانند یک اسفنج آلودگی را نگه می‌دارد و آن را به تدریج در اختیار گیاه قرار می‌دهد.

آلودگی برگ‌ها برای گیاهانی که بخش‌های برگ‌ها و سطحی آنها مورد مصرف قرار می‌گیرد، مهم است چرا که محل ویژه‌ای برای ایزوتوپ‌هایی که نیمه عمر کم دارند، محسوب می‌شود.

### نوع گیاه و حفظ آلودگی ترسیب شده

شکل گیاه که تابعی از نوع آن است تأثیر زیادی در جذب و حفظ آلودگی ترسیب شده دارد، به طوری که اگر گیاه سطحی را فراهم آورد که آلودگی بتواند در آن گیر افتد، نگهداری و حفظ رادیونوکلید نیز بیشتر می‌شود. بهترین مثال علوفه است که شکل برگ‌های آن به صورتی است که برگ‌ها و ساقه یک شکل قیف مانند برای جمع کردن رسوبات می‌سازند.

و یا هنگام چرای فعال به وسیله جانوران اهلی (نظیر آنها که تولید شیر می کنند) بیشتر است.

اهمیت نسبی آلودگی شاخ و برگ همچنین وابسته به ساختمان گیاه و نقش قسمت های مختلف گیاه در ارتباط با غذای انسان یا جانور می باشد.

ساختار خوشه گندم به شکلی است که منجر به جذب و گیراندازی زیادی برای ریزش های اتمی می شود. ممکن است به همین دلیل باشد که گندم یک منبع عمده از  $Sr90$  حاصل از تست سلاح ها بر اساس تحقیقی بر روی غذاهای مصرفی غربی می باشد. عموماً حبوبات به عنوان نمونه ای از جذب سطحی بالا مطرح می باشند.

خطر در ماه های زمستان که محصولات روی زمین نیستند، کمترین است. هر چند که حتی در این ماه ها ممکن است ریزش مستقیم بر روی زمین در مراتع دائمی، تا بهار آینده ذخیره شود و در آن زمان به وسیله گیاهان در حال رشد جذب شود. این گونه ضبط و نگهداری، برای گیاهانی که بخش هایی از اندامشان نظیر ساقه های پیر یا ریشه های سطحی در معرض می باشد، بیشتر خواهد بود. به طور کلی، آلودگی مستقیم کمتر از آلودگی به وسیله خاک مورد توجه قرار گرفته است زیرا فاکتورهای تعیین کننده و دخیل در آن تنوع و تعدد بیشتری دارند و بنابراین، نتایج تحقیقات نیز اعتبار کمتری دارند. از طرفی طراحی (set) آزمایش ها و تکنیک های آزمایشگاهی برای گسترش اطلاعات در این زمینه طراحی خاصی را می طلبد در حالی که مطالعات در مورد جذب غیرمستقیم از طریق خاک بسیار راحت تر می باشد.

### حذف آلودگی سطحی یا مستقیم

این نوع آلودگی به وسیله واپاشی رادیواکتیوی می تواند حذف شود. از دیگر راه های حذف، لیچینگ به وسیله باران، فرار (volatilization) ، دیگر اثرات آب و هوایی مانند باد، مرگ و میر و از دست رفتن قسمت های گیاه، و البته به وسیله شستشوی قبل از مصرف به وسیله انسان می باشد.

$\tau$  برای رسوب خشک روی علف های مرطوب  $\tau >$  برای رسوب خشک روی علف های خشک است.

$\tau$  برای رسوبات دانه ریز  $\tau >$  برای رسوبات دانه درشت است. که علامت  $>$  میزان گیرافتادن توسط گیاه را نشان می دهد. جذب مستقیم توسط گیاه به طور کلی بستگی به سرعت جریان ترسیب ریزش اتمی دارد. به عبارتی این نحو جذب را Rate Dependent گویند.

جدول ۲: اکتیویته ویژه بر واحد اکتیویته ترسیب شده بر واحد سطح

( Bq / kg f.w. per Bq / m<sup>2</sup> )

	Cs-137	Ba-140	Ru-106	I-131
۱ میلی	۰/۰۹۵	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۳۳
۲ میلی	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۶
۳ میلی	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۲۸
۴ میلی	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۸
۵ میلی	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۲۷
۶ میلی	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۲۴

### زمان بازداری برای آلودگی مستقیم

فاکتور بازداری روتینم ۱۰۶ (Ru<sub>106</sub>)، برخلاف انتظار اندکی کمتر از I<sub>131</sub> است. دلیل آن می تواند ترکیب شیمیایی روتینم در ریزش باشد. مدل ecosys-87 برای بازداری سه عنصر Ru, Cs, Ba نسبت به ید، برمینای ترسیب تر، پیش بینی می کند که بازداری ید آنبونی نسبت به کاتیون Ba, Sr که ۲ ظرفیتی اند، ۴ برابر کمتر و نسبت به کاتیون یک ظرفیتی Cs، ۲ برابر کمتر می باشد. در ضمن با افزایش میزان باران، بازداری کاهش یافته و با افزایش بیومس محصولات، بازداری افزایش می یابد.

### اهمیت نسبی آلودگی سطحی در گیاهان

اهمیت آلودگی سطحی با فصل رشد تغییر می کند، به این صورت که خطر حاصل از این ناحیه قبل از برداشت محصول به هنگام برداشت

قسمت اعظم غذایی که توسط انسان مصرف می‌شود، مستقیم یا غیرمستقیم از خاک به‌دست می‌آید. بجز عناصری مانند کربن و اکسیژن که ممکن است از اتمسفر حاصل شوند، این خاک است که تغذیه‌کننده اصلی اکوسیستم زمینی که غذای انسان در آن رشد می‌کند، می‌باشد.

جدول ۳: ضرایب تصحیح در معادله فوق برای غلات، خوراک دام و علوفه دامی

	a	b	c	D
ایزوتوپ‌های سزیم	-۰/۸۷	+۰/۰۳	-۰/۱۲	-۰/۰۲۷
استرانسیوم	-۰/۸۴	+۰/۰۵۷	-۰/۰۵۰	-۰/۰۰۶
پلوتونیوم	+۰/۰۵۸	+۰/۰۱۱	+۰/۲۴۰	-۰/۰۵۰
<b>سزیم‌جات و خانواده سبب‌زمینی</b>				
سزیم	-۰/۰۵۴	-۰/۰۲۴	-۰/۳۰	-۰/۱۰
استرانسیوم	-۰/۸۲	+۰/۲۰۱	-۰/۰۰۴	-۰/۰۱۸
پلوتونیوم	+۰/۲۳	+۰/۰۱۱	-۰/۱۵	-۰/۴۱

در تحقیقی، جذب رادیونوکلئیدها در گیاهانی مانند گیاهان برگ‌بیدی که در معرض آلودگی هوا قرار دارند، کمتر از جذب برای گیاهانی بود که در معرض مایعات و آب‌های مخلوط با گرد و غبارهای آلوده قرار داشتند.

در بررسی توانایی جذب آلودگی توسط گیاه با تعیین حجم آلودگی در دسترس توانایی جذب ریشه‌ای بیش از ته نشست مستقیم و یا پاشیدن باران و یا سوسپانسیون می‌باشد.

رادیو نوکلئیدهایی نظیر  $^{226}\text{Ra}$ ،  $^{210}\text{Po}$  که به‌صورت طبیعی در خاک موجود می‌باشند، به‌شکل متابولیک وارد گیاهان شده و در نهایت وارد زنجیره غذایی انسان می‌شوند. رادیونوکلئیدهای مصنوعی نیز به‌روشی مشابه عمل می‌کنند.

آلودگی جهانی زنجیره غذایی به‌وسیله رادیونوکلئیدهای تولیدی در اثر تست سلاح‌های هسته‌ای با گذشت ده‌ها سال هنوز وجود دارد. انتقال این آلودگی‌ها به گیاه، با هر مکانیسمی که اتفاق افتد،

در تحقیقی که برای استرانسیوم ۹۰ در کشتزار صورت گرفت، نیمه عمر حذف آن از اجزای گیاه در طی فصل رشد، بدون توجه به واپاشی رادیواکتیوی، ۱۴ روز مشخص شد. عدد متوسط مفیدی است اما این زمان به‌وسیله گیاه و اختلاف در خواص فیزیکی و شیمیایی رادیونوکلئیدها تغییر کرده و تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

نیمه عمر برداشت استرانسیوم اسپری شده روی محصولات از ۱۹ روز در تابستان تا ۴۹ روز در زمستان تغییر می‌کند. با تمام شدن یک دوره رشد، دوره بعدی رشد شامل کمتر از ۱٪ از ترسیب اولیه می‌باشد. در تحقیقی از دست رفتن ۰/۰۵ در روز برای چند هفته اول بعد از ریزش دیده شد ولی بعد از آن سرعت از دست رفتن کاهش می‌یابد. از کاربردی‌ترین روش‌ها، برای حل مشکل برگ‌های آلوده عملیات انتقال و تدفین برای برگ‌های آلوده می‌باشد.

### دخالته سائز ذرات ترسیبی در آلودگی مستقیم گیاهی

ذراتی که روی گیاه قرار می‌گیرند به نسبت عکس سائزشان، در محل ریزش شده باقی می‌مانند. ذرات بزرگتر از ۵ میکرومتر نسبتاً سریع جدا می‌شوند که ۹۹٪ آنهايي که از سطوح گیاه جدا می‌شوند این گونه‌اند. ذرات کوچکتر به‌وسیله نیروهای سطحی نگه داشته می‌شوند و حدود ۲۰٪ امکان باقی ماندن دارند.

### ید ۱۳۱

دیگر آلاینده گیاهی ید ۱۳۱ است نیمه عمر ید رادیواکتیو یعنی  $^{131}\text{I}$ ، کوتاه است (۸ روز) و به‌همین علت یک آلاینده چندان مهم محسوب نمی‌شود. جریان هوای اطراف در سطح پهن برگ و آیرودینامیک آن می‌باشد. بیشترین ترسیب  $^{131}\text{I}$  به این روش است اما بخارات ید ممکن است روی غبارات جذب شوند و سپس به‌همان صورت ذرات جامد عمل کنند [۱، ۲، ۴، ۱۳، ۱۸، ۱۹].

### ۲- جذب ریشه‌ای توسط گیاه

a, b, c, d ضرایب تصحیح‌اند که بستگی به رادیونوکلئید نوع گیاه زراعی دارند. بعضی از ضرایب تصحیح در جدول ۳ نشان داده شده است.

اعدادی که مقادیر TF به دست می‌دهند بر پایه وزن خشک محصولات می‌باشد. اما از آنجا که محصولات به صورت تازه به بازار عرضه می‌شوند، وزن معمولی باید دخالت داده شود.

در جذب از خاک، علاوه بر میزان تحرک رادیونوکلئید در خاک که وابسته به نوع خاک می‌باشد، میزان بارش و نیز واپاشی را نیز باید مدنظر قرار داد. عمق مناسب برای جذب رادیونوکلئیدها توسط علوفه ۱۰ cm می‌باشد که برای گیاهان دیگر این عمق تغییر می‌کند.

### تغییر مقدار جذب توسط گیاه، به صورت انتخابی

گیاهان تقریباً تمام موادی را که در خاک به شکل محلول هستند، جذب می‌کنند. در میان رادیونوکلئیدها سزیم ۱۳۷ و استرانسیوم ۹۰ به صورت قابل ملاحظه‌ای توسط ریشه گیاهان جذب می‌شوند. زیرا، این عناصر شباهت زیادی به Ca و k دارند که در جریان فرآیند جذب گیاهی و در ساختار گیاه معمول هستند.

یکی از مهمترین ابزارها برای کاهش جذب آلودگی توسط محصولات کشاورزی این است که مواد معدنی مغذی گیاه جهت رقابت در جذب رادیونوکلئیدی در اختیار گیاه قرار گیرد. با یک سری تحقیقات مشخص شده است که پتاسیم در این زمینه بالاترین بازدهی را دارد. استفاده از نیترژن به صورت آمونیوم سولفات یا نترات، تجمع سزیم ۱۳۷ را در محصول افزایش می‌دهد که گاهاً این افزایش به سه برابر می‌رسد. بهترین نتیجه آن در استفاده از کودهای معدنی مخلوط یا کمپلکس با مقدار متداول فسفر و پتاسیم (۲ تا ۳ برابر بیشتر از مقدار نیترژن) حاصل می‌شود. در تحقیقی در ایسلند، مشخص شده است که کمبود پتاسیم در خاک جذب سزیم ۱۳۷ توسط گیاهان و جانوران را بیشتر می‌کند و استفاده از کودهای پتاسیمی، باعث کاهش جذب و در نتیجه عدم تجمع بیولوژیک آن می‌شود. پتاسیم به صورت کود kcl

به صورت مستقیم و یا جذب متابولیکی از گیاه به جانور مصرف کننده انتقال می‌یابند.

در جذب ریشه‌ای ضریب انتقال مطرح است. ضریب انتقال استاندارد بیان گر میزان جذب رادیونوکلئید از خاک توسط گیاه است و به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$TFS = \frac{\text{Bq/kg}}{\text{Bq/kg}}$$

اکتیویته رادیونوکلئید در واحد وزن خاک =

$$\frac{\text{Bq/kg}}{\text{Bq/kg}}$$

اکتیویته رادیونوکلئید در واحد وزن محصول

جدول ۴- رادیونوکلئید مورد نظر

نوع خاک	نوع محصول	Cs ۱۳۴ و ۱۳۷	Sr ۸۹ و ۹۰	Pu ۲۹
شنی	علف	۰/۰۴۱	۰/۰۸۶	$۴/۶ \times 10^{-۵}$
-	سبزیجات	۰/۰۹۸	۰/۰۹۲	-
-	غده‌ای	۰/۰۲۸	۰/۰۵۵	$۱/۱ \times 10^{-۳}$
-	غلات و حبوبات	۰/۰۱۶	۰/۰۹۰	$۵/۶ \times 10^{-۵}$
لوم	علف	۰/۰۳۷	۱/۸	$۳ \times 10^{-۵}$
-	سبزیجات	۰/۰۷۳	۲/۲	-
-	غده‌داران	۰/۰۲۱	۰/۱۳	$۳ \times 10^{-۴}$
-	غلات	۰/۰۱۴	۰/۱۹	$۳/۷ \times 10^{-۵}$
رس	علف	۰/۱۲	۱/۲	$۲/۱ \times 10^{-۵}$
-	سبزیجات	۰/۰۴۸	۱/۱	-
-	غده‌داران	۰/۰۱۴	۰/۰۶۶	$۲ \times 10^{-۱}$
-	غلات	۰/۱۱۰	۰/۱۳	$۲/۶ \times 10^{-۵}$

شرایط استاندارد یعنی تا عمق ۱۰ cm خاک علف‌زار و تا عمق ۲۰ cm خاک گیاهان زراعی که ماده آلی آن به ترتیب ۱۰٪ و ۴٪ است، pH = ۶ و زمان آلودگی ۲ سال.

رابطه TFA واقعی و TFs به صورت زیر است:

$$TFA = TFs \cdot \exp(\text{pH}-6) \cdot \exp(\text{OM}-4 \text{ or } 10) \cdot b..$$

$$\exp(D-10 \text{ or } 20) \cdot c \cdot \exp(y-2) \cdot d$$

$$D = (\text{cm}) \text{ و } y = \text{و عمق خاک (سال)}$$

و

OM = ماده آلی



آب رودخانه است. چنان که مثلاً آب آلوده رودخانه کلمبیا در هانفورد منجر به آلودگی  $Zn_{65}$  در محصولات کشاورزی گردید. بنابراین آبی که برای آبیاری گیاهان استفاده می‌شود چه به‌روش آبیاری مصنوعی یا آبیاری با آب رودخانه درآلوده کردن گیاه و محصول گیاهی نقش دارد که نباید از نظر دور نگه داشته شود [۱، ۲، ۴، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۹].

### نتیجه‌گیری

در جریان یک انفجار یا حمله هسته‌ای رادیونوکلئیدهای زیادی تولید می‌شوند. یک سری از آنها که در محیط پخش می‌شوند، توسط گیاهان قابل جذب می‌باشند. در میان آنها، رادیونوکلئیدهایی که نیمه عمری متوسط به‌بالا داشته و مدت زمان بیشتری در محیط باقی می‌مانند یا با عناصر مورد نیاز گیاه تشابه دارند، یا سرعت جذب آنها توسط گیاهان زیاد است، در آلودگی منابع گیاهی اهمیت بیشتری دارند. مهمترین آنها  $^{137}Cs$ ،  $^{90}Sr$ ،  $^{131}I$  می‌باشند. حال با شناخت مکانیسم‌های جذب گیاهی این عناصر و فاکتورهای دخیل در آنها می‌توان به‌شکل کامل‌تری به آلودگی رادیواکتیوی گیاهان پرداخت و به‌این وسیله آن‌را تحت کنترل درآورده و یا اثرات منفی مربوطه را کاهش داد. علاوه بر آن شناخت کمی و کیفی این فاکتورها در مجموع به مردم به‌طور اعم و به ارگان‌ها و سازمان‌های مسئول تصمیم‌گیرنده به‌طور اخص، این توانایی را می‌دهد که در جریان یک جنگ هسته‌ای استراتژی خود را در قبال منابع گیاهی آلوده که تأثیر زیادی در جوانب مختلف زندگی انسان دارند، تعیین کنند و در کوتاه مدت و بلند مدت نحوه استفاده از این منابع را مشخص نمایند.

مفیدتر است، به‌طوری که در آزمایشی ۲ برابر کردن مقدار پتاسیم باعث کاهش ۳ برابر در جذب  $^{137}Cs$  شد. به‌طور کلی افزایش ایزوتوپ‌های طبیعی عناصر یا بعضی عناصر شیمیایی مشابه، می‌تواند انتقال بین خاک و گیاه را کاهش دهد. pH نیز در این زمینه مؤثر است. جذب استرانسیوم ۹۰ با افزایش pH کاهش می‌یابد. افزایش نمک‌های کلسیم همچنین استفاده از نمک‌های سزیم طبیعی در میزان کاهش جذب استرانسیوم ۹۰ به دلیل افزایش pH مؤثرند. در جذب ریشه‌ای گیاه عموماً مقدار کل رادیواکتیویته موجود در خاک مطرح است.

### ضریب انتقال بین خاک و گیاه

این ضریب به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Tc(m2/kg) = (Bq/kg) / \text{میزان عنصر در گیاه} / (Bq/m2)$$

نوسانات موجود در میزان جذب گیاهی، در اثر تفاوت بین خاک‌ها و محیط‌های طبیعی مختلف و نیز نوع گیاه است. برای این که مقایسه‌ای در مورد فاکتورهای انتقال در خاک و گیاه بشود، تحقیقات زیادی انجام شده و نتایج زیر حاصل شده که جالب توجه است. فاکتور انتقال برای خاک‌های نرم  $0.25 m2/kg$  برای خاک‌های آلی  $0.27 m2/kg$  است. نیز برای گندم  $0.07 - 0.05 / m2/kg$  و برای علوفه  $0.29 - 0.01 / m2/kg$  می‌باشد.

### تأثیر پذیری گیاه از آب آلوده

علاوه بر این که آلودگی رادیواکتیو به وسیله خاک آلوده و یا جذب مستقیم به گیاه منتقل می‌شود، آب آلوده نیز خود یک منبع مهم آلودگی می‌باشد که قابلیت انتقال آن‌را به گیاه دارد. این گزینه به‌عنوان یکی از فاکتورهای محلی تأثیر گذار در آلودگی گیاهی، مطرح است. به‌عنوان مثال یکی از این فاکتورهای محلی تأثیر گذار



## منابع

- 1- Eisenbud Merrill(1987). Environmental radioactivity, 3th. API, New York, P. 89 – 113, 285 - 317
- 2- Winteringham FPW(1989). Radioactive fallout in soils,crops and food." IAEA , FAO, P. 2.1 – 2.5.
- 3- IAEA(1986). Summary report on the post – Accident review meeting on the chernobyl accident..Safety Series. No.75-INSAG:1.
- 4- NEA AEN(1995). Chernobyl ten years on. by OECD NEA, P. 18 - 25.and 47 - 52.
- 5-Liaurado M, Vidal M, Rauret G(1994). Radiocaesium behaviour in mediteranian conditions. J Env Rad; 23: 81 - 100.
- 6- Povinec P, Shudy M, Sykora I(1990). Radioactivity in slovakia after the chernobyl accident Acta physica univ. comen XXX, P. 45 - 62.
- 7- Cebulska Antonina, Wasilewsk A(1992). Tradescantia stamen-hair mutation bioassay. on the mutagenicity of radioisotope-contaminated air following Mutation Research; 270: 23 - 29.
- 8-Hutchinson D(1976). Radioecology and energy resources Ross,Inc The ecological society of america. P.10.
- 9-Gunnerod TB, Blakan I(1989). Fresh water and alpine ecosystems response to chernobyl fallout in Norway. IAEA, SM, P. 306: 41.
- 10-Aycik GA, Golge T(1989). Studies of I - 131, Cs - 137, Cs - 134 in air,milk,water in Ankara following the chernobyl accident. IAEA-SM, P. 306: 25.
- 11-Kushar VP, Baryakhtar VG(1994).The chernobyl catastrophe and its environmental consequences Chemistry for sustainable development; P. 357 - 366.
- 12-Donaldson LR, Enymour AH(1997). University of washington radiocological studies in the marshal island,1946-1977 .Health Phys; 73(1): 214 - 222.
- 13-Jacob P, Muller H, Prohl G(1993). Environmental behavior of radionuclides deposited after the reactor accident of chernobyl and related exposures. Radiat.Environ.Biophys; 32: 193 - 207.
- 14-Walker RB, Gessel SB(1997). The ecosystem study on Rongelap Atoll. Health Phys;73(1): 223 - 233.
- 15-Bretten S, Gaare E, Skogland T(1992) Investigations of radiocaesium in the natural terrestrial environment in Norway following the chernobyl accident. Analyst; 117: 501- 503.
- 16- Naught lw(1966). Nuclear weapons and their effects.
- 17-Selnaes TD, Strand Per(1992). Comparison of the uptake of radiocaesium from soil to grass after nuclear weapons tests and the chernobyl accident. Analyst; 117: 493 - 495.
- 18-Prister ES, Tkachenko NV(1994). Radioactive contamination of forest ecoystems and its contribution to the radiation situation in Kief in 1986. The Science of The Total Environment; 157: 333 - 338.
- 19- University of Aston in Birmingham(1972). Isotopes and radiation in biology. The department of biological sciences, P. 72.
- 20-Matsuoka N, Okamura M(1992). Study of the environmental behavior of chernobyl, derived radionuclides in Kushu Island.Japan Appl Radiat Isot; 43(5): 651 - 657.
- 21-Cooper EL(1992). Radioactivity in food and total diet samples collected in selected settlements in the USSR. J Env Rad; 17: 147 - 157.
- 22- Saxen P, Pantavaara A(1984). Environmental radioactivity in finland after the chernobyl accident. IAEA – SM, P. 306.
- 23-Lew HW(1996). Radioactive deposition in europe after the chernobyl accident and its long-term consequences: Ecol Res; 201 - 216.
- 24-Bagsal Arif, Yazici K(1995). Radioactive contamination in lichens collected from Akcaabat and Camlihemsin in the eastern blacksea Toxicological and Environmental Chemistry; 48: 145 - 148.
- 25-Glasstone S, Dolan PJ(1977). The effects of nuclear weapons. 3th. USDOE, P. 197.