



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۷۱۲۶

چاپ اول

۱۳۹۷



دارای محتوای رنگی

INSO
17126
1st Edition
2018

Identical with
ISO 16637: 2016

حفاظت پرتوی – مونیتورینگ و دزسنجی
داخلی کارکنان در معرض چشمه‌های باز
پزشکی

**Radiological protection — Monitoring and
internal dosimetry for staff members
exposed to medical radionuclides as
unsealed sources**

ICS: 13.280

استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۱۲۶ (چاپ اول): سال ۱۳۹۷

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران-ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۱-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۸۱۱۴-۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.gov.ir

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No. 2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.gov.ir

Website: <http://www.isiri.gov.ir>

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاهای، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«حفاظت رادیولوژیکی - مونیتورینگ و دزسنجی داخلی کارکنان در معرض چشمه های باز

پزشکی»

رئیس:

دانشگاه علوم پزشکی تهران - دانشکده پیراپزشکی

جزایری قره‌باغ، الهه
(دکتری فیزیک پزشکی)

دبیر:

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

فیروزی، بهنام
(دکتری فیزیک هسته‌ای)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

شرکت جهان گسترش تجارت

اشرف، سیده رعنا
(کارشناسی ارشد مهندسی پرتو پزشکی)

سازمان انرژی اتمی ایران - پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

جوانشیر، محمدرضا
(کارشناسی ارشد مهندسی صنایع)

انستیتو پرتوپزشکی نوین

خرم‌باقری، مهدی
(کارشناسی ارشد پرتوپزشکی)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی

سمیع‌پور، فرهاد
(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

شرکت تولیدی - مهندسی بهساز طب

صیادی، سعید
(کارشناس ارشد برق و الکترونیک)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی

عربلو، رضا
(کارشناسی فیزیک اتمی)

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

عروجی، طاهره
(کارشناسی ارشد فیزیک اتمی)

ویراستار:

شرکت تولیدی - مهندسی بهساز طب

صیادی، سعید
(کارشناس ارشد برق و الکترونیک)

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیش‌گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۲	۲ مراجع الزامی
۳	۳ اصطلاحات و تعاریف
۱۱	۴ نمادها و عبارات اختصاری
۱۲	۵ هدف و نیاز برنامه‌های مونیتورینگ در مراکز تشخیصی و درمانی پزشکی هسته‌ای
۱۲	۱-۵ کلیات
۱۲	۲-۵ ارزیابی میزان پرتوگیری‌های احتمالی
۱۴	۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ
۱۴	۱-۳-۵ کلیات
۱۵	۲-۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ تاییدی
۱۵	۳-۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ دوره‌ای
۱۵	۴-۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ تریاژ
۱۶	۵-۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ وابسته به کار
۱۶	۶-۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ ویژه
۱۶	۷-۳-۵ پیاده‌سازی یک برنامه مونیتورینگ
۱۸	۶ رادیونوکلئیدهای متعارف
۱۹	۷ آستانه‌های مرجع
۱۹	۸ برنامه‌های مونیتورینگ دوره‌ای
۱۹	۱-۸ کلیات
۲۱	۲-۸ مونیتورینگ فردی
۲۱	۳-۸ روش‌ها و بازه‌های زمانی مونیتورینگ
۲۲	۹ برنامه‌های مونیتورینگ تریاژ
۲۳	۱۰ برنامه‌های مونیتورینگ ویژه
۲۳	۱-۱۰ کلیات
۲۴	۲-۱۰ مونیتورینگ محل کار
۲۴	۳-۱۰ مونیتورینگ فردی
۲۵	۱۱ برنامه‌های مونیتورینگ تاییدی

صفحه	عنوان
۲۵	۱-۱۱ کلیات
۲۶	۲-۱۱ مونیتورینگ محل کار
۲۶	۳-۱۱ مونیتورینگ فردی
۲۷	۱۲ تکنیک‌های اندازه‌گیری و معیارهای اجرایی
۲۷	۱-۱۲ کلیات
۲۸	۲-۱۲ اندازه‌گیری‌های انجام شده در یک آزمایشگاه تخصصی زیست‌سنجی پرتوی
۲۸	۱-۲-۱۲ اندازه‌گیری برون‌تنی
۲۸	۲-۲-۱۲ اندازه‌گیری‌های درون‌تنی
۲۸	۳-۲-۱۲ تضمین و کنترل کیفیت در آزمایشگاه‌های زیست‌سنجی
۲۹	۳-۱۲ اندازه‌گیری انجام شده در خدمات پزشکی هسته‌ای
۲۹	۱۳ روش اجرایی ارزیابی پرتوگیری‌ها
۲۹	۱-۱۳ تفسیر داده‌های مونیتورینگ فردی برای ارزیابی دز
۲۹	۱-۱-۱۳ کلیات
۳۰	۲-۱-۱۳ ارزیابی دز بر اساس مونیتورینگ دوره‌ای
۳۰	۳-۱-۱۳ ارزیابی دز بر اساس مونیتورینگ ویژه
۳۷	۲-۱۳ ابزارهای نرم افزاری
۳۷	۳-۱۳ عدم قطعیت‌ها
۳۷	۴-۱۳ تضمین کیفیت فرایند ارزیابی
۳۸	۱۴ گزارش دهی و مستندسازی
۳۸	۱-۱۴ نتایج گزارش‌دهی برای اندازه‌گیری‌های برون‌تنی
۳۹	۲-۱۴ گزارش‌دهی نتایج برای اندازه‌گیری‌های درون‌تنی
۳۹	۳-۱۴ مستندسازی ارزیابی دز
۴۱	پیوست الف (آگاهی‌دهنده) «فاکتور تصمیم‌گیری» براساس IAEA Safety Guide RS-G-1.2
۴۴	کتاب‌نامه

پیش‌گفتار

استاندارد «حفاظت پرتوی - مونیتورینگ و دزسنجی داخلی کارکنان در معرض چشمه‌های باز پزشکی» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در هفتصد و پنجاه و پنجمین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۱۳۹۷/۱۰/۱۰ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران - ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوطه، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

ISO 16637: 2016, Radiological protection — Monitoring and internal dosimetry for staff members exposed to medical radionuclides as unsealed sources

مقدمه

در دوران کاری، افراد ممکن است با مواد پرتوزایی کار کنند که تحت شرایط خاص، می‌توانند وارد بدن شوند. به منظور حفاظت از پرتوکاران در برابر خطرات رادیونوکلئیدهای به کار گرفته شده، مونیتورینگ ورود بالقوه مواد پرتوزا به بدن و/یا تعیین مقدار واقعی مواد پرتوزای وارد شده به بدن و میزان پرتوگیری ضروری است. دزهای ناشی از آلودگی داخلی با مواد پرتوزا را نمی‌توان به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کرد. به همین منظور برای اندازه‌گیری میزان پرتوزایی و ارزیابی دز، انتخاب معیارها و برنامه‌هایی برای تصمیم‌گیری در مورد روش‌ها، تکنیک‌ها، دوره‌های زمانی و غیره، ضروری است. معیارهای ارزیابی لزوم این برنامه مونیتورینگ یا انتخاب روش‌ها و دوره‌های مونیتورینگ به عوامل گوناگونی مانند قوانین جاری، هدف از اجرای برنامه حفاظت در برابر پرتو، احتمال ورود بالقوه رادیونوکلئیدها به بدن و مشخصه‌های مواد مورد استفاده، بستگی دارد.

به همین علت استانداردهایی برای الزامات برنامه‌های مونیتورینگ (به استاندارد ISO 20553 مراجعه شود)، الزامات آزمایشگاهی (به استاندارد ISO 28218 مراجعه شود) و ارزیابی دز (به استاندارد ISO 27048 مراجعه شود) تدوین شده است. این استاندارد می‌تواند به‌عنوان یک روش ساده و کاربردی در بسیاری از محل‌های کار که در آن آلودگی داخلی ممکن است رخ دهد، کاربرد داشته باشد. به منظور به‌کارگیری این استاندارد برای کارکنان درگیر با رادیونوکلئیدهای مورد استفاده در بخش‌های تشخیصی یا درمانی پزشکی، باید کوتاه‌بودن نیمه‌عمر مؤثر رادیونوکلئیدهایی که معمولاً برای این منظور استفاده می‌شوند و فاصله بین بخش پزشکی هسته‌ای با مکان مجهز به تجهیزات شمارش درون‌تنی^۱ یا آزمایشگاه‌های آنالیز پرتوی، در نظر گرفته شود.

این استاندارد، معیارهایی برای ضرورت مونیتورینگ ورود ماده پرتوزا به بدن کارکنان در معرض چشمه‌های باز پزشکی و همچنین الزامات طراحی برنامه‌های مونیتورینگ، ارزیابی دز مرتبط و الزامات آزمایشگاهی را تعیین می‌کند. در این استاندارد، توصیه‌های نهادهای تخصصی و تجربیات بین‌المللی با کاربرد عملی این توصیه‌ها در برنامه‌های حفاظت پرتوی، مورد توجه قرار گرفته است. تبادل اطلاعات بین مراجع ذی‌صلاح، مؤسسات نظارتی و کارفرمایان با به‌کارگیری این استاندارد تسهیل می‌شود.

این استاندارد جایگزین الزامات قانونی نیست.

حفاظت پرتوی - مونیتورینگ و دزسنجی داخلی کارکنان در معرض چشمه های باز پزشکی

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین حداقل الزامات برای طراحی برنامه های حرفه ای به منظور مونیتورینگ کارکنان در معرض ریسک آلودگی داخلی از طریق استنشاق، هنگام استفاده از چشمه های رادیونوکلئیدهای باز در بخش های تصویربرداری و درمانی پزشکی هسته ای می باشد. این استاندارد اصولی را برای توسعه اهداف و الزامات سازگار با برنامه های مونیتورینگ و در صورت کفایت، ارزیابی دز برقرار می کند. همچنین در این استاندارد روش های اجرایی و مفروضاتی برای آنالیز ریسک، برنامه های مونیتورینگ و تفسیرهای استاندارد شده داده های مونیتورینگ نیز ارائه شده است.

این استاندارد برای موارد زیر کاربرد دارد:

- الف- اهداف مونیتورینگ و برنامه های مونیتورینگ؛
- ب- توصیف دسته بندی های مختلف برنامه های مونیتورینگ؛
- پ- معیارهای کمی برای اجرای برنامه های مونیتورینگ؛
- ت- روش های مناسب برای مونیتورینگ و معیارهای انتخاب آنها؛
- ث- اطلاعات ضروری جمع آوری شده برای طراحی برنامه مونیتورینگ؛
- ج- الزامات عمومی برای برنامه های مونیتورینگ (مانند حدود آشکارسازی، عدم قطعیت های قابل قبول^۱)؛
- چ- بازه های زمانی اندازه گیری ها؛
- ح- روش های اجرایی برای ارزیابی دز براساس آستانه های مرجع^۲ برای برنامه های مونیتورینگ دوره ای و ویژه؛
- خ- فرضیاتی برای انتخاب مقادیر پارامترهای مهم دز؛
- د- معیارهایی برای تعیین اهمیت نتایج مونیتورینگ فردی؛
- ذ- تفسیر نتایج مونیتورینگ محل کار؛

1- Tolerated uncertainties

2- Reference level

- ر- عدم قطعیت‌های ناشی از ارزیابی‌های دز و تفسیر داده‌های زیست‌سنجی^۱؛
- ز- گزارش دهی/ مستندسازی؛
- ژ- تضمین کیفیت.

این استاندارد برای موارد زیر کاربرد ندارد:

- الف- مونیتورینگ و دزسنجی داخلی پرتوکاران در معرض رادیونوکلیدها در کاربردهای آزمایشگاهی، مانند روش‌های رادیوایمونواسی^۲؛
- ب- مونیتورینگ و دزسنجی داخلی پرتوکاران درگیر در بهره‌برداری، نگهداری و تعمیر سیکلوترون‌های توموگرافی گسیل پوزیترون (PET)^۳؛
- پ- تشریح جزئیات روش‌ها و تکنیک‌های اندازه‌گیری؛
- ت- دزسنجی برای دعاوی قضایی؛
- ث- مدل‌سازی به‌منظور بهبود دزسنجی داخلی؛
- ج- تأثیر بالقوه درمان پزشکی آلودگی داخلی؛
- چ- بررسی علل یا پیامدهای پرتوگیری؛
- ح- دزسنجی برای پرتوگیری از طریق بلع و زخم‌های آلوده.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

- 2-1 ISO 20553, Radiation protection — Monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material
- 2-2 ISO 27048: 2011, Radiation protection — Dose assessment for the monitoring of workers for internal radiation exposure

1- Bioassay
2- Radioimmunoassay techniques
3- Positron emission tomography

2-3 ISO 28218, Radiation protection — Performance criteria for radiobioassay

2-4 ISO/IEC Guide 99, International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۴۷۲۳: سال ۱۳۹۰، واژه‌نامه اندازه‌شناسی - مفاهیم پایه و عمومی و اصطلاحات مربوط، با استفاده از استاندارد ISO/IEC Guide 99: 2007 تدوین شده است.

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ارائه شده در استانداردهای ISO/IEC Guide 99، ISO 20553، ISO 28218 و ISO 27048، اصطلاحات با تعاریف زیر نیز به کار می‌رود:

۱-۳

جذب

absorption

حرکت مواد به خون بدون در نظر گرفتن مکانیزمی، که معمولاً برای تفکیک ذرات و جذب در خون از اجزاء قابل حل و مواد جدا شده از ذرات به کار می‌رود.

۲-۳

جذب نوع F

absorption type F

همان‌طور که ICRP^۱ تعریف کرده است، مواد نشست‌کرده از مسیر تنفسی که آهنگ جذب (مطابق با زیربند ۱-۳) آن‌ها در مایعات بدن بالا (سریع) می‌باشد.

۳-۳

جذب نوع M

absorption type M

همان‌طور که ICRP تعریف کرده است، مواد نشست‌کرده از مسیر تنفسی که آهنگ جذب (مطابق با زیربند ۱-۳) آن‌ها در مایعات بدن متوسط (ملایم) می‌باشد.

1- International Commission on Radiological Protection

۴-۳

پرتوزایی

activity

تعداد واپاشی‌های خودبه‌خودی هسته بر واحد زمان است.
یادآوری - پرتوزایی برحسب یکای بکرل (Bq)، یعنی تعداد واپاشی‌ها بر ثانیه، بیان می‌شود.

۵-۳

میان‌ه قطر آیرودینامیکی پرتوزایی

activity median aerodynamic diameter

AMAD

مقدار قطر آیرودینامیکی به‌طوری‌که ۵۰٪ پرتوزایی (مطابق با زیربند ۳-۴) هوابرد در یک آئروسول^۱ معین مربوط به ذرات کوچکتر از AMAD و ۵۰٪ پرتوزایی مربوط به ذرات بزرگتر از AMAD است.
یادآوری - قطر آیرودینامیکی ذرات هوابرد، قطری است که یک کره با چگالی واحد لازم دارد تا هنگامی که به‌عنوان ذره مورد نظر در هوا قرار می‌گیرد، دارای سرعت خروجی یکسان باشد.

۶-۳

آلودگی

contamination

وجود ناخواسته یا نامطلوب پرتوزایی (مطابق با زیربند ۳-۴) رادیونوکلئیدها در سطوح یا درون جامدات، مایعات یا گازها (شامل بدن انسان) است.

۷-۳

آستانه تصمیم‌گیری

decision threshold

یک مقدار ثابت از اندازه‌ده، به‌طوری‌که هرگاه نتیجه یک اندازه‌گیری واقعی از آن مقدار ثابت که یک اثر فیزیکی را به‌صورت کمی بیان می‌کند بیشتر شود، در مورد وجود اثر فیزیکی تصمیم‌گیری می‌شود.

۸-۳

حد آشکارسازی

detection limit

کمترین مقدار حقیقی یک اندازه‌ده که قابل آشکارسازی با یک روش اندازه‌گیری است.

۹-۳

دز سالانه

annual dose

دز مؤثر اجباری (مطابق با زیربند ۳-۱۱) که از ورود همه مواد پرتوزا به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) در طول یک سال خورشیدی حاصل شده است.

یادآوری - در اصطلاح «دز سالانه»، دز دریافتی سالانه حاصل از کل مواد پرتوزایی که قبلاً به بدن وارد شده است لحاظ نمی‌شود.

۱۰-۳

دز معادل اجباری

committed equivalent dose

مجموع حاصل ضرب دزهای جذب شده توسط یک ارگان یا بافت بدن از انواع پرتوها در ضرایب وزنی پرتوی مناسب، در بازه زمانی تخصیص یافته^۱ بعد از ورود ماده پرتوزا به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) می‌باشد.

۱۱-۳

دز مؤثر اجباری

committed effective dose

مجموع حاصل ضرب دزهای معادل اجباری هر ارگان یا بافت بدن در ضرایب وزنی متناسب با آن بافت می‌باشد.

یادآوری - در این استاندارد، بازه زمانی تخصیص یافته (بازه زمانی بعد از ورود ماده پرتوزا به بدن مطابق با زیربند ۳-۱۴)، پنجاه سال در نظر گرفته شده است.

1- Commitment period

۱۲-۳

تابع دفع

excretion function

تابعی است که بیان می‌کند چه کسری از میزان ماده پرتوزای وارد شده به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) با توجه به زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا، به صورت روزانه از بدن دفع می‌شود.

۱۳-۳

رویداد (حادثه)

event = incident

هر اتفاق غیرعمدی شامل خطای انسانی، نقص فنی تجهیزات یا سایر رویدادهای ناگوار، به طوری که پیامدها یا پیامدهای محتمل آن‌ها از نقطه نظر حفاظت یا ایمنی قابل چشم‌پوشی نباشد.

۱۴-۳

ورود ماده پرتوزا به بدن - میزان پرتوزایی وارد شده به بدن

intake

پرتوزایی (مطابق با زیربند ۳-۴) یک رادیونوکلئید وارد شده به بدن در بازه زمانی مشخص یا در نتیجه یک رویداد می‌باشد. این اصطلاح به فرایند ورود ماده پرتوزا به بدن نیز اطلاق می‌شود.

۱۵-۳

آنالیزهای برون تنی

اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم

in vitro analyses

indirect measurements

آنالیزهایی شامل اندازه‌گیری‌های پرتوزایی موجود در نمونه‌های بیولوژیکی گرفته شده از فرد می‌باشد. یادآوری - این نمونه‌ها شامل نمونه‌های ادرار، مدفوع و مخاط بینی می‌باشد. در برنامه‌های مونیتورینگ ویژه (مطابق با زیربند ۳-۲۱) ممکن است نمونه‌هایی از مواد دیگر مثل خون و مو نیز گرفته شود.

۱۶-۳

اندازه‌گیری‌های درون‌تنی

اندازه‌گیری‌های مستقیم

in vivo measurements

direct measurements

اندازه‌گیری پرتوایی موجود در بدن انسان با استفاده از آشکارسازهایی که پرتوهای گسیل‌شده را اندازه‌گیری می‌کنند.

یادآوری - به‌طور معمول، وسایل اندازه‌گیری عبارتند از شمارنده‌های تمام بدن یا قسمتی از بدن (مانند ریه و تیروئید).

۱۷-۳

مونیتورینگ

monitoring

اندازه‌گیری‌هایی که به‌منظور ارزیابی یا کنترل پرتوگیری از مواد پرتوزا و تفسیر نتایج آن انجام می‌شود.

یادآوری ۱ - در این استاندارد پنج دسته از برنامه‌های مونیتورینگ به شرح زیر شناخته و متمایز شده‌اند:

- برنامه مونیتورینگ دوره‌ای (مطابق با زیربند ۳-۱۸)،

- برنامه مونیتورینگ وابسته به کار (مطابق با زیربند ۳-۱۹)،

- برنامه مونیتورینگ تریاژ (مطابق با زیربند ۳-۲۰)،

- برنامه مونیتورینگ ویژه (مطابق با زیربند ۳-۲۱)،

- برنامه مونیتورینگ تأییدی (مطابق با زیربند ۳-۲۲).

یادآوری ۲ - در این استاندارد دو نوع متفاوت از مونیتورینگ نیز مشخص و متمایز شده است که شامل مونیتورینگ فردی (مطابق با زیربند ۳-۲۳) و مونیتورینگ محل کار (مطابق با زیربند ۳-۲۴) می‌باشد.

۱۸-۳

برنامه مونیتورینگ دوره‌ای

routine monitoring programme

یک برنامه مونیتورینگ مرتبط با بهره‌برداری‌های مداوم که به‌منظور نمایش رضایت‌بخش باقی‌ماندن شرایط کاری (شامل سطوح دز فردی) و برآورده شدن الزامات قانونی انجام می‌شود.

۱۹-۳

برنامه مونیترینگ وابسته به کار

task-related monitoring programme

یک برنامه مونیترینگ مربوط به یک بهره‌برداری مشخص که:

- به منظور تهیه اطلاعات آن بهره‌برداری در یک بازه زمانی محدود؛ یا
- به دنبال تغییرات مهم اعمال شده در تأسیسات یا روش‌های اجرایی بهره‌برداری؛ یا
- برای تأیید مناسب بودن برنامه مونیترینگ دوره‌ای (مطابق با زیربند ۳-۱۸) انجام می‌شود.

۲۰-۳

برنامه مونیترینگ تریاژ

triage monitoring programme

یک برنامه مونیترینگ شامل اندازه‌گیری‌های مکرر که در مراکز پزشکی هسته‌ای انجام شده و اگرچه قابلیت محاسبه دز را فراهم نمی‌کند اما عدم عبور از آستانه تعیین‌شده برای ورود بالقوه ماده پرتوزا به بدن را (مطابق با زیربند ۳-۱۴) تصدیق می‌کند.

۲۱-۳

برنامه مونیترینگ ویژه

special monitoring programme

یک برنامه مونیترینگ که به منظور تعیین پرتوگیری‌های قابل توجه به دنبال رویدادهای غیرعادی واقعی یا مشکوک انجام می‌شود.

۲۲-۳

برنامه مونیترینگ تأییدی

confirmatory monitoring programme

یک برنامه مونیترینگ برای تأیید مفروضاتی در مورد شرایط کاری، به‌عنوان مثال، این که میزان قابل توجهی از مواد پرتوزا به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) وارد نشده است.

۲۳-۳

مونیتورینگ فردی

individual monitoring

یک برنامه مونیتورینگ که توسط:

- دزسنج‌های فردی که کارکنان با خود حمل می‌کنند؛ یا
- اندازه‌گیری مقادیر مواد پرتوزا در درون یا روی بدن کارکنان؛ یا
- اندازه‌گیری مواد پرتوزای دفع شده از بدن کارکنان انجام می‌شود.

۲۴-۳

مونیتورینگ محیطی

workplace monitoring

یک برنامه مونیتورینگ که در آن از اندازه‌گیری‌های انجام شده در محیط کار استفاده می‌شود.

۲۵-۳

بازه زمانی مونیتورینگ

monitoring interval

بازه زمانی بین دو اندازه‌گیری متوالی است.

۲۶-۳

تضمین کیفیت

quality assurance

اقدامات سیستماتیک و برنامه‌ریزی شده لازم برای ایجاد اطمینان کافی از این که یک فرایند، اندازه‌گیری یا خدمت، الزامات تعیین شده برای کیفیت را همان‌طور که در پروانه کار مشخص شده است، برآورده می‌کند.

۲۷-۳

کنترل کیفیت

quality control

قسمتی از فرایند تضمین کیفیت (مطابق با زیربند ۳-۲۶) است که به منظور تصدیق انطباق اجزاء و سیستم‌ها با الزامات از پیش تعیین شده انجام می‌شود.

۲۸-۳

مدیریت کیفیت

quality management

تمام فعالیت‌های مربوط به عملکرد کلی مدیریت که سیاست‌های کیفیت، اهداف و مسئولیت‌ها را تعیین کرده و آن‌ها را با تمهیداتی مانند برنامه‌ریزی، کنترل کیفیت (مطابق با زیربند ۳-۲۶)، تضمین کیفیت (مطابق با زیربند ۳-۲۷) و بهبود کیفیت در یک سیستم کیفیت پیاده‌سازی می‌کند.

۲۹-۳

آستانه مرجع

reference level

همان آستانه بررسی (مطابق با زیربند ۳-۳۰) یا آستانه ثبت (مطابق با زیربند ۳-۲۹) است.

۳۰-۳

آستانه ثبت

recording level

مقداری از دز، پرتوگیری یا ورود ماده پرتوزا به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) که توسط کارفرما یا واحد قانونی مشخص می‌شود و اگر میزان دز، پرتوگیری یا ورود ماده پرتوزا به بدن پرتوکاران بیشتر از آن باشد، مقادیر مرتبط باید در گزارش‌های پرتوگیری هر فرد ثبت شود.

۳۱-۳

آستانه بررسی

investigation level

مقداری از دز، پرتوگیری یا ورود ماده پرتوزا به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) است که به منظور کاهش عدم قطعیت مرتبط با ارزیابی دز برای مقادیر مساوی یا بالاتر از آن باید بررسی‌هایی انجام شود.

۳۲-۳

تابع ابقا

retention function

تابعی است برای توصیف کسری از ماده پرتوزای وارد شده به بدن (مطابق با زیربند ۳-۱۴) که بعد از سپری شدن زمان معینی از ورود ماده پرتوزا، در تمام بدن یا در قسمتی از بدن، یک بافت یا ارگان باقی می‌ماند.

۳۳-۳

فاکتور پراکندگی

scattering factor

انحراف معیار هندسی توزیع لگ-نرمال^۱ در اندازه‌گیری‌های زیست‌سنجی است.

۳۴-۳

زمان اندازه‌گیری

time of measurement

(در آنالیز درون‌تنی) زمان آغاز اندازه‌گیری است.

۴ نمادها و عبارات اختصاری

A_{DL}	مقدار حد آشکارسازی پرتوزایی ^۲ (برحسب Bq) در اندازه‌گیری‌های دوره‌ای
AMAD	میان‌قطر آیرودینامیکی پرتوزایی
B	آهنگ تنفس یک فرد (برحسب $m^3 \cdot h^{-1}$)
C_m	غلظت هوابرد رادیونوکلئید (برحسب $Bq \cdot m^{-3}$)
DL	حد آشکارسازی
$E(50)$	دز مؤثر اجباری انباشته برای بازه زمانی ۵۰ سال بعد از یک بار ورود ماده پرتوزا به بدن (برحسب Sv)
$e(50)$	ضریب دز، یعنی دز مؤثر اجباری انباشته برای بازه زمانی ۵۰ سال به ازاء ورود یک واحد ماده پرتوزا به بدن (برحسب $Sv \cdot Bq^{-1}$)
$m(t)$	مقدار پیش‌بینی شده از کمیت اندازه‌گیری شده در زمان t ، به ازاء ورود یک واحد ماده پرتوزا به بدن (تابع دفع یا ابقاء در زمان t به ازاء یک واحد ماده پرتوزای وارد شده به بدن)
I	میزان پرتوزایی ماده پرتوزای وارد شده به بدن (برحسب بکرل Bq)
IAEA	آژانس بین‌المللی انرژی اتمی
ICRP	کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتو

1- Lognormal distribution
2- Activity detection limit

ΔT بازه زمانی مونیتورینگ بین دو اندازه‌گیری در یک برنامه مونیتورینگ دوره‌ای (برحسب d)
 T_{work} زمانی که کارکنان در یک محیط با هوای پرتوزا صرف می‌کنند (برحسب h).

۵ هدف و نیاز به برنامه‌های مونیتورینگ در مراکز تشخیصی و درمانی پزشکی هسته‌ای

۱-۵ کلیات

به‌طور کلی، هدف از مونیتورینگ، تصدیق و مستندسازی این موضوع است که کارکنان در مقابل ریسک ورود مواد پرتوزا به اندازه کافی محافظت می‌شوند و حفاظت در برابر پرتو با الزامات قانونی مطابقت دارد. بنابراین، برنامه مونیتورینگ بخشی از برنامه کلی حفاظت در برابر پرتو است، که برای شناسایی یک شرایط کاری که در آن ریسک ورود ماده پرتوزا به بدن کارکنان وجود دارد، توصیه می‌شود با یک ارزیابی آغاز و میزان احتمالی ورود سالانه ماده پرتوزا به بدن و مقدار دز مؤثر اجباری آن تعیین شود. همچنین توصیه می‌شود در مورد نیاز به مونیتورینگ و طراحی برنامه مونیتورینگ با توجه به داده‌های به‌دست آمده از ارزیابی ریسک تصمیم‌گیری صورت گیرد.

۲-۵ ارزیابی میزان پرتوگیری‌های احتمالی

ضروری است که میزان پرتوگیری احتمالی بدون در نظر گرفتن اقدامات حفاظتی فردی ارزیابی شود. در صورت امکان، این ارزیابی می‌تواند بر اساس نتایج برنامه‌های مونیتورینگ قبلی (مونیتورینگ فردی یا محل کار) و/یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل کار برای مشخص کردن شرایط پرتوی انجام شود.

در پزشکی هسته‌ای، ممکن است آلودگی کارکنان از طریق استنشاق ترکیبات فرار (به‌طور عمده ید پرتوزا) یا آئروسول‌ها صورت گیرد. در نتیجه، ممکن است مونیتورینگ فردی آلودگی داخلی برای کارکنانی که به‌طور دائم با مواد پرتوزای فرار با پرتوزایی‌های بالا سر و کار دارند، ضروری باشد (به منبع [۱] کتاب‌نامه مراجعه شود).

توصیه می‌شود به‌منظور ارزیابی میزان پرتوگیری‌های احتمالی، در بخش‌هایی که از مقادیر زیاد I-131 برای درمان استفاده می‌شود، یا در جایی که برای آزمایش استنشاق ریوی از اسپری‌ها استفاده می‌شود، اندازه‌گیری آلودگی هوا انجام شود.

توصیه می‌شود برای ارزیابی ریسک استنشاق I-131، نمونه‌برداری هوا در مناطقی انجام شود که احتمال بالقوه پرتوزایی هوا در آنجا وجود داشته باشد. این مناطق ممکن است شامل موارد زیر باشند:

- آزمایشگاه‌هایی که در آن با مواد پرتوزا کار می‌شود (هات لب)؛
- اتاق‌های درمان با ید پرتوزا و مناطق مجاور آن؛

- تأسیسات نگهداری پسمان‌های پرتوزا و مناطق ذخیره‌سازی پساب.

برای یک رادیونوکلئید خاص، دز مؤثر اجباری احتمالی ناشی از پرتوزایی هوا برای یک فرد، طبق فرمول (۱) محاسبه می‌شود:

$$E(50) = \frac{I \times e(50)}{0.001} \quad (1)$$

که در آن:

$E(50)$ دز مؤثر اجباری برای رادیونوکلئید (برحسب mSv)؛

I میزان ماده پرتوزای وارد شده به بدن (برحسب Bq)؛

$e(50)$ ضریب دز (برحسب $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$) برای استنشاق ماده پرتوزا برحسب؛

0.001 ضریب تبدیل Sv به mSv است.

مقادیر $e(50)$ را باید از سند ICRP 68^[2] یا برای رادیوداروهایی که به صورت آئروسول استفاده می‌شوند از سند ICRP 53^[3] و الحاقیه‌های بعدی آن، به دست آورد. توصیه می‌شود ایزوتوپ‌های پرتوزای ید به شکل بخار فرض شوند، مگر این‌که اطلاعات مشخص موجود حاکی از آن باشد که آن ماده به شکل دیگری مصرف می‌شود.

میزان احتمالی ماده پرتوزای وارد شده به بدن را می‌توان طبق فرمول (۲) محاسبه کرد:

$$I = B \times T_{work} \times C_m \quad (2)$$

که در آن:

B متوسط نرخ تنفس یک فرد در حالت سکون است (برابر با $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)؛

T_{work} مدت زمانی که فرد در محیطی با هوای پرتوزا قرار داشته (برحسب h)؛ و

C_m میزان غلظت رادیونوکلئید در هوا (برحسب $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) می‌باشد.

اگر اطلاعات قابل اعتماد دیگری در دسترس نباشد یا این اطلاعات را از محل کار و/یا اندازه‌گیری‌های فردی نتوان به دست آورد، برای تعیین این که آیا برنامه مونی‌تورینگ داخلی برای کارکنان پزشکی هسته‌ای مورد نیاز است، می‌توان از معیارهای پیشنهاد شده مندرج در سند IAEA Safety Guide RS-G-1.2^[4] و معیارهای بیان شده در پیوست الف استفاده کرد (به منابع [۵]، [۶] و [۷] کتاب‌نامه مراجعه شود).

۳-۵ برنامه‌های مونیتورینگ

۱-۳-۵ کلیات

عواملی که ضرورت یک برنامه مونیتورینگ را تعیین می‌کنند عبارت است از:

- میزان پرتوگیری‌های احتمالی؛
 - شناسایی رویدادهای منجر به ورود ماده پرتوزا به بدن؛
 - ارزیابی اثربخشی تجهیزات حفاظتی.
- برنامه مونیتورینگ می‌تواند شامل مونیتورینگ فردی و/یا محل کار باشد. این دو نوع مونیتورینگ اطلاعات مختلفی را فراهم می‌کنند.
- مونیتورینگ فردی اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی پرتوگیری داخلی یک فرد را با اندازه‌گیری پرتوایی‌های بدن آن فرد، نرخ دفع، یا پرتوایی استنشاق شده (با استفاده از نمونه‌بردارهای هوای فردی) فراهم می‌کند.
 - مونیتورینگ محل کار، با استفاده از مونیتورینگ هوا یا اندازه‌گیری آلودگی سطحی، به ارزیابی احتمال پرتوگیری داخلی کارکنان از طریق استنشاق کمک می‌کند و اطلاعاتی را در مورد ریسک آلودگی برای تنظیم برنامه‌های مونیتورینگ فردی کارکنان فراهم می‌کند. از آن جا که مونیتورینگ محل کار، شاخص‌های مفیدی را برای پیش‌بینی دزها و برقراری اقدامات حفاظتی در بهره‌برداری فراهم می‌کند، مکمل مونیتورینگ فردی محسوب می‌شود.
- همان‌طور که در استاندارد ISO 20553 بیان شده است، اگر فردی در معرض پرتوگیری شغلی قرار گیرد و سهم دز ناشی از ورود رادیونوکلئیدها به بدن او قابل توجه باشد، یک برنامه مونیتورینگ آلودگی داخلی الزامی است. همچنین اگر سطح دز مؤثر اجباری سالانه احتمالی بیشتر از 1 mSv باشد، برنامه مونیتورینگ آلودگی داخلی توصیه می‌شود.
- طبق ارزیابی ریسک، برای کارکنان در معرض پرتوگیری از چشمه‌های باز رادیونوکلئیدهای پزشکی در بخش‌های پزشکی هسته‌ای، می‌توان دسته‌بندی‌های متفاوت زیر از برنامه‌های مونیتورینگ را پیاده‌سازی کرد:
- برنامه‌های مونیتورینگ تأییدی؛
 - برنامه‌های مونیتورینگ تریاژ؛
 - برنامه‌های مونیتورینگ دوره‌ای یا وابسته به کار؛
 - برنامه‌های مونیتورینگ ویژه به دنبال ورود تصادفی ماده پرتوزا به بدن.

۵-۳-۲ برنامه‌های مونی‌تورینگ تأییدی

مونی‌تورینگ تأییدی، که شامل مونی‌تورینگ محل کار و/یا مونی‌تورینگ فردی است و به صورت گهگاه یا با فواصل زمانی منظم انجام می‌شود، برای بررسی مفروضات مربوط به شرایط پرتوگیری ناشی از روش‌های اجرایی انتخاب‌شده، مثلاً اثربخشی اقدامات حفاظتی، لازم می‌باشد. توصیه می‌شود داده‌های ثبت‌شده به صورت دوره‌ای بررسی شوند زیرا می‌توانند نیاز به مونی‌تورینگ تریاژ، دوره‌ای یا وابسته به کار را نشان دهند. توصیه می‌شود زمان پیاده‌سازی در حین انجام آن فرایندی باشد که به‌عنوان بالاترین ریسک پرتوگیری داخلی شناسایی شده است.

مونی‌تورینگ تأییدی برای اندازه‌گیری دز در نظر گرفته نشده است. با این حال، می‌توان از آن برای بررسی ریسک آلودگی و تخمین دز احتمالی استفاده کرد و به دنبال این بررسی، نتیجه مونی‌تورینگ تأییدی می‌تواند نیاز به اجرای یک برنامه مونی‌تورینگ دوره‌ای یا تریاژ را نشان دهد.

۵-۳-۳ برنامه‌های مونی‌تورینگ دوره‌ای

برنامه‌های مونی‌تورینگ دوره‌ای برای کمی‌سازی پرتوگیری‌ها در مکان‌هایی که ورود تصادفی مواد پرتوزای شناسایی نشده یا ورود مزمن مواد پرتوزا به بدن محتمل است انجام می‌شود. اساس برنامه‌های مونی‌تورینگ دوره‌ای بر این فرض استوار است که شرایط کار و در نتیجه ریسک‌های ورود ماده پرتوزا به بدن، به صورت معقول ثابت باقی می‌مانند. طراحی چنین برنامه‌ای به منظور انجام اندازه‌گیری‌های منظم شدیداً به میزان دز سالانه‌ای که مقدار آن تضمین شده است، بستگی دارد. توصیه می‌شود این میزان به مراتب کمتر از حدود قانونی مرتبط باشد. همچنین توصیه می‌شود عدم قطعیت‌ها (به‌عنوان مثال، در اندازه‌گیری پرتوزایی و ارزیابی دز) در تعریف آن لحاظ شود. اگر این مقدار خیلی زیاد باشد، ممکن است مقادیری از ماده پرتوزای وارد شده به بدن که بخش‌های قابل توجهی از حدود دز را نشان می‌دهد، نادیده گرفته شوند. اگر این مقدار کم در نظر گرفته شود می‌تواند منجر به صرف وقت و انرژی غیرضروری شود.

۵-۳-۴ برنامه‌های مونی‌تورینگ تریاژ

برنامه‌های مونی‌تورینگ تریاژ به اندازه‌گیری‌های غربالگری فردی مکرر انجام شده در محل کار توسط کارکنان محلی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی استاندارد برای تشخیص این که آیا ورود احتمالی ماده پرتوزا به بدن رخ داده است، متکی است. اگر چه اندازه‌گیری‌های غربالگری، در مقایسه با اندازه‌گیری‌های درون‌تنی یا برون‌تنی انجام شده در چارچوب یک برنامه مونی‌تورینگ دوره‌ای، امکان محاسبه یک مقدار صحیح یا دقیق برای دز جذبی را فراهم نمی‌کند، اما می‌تواند برای تعیین این که آیا عبور از آستانه دز اتفاق افتاده است، مورد استفاده قرار گیرد. اگر عبور از آستانه غربالگری اتفاق افتاده باشد، آزمایش‌های زیست‌سنجی پرتوی درون‌تنی یا برون‌تنی به منظور تأیید آلودگی داخلی و تعیین میزان پرتوزایی وارد شده انجام می‌شود.

۵-۳-۵ برنامه‌های مونیوتورینگ وابسته به کار

برنامه‌های مونیوتورینگ وابسته به کار، برای یک عملیات معین به کار می‌رود. هدف و معیار دز برای انجام برنامه‌های مونیوتورینگ وابسته به کار، همانند هدف و معیار دز در برنامه‌های مونیوتورینگ دوره‌ای می‌باشد.

در پزشکی هسته‌ای، برنامه‌های مونیوتورینگ وابسته به کار، به منظور تهیه داده‌های لازم برای ارزیابی دز و فرایند بهینه‌سازی حفاظت در برابر پرتو در مورد یک پروتکل جدید تشخیصی یا درمانی و عملیات انجام شده در مدت زمان محدود، الزام شده است. این برنامه مونیوتورینگ پس از ایجاد تغییرات عمده در تأسیسات یا روش‌های اجرایی بهره‌برداری نیز ضروری است. الزامات کلی که در زیربند ۸-۱ برای برنامه‌های مونیوتورینگ دوره‌ای اجرا می‌شود، باید در برنامه‌های مونیوتورینگ وابسته به کار نیز به کار گرفته شود. برخلاف برنامه‌های مونیوتورینگ دوره‌ای، در این نوع برنامه‌ریزی در مورد شرایط یک رویداد منجر به ورود ماده پرتوزا به بدن، به‌ویژه در مورد زمان بین اندازه‌گیری و ورود ماده پرتوزا به بدن، اطلاعات بیشتری می‌تواند در دسترس باشد. اهداف یک برنامه مونیوتورینگ وابسته به کار و روش سازماندهی آن، شامل مبانی تفسیر نتایج، باید مستند شود.

۵-۳-۶ برنامه‌های مونیوتورینگ ویژه

برنامه‌های مونیوتورینگ ویژه برای اندازه‌گیری پرتوگیری‌های قابل توجه پس از رویدادهای غیرعادی واقعی یا مشکوک (به‌عنوان مثال، ریختن یک محلول رادیو دارو)، یا در صورت غربالگری مثبت در هنگام مونیوتورینگ تریاژ انجام می‌شود. بنابراین، در مقایسه با برنامه‌های مونیوتورینگ دوره‌ای، زمان ورود ماده پرتوزا به بدن معمولاً به صورت دقیقتر مشخص است. همچنین اطلاعات تکمیلی که به کاهش عدم قطعیت در ارزیابی دز کمک می‌کند نیز می‌تواند در دسترس باشد. اهداف ارزیابی دز در چنین مواردی شامل کمک به تصمیم‌گیری در مورد اقدامات متقابل (مثلاً تزریق درمانی)، انطباق با ضوابط قانونی و کمک به تصمیم‌گیری برای بهبود شرایط در محل کار است. در بیشتر موارد، برنامه‌های مونیوتورینگ ویژه به صورت انفرادی انجام می‌شود. در مواردی که دلایلی مبنی بر امکان عدول از حد مجاز دز مؤثر سالانه وجود دارد، توسعه اندازه‌گیری‌ها به منظور استخراج توابع ابقاء و دفع مختص فرد و پارامترهای مدل بیوکینتیک^۱ می‌تواند مناسب باشد.

۵-۳-۷ پیاده‌سازی یک برنامه مونیوتورینگ

به منظور کمک به پیاده‌سازی برنامه‌های مونیوتورینگ، فلوچارت تفصیلی شکل ۱ پیشنهاد می‌شود. این فلوچارت برنامه‌های مونیوتورینگ را برای به کارگیری سه نقطه شروع مطابق با موقعیت‌های مختلف به شرح زیر ارائه می‌کند:

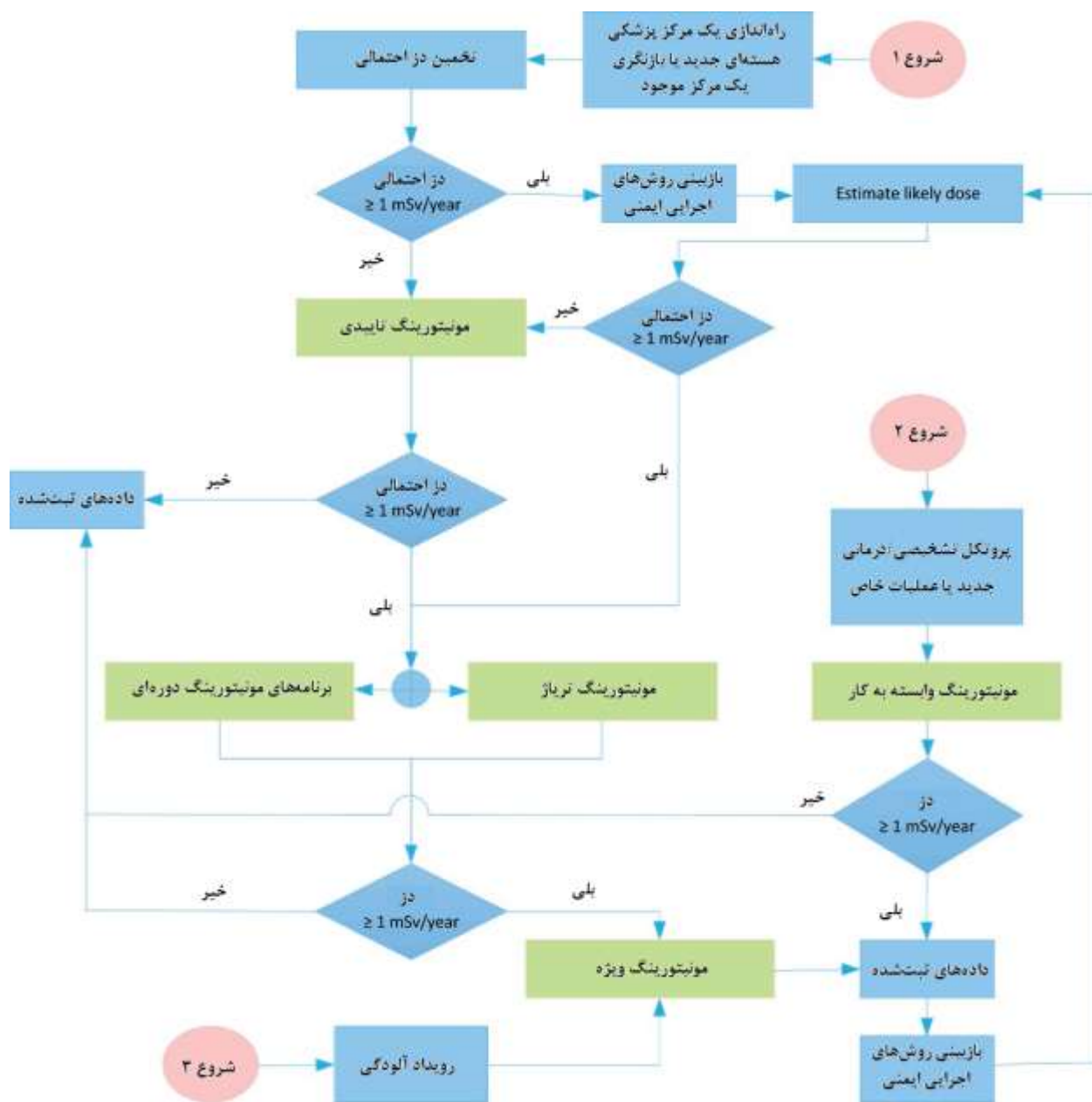
الف- راه‌اندازی یک مرکز پزشکی هسته‌ای جدید یا بازنگری مرکز موجود؛

1- Biokinetic

ب- توسعه و تدوین یک پروتکل جدید (به عنوان مثال برای یک رادیو داروی جدید)؛

پ- مشکوک بودن به یک آلودگی تصادفی.

بررسی دوره‌ای برنامه‌های مونیتورینگ باید با توجه به داده‌های ثبت‌شده (نتایج اندازه‌گیری‌های آلودگی داخلی، زمان انجام آن و دزهای ارزیابی‌شده) انجام شود.



شکل ۱- فلوجارت پیاده‌سازی برنامه‌های مونیتورینگ

۶ رادیونوکلئیدهای متعارف

بیشتر رادیونوکلئیدهای استفاده شده در پزشکی هسته‌ای دارای نیمه‌عمرهای کوتاه هستند (به جدول ۱ مراجعه شود). برای کاربرد تشخیصی، انرژی گسیل شده با کمترین جذب توسط بافت، باید به آشکارساز سنتیلاسیون^۱ دوربین گاما تخلیه شود و برعکس، برای کاربرد درمانی، انرژی باید در بافت نشست کند. بنابراین، رادیونوکلئیدهای با واپاشی γ یا β^+ برای تصویربرداری و رادیونوکلئیدهای با واپاشی‌های α و β^- برای اهداف درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱- متداولترین رادیونوکلئیدهای مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای

تابش‌های اصلی	نیمه‌عمر ^a	رادیونوکلئیدها
β^+ , γ^i	۲۰٫۳۹ min	C-11
β^+ , γ^i	۱۲۲٫۲۴ s	O-15
e^- , β^+ , γ^i	۱۰۹٫۷۷ min	F-18
e^- , X, γ	۳٫۲۶ d	Ga-67
β^+ , γ^i , γ	۶۷٫۷۱ min	Ga-68
β^- , γ	۵۰٫۵۳ d	Sr-89
β^-	۶۴٫۱۰ h	Y-90
e^- , X, γ	۶٫۰۲ h	Tc-99m
e^- , X, γ	۲٫۸۰ d	In-111
e^- , X, γ	۱۳٫۲۷ h	I-123
e^- , β^- , X, γ	۸٫۰۲ d	I-131
e^- , β^- , X, γ	۴۶٫۵۰ h	Sm-153
β^- , γ	۹٫۴۰ d	Er-169
β^- , γ	۶٫۶۵ d	Lu-177
e^- , β^- , X, γ	۳٫۷۲ d	Re-186
e^- , β^- , X, γ	۱۷٫۰۰ h	Re-188
e^- , X, γ	۷۲٫۹۱ h	Tl-201
α , β^- , X, γ	۱۱٫۴۳ d	Ra-223

^a مطابق با سند ICRP 107^[8]
ⁱ فوتون‌های نابودی

۷ آستانه‌های مرجع

آستانه‌های مرجع مقادیری از کمیت‌ها هستند که برای مقادیر بالاتر از آن باید یک اقدام انجام یا یک تصمیم خاص گرفته شود. هدف از قراردادن این آستانه‌ها آن است که بتوان از اقدامات غیرضروری و بی‌نتیجه جلوگیری کرد و بتوان منابع را در مواردی که بیشتر مورد نیاز است، استفاده کرد. آستانه‌های مرجع شامل آستانه ثبت و آستانه بررسی است. آستانه ثبت مقداری از یک کمیت است که هر ارزیابی دز بالاتر از آن باید ثبت شود و مقادیر کمتر از آن قابل صرف‌نظر کردن هستند. آستانه بررسی مقداری از یک کمیت است که پرتوگیری‌های تخمین‌زده شده بالاتر از آن باید با بررسی‌های تکمیلی تأیید شود (به جدول ۲ مراجعه شود).

یادآوری- بررسی دلایل یا پیامدهای پرتوگیری یا ورود ماده پرتوزا به بدن در دامنه کاربرد این استاندارد قرار ندارد.

آستانه ثبت (با در نظر گرفتن طول بازه زمانی مونیتورینگ) باید مقداری مرتبط با دز سالانه بوده و از ۵٪ حد دز سالانه بیشتر نباشد. آستانه بررسی باید مقداری مرتبط با دز سالانه بوده و از ۳۰٪ حد دز سالانه بیشتر نباشد.

جدول ۲- آستانه‌های مرجع برای مونیتورینگ پرتوگیری‌های داخلی

آستانه	مفهوم
آستانه ثبت	آستانه ثبت، مقداری از دز، پرتوگیری یا ورود ماده پرتوزا به بدن است که برای مقادیر بزرگتر یا مساوی آن ارزیابی‌های دز باید در سابقه پرتوگیری هر فرد ثبت شود. آستانه ثبت باید مقداری منطبق با دز سالانه که بیشتر از ۵٪ حد دز سالانه نباشد، قرار داده شود. نتایج کمتر از این آستانه ممکن است به صورت «کمتر از آستانه ثبت» نمایش داده شود.
آستانه بررسی	آستانه بررسی، مقداری از دز، پرتوگیری یا ورود ماده پرتوزا به بدن است که برای مقادیر بزرگتر یا مساوی آن، به‌منظور کاهش عدم قطعیت مرتبط با ارزیابی دز، باید بررسی انجام شود. این آستانه باید مقداری منطبق با دز سالانه که بالاتر از ۳۰٪ حد دز سالانه باشد، قرار داده شود.

۸ برنامه‌های مونیتورینگ دوره‌ای

۱-۸ کلیات

در یک برنامه مونیتورینگ دوره‌ای اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های از پیش تعیین‌شده انجام می‌شوند و به رویدادهای شناخته‌شده ورود ماده پرتوزا به بدن، مربوط نیستند. بنابراین در خصوص روش‌ها، دوره‌های زمانی و مدل‌های بیوکینتیک مربوط باید از قبل تصمیمات لازم گرفته شده باشد. برای ارزیابی مقادیر اندازه‌گیری‌شده ناشی از ورود مواد پرتوزا به بدن، لازم است در رابطه با فاصله بین زمان ورود ماده پرتوزا به بدن و زمان اندازه‌گیری، مفروضاتی در نظر گرفته شوند.

الزامات کلی زیر باید هنگام تعیین یک برنامه مونیتورینگ دوره‌ای رعایت شوند:

- پیامدهای ناشی از نامعلوم بودن فاصله زمانی بین ورود ماده پرتوزا به بدن و انجام اندازه‌گیری باید محدود شود، به طوری که:
 - به طور متوسط، در اکثر بازه‌های زمانی مونیتورینگ، دزهای تخمینی کمتر از مقدار واقعی^۱ نباشند؛
 - حداکثر مقدار دز تخمینی کمتر از مقدار واقعی ناشی از یک‌بار ورود ماده پرتوزا به بدن از فاکتور ۳ بیشتر نشود.
 - باید اطمینان حاصل شود که تمام پرتوگیری‌های سالانه که می‌توانند بیشتر از ۱ mSv باشند، آشکارسازی می‌شوند؛
 - باید سالانه حداقل دو اندازه‌گیری انجام شود.
- حداکثر تخمین بیشتر از مقدار واقعی^۲، تقریباً در تمامی موارد بیشتر از حداکثر تخمین کمتر از مقدار واقعی است. محدودیت در حداکثر تخمین کمتر از مقدار واقعی ناشی از یک‌بار ورود ماده پرتوزا به بدن، مانع از داشتن یک تخمین بیش از مقدار واقعی قابل توجه نمی‌شود.
- این الزامات به همراه مفروضات مربوط به الگوی ورود ماده پرتوزا به بدن و حساسیت روش‌های اندازه‌گیری انتخابی، بازه‌های زمانی اندازه‌گیری‌های دوره‌ای را تعیین می‌کنند.
- در پزشکی هسته‌ای، توصیه می‌شود برای کارکنانی که به طور معمول درگیر درمان بیماران با مقادیر قابل توجهی از I-131 هستند، مونیتورینگ دوره‌ای بر اساس اندازه‌گیری‌های فردی در نظر گرفته شود.
- برای این منظور، اندازه‌گیری‌های درون‌تنی تیروئید می‌تواند در یک آزمایشگاه زیست‌سنجی پرتوی یا در بخش پزشکی هسته‌ای با استفاده از دوربین گاما (به منبع [۹] کتاب‌نامه مراجعه شود) یا پروب تیروئید انجام شود (به منابع [۱۰] و [۱۱] کتاب‌نامه مراجعه شود).
- اهداف یک برنامه مونیتورینگ و نحوه سازماندهی آن باید شامل اصولی برای تفسیر نتایج باشد. برنامه مونیتورینگ باید پس از انجام هر تغییر عمده در نصب، بهره‌برداری یا الزامات مرجع قانونی با استفاده از یک برنامه مونیتورینگ تأییدی بازنگری شود.

1- Underestimation
2- Overestimation

۸-۲ مونیترینگ فردی

مونیترینگ فردی رادیونوکلئیدها می‌تواند با اندازه‌گیری‌های درون‌تنی یا آنالیزهای برون‌تنی، با نمونه‌گیری مستمر از هوا با استفاده از وسایل نمونه‌گیری هوای فردی یا با ترکیبی از تمامی این روش‌ها انجام شود. این انتخاب به چندین عامل بستگی دارد، مانند:

- تابش گسیل‌شده از رادیونوکلئید و دختران آن؛
- آهنگ واپاشی رادیونوکلئید؛
- نشست رادیونوکلئید در بدن یا آهنگ دفع آن از بدن به‌صورت تابعی از فاصله زمانی بین ورود ماده پرتوزا به بدن و زمان اندازه‌گیری؛
- دانش بیوکینتیک، نشست در ارگان بدن و مسیر دفع رادیونوکلئید؛
- امکان‌سنجی فنی اندازه‌گیری.

۸-۳ روش‌ها و بازه‌های زمانی مونیترینگ

فاصله زمانی بین دو اندازه‌گیری (ΔT)، برحسب روز) در برنامه مونیترینگ دوره‌ای به ابقاء و دفع رادیونوکلئید، حساسیت تکنیک‌های اندازه‌گیری در دسترس و عدم قطعیت قابل‌قبول در زمان تخمین میزان سالانه ورود ماده پرتوزا به بدن و دز مؤثر اجباری بستگی دارد.

این فواصل زمانی که در فرمول‌های (۳) و (۴) ارائه شده‌اند، با دو الزام زیر مطابقت دارند:

- باید از آشکارسازی تمام پرتوگیری‌های سالانه که می‌توانند بیشتر از ۱ mSv باشد، اطمینان حاصل شود [طبق فرمول (۳)؛

- حداکثر تخمین کمتر از مقدار واقعی بالقوه نباید بیشتر از فاکتور ۳ باشد؛ فرض بر این است که یک ورود ماده پرتوزا به بدن در وسط بازه مونیترینگ رخ داده است [طبق فرمول (۴)].

$$e(50) \times \frac{A_{DL}}{m(\Delta T)} \times \frac{365}{\Delta T} \leq 1 \text{ mSv} \quad (3)$$

$$e \frac{m(\frac{\Delta T}{2})}{m(\Delta T)} \leq 3 \quad (4)$$

که در آن:

$e(50)$ ضریب دز برای استنشاق (دز مؤثر اجباری انباشته‌شده در یک دوره ۵۰ ساله پس از ورود یک واحد ماده پرتوزا به بدن) است؛

$m(t)$ مقدار پیش‌بینی شده از کمیت اندازه‌گیری شده در زمان t پس از ورود یک واحد ماده پرتوزا به بدن (تابع دفع یا ابقاء در زمان t برای ورود یک واحد ماده پرتوزا به بدن) است؛

ΔT فاصله زمانی (برحسب روز) بین دو اندازه‌گیری متوالی در یک برنامه مونیورینگ دوره‌ای است؛
 A_{DL} مقدار حد آشکارسازی برای اندازه‌گیری‌های دوره‌ای است.

برای مونیورینگ دوره‌ای I-131، روش ترجیحی اندازه‌گیری تیروئید است و بر اساس اصول شرح داده شده فوق، حداکثر فاصله زمانی بین اندازه‌گیری‌های تیروئید ۱۵ d می‌باشد که با پیروی از مفروضات زیر مندرج در استاندارد ISO 20553 در نظر گرفته است:

- برای استنشاق، مدل مسیر تنفسی مندرج در سند ICRP 66^[9]؛
- تابع‌های ابقاء و دفع ید تعریف شده در سند ICRP 78^[13]؛
- ورود حاد ماده پرتوزا به بدن از طریق استنشاق در وسط بازه مونیورینگ. برای ورود مزمن مواد پرتوزا به بدن، این یک فرض معقول است و روی هم‌رفته مانع از تخمین کمتر از مقدار واقعی میزان ورود ماده پرتوزا به بدن می‌شود.
- مقادیر DL برای اندازه‌گیری‌های دوره‌ای مندرج در سند ICRP 78. در تأسیساتی که در آن DL دستگاه شمارش‌گر به‌طور معنی‌داری با مقدار داده شده در سند ICRP 78 (یعنی Bq ۱۰۰) متفاوت است، توصیه می‌شود یک دوره زمانی مخصوص برای مونیورینگ دوره‌ای تعیین شود.
- هنگامی که اندازه‌گیری‌های تیروئید امکان‌پذیر نیست، با آگاهی از این که در مونیورینگ ادرار ممکن است سطح آشکارسازی ۱ mSv قابل دستیابی نباشد، آنالیز برون‌تنی ادرار با همان حداکثر فاصله زمانی، یعنی ۱۵ d، روش جایگزین است. توصیه می‌شود رواداری^۱ فاصله زمانی بیشتر از ۲ d نباشد.
- همان‌طور که در بالا بیان شده است، در یک برنامه مونیورینگ دوره‌ای باید از آشکارسازی تمام پرتوگیری‌های سالانه که می‌توانند بیشتر از ۱ mSv باشند اطمینان حاصل شود. بنابر مفروضات بالا، برای مونیورینگ ورود I-131 به بدن با فاصله زمانی ۱۵ d، پرتوایی‌های اندازه‌گیری‌شده معادل با دز مؤثر اجباری سالانه ۱ mSv، در صورت آشکارسازی در هر بازه زمانی، مطابق زیر است:
- برای اندازه‌گیری درون‌تنی تیروئید: Bq ۳۰۰؛
- برای اندازه‌گیری برون‌تنی ادرار: $Bq \cdot d^{-1}$ ۰٫۴.

۹ برنامه‌های مونیورینگ تریاژ

همان‌طور که در بالا تعریف شد، ممکن است مونیورینگ دوره‌ای فردی برای رادیونوکلیدهای با نیمه‌عمر کوتاه‌تر از I-131 امکان‌پذیر نباشد. در این حالت، هنگامی که دز احتمالی تعیین شده بر اساس روش شرح داده شده در زیربند ۵-۲ بیشتر از 1 mSv/year باشد، امکان اجرای مونیورینگ تریاژ در بخش پزشکی

1- Tolerance

هسته‌ای وجود دارد و در صورت نتیجه مثبت، به منظور ارزیابی دز مؤثر اجباری $E(50)$ ، با شمارش به روش مستقیم یا به روش آزمایش آنالیز غیرمستقیم ادرار در آزمایشگاه ارائه‌دهنده خدمت رادیویست‌سنجی، پیگیری می‌شود (به منبع [۱۴] کتاب‌نامه مراجعه شود).

مونیتورینگ تریاژ براساس اندازه‌گیری‌های غربالگری مکرر انجام شده در محل کار توسط کارکنان با استفاده از دستگاه‌های استاندارد آزمایشگاهی است. این روش می‌تواند شامل موارد زیر باشد (به منبع [۱۴] کتاب‌نامه مراجعه شود):

- اندازه‌گیری‌های مکرر با مونیتور آهنگ دز کالیبره‌شده در مقابل شکم برای رادیونوکلئیدهایی با نیمه‌عمر فیزیکی بسیار کوتاه (کوچکتر یا مساوی ۶ h)، مانند Tc-99m (اندازه‌گیری‌های روزانه) و موارد استفاده در تصویربرداری توموگرافی گسیل پوزیترون، یعنی C-11، F-18 و Ga-68 (اندازه‌گیری‌های نیمه‌روزانه). برای O-15، اندازه‌گیری تریاژ را می‌توان پس از آشکارسازی آلودگی هوا توسط یک سیستم هشداردهنده انجام داد؛
- بلافاصله پس از استفاده از رادیونوکلئیدهای بتازای خالص^۱، یعنی Y-90، به‌علاوه رادیونوکلئیدهای بتازای همراه با گامای کم شدت، یعنی Sm-153، Lu-177، Re-186 و Re-188، اندازه‌گیری با یک مونیتور آلودگی دست انجام می‌شود؛
- اندازه‌گیری توسط مونیتور آلودگی سطحی کالیبره‌شده در مقابل تیروئید برای I-123 یا با یک مونیتور ریه یا مونیتور دز کالیبره‌شده در مقابل قفسه سینه برای Ga-67، In-111 و Tl-201. توصیه می‌شود فرکانس اندازه‌گیری برای هر رادیونوکلئید متناسب با حد آشکارسازی تعیین شود.
- مونیتورینگ محل کار از جمله اندازه‌گیری آلودگی سطحی نیز می‌تواند به‌عنوان بخشی از یک برنامه مونیتورینگ تریاژ انجام شود.

۱۰ برنامه‌های مونیتورینگ ویژه

۱-۱۰ کلیات

- برنامه‌های مونیتورینگ ویژه به اندازه‌گیری‌هایی برمی‌گردد که در هنگام مشکوک شدن نسبت به ورود ماده پرتوزا به بدن پس از وقوع یک رویداد انجام شده و باید طی آن داده‌های لازم برای موارد زیر تهیه شود:
- ارزیابی دز مورد نیاز برای برآورد ریسک و تعیین نیاز به هر درمان؛
 - فرایند بهینه‌سازی حفاظت پرتوی.

در مقایسه با برنامه‌های مونیتورینگ دوره‌ای، برنامه‌های مونیتورینگ ویژه می‌توانند در مورد شرایط یک رویداد ورود ماده پرتوزا به بدن، به‌ویژه در مورد فاصله زمانی بین اندازه‌گیری و ورود ماده پرتوزا به بدن اطلاعات بیشتری فراهم کند.

اهداف یک برنامه مونیتورینگ ویژه و نحوه سازماندهی آن، شامل معیارهای تفسیر نتایج، باید مستند شوند.

۱۰-۲ مونیتورینگ محل کار

مونیتورینگ هوا و مونیتورینگ آلودگی سطحی می‌تواند برای مشخص کردن محل آلوده شده به مواد پرتوزا مورد استفاده قرار گیرد.

۱۰-۳ مونیتورینگ فردی

هدف از مونیتورینگ فردی ویژه، حصول اطمینان از این است که هر رویداد ورود ماده پرتوزا به بدن در مرحله اولیه تشخیص داده شده و دزهای اجباری مرتبط ارزیابی شده است. برنامه‌های مونیتورینگ ویژه تحقیقی بوده و معمولاً شامل یک برنامه ترکیبی مناسب شامل روش‌های اندازه‌گیری درون‌تنی و آنالیزهای برون‌تنی به‌همراه مدل مناسب بیوکینتیک می‌باشند.

- اندازه‌گیری درون‌تنی یا مستقیم: مقدار رادیونوکلیید درون بدن به سرعت در دسترس بوده و نشان می‌دهد که آیا ورود قابل توجهی از ماده پرتوزا به بدن رخ داده است.

- آنالیز برون‌تنی یا غیرمستقیم: معمولاً ارزیابی دز قابل اعتماد بر اساس آنالیز نمونه ادرار ۲۴ h است؛ اما در مورد برنامه‌های مونیتورینگ ویژه، جمع‌آوری «نمونه‌های نقطه‌ای»^۱ می‌تواند مفید باشد.

در جدول ۳ خلاصه روش‌های توصیه‌شده برای مونیتورینگ فردی ارائه شده است. در این جدول، اثرات درمانی که می‌تواند برای کاهش دز مؤثر اجباری انجام شود، لحاظ نشده است.

جدول ۳ - روش‌های توصیه‌شده برای برنامه‌های مونتورینگ ویژه پس از استنشاق

اندازه‌گیری‌های مستقیم		آنالیزهای غیر مستقیم		رادیونوکلئید / ماده
ارگان		نمونه ادرار		
تیروئید	تمام بدن	۲۴ ساعته	نقطه‌ای	
	++		+	F-18
	++		+	Ga-67
		++		Sr-89
		++		Y-90
	++	+		Tc-99m
	++			In-111
++		+		I-123
++		+		I-131
	++	+		Sm-153
	+	++		Er-169
	++	+		Lu-177
	++	+		Re-186
	++	+		Re-188
	++	+		Tl-201
		++		Ra-223

++ = توصیه شده
+ = روش تکمیلی (مفید است، اما اجباری نیست).

در صورت مشکوک شدن به ^{18}F FDG (به منبع [۱۸] کتاب‌نامه مراجعه شود)، اگر اندازه‌گیری تا ۱ d پس از وقوع حادثه انجام شود، مونتورینگ مستقیم F-18 در مغز برای تشخیص سطوح کمتر از ۱ mSv مؤثر است (به منبع [۱۵] کتاب‌نامه مراجعه شود).

در جدول ۱، C-11 و O-15 به دلیل نیمه‌عمر بسیار کوتاه آن‌ها ارائه نشده است. با این حال آلودگی توسط C-11 را با اندازه‌گیری‌های مستقیم بسیار سریع پس از رویداد ورود ماده پرتوزا به بدن می‌توان اندازه‌گیری کرد.

۱۱ برنامه‌های مونتورینگ تأییدی

۱-۱۱ کلیات

برنامه‌های مونتورینگ تأییدی برای بررسی فرضیات مربوط به شرایط پرتوگیری با در نظر گرفتن روش‌های انتخابی، مثلاً اثربخشی اقدامات حفاظتی، ضروری هستند. این برنامه‌ها ممکن است شامل مونتورینگ محل کار یا مونتورینگ فردی باشد. به منظور حصول اطمینان از رضایت‌بخش بودن شرایط کاری، اندازه‌گیری‌های

دوره‌ای می‌تواند انجام شود. در ارتباط با مسئول فیزیک بهداشت^۱، نتایج مونتورینگ محل کار (آزمون‌های نمونه‌برداری سطحی^۲ و اندازه‌گیری نمونه‌های هوا) با اندازه‌گیری‌های آلودگی ایجاد شده در افراد می‌تواند مقایسه شوند و در صورت لزوم سیستم حفاظت در برابر پرتو اصلاح شود. به‌عنوان مثال، مونتورینگ تأییدی می‌تواند نیاز به پیاده‌سازی یک برنامه مونتورینگ دوره‌ای یا تریاژ را نشان دهد.

۱۱-۲ مونتورینگ محل کار

مونتورینگ محل کار به ماهیت رادیونوکلیدها و نوع کار انجام شده مربوط است. مونتورینگ محل کار ممکن است شامل اندازه‌گیری پرتوزایی هوابرد یا آزمون نمونه‌برداری سطحی باشد.

توصیه می‌شود مونتورینگ محل کار در صورت استفاده گسترده از مواد فرار یا گازهای پرتوزا (مانند مقدار زیاد از I-131 یا Tc-99m) شامل اندازه‌گیری پرتوزایی‌های هوابرد و اندازه‌گیری آلودگی سطحی در محل کار باشد.

در صورت وجود یک پس‌زمینه تابش نسبتاً بالا، ممکن است آشکارسازی مستقیم سطح قابل توجهی از آلودگی سطحی امکان‌پذیر نباشد و ممکن است آزمون‌های نمونه‌برداری سطحی برای ارزیابی میزان رفع آلودگی ضروری باشد. در آن نواحی که ممکن است آلودگی سطحی به‌وجود آید یا وجود آن آلودگی مشکوک باشد، توصیه می‌شود تا زمانی که نتایج مونتورینگ خلاف آن را تأیید کند، کل آن ناحیه و هر چه که در آن ناحیه قرار دارد، آلوده فرض شود (به سند ICRP 57 مراجعه شود).

اهداف اصلی مونتورینگ پرتوزایی هوابرد عبارتند از:

- کمک به ارزیابی احتمالی پرتوگیری داخلی کارکنان از طریق استنشاق،
- ارائه اطلاعات برای تنظیم برنامه‌های مونتورینگ فردی کارکنان.

توصیه می‌شود پرتوزایی هوابرد I-131 در هات سل^۳، اتاق‌های درمان ید پرتوزا و نواحی مجاور، تأسیسات پسمان‌های پرتوزا و نواحی انبارش فاضلاب اندازه‌گیری شود.

همان‌طور که در زیربند ۵-۲ بیان شده است، ارزیابی دز مؤثر احتمالی می‌تواند بر اساس داده‌های مونتورینگ هوا انجام شود.

۱۱-۳ مونتورینگ فردی

مونتورینگ فردی به‌عنوان بخشی از مونتورینگ تأییدی، برای تأیید کفایت اقدامات حفاظتی و فرضیه‌های مربوط به سطح پرتوگیری می‌باشد. مونتورینگ فردی می‌تواند از طریق اندازه‌گیری‌های درون‌تنی دوره‌ای یا آنالیز دوره‌ای ادرار انجام شود. با این حال، به‌دلیل نیمه‌عمر پایین رادیونوکلیدهای مورد استفاده در تشخیص

1- Radiation protection officer
2- Wipe tests
3- Hot cell

یا درمان در حوزه پزشکی هسته‌ای، اندازه‌گیری‌های درون‌تنی برای شناسایی آلودگی‌ها، به‌ویژه برای رادیونوکلئیدهای معمولی مانند Tc-99m یا F-18 بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اندازه‌گیری‌های درون‌تنی (مستقیم) را می‌توان توسط دستگاه شمارش تمام بدن که در نزدیکی بخش پزشکی هسته‌ای قرار گرفته است، انجام داد. برای بخش‌های دور از چنین امکاناتی، آزمایشگاه‌های سیار^۱ به‌منظور انجام اندازه‌گیری در محل می‌تواند انتخاب مناسبی باشد (به منابع [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] کتاب‌نامه مراجعه شود).

۱۲ تکنیک‌های اندازه‌گیری و معیارهای اجرایی

۱-۱۲ کلیات

در مونی‌تورینگ دوره‌ای، مونی‌تورینگ ویژه یا مونی‌تورینگ تأییدی، بسته به عواملی مانند ترکیب شیمیایی آلودگی درگیر، سطح احتمالی آلودگی و در دسترس بودن تکنیک‌های اندازه‌گیری، تکنیک‌های اندازه‌گیری درون‌تنی و/یا برون‌تنی، تکنیک‌های مونی‌تورینگ محل کار یا ترکیبی از این تکنیک‌ها ممکن است مورد استفاده قرار گیرند.

همان‌طور که در بالا شرح داده شده است، ریسک ورود I-131 به بدن بالا بوده و این مورد بیشترین علت دز داخلی کارکنان پزشکی هسته‌ای محسوب می‌شود. با توجه به هزینه‌های مرتبط با حمل و نقل کارکنان یا انتقال نمونه‌های زیست‌سنجی به آزمایشگاه، ممکن است مراکز پزشکی هسته‌ای از وسایل موجود برای انجام مونی‌تورینگ کارکنانی که با ید پرتوزا سر و کار دارند استفاده کنند. اندازه‌گیری‌ها می‌توانند با استفاده از دوربین گاما (به منبع [۹] کتاب‌نامه مراجعه شود) یا پروب تیروئید انجام شوند (به منابع [۱۰] و [۱۱] کتاب‌نامه مراجعه شود).

با توجه به این که شرح مفصل روش‌ها و تکنیک‌های اندازه‌گیری فراتر از هدف و دامنه کاربرد این استاندارد است، در زیربندهای بعدی شرح مختصری در مورد تکنیک‌های اندازه‌گیری در دسترس برای اندازه‌گیری درون‌تنی و برون‌تنی، ارائه شده است.

توصیه می‌شود آزمایشگاه‌های ارائه دهنده خدمات زیست‌سنجی پرتوی که اندازه‌گیری‌های درون‌تنی یا برون‌تنی را برای کارکنان پزشکی هسته‌ای انجام می‌دهند، معیارهای ارائه شده در استاندارد ISO 28218 را اعمال کنند. توصیه می‌شود این معیارها توسط آزمایشگاه‌های ثابت و همچنین آزمایشگاه‌های سیار مورد استفاده قرار گیرند.

در زیربند ۱۲-۳ این استاندارد، الزاماتی برای اندازه‌گیری‌های تیروئید انجام شده در بخش‌های ارائه دهنده خدمات پزشکی هسته‌ای تعیین شده است.

1- Mobile laboratories

۱۲-۲ اندازه‌گیری‌های انجام شده در یک آزمایشگاه تخصصی زیست‌سنجی پرتوی

۱۲-۲-۱ اندازه‌گیری برون‌تنی

اندازه‌گیری برون‌تنی برای مونیتورینگ آلودگی داخلی به‌وسیله رادیونوکلیدهای مورد استفاده در بخش پزشکی هسته‌ای به استثناء آن‌هایی که نیمه‌عمر بسیار کوتاه دارند (C-11 و O-15) قابل کاربرد است. آنالیز ادرار تنها روش زیست‌سنجی است که معمولاً به‌کار گرفته می‌شود. پیشنهاد می‌شود، نمونه ۲۴ ساعته ادرار از فرد جمع‌آوری شود.

روش معمول برای اندازه‌گیری کمی رادیونوکلیدهای گسیل‌کننده گاما، اندازه‌گیری پرتو گاما به روش طیف‌سنجی گاما در یک نمونه آزمون است. حد آشکارسازی برای نمونه آزمون با حجم ۵۰۰ ml در شمارش یک ساعته و در زمان اندازه‌گیری، تقریباً ۱ Bq/l است.

اندازه‌گیری رادیونوکلیدهای گسیل‌کننده بتا، به‌وسیله سنتیلاسیون مایع، دستیابی به حد آشکارسازی حدود ۵۰ Bq/l در یک نمونه آزمون با حجم ۲ ml در زمان شمارش ۶۰ min را ممکن می‌کند.

به‌دلیل نیاز به تجهیزات فنی پیچیده، این اندازه‌گیری‌ها نمی‌توانند در بخش پزشکی هسته‌ای انجام شوند اما در یک آزمایشگاه زیست‌سنجی پرتوی قابل انجام هستند.

۱۲-۲-۲ اندازه‌گیری‌های درون‌تنی

اندازه‌گیری‌های درون‌تنی برای مونیتورینگ کارکنان خدمات هسته‌ای عبارتند از:

- اندازه‌گیری‌های تیروئید؛

- اندازه‌گیری‌های تمام بدن.

توصیه می‌شود قبل از انجام اندازه‌گیری تمام بدن، عدم وجود آلودگی خارجی به‌ویژه در دست‌ها تأیید شود. برای تأیید آلودگی داخلی، اندازه‌گیری زیست‌سنجی برون‌تنی بر روی یک نمونه ادرار می‌تواند انجام شود.

۱۲-۲-۳ تضمین و کنترل کیفیت در آزمایشگاه‌های زیست‌سنجی

برای اطمینان از مطابقت فرایندهای تحلیلی، تجهیزات اندازه‌گیری و سایر امکانات لازم با الزامات از پیش تعیین شده، باید کنترل‌های عملکردی انجام شود. برای تصدیق مطابقت کیفیت اندازه‌گیری‌ها یا تعیین میزان پرتوآیی‌ها با الزامات درستی ارائه شده در استاندارد ISO 28218، آزمایشگاه باید روش‌های اجرایی کنترل کیفی را مدون کند.

علاوه بر این، توصیه می‌شود آزمایشگاه‌هایی که آنالیزهای برون‌تنی یا درون‌تنی و/یا ارزیابی‌های دزسنجی داخلی انجام می‌دهند در آزمون‌های مقایسه‌ای ملی یا بین‌المللی شرکت کنند.

۱۲-۳ اندازه‌گیری انجام شده در خدمات پزشکی هسته‌ای

اندازه‌گیری‌های I-131 می‌تواند در بخش پزشکی هسته‌ای با استفاده از یک دوربین گامای یا یک پروب تیروئید از قبل کالیبره شده انجام شود (به منبع [۱۹] کتاب‌نامه مراجعه شود). باید برنامه تضمین کیفیت و روش اندازه‌گیری شامل موارد زیر تدوین شود:

- شرح تجهیزات (آشکارساز، آنالیزور، نرم‌افزار) مورد استفاده برای آنالیز طیف؛
- شرح فانتوم استفاده شده برای کالیبراسیون؛
- پیکربندی شمارش.

کفایت تجهیزات و روش‌ها باید براساس الزامات استقرار یافته تضمین کیفیت، ارزیابی شود. ممکن است این الزامات توسط مقررات ملی تعیین شوند.

توصیه می‌شود اندازه‌گیری‌ها در یک محل با کمترین آهنگ شمارش زمینه ممکن انجام شود. حد آشکارسازی (DL) باید تعیین شود. مطابق با زیربند ۸-۳، حد آشکارسازی برای مونیتورینگ دوره‌ای باید کمتر از 300 Bq باشد.

۱۳ روش اجرایی ارزیابی پرتوگیری‌ها

۱۳-۱ تفسیر داده‌های مونیتورینگ فردی برای ارزیابی دز

۱-۱-۱۳ کلیات

در استاندارد ISO 27048 یک روش اجرایی عمومی برای ارزیابی دز تشریح شده است. ارزیابی دز داخلی می‌تواند بر اساس داده‌های مونیتورینگ فردی پس از مونیتورینگ دوره‌ای یا مونیتورینگ ویژه انجام شود. ارزیابی دز با استفاده از نتایج اندازه‌گیری درون تنی یا آنالیز ادرار انجام می‌شود. در صورت امکان، مدل بیوکینتیک مطابق با شکل فیزیکی-شیمیایی آلودگی باید مورد استفاده قرار گیرد. انواع جذب ریوی مورد استفاده برای محاسبه پرتوایی‌های تیروئید یا تمام بدن و دفع روزانه ادرار که در جداول ۴ تا ۱۵ ارائه شده است، از سند ICRP 68^[2] گرفته شده‌اند.

در مورد مونیتورینگ ویژه، زمان ورود ماده پرتوزا به بدن معمولاً معلوم است. در مونیتورینگ دوره‌ای، زمان ورود حاد ماده پرتوزا به بدن معمولاً نامعلوم است. به‌طور معمول فرض می‌شود که ورود مواد پرتوزا در وسط بازه مونیتورینگ صورت می‌گیرد (به منبع [۱۳] کتاب‌نامه مراجعه شود). با این حال، ورود مزمن یکنواخت ماده پرتوزا به بدن نیز می‌تواند در نظر گرفته شود.

۱۳-۱-۲ ارزیابی دز بر اساس مونیتورینگ دوره‌ای

برای I-131، پرتوژیایی اندازه‌گیری شده در تیروئید متناظر با ۱ mSv دز مؤثر اجباری (برای یک ورود یکنواخت ماده پرتوزا به بدن در میانه یک بازه مونیتورینگ)، برابر با ۷۰۰۰ Bq است. پرتوژیایی اندازه‌گیری شده در ادرار مطابق با همان دز، برابر با ۹/۵ Bq/d است. این مقادیر برای بخارید در یک بازه زمانی ۱۵ d مطابق با زیربند ۳-۸ ارائه شده است.

۱۳-۱-۳ ارزیابی دز بر اساس مونیتورینگ ویژه

در مورد آلودگی ید پرتوزا، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های تیروئید و/یا آنالیز ادرار انجام شود. جداول ۴ تا ۶ پرتوژیایی‌های I-131 اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه ادرار (برحسب $Bq \cdot d^{-1}$) را نشان می‌دهد که متناظر است با یک دز مؤثر اجباری ۱ mSv از استنشاق I-131 به صورت بخار (به جدول ۴ مراجعه شود) یا به شکل آئروسول (نوع جذب ریوی F و AMAD آن $5 \mu m$ ، به جدول ۵ مراجعه شود)، یا ناشی از تزریق I-131 (به جدول ۶ مراجعه شود). در جداول ۷ تا ۹ پرتوژیایی‌های I-123 اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه ادرار (برحسب $Bq \cdot d^{-1}$) ارائه شده که متناظر است با دز مؤثر اجباری ۱ mSv از استنشاق I-123 به صورت بخار (به جدول ۷ مراجعه شود) یا به شکل آئروسول (نوع جذب ریوی F و AMAD آن $5 \mu m$ ، جدول ۸) یا ناشی از تزریق I-123 (به جدول ۹ مراجعه شود).

جدول ۴- پرتوژیایی اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه پرتوژیایی در ادرار پس از استنشاق I-131 به شکل بخار متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوژیایی در ادرار ($Bq \cdot d^{-1}$)	پرتوژیایی اندازه‌گیری شده در تیروئید (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن برحسب روز
2,6 E + 04	1,1 E + 04	1
2,2 E + 03	1,1 E + 04	2
1,3 E + 02	1,0 E + 04	3
1,4 E + 01	9,3 E + 03	4
8,4 E + 00	8,4 E + 03	5
9,0 E + 00	7,7 E + 03	6
9,5 E + 00	7,0 E + 03	7
1,0 E + 01	6,4 E + 03	8
1,0 E + 01	5,8 E + 03	9
1,1 E + 01	5,3 E + 03	10

جدول ۵- پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق I-131 به شکل آئروسول (نوع جذب ریوی F و AMAD آن ۵ μm) متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
2,5 E + 04	1,1 E + 04	1
2,0 E + 03	1,1 E + 04	2
1,3 E + 02	9,9 E + 03	3
1,3 E + 01	9,0 E + 03	4
8,2 E + 00	8,2 E + 03	5
8,7 E + 00	7,5 E + 03	6
9,4 E + 00	6,8 E + 03	7
9,8 E + 00	6,2 E + 03	8
1,0 E + 01	5,6 E + 03	9
1,0 E + 01	5,1 E + 03	10

جدول ۶- پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از تزریق I-131 متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
2,7 E + 04	1,2 E + 04	1
2,0 E + 03	1,1 E + 04	2
1,2 E + 02	1,0 E + 04	3
1,3 E + 01	9,4 E + 03	4
8,5 E + 00	8,5 E + 03	5
9,2 E + 00	7,7 E + 03	6
9,9 E + 00	7,1 E + 03	7
1,0 E + 01	6,4 E + 03	8
1,1 E + 01	5,8 E + 03	9
1,1 E + 01	5,3 E + 03	10

جدول ۷- پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق I-123 به شکل آئروسول متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
7,9 E + 05	3,4 E + 05	1
2,4 E + 04	1,0 E + 05	2
4,4 E + 02	3,0 E + 04	3
1,3 E + 01	8,3 E + 03	4
2,3 E + 00	2,3 E + 03	5
7,7 E - 01	6,6 E + 02	6
2,6 E - 01	1,9 E + 02	7
8,3 E - 02	5,2 E + 01	8
2,6 E - 02	1,5 E + 01	9
8,2 E - 03	4,1 E + 00	10

جدول ۸- پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق I-123 به شکل آئروسول (نوع جذب ریوی F و AMAD آن ۵ μm) متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
8,4 E + 05	3,7 E + 05	1
2,0 E + 04	1,1 E + 05	2
5,6 E + 02	3,2 E + 04	3
1,6 E + 01	9,1 E + 03	4
2,5 E + 00	2,6 E + 03	5
8,3 E - 01	7,2 E + 02	6
2,8 E - 01	2,0 E + 02	7
9,0 E - 02	5,7 E + 01	8
2,9 E - 02	1,6 E + 01	9
8,9 E - 03	4,5 E + 00	10

جدول ۹- پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از تزریق I-123 متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی اندازه‌گیری شده در تیروئید (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن برحسب روز
8,4 E + 05	3,6 E + 05	1
2,1 E + 04	1,1 E + 05	2
3,6 E + 02	3,0 E + 04	3
1,2 E + 01	8,5 E + 03	4
2,4 E + 00	2,4 E + 03	5
8,0 E - 01	6,8 E + 02	6
2,7 E - 01	1,9 E + 02	7
8,6 E - 02	5,4 E + 01	8
2,7 E - 02	1,5 E + 01	9
8,4 E - 03	4,2 E + 00	10

در مورد آلودگی به Tc-99m به صورت پرتکنات^۱، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های تمام بدن و/یا آنالیز ادرار انجام شود. جدول ۱۰ پرتوزایی‌های Tc-99m اندازه‌گیری شده در تمام بدن و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (برحسب Bq·d⁻¹) را نشان می‌دهد که متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv از استنشاق Tc-99m به صورت آئروسول پرتکنات (با جذب ریوی F و AMAD آن ۵ μm) است.

جدول ۱۰- پرتوزایی در تمام بدن و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق Tc-99m به شکل پرتکنات متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی تمام بدن (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن برحسب روز
1,9 E + 05	1,6 E + 06	1
9,2 E + 03	6,7 E + 04	2
3,8 E + 02	2,9 E + 03	3
1,6 E + 01	1,3 E + 02	4
7,1 E - 01	6,0 E + 00	5

در مورد آلودگی به Ga-67 به صورت سیترات^۲، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های تمام بدن و/یا آنالیز ادرار انجام شود. جدول ۱۱ پرتوزایی‌های اندازه‌گیری شده Ga-67 در تمام بدن و دفع روزانه پرتوزایی در

1- Pertechnetate
2- Citrate

ادرار را ($Bq \cdot d^{-1}$) نشان می‌دهد که متناظر با دز مؤثر اجباری 1 mSv از استنشاق $Ga-67$ به صورت یک آئروسول (با جذب ریوی F و $AMAD$ آن $5 \mu m$) است.

جدول ۱۱- پرتوزایی در تمام بدن و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق $Ga-67$ به شکل سیترات متناظر با دز مؤثر اجباری 1 mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار ($Bq \cdot d^{-1}$)	پرتوزایی تمام بدن (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
1,0 E + 05	3,9 E + 06	1
9,0 E + 04	2,1 E + 06	2
4,2 E + 04	1,3 E + 06	3
2,0 E + 04	8,5 E + 05	4
9,9 E + 03	6,3 E + 05	5
5,6 E + 03	4,8 E + 05	6
3,5 E + 03	38 E + 05	7
2,4 E + 03	3,0 E + 05	8
1,8 E + 03	2,4 E + 05	9
1,4 E + 03	1,9 E + 05	10

در مورد آلودگی به $Sr-89$ به شکل کلراید، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از آنالیز ادرار انجام شود. جدول ۱۲ دفع روزانه پرتوزایی در ادرار ($Bq \cdot d^{-1}$) $Sr-89$ را نشان می‌دهد که متناظر با دز مؤثر اجباری برابر 1 mSv از استنشاق $Sr-89$ به شکل آئروسول (با جذب ریوی F و $AMAD$ آن $5 \mu m$) است.

جدول ۱۲- دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق $Sr-89$ به شکل کلراید متناظر با دز مؤثر اجباری 1 mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار ($Bq \cdot d^{-1}$)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
4,8 E + 04	1
1,6 E + 04	2
1,1 E + 04	3
7,9 E + 03	4
6,2 E + 03	5
5,0 E + 03	6
4,1 E + 03	7
3,5 E + 03	8
3,0 E + 03	9
2,6 E + 03	10

در مورد آلودگی با In-111 به شکل کلراید، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های تمام بدن انجام شود. جدول ۱۳ پرتوزایی In-111 اندازه‌گیری شده در تمام بدن متناظر با دز مؤثر اجباری برابر ۱ mSv از استنشاق In-111 به صورت آئروسول (با جذب ریوی F و AMAD آن ۵ μm) ارائه می‌کند.

جدول ۱۳- پرتوزایی در تمام بدن پس از استنشاق In-111 به شکل کلراید
متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

پرتوزایی تمام بدن (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن بر حسب روز
2,0 E + 06	1
1,1 E + 06	2
7,2 E + 05	3
5,2 E + 05	4
3,9 E + 05	5
3,0 E + 05	6
2,4 E + 05	7
1,9 E + 05	8
1,4 E + 05	9
1,1 E + 05	10

در مورد آلودگی به Tl-201 به شکل کلراید، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری‌های تمام بدن و/یا آنالیز ادرار انجام شود. جدول ۱۴ پرتوزایی‌های Tl-201 اندازه‌گیری شده در تمام بدن دفع روزانه پرتوزایی در ادرار ($Bq \cdot d^{-1}$) را نشان می‌دهد که متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv از استنشاق Tl-201 به صورت یک آئروسول (با جذب ریوی F و AMAD آن ۵ μm) است.

جدول ۱۴- پرتوزایی در تمام بدن و دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق TI-201 به شکل کلراید متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	پرتوزایی تمام بدن (Bq)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن برحسب روز
1,4 E + 05	6,2 E + 06	1
1,2 E + 05	4,1 E + 06	2
9,4 E + 04	2,9 E + 06	3
7,0 E + 04	2,1 E + 06	4
5,2 E + 04	1,5 E + 06	5
3,9 E + 04	1,1 E + 06	6
2,9 E + 04	8,4 E + 05	7
2,1 E + 04	6,3 E + 05	8
1,6 E + 04	4,7 E + 05	9
1,2 E + 04	3,5 E + 05	10

در مورد آلودگی به Ra-223، به شکل کلراید، ارزیابی دز می‌تواند با استفاده از آنالیز ادرار انجام شود. جدول ۱۵ دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Ra-223 (Bq·d⁻¹) را نشان می‌دهد که متناظر با دز مؤثر اجباری برابر ۱ mSv از طریق استنشاق Ra-223 به صورت آئروسول (با جذب ریوی F و AMAD آن ۵ μm) است.

جدول ۱۵- دفع روزانه پرتوزایی در ادرار پس از استنشاق Ra-223 به شکل کلراید متناظر با دز مؤثر اجباری ۱ mSv

دفع روزانه پرتوزایی در ادرار (Bq·d ⁻¹)	زمان سپری شده پس از ورود ماده پرتوزا به بدن برحسب روز
2,6 E - 01	1
4,9 E - 02	2
3,0 E - 02	3
2,0 E - 02	4
1,4 E - 02	5
9,4 E - 03	6
6,6 E - 03	7
4,7 E - 03	8
3,4 E - 03	9
2,6 E - 03	10

همچنین، ممکن است مقادیر کوچکتر میانه قطر آیرودینامیکی پرتوزایی آئروسول‌ها یا سایر انواع جذب ریوی مورد استفاده قرار گیرد، مشروط بر این که برای فرایندی که فرد درگیر آن است مستند شده و معتبر و مناسب باشند.

۱۳-۲ ابزارهای نرم افزاری

معیارهای انتخاب یک نرم افزار یا برنامه کامپیوتری برای تفسیر داده‌های زیست‌سنجی بر اساس الزامات قابلیت‌های نرم افزار به صورت زیر است:

الف- مسیر ورود ماده پرتوزا (استنشاق، بلع، تزریق)، الگوی ورود ماده پرتوزا به بدن (حاد، مزمن، یا ترکیبی از هر دو)، و تاریخ ورود ماده پرتوزا به بدن؛

ب- نوع اطلاعات مربوط به عنصر یا ترکیب، مانند تعداد رادیونوکلیدها، مشخصه‌های فیزیکی - شیمیایی ترکیب (AMAD و پارامترهای جذب) و انتخاب بین مقادیر پیش فرض و/یا خاص؛

پ- نوع اندازه‌گیری (ادرار، تمام بدن، تیروئید)، امکان پردازش همزمان چندین داده، انعطاف‌پذیری در ورود، پردازش و به کارگیری داده‌ها (نوع عدم قطعیت‌ها، الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده برای پردازش داده‌های خودکار و/یا تعاملی، مشکلات مقادیر کمتر از حد آشکارسازی)؛

ت- مدل‌های موجود برای محاسبه: مدل‌های بیوکینتیک از سند ICRP 78 یا سایر مدل‌ها؛

ث- روش‌های برازش و تفسیر داده‌ها و امکان پردازش چندین داده و داده‌های به دست آمده از بیش از یک روش مونیتورینگ.

۱۳-۳ عدم قطعیت‌ها

توزیع مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌سنجی حاصل از مؤلفه‌های مختلف عدم قطعیت، همراه با عدم قطعیت تعیین شده با استفاده از انحراف معیار هندسی را می‌توان با استفاده از توزیع‌های لگ-نرمال تشریح کرد. انحراف معیار هندسی اغلب به عنوان فاکتور پراکندگی (K_{SF}) شناخته می‌شود و مقادیر آن در Annex B مندرج در استاندارد ISO 27048:2011 ارائه شده است.

در استاندارد ISO 27048 روش اجرایی عمومی برای ارزیابی عدم قطعیت تشریح شده است.

۱۳-۴ تضمین کیفیت فرایند ارزیابی

اثربخشی پیوسته هر برنامه پرتوی، از جمله پذیرش یک برنامه مؤثر تضمین کیفیت (QA) بر اساس استانداردهای ISO 28218، ISO 20553 و ISO 27048، به کسانی که مسئول پیاده‌سازی اجزای مختلف آن هستند متکی است. تضمین کیفیت شامل فرایندی کنترل کیفی است که تمامی اقداماتی که از طریق آن کفایت ابزار و روش‌های اجرایی بر اساس الزامات تعیین شده ارزیابی می‌شود را در بر می‌گیرد. الزامات تضمین کیفیت ممکن است توسط مقررات ملی تعیین شود.

۱۴ گزارش دهی و مستند سازی

۱-۱۴ نتایج گزارش دهی برای اندازه‌گیری‌های برون تنی

نتایج به‌دست آمده توسط آزمایشگاه ارائه دهنده خدمات باید به مشتریان گزارش شود و این گزارش باید حداقل شامل موارد زیر را باشد:

الف - شناسه نمونه:

- ۱- شماره تخصیص داده شده؛
 - ۲- حجم یا جرم کل نمونه تحویل داده شده؛
 - ۳- تاریخ(های) مرجع و زمان‌های شروع و پایان جمع‌آوری و آنالیز نمونه؛
 - ۴- شناسه رادیونوکلئیدهای مورد نیاز و سایر رادیونوکلئیدهای آشکارسازی شده؛
 - ۵- نوع نمونه؛
 - ۶- نگهداری نمونه؛
 - ۷- تاریخ دریافت نمونه توسط آزمایشگاه ارائه دهنده خدمات؛
 - ۸- شرایط بسته‌بندی؛
- ب- تعیین میزان پرتو زایی نمونه در زمان اندازه‌گیری با در نظر گرفتن نمونه‌های شاهد^۱ و فاکتورهای تصحیح مناسب (برای مثال آنالیز کراتین^۲)؛
- پ- تخمین‌های عدم قطعیت شمارش و عدم قطعیت منتشر شده کل^۳ (بسته به درخواست مشتری)؛
- ت- شناسه تجهیزات و روش‌های اجرایی ویژه اندازه‌گیری؛
- ث- مقادیر مربوط به آستانه تصمیم‌گیری و حد آشکارسازی؛
- ج- مشخصات شخص مسئول گزارش.
- آزمایشگاه ارائه دهنده خدمات باید سوابق را مطابق با الزامات استاندارد ISO 28218 در شکل‌های قابل بازیابی، نگهداری کند.
- این سوابق باید در بازه زمانی معینی که به‌وسیله الزامات قانونی ملی تعیین شده یا تا هنگامی که در جریان هستند، نگهداری شوند.

1- Blank
2- Creatinine
3- Total propagated uncertainty

۱۴-۲ گزارش‌دهی نتایج برای اندازه‌گیری‌های درون‌تنی

نتایج به‌دست آمده به‌وسیله آزمایشگاه ارائه دهنده خدمات باید گزارش شود و این گزارش باید حداقل شامل موارد زیر باشد:

- الف- مشخصات فرد مراجعه‌کننده؛
 - ب- تاریخ و (در صورت مناسبت) زمان اندازه‌گیری؛
 - پ- شناسه رادیونوکلئیدهای آشکارسازی‌شده؛
 - ت- مشخصات روش‌های اجرایی و تجهیزات ویژه اندازه‌گیری؛
 - ث- تعیین میزان هر رادیونوکلئید اندازه‌گیری‌شده در هر یک از اجزای بدن که در زمان اندازه‌گیری شمارش شده است؛
 - ج- تخمین‌های عدم قطعیت شمارش و عدم قطعیت منتشر شده کل (بسته به درخواست مشتری)؛
 - چ- مقادیر آستانه تصمیم‌گیری و حد آشکارسازی؛
 - ح- مقدار آستانه اقدام مشخص شده توسط مشتری یا آزمایشگاه ارائه دهنده خدمات برای اطلاع‌رسانی فوری؛
 - خ- مشخصات شخص مسئول گزارش.
- آزمایشگاه ارائه دهنده خدمات باید سوابق را مطابق با الزامات استاندارد ISO 28218 در شکل‌های قابل بازیابی، نگهداری کند.

۱۴-۳ مستندسازی ارزیابی دز

باید تمهیداتی اتخاذ شود تا اطمینان حاصل شود که نتایج ارزیابی‌ها به درستی و در زمان معقول به سرویس نگهداری و ثبت دز مشتری گزارش می‌شود.

سوابق کافی از جزئیات تمام ارزیابی‌ها باید نگهداری شود به‌طوری که شرایط دقیق ارزیابی بتواند در آینده باز تولید شود. تمام گزارش‌ها و پرونده‌ها باید توسط کارشناس حفاظت در برابر پرتو تأیید شود. الزامات ملی در رابطه با ثبت و نگهداری باید در نظر گرفته شود.

هر ارزیابی باید شامل موارد زیر باشد:

- الف- شناسه منحصر به‌فرد ارزیابی دز برای یک فرد یا یک رویداد؛
- ب- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ترکیبات ساخته‌شده (ترکیب، AMAD و غیره)؛
- پ- شناسه رادیونوکلئیدهای مورد نیاز و سایر رادیونوکلئیدهای آشکارسازی‌شده؛

- ت- تاریخ و زمان اندازه‌گیری‌ها و مقادیر اندازه‌گیری‌شده؛
- ث- مسیر بالقوه ورود ماده(های) پرتوزا به بدن
- ج- روش اجرایی برای محاسبه دزها: مفروضات استفاده شده در الگوی زمانی ورود ماده پرتوزا به بدن، مقدار پیش‌فرض یا مقدار مشخص AMAD، خواص فیزیکی و شیمیایی آئروسول پرتوزا، به‌همراه فرضیاتی در مورد نوع جذب؛
- چ- روش محاسبه دز؛ اگر محاسبات به‌صورت دستی انجام شده است، مرجع مدل‌های بیوکینتیک و ضرایب دز باید مستند شوند؛ اگر محاسبات با نرم‌افزار انجام شده باشد، نرم‌افزار مورد استفاده و همچنین شناسه نسخه نرم‌افزار باید مشخص شود؛
- ح- نتایج برحسب دز مؤثر اجباری حاصل از میزان ماده پرتوزای وارد شده به بدن از هر رادیونوکلئید در بازه زمانی مونیتورینگ بیان می‌شود. تمامی دزها باید برحسب میلی‌سیورت (mSv) تا یک رقم اعشار داده شود؛
- خ- عدم قطعیت‌های مرتبط با آن، در صورت محاسبه، تنها در صورت درخواست صریح مشتری در گزارش‌ها ارائه می‌شود؛
- د- مشخصات کارشناس حفاظت پرتوی مسئول محاسبه دز.
- نحوه گزارش‌دهی به مقامات ملی باید در صورت لزوم مطابق با قوانین ملی انجام شود.

پیوست الف
(آگاهی دهنده)

«فاکتور تصمیم‌گیری» براساس سند IAEA Safety Guide RS-G-1.2

سند IAEA Safety Guide RS-G-1.2^[4] روشی را برای تخمین «فاکتور تصمیم‌گیری»، d_j ، مطابق با مرتبه بزرگی دز سالانه‌ای که یک پرتوکار احتمالاً دریافت می‌کند، بیان می‌کند که برای یک رادیونوکلئید معین Z در یک فعالیت مشخص مطابق با فرمول (الف-۱) تعریف می‌شود:

$$d_j = \frac{A_j \times e_j(50) \times f_{fs} \times f_{hs} \times f_{ps}}{0.001} \quad (\text{الف-۱})$$

که در آن:

d_j	فاکتور تصمیم‌گیری (mSv)؛
A_j	پرتوزایی انباشته‌شده (Bq) ناشی از رادیونوکلئید Z که در مدت یک‌سال در محیط کار وجود دارد؛
$e_j(50)$	ضریب دز (Sv/Bq) برای رادیونوکلئید Z وارد شده از مسیر تنفسی، که مطابق با سند ICRP 78، مقدار AMAD برای پرتوکاران معمولاً برابر $5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته می‌شود. ممکن است این پارامتر پیش‌فرض با توزیع ذرات در محیط کار یکی نباشد. در صورت وجود شواهد مستند مبنی بر ابعاد کوچکتر آئروسول (به‌عنوان مثال داده‌های حاصل از مونیتورینگ هوا)، مقدار دیگری از AMAD باید در نظر گرفته شود.
f_{fs}	ضریب ایمنی شکل فیزیکی که براساس خواص فیزیکی و شیمیایی ماده پرتوزا تعیین می‌شود؛
f_{hs}	ضریب ایمنی نوع عملیات که بر اساس تجربه بهره‌برداری انجام‌شده و شکل ماده پرتوزا تعیین می‌شود؛
f_{ps}	ضریب ایمنی حفاظتی که بر اساس استفاده از تجهیزات حفاظتی دائمی آزمایشگاهی (مانند جعبه دستکش‌دار ^۱ ، هود خلأ ^۲) تعیین می‌شود؛
۰٫۰۰۱	ضریب تبدیل از سیورت (Sv) به میلی‌سیورت (mSv) است.

ضریب تصمیم‌گیری D (برحسب mSv) برای تمام رادیونوکلئیدهای موجود در محیط کار (برای یکی از کارکنان) عبارت است از مجموع ضرایب تصمیم‌گیری تخصیصی همه رادیونوکلئیدها (هر کدام برای هر

1- Glove box
2- Fume hood

رادیونوکلئید، در تمام روش‌های اجرایی انجام شده توسط پرتوکار مربوط است) که مطابق با فرمول (الف-۲) تعریف می‌شود:

$$D = \sum_j d_j \quad (\text{الف-۲})$$

برای رادیوداروهای به کار رفته به صورت آئروسول، مقادیر $e(50)$ باید از سند ICRP 68 یا سند ICRP 53 و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها گرفته شود.

در بیشتر موارد، توصیه می‌شود مقدار f_{fs} برابر با ۰٫۰۱ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین فرمول (الف-۲) به صورت فرمول (الف-۳) ساده می‌شود:

$$d_j = 10 A_j \times e_j(50) \times f_{hs} \times f_{ps} \quad (\text{الف-۳})$$

مقادیر پیشنهادی f_{ps} و f_{hs} در سند IAEA Safety Guide RS-G-1.2، در جدول الف-۱ و جدول الف-۲ ارائه شده است.

جدول الف-۱- ضرایب ایمنی نوع عملیات

ضریب ایمنی نوع عملیات، f_{hs}	فرایند
۰٫۰۱	انبارش (ذخیره کردن محلول‌ها)
۰٫۱	عملیات ساده‌ای که در آن از مواد مرطوب استفاده می‌شود
۱	عملیات شیمیایی عادی
۱۰	عملیات پیچیده‌ای که در آن از مواد مرطوب استفاده میشود و ریسک پخش شدن وجود دارد
۱۰	عملیات ساده با مواد خشک
۱۰۰	کار با ترکیبات فرار
۱۰۰	عملیات کار با مواد خشک و پودر مانند

جدول الف-۲-- ضرایب ایمنی حفاظتی

ضریب ایمنی حفاظتی، f_{ps}	وسایل حفاظتی
۱	عملیات بر روی میز آزمایشگاهی
۰٫۱	هود خلأ
۰٫۰۱	جعبه دستکش‌دار

روش‌شناسی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ممکن است برای فعالیت‌های پزشکی هسته‌ای محدودیت‌های بیشتری را اعمال کند. بنابراین، ضرایب تصحیح بیشتری پیشنهاد داده شده است (به منبع [۵] کتاب‌نامه مراجعه شود). این ضرایب تصحیح شامل موارد زیر است:

- $f_{workload}$ کسری از زمانی که یک پرتوکار در یک سناریو درگیر فعالیت ویژه‌ای بوده است. این مقدار توسط مسئول فیزیک بهداشت مطابق با زمان مقرر شده برای آن فعالیت تعیین می‌شود. این مقدار کوچکتر یا مساوی یک است.

- $f_{handled_activity}$ کسری از پرتوزایی کل که پرتوکار در یک سناریو با آن سر و کار داشته است، با در نظر گرفتن این که در یک ناحیه مشخص هر پرتوکار در یک فعالیت واقعی مطابق با مسئولیت خود فقط می‌تواند با کسری از پرتوزایی کل سر و کار داشته باشد. این مقدار کوچکتر یا مساوی یک است.

- f_{intake} کسری از پرتوزایی به کار رفته توسط پرتوکار که می‌تواند از طریق گرد و غبار یا بخار وارد بدن شود. بر اساس یک رویکرد محافظ کارانه برای نشان دادن ورود بالقوه ماده پرتوزا به بدن از پرتوزایی به کار گرفته شده مقدار 1×10^{-4} برای آن اختصاص داده شده است.

هنگامی که این سه عامل افزوده شده برای محاسبه «فاکتور تصمیم‌گیری» در نظر گرفته شود، فرمول (الف-۱) به صورت (الف-۴) تغییر می‌یابد:

$$d_j = \frac{A_j \times e_j(50) \times f_{fs} \times f_{hs} \times f_{ps} \times f_{workload} \times f_{handled\ activity} \times f_{intake}}{10^{-3}} \quad (\text{الف-۴})$$

و فرمول ساده شده (الف-۳) به صورت فرمول (الف-۵) در خواهد آمد:

$$d_j = 10A_j \times e_j(50) \times f_{hs} \times f_{ps} \times f_{workload} \times f_{handled\ activity} \times f_{intake} \quad (\text{الف-۵})$$

کتابنامه

- [1] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Radiological protection of the worker in medicine and dentistry*, ICRP Report 57. Pergamon Press, New York, 1989
- [2] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers*, ICRP Report 68. Pergamon Press, New York, 1995
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Radiation dose for patients from radiopharmaceuticals*, ICRP Report 53. Pergamon Press, New York, 1987
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Assessment of occupational exposures due to intakes of radionuclides – IAEA Safety Guide No.RS-G-1.2*. IAEA, Vienna, 1999
- [5] Rojo A., Dantas B., Lopez G., Navarro T., Cruz Suarez R. *Application of IAEA criteria for internal monitoring of occupationally exposed workers of nuclear medicine*, memories IRPA 12, 2008
- [6] Dantas B.M., Lucena E.A., Dantas A.L.A. *Internal exposure in nuclear medicine: application of IAEA criteria to determine the need for internal monitoring*. Brazilian Archives of Biology and technology, Vol. 51, No. special, pp 103-107, 2008
- [7] Bento J., Teles P., Neves N., Santos A.I., Cardoso G., Barreto A. *Study of nuclear medicine practices in Portugal from an internal dosimetry perspective*. Radiat. Prot. Dosimetry. 2012, **149** (4) pp. 438–443
- [8] International Commission on Radiological Protection. *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations*, Publication 107, Volume 38 Issue 3, 2008
- [9] Lucena E.A., Rebelo A.M.O., Araujo F., Sousa W.O., Dantas A.L.A., Dantas B.M. *Evaluation of internal exposure of nuclear medicine staff through in vivo and in vitro bioassays techniques*. Radiat. Prot. Dosimetry. 2007, **127** (1-4) pp. 465–468
- [10] Vidal M.V.S., Dantas A.L.A., Dantas B.M. *A methodology for auto-monitoring of internal contamination by ^{131I} in nuclear medicine workers*. Radiat. Prot. Dosimetry. 2007, **125** (1-4) pp. 483–487
- [11] Lorah B., King S., Achey B. *A reevaluation of the procedures used to perform thyroid bioassay on nuclear medicine personnel following radioiodine-handling procedures*. Health Phys. 2012, **102** () pp. S60–S62
- [12] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Human respiratory tract model for radiological protection*, ICRP Report 66. Pergamon Press, New York, 1994
- [13] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Individual monitoring for internal exposures of workers*. ICRP report 78. Pergamon Press, New York, 1997
- [14] Baechler S., Stritt N., Bochud F.O. *Individual monitoring of internal exposure for nuclear medicine workers in Switzerland*. Radiat. Prot. Dosimetry. 2011, **144** (1-4) pp. 464–467
- [15] Oliveira C.M., Lima F.F., De Oliveira M.L., Da Silva T.V., Dantas A.N., Dantas B.M. *Evaluation of a technique for in vivo internal monitoring of ^{18F} within a Brazilian laboratory network*. Radiat. Prot. Dosimetry. 2013, **153** (1) pp. 100–105

- [16] Franck D., Berniere J., Viltard D., Parre F., Challeton-De Vathaire C., Agarande M. Development of two mobile laboratories for a routine and accident monitoring of internal contamination. *Appl. Radiat. Isot.* 2012, **70** pp. 1095–1099
- [17] Dantas B.M., Lucena E.A., Dantas A.L.A., Santos M.S, Juliao L.Q.C., Melo D.R., Sousa W.O., Fernandez P.C., Mesquita S.A. A mobile bioassay laboratory for the assessment of internal doses based on in vivo and in vitro measurements. *Health Phys.* 2010, **99** (4) pp. 449–452
- [18] Wassilieff S., Cazoulat A., Bohand S., Merat F., Gontier E., Gagna G. Assessment of internal exposure to ionizing radiations of the nuclear medicine department staff in the Val-de-Grâce military hospital. *Arch. Mal. Prof. Environ.* 2012, **73** (6) pp. 860–867
- [19] Dantas B.M., Lucena E.A., Dantas A.L.A., Araujo F., Rebelo A.M.O., Teran M. Protocol for the calibration of gamma cameras to estimate internal contamination. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2007, **127** pp. 253–257