سیستم مدیریت ایزو
www.isomanagement.ir

تماس تلفنی جهت دریافت مشاوره:

۱. مشاور دفتر تهران (آقای محسن ممیز)

۰۹۱۲ ۹۶۳ ۹۳۳۶

۲. مشاور دفتر اصفهان (سرکار خانم لیلا ممیز)

۰۹۱۳ ۳۲۲ ۸۲۵۹

مجموعه **سیستم مدیریت ایزو** با هدف بهبود مستمرعملکرد خود و افزایش رضایت مشتریان سعی بر آن داشته، کلیه استانداردهای ملی و بین المللی را در فضای مجازی نشر داده و اطلاع رسانی کند، که تمام مردم ایران از حقوق اولیه شهروندی خود آگاهی لازم را کسب نمایند و از طرف دیگر کلیه مراکز و کارخانه جات بتوانند به راحتی به استانداردهای مورد نیاز دسترسی داشته باشند.

این موسسه اعلام می دارد در کلیه گرایشهای سیستم های بین المللی ISO پیشگام بوده و کلیه مشاوره های ایزو به صورت رایگان و صدور گواهینامه ها تحت اعتبارات بین المللی سازمان جهانی IAF و تامین صلاحیت ایران می باشد.

هم اکنون سیستم خود را با معیارهای جهانی سازگارکنید...

ISO 9001 14001 18001

CE

GMP GAP 22716

IMS HSE-MS

45001

22000 HACCP

INSO
11699-2
1st Edition
2019
Identical with
ISO 8529-2:
2000

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۱۱۶۹۹-۲
چاپ اول
۱۳۹۸

پرتوهای نوترونی مرجع — قسمت ۲: اصول کالیبراسیون وسایل حفاظت در برابر پرتو مربوط به کمّیت‌های اصلی مشخص‌کننده میدان پرتوی

Reference neutron radiations Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field

ICS: 17.240

استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۲-۱۱۶۹۹ (چاپ اول): سال ۱۳۹۸

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: 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 مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفهٔ 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 منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمآن‌های 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 پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به‌عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمآن‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به‌عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ 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)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به‌عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] 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 به‌منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمآن‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمآن‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللییکاها، 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

«پرتوهای نوترونی مرجع — قسمت ۲: اصول کالیبراسیون وسایل حفاظت در برابر پرتو مربوط به کمّیت‌های اصلی مشخص‌کننده میدان پرتوی»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
طاهری، مهران (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)	مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور
دبیر:	
شاکری جویباری، بنین (دکتری فیزیک هسته‌ای)	پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فیزیک و شتابگرها
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
اردانه، مرتضی (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)	پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی
اکبری، زهرا (کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای)	پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فیزیک و شتابگرها
پارسافر، ناهید (کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد)	پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی
سلطانی، امیر (کارشناسی ارشد مهندسی برق)	سازمان انرژی اتمی ایران
سمیع‌پور، فرهاد (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)	پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی
شاهور، ارژنگ (کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد)	شرکت پارس ایزوتوپ
عربلو، رضا (کارشناسی فیزیک اتمی)	پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی
مختاری، حسین (کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای)	سازمان انرژی اتمی ایران
ملکی، شهریار (دکتری فیزیک هسته‌ای)	پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده کاربرد پرتوها

استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۲-۱۱۶۹۹ (چاپ اول): سال ۱۳۹۸

ویراستار:

صبور گیلوان، عباس
(کارشناسی مهندسی مکانیک- ساخت و تولید)
سازمان ملی استاندارد ایران- مرکز اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌ها

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار ط
مقدمه ی
۱ هدف و دامنهٔ کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات، تعاریف و نمادها ۲
۴ کالیبراسیون و قابلیت‌ردیابی میدان پرتوی مرجع ۶
۴-۱ ملاحظات کلی ۶
۴-۲ قابلیت‌ردیابی برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی ۷
۴-۳ قابلیت‌ردیابی برای نوترون‌های تولیدشده در شتاب‌دهنده ۷
۴-۴ قابلیت‌ردیابی برای باریکه‌های نوترونی تولیدشده در راکتور ۷
۵ اصول کالیبراسیون برای کالیبراسیون منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی ۸
۵-۱ اصول کلی ۸
۵-۲ ویژگی‌های مهم یک سامانه کالیبراسیون نوترونی ۱۰
۵-۲-۱ منبع ۱۰
۵-۲-۲ چیدمان پرتودهی ۱۰
۵-۲-۳ اتاق پرتودهی ۱۱
۵-۳ منابع نوترون‌های پراکنده ۱۱
۵-۳-۱ مقدمه ۱۱
۵-۳-۲ پراکندگی اتاق ۱۱
۵-۳-۳ تضعیف هوا (پراکندگی خروجی هوا) ۱۱
۵-۳-۴ پراکندگی ورودی هوا ۱۱
۵-۳-۵ پراکندگی از سازه‌های نگه‌دارنده ۱۲
۵-۳-۶ اثرات طیفی ۱۲
۵-۴ اثر پرتو فوتونی ۱۲
۶ تصحیح اثرات پراکندگی برای منبع‌های رادیونوکلئیدی ۱۲
۶-۱ اندازه‌گیری‌های اولیه ۱۲
۶-۲ تصحیح هندسه ۱۵
۶-۳ آنالیز داده‌ها ۱۶

عنوان **صفحه**

۶-۳-۱ روش مخروط- سایه ۱۶
۶-۳-۲ روش برازش تعمیم‌یافته ۱۷
۶-۳-۳ روش نیمه‌تجربی ۱۸
۶-۳-۴ روش برازش تقلیل‌یافته ۲۰
۶-۴ انتخاب روش‌ها ۲۱
۶-۴-۱ روش مخروط- سایه ۲۱
۶-۴-۲ روش برازش تعمیم‌یافته ۲۲
۶-۴-۳ روش نیمه‌تجربی ۲۲
۶-۴-۴ روش برازش تقلیل‌یافته ۲۳
۷ تعیین خطی‌بودن ۲۴
۸ کالیبراسیون با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها و راکتورها ۲۴
۸-۱ مقدمه ۲۴
۸-۲ نوترون‌های تولیدشده در شتاب‌دهنده ۲۵
۸-۲-۱ مقدمه ۲۵
۸-۲-۲ آهنگ شارش نوترونی ۲۵
۸-۲-۳ پایش ۲۵
۸-۲-۴ وابستگی پاسخ به انرژی ۲۵
۸-۲-۵ منابع آلاینده نوترونی ۲۶
۸-۲-۶ انرژی نوترون و پهن‌شدگی انرژی ۲۶
۸-۲-۷ تغییرات طیف نوترونی با زاویه گسیل ۲۶
۸-۲-۸ تصحیحات پراکندگی در هدف ۲۶
۸-۲-۹ اثرات پراکندگی نوترون ۲۷
۸-۳ باریکه‌های نوترونی راکتورها ۲۷
۸-۳-۱ مقدمه ۲۷
۸-۳-۲ باریکه‌های نوترونی فیلترشده ۲۷
۸-۳-۲-۱ پهن‌شدگی انرژی ۲۸
۸-۳-۲-۲ انرژی‌های آلاینده ۲۸
۸-۳-۳ نوترون‌های حرارتی ۲۸
۹ ملاحظات ویژه برای دُزسنج‌های فردی ۲۸
۱۰ عدم‌قطعیت‌ها ۲۹

عنوان **صفحه**

۱۰-۱ مقدمه ۲۹
۱۰-۲ مؤلفه‌های عدم‌قطعیت قابل اعمال مربوط به منبع رادیونوکلئیدی کالیبراسیون ۳۰
۱۰-۲-۱ کلیات ۳۰
۱۰-۲-۲ عدم‌قطعیت در قدرت منبع نوترون B ۳۰
۱۰-۲-۳ عدم‌قطعیت در تابع ناهمسانگردی $F_1(\theta)$ ۳۰
۱۰-۲-۴ عدم‌قطعیت در فاصله کالیبراسیون l ۳۰
۱۰-۲-۵ عدم‌قطعیت در عامل هندسی $F_1(l)$ ۳۱
۱۰-۲-۶ عدم‌قطعیت تصحیح پراکندگی ۳۱
۱۰-۲-۷ عدم‌قطعیت در خوانش M ۳۲
۱۰-۲-۸ عدم‌قطعیت در زمان‌گیری ۳۲
۱۰-۲-۹ عدم‌قطعیت در مقادیر ضریب تبدیل شارش به معادل دُز متوسط‌گیری‌شده نسبت به طیف ۳۲
۱۰-۳ عدم‌قطعیت‌ها برای شتاب‌دهنده‌ها و راکتورها ۳۳
۱۰-۳-۱ مقدمه ۳۳
۱۰-۳-۲ انرژی نوترون و پهن‌شدگی انرژی ۳۳
۱۰-۳-۳ تغییرات طیف نوترون با زاویه گسیل ۳۳
۱۰-۳-۴ تصحیح پراکندگی از هدف ۳۳
۱۰-۳-۵ اثرات پراکندگی نوترونی ۳۳
۱۰-۳-۶ تعیین شارش ۳۴
پیوست الف (آگاهی‌دهنده) فهرست علائم به‌کار رفته در این استاندارد ۳۵
پیوست ب (آگاهی‌دهنده) کمینه طول‌های اتاق برای برگشت٪ ۴۰ از اتاق ۳۸
پیوست پ (آگاهی‌دهنده) عوامل تصحیح تضعیف هوا ۳۹
پیوست ت (آگاهی‌دهنده) تصحیح پراکندگی کل ناشی از هوا ۴۰
پیوست ث (آگاهی‌دهنده) معیارهایی برای ساخت و استفاده از مخروط سایه ۴۱
پیوست ج (آگاهی‌دهنده) نمایش پارامترها و متغیرها در روش برازش تقلیل‌یافته ۴۳
کتاب‌نامه ۴۴

پیش‌گفتار

استاندارد «پرتوهای نوترونی مرجع- قسمت ۲: اصول کالیبراسیون وسایل حفاظت در برابر پرتو مربوط به کمّیت‌های اصلی مشخص‌کننده میدان پرتوی» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی به‌عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شمارهٔ ۵ تهیه و تدوین شده، در چهارصد و هشتمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌های مورخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۶ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به‌عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوهٔ نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم وخدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، 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 8529-2: 2000, Reference neutron radiations — Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field

مقدمه

این استاندارد یک قسمت از مجموعه استانداردهای ملی شماره ۱۱۶۹۹ است که در مورد پرتوهای نوترونی مرجع، تدوین شده است.

سایر قسمت‌های این استاندارد به شرح زیر است:

- قسمت ۱: مشخصات و روش‌های تولید؛
- قسمت ۳: کالیبراسیون دُزسنج‌های فردی و محیطی و تعیین پاسخ آن‌ها به‌صورت تابعی از انرژی نوترون و زاویه فرود.

این استاندارد با دو قسمت دیگر خود، ارتباط تنگاتنگی داشته که مجموعه این استانداردهای ملی برای کالیبراسیون دُزسنج‌های فردی و دستگاه‌های پایش سطح استفاده می‌شود. در استاندارد ۱-۱۱۶۹۹، روش‌های تولید پرتوهای نوترونی، به‌منظور کالیبراسیون دزسنج‌های فردی و محیطی ارائه شده است و در این استاندارد و استاندارد ۳-۱۱۶۹۹، به‌ترتیب اصول و شرایط کالیبراسیون و روش‌های اجرایی کالیبراسیون این دستگاه‌ها بیان شده است.

همچنین اطلاعات تکمیلی در این باره، در منابع کتاب‌نامه ارائه شده‌اند. خلاصه‌ای از مشخصات فیزیکی دُزسنج‌های فردی در منبع [1] کتاب‌نامه و خلاصه‌ای از روش‌های اجرایی کالیبراسیون آن‌ها در منابع [2] و [3] کتاب‌نامه ارائه شده است.

جزئیات بیشتر در مورد مشخصات دستگاه‌های پایش سطح و الزامات و روش‌های اجرایی کالیبراسیون آن‌ها در منابع [3] تا [5] کتاب‌نامه، ارائه شده است. تعاریف کاملی از کمّیت‌ها و یکاهای پرتوی در مدارک ICRP 51، ICRP 74، ICRU 33، ICRU 39، ICRU 43، ICRU 47، ICRU 51 و ICRU 57 (به منابع [24] و [28] تا [32] کتاب‌نامه مراجعه شود)، بیان شده است.

پرتوهای نوترونی مرجع- قسمت ۲: اصول کالیبراسیون وسایل حفاظت در برابر پرتو مربوط به کمّیت‌های اصلی مشخص‌کننده میدان پرتوی

۱ هدف و دامنهٔ کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روش‌های اجرایی مورد استفاده برای تحقق شرایط کالیبراسیون وسایل حفاظت در برابر پرتو در میدان‌های نوترونی حاصل از منبع‌های کالیبراسیون، با تأکید ویژه بر تصحیحات اثرات خارجی (برای مثال نوترون‌های پراکنده‌شده از دیوارها در اتاق کالیبراسیون)، است.

در این استاندارد، تأکید ویژه‌ای بر کالیبراسیون با استفاده از منبع‌های رادیونوکلئیدی با توجه به کاربرد وسیع آن‌ها شده است (به بندهای ۴ تا ۶ مراجعه شود). هم‌چنین در این استاندارد با جزئیات کم‌تری به کالیبراسیون با استفاده از منبع‌های راکتور و شتاب‌دهنده پرداخته شده است (به زیربندهای۲-۸ و ۳-۸ مراجعه شود).

این استاندارد برای منبع‌های نوترونی تشریح‌شده در استاندارد ISO 8529-1، کاربرد دارد. در استاندارد ISO 8529-3، ضرایب تبدیل، قواعد کلی و روش‌های اجرایی برای کالیبراسیون ارائه شده است.

۲ مراجع الزامی

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

در صورتی‌که 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 8529-1, Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production.

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۱- ۱۱۶۹۹: سال ۱۳۸۷، تابش‌های نوترونی مرجع – قسمت ۱: مشخصات و روش‌های تولید، با استفاده از استاندارد ISO 8529-1: 2001 تدوین شده است.

2-2 ISO 8529-3, Reference neutron radiations — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence.

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۳- ۱۱۶۹۹: سال ۱۳۹۷، پرتوهای نوترونی مرجع- قسمت ۳: کالیبراسیون دُزسنج‌های فردی و محیطی و تعیین پاسخ آن‌ها به‌صورت تابعی از انرژی نوترون و زاویه فرود، با استفاده از استاندارد ISO 8529-3: 1998 تدوین شده است.

2-3 ISO 12789, Reference neutron radiations — Characteristics and methods of production of simulated workplace neutron fields.

2-4 BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML:1993, International vocabulary of basic and terms in metrology.

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

2-5 ICRU Report 33, Radiation Quantities and Units.

2-6 ICRU Report 60, Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation.

۳ اصطلاحات، تعاریف و نمادها

در این استاندارد، علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ارائه‌شده در مدارک ICRU 33، ICRU 60 و استاندارد VIM، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به‌کار می‌رود:

فهرست نمادهای مورد استفاده در این استاندارد، در پیوست **الف** ارائه شده است.

۳-۱

خوانش

M

reading

مقدار کمّیت نشان داده توسط دستگاه است.

۳-۲

مقدار واقعی قراردادی یک کمّیت

conventional true value of a quantity

بهترین تخمین از مقدار کمّیتی که اندازه‌گیری می‌شود.

یادآوری- یک مقدار واقعی قراردادی به‌طور معمول به‌عنوان مقداری درنظر گرفته می‌شود که به اندازه کافی به مقدار واقعی نزدیک است تا حدی که اختلاف آن‌ها برای هدف موردنظر ناچیز باشد.

۳-۳

معادل دُز

H

dose equivalent

حاصل‌ضرب Q و D در نقطه‌ای درون بافت است که در آن D دُز جذبی در آن نقطه و Q عامل کیفیت هستند: $H=QD$

۱-۳-۳

معادل دُز محیطی

$H^*(d)$

ambient dose equivalent

معادل دُز در نقطه‌ای در میدان پرتوی که توسط میدانی گسترش‌یافته و همسو در کُره ICRU[1] در عمق، d، در شعاعی خلاف جهت میدان همسو ایجاد شده است.

۲-۳-۳

معادل دُز فردی

$Hp(d)$

personal dose equivalent

معادل دُز در بافت نرم در عمق مناسب، d، زیر نقطه‌ای از بدن است.

یادآوری- واحد معادل دُز فردی ژول بر کیلوگرم ($J{\cdot}kg^{-1}$) با نام ویژه سیورت (Sv) است.

۴-۳

شارش

Φ

fluence

نسبت dN به da، که در آن dN تعداد نوترون‌های برخوردی به کره‌ای با سطح مقطع عرضی da است:

$$\Phi = dN/da$$

1- ICRU sphere

۳-۵

پاسخ

R

response

نسبت خوانش به مقدار واقعی قراردادی کمّیت ایجادکننده آن است.

یادآوری- نوع پاسخ باید مشخص شود، برای مثال «پاسخ شارش» که طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$R_{\Phi} = \frac{M}{\Phi} \qquad (۱)$$

یا «پاسخ معادل دُز» طبق معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$R_{H} = \frac{M}{H} \qquad (۲)$$

یا «پاسخ معادل دُز فوتون» طبق معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$R_{\gamma} = \frac{M}{H_{\gamma}} \qquad (۳)$$

در صورتی‌که، M، اندازه‌گیری آهنگ باشد، کمّیت‌های شارش (Φ) و معادل دُز (H) به‌ترتیب با آهنگ شارش ($\dot{\varphi}$) و آهنگ معادل دُز ($\dot{H}$) جایگزین می‌شود.

۳-۶

عامل کالیبراسیون

N

calibration factor

مقدار معکوس پاسخ، وقتی پاسخ تحت شرایط مرجع تعیین می‌شود.

یادآوری- عامل کالیبراسیون، عاملی است که برای به‌دست‌آوردن مقدار کمّیت مورد اندازه‌گیری، در خوانش M ضرب می‌شود.

۷-۳

وابستگی پاسخ به انرژی

$R_H(E)$ یا $R_\Phi(E)$

energy dependence of response

پاسخ R، با درنظرگرفتن شارش Φ یا معادل دُز H، برای نوترون‌های تک‌انرژی به‌صورت تابعی از انرژی نوترون E است.

۸-۳

حساسیت فوتونی

photon sensitivity

تغییر در خوانش نوترونی یک دستگاه وقتی که فوتون‌ها به میدان نوترونی اضافه می‌شود.

به پاسخ معادل دُز فوتونی (زیربند ۳-۵) مراجعه شود

۹-۳

کمّیت میدان-آزاد

free-field quantity

این کمّیت در شرایطی که پرتودهی‌ها در فضای آزاد و بدون هرگونه اثرات پراکندگی یا زمینه انجام شود، به‌دست می‌آید.

۱۰-۳

نقطه آزمون

point of test

نقطه‌ای در میدان پرتوی که در آن مقدار واقعی قراردادی کمّیت مورد اندازه‌گیری، معلوم باشد.

۱۱-۳

نقطه مرجع

reference point

نقطه‌ای از دستگاه که در نقطه تحت آزمون با اهداف کالیبراسیون یا آزمون، قرار می‌گیرد.

یادآوری- فاصله اندازه‌گیری، فاصله بین مرکز منبع پرتوی و نقطه مرجع دستگاه است.

۱۲-۳

مرکز مؤثر

effective center

نقطه‌ای داخل دستگاه که خوانش در آن نقطه مانند حالتی که یک آشکارساز نقطه‌ای باشد، رفتار می‌کند. به این معنی که خوانش در آن نقطه با عکس مربع فاصله از منبع نقطه‌ای تغییر می‌کند.

مثال- برای یک دستگاه با تقارن کروی، این نقطه به‌طور معمول مرکز هندسی آن خواهد بود.

۴ کالیبراسیون و قابلیت‌ردیابی میدان پرتوی مرجع

۴-۱ ملاحظات کلی

آهنگ شارش نوترونی میدان پرتوی ایجاد شده برای کالیبراسیون مطابق با این استاندارد، باید به یک استاندارد ملی (یا بین‌المللی) شناخته‌شده قابل ردیابی باشد. روش مورد استفاده برای ایجاد ارتباط این کالیبراسیون به نوع میدان پرتوی مرجع وابسته است، اما قابلیت‌ردیابی اندازه‌گیری به‌طور معمول از طریق استفاده از یک استاندارد انتقالی قابل دستیابی است. به‌عنوان مثال فرآیند قابلیت‌ردیابی می‌تواند به‌واسطه یک منبع رادیونوکلئیدی (به زیربند ۴-۲ مراجعه شود) یا یک دستگاه انتقالی مورد توافق (به زیربند ۴-۲ مراجعه شود) انجام شود. کالیبراسیون میدان به بیانی دقیق، فقط در زمان کالیبراسیون معتبر است و پس از آن می‌توان به‌عنوان مثال از اطلاعات نیمه‌عمر و ترکیبات ایزوتوپی منبع رادیونوکلئید یا ویژگی‌های دستگاه انتقالی، کالیبراسیون جدید را استخراج کرد.

هم‌چنین روش اندازه‌گیری استفاده‌شده توسط یک آزمایشگاه کالیبراسیون برای کالیبراسیون یک وسیله اندازه‌گیری نوترونی باید مطابق با الزامات ضوابط ملی، مورد تأیید قرار گیرد. دستگاهی که کالیبراسیون سایر دستگاه‌های یکسان یا مشابه با آن بر اساس آن انجام می‌گیرد، باید در آزمایشگاه دُزسنجی مرجع ثانویه (SSDL)[1] کالیبره شده باشند. این اندازه‌گیری‌ها باید در هریک از آزمایشگاه‌های مرجع و آزمایشگاه کالیبراسیون، با استفاده از روش‌های کالیبراسیون تأییدشده مورد استفاده در آن آزمایشگاه، انجام شود. به‌منظور اثبات این‌که قابلیت‌ردیابی مناسب حاصل شده است، آزمایشگاه کالیبراسیون باید عامل کالیبراسیون را همانند آن‌چه در آزمایشگاه مرجع به‌دست آمده در محدوده‌های موردپذیرش به‌دست آورد.

تعداد دوره‌های کالیبراسیون میدان باید به گونه‌ای باشد که اطمینان حاصل شود که مقدار آن بین دو کالیبراسیون متوالی از محدوده‌های مشخصه آن خارج نخواهد شد. تعداد دوره کالیبراسیون برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی در استاندارد ISO 8529-1، ارائه شده است. کالیبراسیون دستگاه انتقالی تأییدشده

1- Secondary standard dosimetry laboratory

این آزمایشگاه تحت نظر مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور در خصوص دُزسنجی و پرتوهای یون‌ساز فعالیت می‌کند و قابل‌ردیابی به آزمایشگاه مرجع آژانس بین‌المللی انرژی اتمی می‌باشد.

آزمایشگاه و بررسی روش‌های اندازه‌گیری مورد استفاده توسط آزمایشگاه کالیبراسیون باید حداقل هر پنج سال یک‌بار یا هر زمان که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در شرایط محیطی آزمایشگاه به وجود آید، انجام شود.

۴-۲ قابلیت‌ردیابی برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی

برای کالیبراسیون با استفاده از میدان‌های نوترونی تولیدشده توسط منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی، قابلیت‌ردیابی را باید یا با استفاده از منبع رادیونوکلئیدی که قدرت زاویه‌ای آن توسط آزمایشگاه مرجع تعیین‌شده است، (برای قدرت زاویه‌ای منبع، به زیربند ۵-۲-۱ مراجعه شود) یا از طریق تعیین آهنگ شارش در موقعیت دستگاه تحت آزمون با استفاده از دستگاه انتقالی مورد قبول که در آزمایشگاه مرجع کالیبره شده است، فراهم کرد. اگر منبع نوترونی بر اساس توصیه‌های زیربند 4.1.2 استاندارد ISO 8529-1 پوشینه‌دار[1] شود، می‌توان فرض کرد که شارش طیفی نوترون از منبع تقریباً با شارش طیفی نوترون نشان‌داده‌شده در استاندارد ISO 8529-1 مشابه است. در این صورت می‌توان از ضرایب تبدیل شارش نوترون به معادل دُز توصیه‌شده در این استاندارد استفاده کرد. عدم‌قطعیت‌ها در ضرایب تبدیل که در در زیربند ۱۰-۲-۹ این استاندارد پیشنهاد شده است، بیانگر عدم‌قطعیت در طیف‌های نشان‌داده‌شده در استاندارد ISO 8529-1 و هم‌چنین تغییرات در طیف‌های ناشی از تفاوت در ساختار و نحوه پوشینه‌دارسازی منبع نوترونی است.

۴-۳ قابلیت‌ردیابی برای نوترون‌های تولیدشده در شتاب‌دهنده

قابلیت‌ردیابی باید با استفاده از یک دستگاه انتقالی که مورد توافق بین آزمایشگاه‌های مرجع و کالیبراسیون است، ایجاد شود. دستگاه انتقالی باید برای میدان‌های نوترونی مشابه به همان شیوه‌ای که کالیبره شده است، استفاده شود و تصحیحات مناسب اعمال شود.

در آزمایشگاه‌ها، دستگاه‌های پایش و انتقالی باید در فواصل زمانی الزام‌شده توسط ضوابط ملی (برای مثال با استفاده از یک منبع نوترونی رادیونوکلئیدی مناسب) مورد بررسی قرار گیرند و نتایج آن‌ها ثبت شوند.

۴-۴ قابلیت‌ردیابی برای باریکه‌های نوترونی تولیدشده در راکتور

اصول کلی که در مورد قابلیت‌ردیابی با یک استاندارد مشخص وجود دارد، برای کالیبراسیون چنین میدان‌های پرتوی خاص نیز باید به‌کار برده شود (باریکه نوترونی گرمایی یا فیلترشده). برای مثال، آهنگ شارش نوترون‌های گرمایی را می‌توان با فعال‌سازی ورقه‌های طلا اندازه‌گیری کرد. که چنین اندازه‌گیری به یک استاندارد اولیه، قابل ردیابی است.

1- Encapsulated

۵ اصول کالیبراسیون برای کالیبراسیون منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی

۵-۱ اصول کلی

عامل کالیبراسیون یا پاسخ یک وسیله، یک خصیصه منحصربه‌فرد برای آن نوع وسیله است. عامل کالیبراسیون می‌تواند به آهنگ معادل دُز، طیف منبع نوترونی یا زاویه فرودی نوترون‌ها بستگی داشته باشد، اما نباید تابعی از مشخصات سامانه کالیبراسیون یا تکنیک‌های تجربی به‌کار رفته باشد. از این رو در این استاندارد، جزئیات روش‌های اجرایی برای کالیبراسیون وسیله‌های اندازه‌گیری نوترونی ارائه شده است که اطمینان می‌دهد کالیبراسیون این وسیله‌ها از تکنیک‌ها و عامل‌هایی مانند فاصله وسیله تا منبع و ابعاد اتاق کالیبراسیون مستقل است.

برای سادگی، اصول کلی برای کالیبراسیون وسیله‌هایی مانند دستگاه پایش سطح ارائه شده است، اما اکثر این اصول برای دیگر وسیله‌ها نیز قابل استفاده هستند. دستگاه در یک میدان پرتوی با آهنگ شارش معین میدان-آزاد قرار داده شده و خوانش دستگاه یادداشت می‌شود. بر اساس پاراگراف بالا، خوانش باید برای همه اثرات پراکندگی نوترونی خارجی شامل پراکندگی نوترونی از هوا، دیوارها، کف و سقف اتاق کالیبراسیون تصحیح شود (به زیربند ۳-۵ مراجعه شود). همچنین خوانش ممکن است نیاز به تصحیح اثرات ناشی از اندازه منبع و آشکارساز داشته باشد (برای اطلاعات بیشتر دربارهٔ عامل تصحیح هندسی $F_1(l)$، به زیربند ۶-۲ مراجعه شود).

پاسخ شارش میدان- آزاد، R_Φ، دستگاه طبق معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$R_\Phi = \frac{M_C}{\Phi} \qquad (۴)$$

که در آن:

M_C خوانش اندازه‌گیری تصحیح‌شده برای همه اثرات خارجی است. اگر M_C اندازه‌گیری آهنگ شمارش باشد، در این صورت:

$$R_\Phi = \frac{M_C}{\varphi} \qquad (۴\text{- الف})$$

آهنگ شارش میدان- آزاد، φ (به زیربند ۳-۹ مراجعه شود)، برای دستگاه تحت پرتودهی، طبق معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$\varphi = \frac{B_\Omega}{l^2} \qquad (۵)$$

که در آن:

l فاصله مرکز منبع تا نقطه آزمون است (به زیربند ۱۰-۳ مراجعه شود)؛

B_Ω قدرت زاویه‌ای منبع نوترونی است که در استاندارد ISO 8529-1 تعریف شده است. این کمّیت از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$B_\Omega = \frac{BF_1(\theta)}{4\pi} \qquad (۶)$$

که در آن:

B قدرت منبع نوترونی است (یعنی آهنگ گسیل کل نوترون در یک میدان فضایی 4π sr)؛

$F_1(\theta)$ عامل تصحیح ناهمسانگردی منبع نوترونی است (به منبع [6] کتاب‌نامه مراجعه شود).

توابع ناهمسانگردی برای دو نوع متفاوت از منبع‌های نوترونی، در استاندارد ISO 8529-1 ارائه شده است.

در برخی مواقع برای سهولت کار یک کمّیت ثابت مشخصه آشکارساز-منبع، k، معرفی می‌شود که به‌طورکامل برای همه اثرات پراکندگی اصلاح شده است (به زیربند ۵-۳ مراجعه شود).

این ثابت به‌طور کلی به‌صورت معادله (۷) می‌باشد:

$$k = M_C \times l^2 \qquad (۷)$$

سپس از معادله‌های (۴- الف) و (۵)، معادله‌های (۸) و (۸- الف) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$k = R_\Phi \times \varphi \times l^2 \qquad (۸)$$

$$k = R_\Phi \times B_\Omega \qquad (۸- \text{الف})$$

ثابت k برای هر چیدمان آشکارساز- منبع، مشخص است، از این‌رو، این ثابت به کمّیت‌های B_Ω و R_Φ وابسته است.

در نهایت پاسخ معادل دُز، از معادله (۹) به‌دست می‌آید:

$$R_H = \frac{R_\Phi}{h_\Phi} \qquad (۹)$$

که در آن h_Φ ضریب تبدیل شارش به معادل دُز است. مقادیر توصیه‌شده برای h_Φ، دراستاندارد ISO 8529-3 ارائه شده‌اند. این مقادیر فقط برای منبع‌های نوترونی توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1، کاربرد دارد (مقدار h_Φ و یک مرجع مناسب باید در هر گزارش کالیبراسیون ذکر شود).

۵-۲ ویژگی‌های مهم یک سامانه کالیبراسیون نوترونی

۵-۲-۱ منبع

میدان کالیبراسیون منبع رادیونوکلیدی باید به یک آزمایشگاه مرجع قابل ردیابی باشد (به بند ۴ مراجعه شود). برای کمینه‌کردن گسیل نوترونی ناهمسانگرد، منبع باید کروی یا استوانه‌ای با قطر و طول تقریباً یکسان باشد. برای منبع‌های استوانه‌ای، آشکارساز باید در $\theta = 90^\circ$ نسبت به محور استوانه کالیبره شود (به استاندارد ISO 8529-1 مراجعه شود). ناهمسانگردی باید برای هر منبع مورد استفاده اندازه‌گیری شود. پوشینه‌دارسازی باید تا حد ممکن سبک بوده و مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی مرتبط با چشمه‌های پرتوزای بسته، باشد. پوشینه‌دارسازی سنگین منبع‌ها ممکن است باعث تغییرات طیف نوترونی به‌همراه گسیل ناهمسانگرد شود. اگر به لحاظ تجربی امکان اندازه‌گیری ناهمسانگردی وجود نداشته باشد، محاسبه آن می‌تواند امکان‌پذیر باشد، به یاد داشته باشید که ناهمسانگردی به موقعیت ماده رادیونوکلئید داخل کپسول منبع بستگی خواهد داشت (به منبع [6] کتاب‌نامه مراجعه شود). به زیربند ۱۰-۲-۳ مراجعه شود. برای بحث‌های تکمیلی بیشتر به زیربند 4.3 استاندارد ISO 8529-1 و منبع [2] کتاب‌نامه مراجعه شود.

منبع باید در مرکز اتاق یا در شرایط کار در سامانه مستقر در فضای باز، تا حد امکان بالای سطح زمین قرار گیرد. منبع باید توسط یک ساختار فاقد هیدروژن و با کمترین جرم ممکن نگه داشته شود.

برای بررسی کامل خطی‌بودن، به تغییراتی با بیش از سه مرتبه بزرگی در آهنگ معادل دُز نیاز است (به‌عنوان مثال از تقریباً $1\ \mu Sv.h^{-1}$ تا تقریباً $10\ mSv.h^{-1}$). پوشش‌دهی این گستره فقط از طریق تغییر فاصله، l، عملی نخواهد بود. به‌طور کلی، ترجیحاً دو (یا بیشتر) منبع، که بتواند قدرت منبع را با عاملی از ۱۰ تا ۱۰۰ تغییر دهند، نیاز خواهد بود. عامل ناهمسانگردی $F_l(\theta)$ برای منبع‌های مختلف، حتی اگر به‌طور اسمی مشابه هم ساخته شده باشند، درصورت لزوم یکسان نخواهند بود.

۵-۲-۲ چیدمان پرتودهی

به‌منظور قرار دادن دستگاه تحت آزمون در زاویه و فاصله‌ای مشخص نسبت به منبع کالیبراسیون، باید از یک سیستم نگه‌دارنده استفاده شود. نگه‌دارنده باید سخت و صلب باشد، اما باید طوری طراحی شود که پراکندگی پرتو را کمینه کند. در چیدمان پرتودهی باید امکان جابه‌جایی و حرکت آشکارساز وجود داشته باشد تا بتوان فاصله آشکارساز تا منبع را تغییر داد. وقتی یک وسیله کالیبره‌شده برای تعیین آهنگ شارش استفاده می‌شود، سیستم نگه‌دارنده آن هم باید الزامات مشابه را داشته باشد.

۵-۲-۳ اتاق پرتودهی

پاسخ وسیله به نوترون‌های پراکنده ناشی از اتاق، با اندازه، شکل و ساختار اتاق تغییر خواهد کرد. اتاق باید به‌گونه‌ای باشد که سهم پراکندگی مربوط به آن کم‌ترین مقدار ممکن باشد، اما در هر صورت پراکندگی اتاق نباید باعث افزایش بیشتر از ٪ ۴۰ در خوانش دستگاه در نقطه کالیبراسیون شود (به پیوست **ب** مراجعه شود).

۵-۳ منابع نوترون‌های پراکنده

۵-۳-۱ مقدمه

عامل‌های کالیبراسیون باید یک خصیصه منحصربه فرد از نوع دستگاه و طیف منبع نوترونی باشد و در این استاندارد، نباید تابعی از مشخصه‌های سامانه کالیبراسیون باشد. بنابراین همه کالیبراسیون‌ها باید به کمّیت‌های میدان- آزاد ارجاع داده شود و باید بر روی خوانش وسیله، تصحیحات مربوط به اثرات نوترون‌های پراکنده انجام شود. در کالیبراسیون‌هایی که از نوترون‌های پراکنده استفاده می‌شود، به استاندارد ISO 12789 مراجعه شود. به‌طور کلی اثرات پراکندگی که در ادامه شرح داده خواهد شد ممکن است رخ دهد:

۵-۳-۲ پراکندگی اتاق

نوترون‌ها به شکل پیچیده‌ای از دیوارها و کف آزمایشگاه پراکنده می‌شوند. سهم این نوترون‌ها در خوانش یک وسیله را می‌توان از طریق محاسبات ترابرد یا از طریق اندازه‌گیری برای شرایط ویژه آزمایشگاه تعیین کرد. پراکندگی اتاق احتمالاً مهم‌ترین منبع نوترون‌های پراکنده است.

۵-۳-۳ تضعیف هوا (پراکندگی خروجی هوا[1])

نوترون‌های گسیل‌شده از منبع با برهمکنش‌های هسته‌ای با هوا تضعیف می‌شوند (به پیوست **پ** مراجعه شود). تضعیف در هوا تقریباً به‌طور خطی با افزایش فاصله منبع-آشکارساز افزایش می‌یابد.

۵-۳-۴ پراکندگی ورودی هوا[2]

نوترون‌هایی که در خارج از مسیر مستقیم منبع به آشکارساز وجود دارند، می‌توانند توسط هوا، پراکنده شوند و این نوترون‌های پراکنده ممکن است با وسیله تحت آزمون آشکارسازی شوند. پراکندگی ورودی نسبی همچنین تقریباً به‌طور خطی با فاصله منبع-آشکارساز افزایش می‌یابد. اثر پراکندگی خالص (پراکندگی ورودی منهای پراکندگی خروجی) مربوط به چندین وسیله اندازه‌گیری نوترون، برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1، در پیوست **ت** ارائه شده است.

1- Air outscatter
2- Air inscatter

بزرگی نسبی پراکندگی اتاق، پراکندگی ورودی هوا و پراکندگی خروجی هوا به اندازه اتاق و فاصله بین منبع نوترون و وسیله‌ای که باید کالیبره شود، بستگی دارد. در تمامی موارد، می‌توان با کمینه‌کردن این فاصله، اثرات پراکندگی‌ها روی کالیبراسیون را کاهش داد.

۵-۳-۵ پراکندگی از سازه‌های نگه‌دارنده

سازه‌های نگه‌دارنده باید تا حد ممکن سبک و از موادی با کم‌ترین یا بدون ترکیبات هیدروژنی باشند. برای کمینه‌کردن جرم سازه نگه‌دارنده نزدیک به آشکارساز یا منبع باید توجه ویژه‌ای لحاظ شود.

۵-۳-۶ اثرات طیفی

برای همه سهم‌های پراکندگی، توزیع زاویه‌ای و طیفی از طیف اصلی منبع متفاوت است. بنابراین سهم نسبی پرتوهای پراکنده بر روی خوانش وسیله به وابستگی زاویه‌ای و وابستگی انرژی پاسخ وسیله، بستگی دارد.

۵-۴ اثر پرتو فوتونی

پاسخ وسیله نسبت به فوتون‌ها باید تعیین شود و همچنین باید مشخص شود که آیا وجود فوتون‌ها روی پاسخ وسیله به نوترون‌ها تأثیر می‌گذارد یا خیر. وقتی یک وسیله با منبع نوترونی رادیونوکلئیدی کالیبره می‌شود، اثر پرتو فوتونی مربوط به منبع نیز باید مورد ارزیابی قرار گیرد و یک تصحیح با یک عدم‌قطعیت متناسب با درستی مورد نیاز برای کالیبرسیون اعمال شود. پاسخ به پرتوهای گاما باید با استفاده از چشمه‌های گامای ^{60}Co و ^{137}Cs و سایر چشمه‌های فوتونی مناسب، تعیین شود.

۶ تصحیح اثرات پراکندگی برای منبع‌های رادیونوکلئیدی

۶-۱ اندازه‌گیری‌های اولیه

تأثیر نوترون‌های پراکنده‌شده از اتاق بر روی خوانش وسیله به‌طور کلی به نوع وسیله و فاصله آن از منبع و اندازه، شکل و ساختار اتاق کالیبراسیون بستگی خواهد داشت. به‌طور کلی، خوانش دستگاه، M'_{T}، ناشی از میدان پرتوی کل (نوترون‌های منبع به‌علاوه نوترون‌های پراکنده) را می‌توان به‌صورت معادله (۱۰) نوشت (به منبع [7] کتاب‌نامه مراجعه شود):

$$M'_{\mathrm{T}}(l) = \frac{k}{l^2}\, F_{\mathrm{L}}\{\frac{F_1(l)}{F_{\mathrm{A}}(l)} + F'_2(l) - 1\} \qquad (۱۰)$$

که در آن:

l فاصله بین مرکز منبع و نقطه مرجع است (به زیربند ۳-۱۱ مراجعه شود)؛

k ثابت مشخصه است [به معادله (۸) مراجعه شود]؛

F_{L} تصحیح خطی‌بودن است که هر گونه انحراف از خطی‌بودن بین خوانش دستگاه و آهنگ معادل دُز منجر به خوانش را تصحیح می‌کند؛

$F_1(l)$ عامل هندسی است؛

$F_{\mathrm{A}}(l)$ تصحیح تضعیف هوا (پراکندگی خروجی هوا) است؛

$F_2'(l)$ تابع تصحیحی است که دیگر سهم‌های ناشی از نوترون‌های پراکنده ورودی را توصیف می‌کند.

نقطه مرجع دستگاه باید منطبق با مرکز مؤثر دستگاه (به زیربند ۳-۱۲ مراجعه شود)، انتخاب شود.

برای وسیله‌ای که حساسیت آن دارای تقارن کروی با نقطه مرجع در مرکز هندسی آن است، مرکز هندسی، همان مرکز مؤثر است. برای وسیله استوانه‌ای، مثل پایشگر اندرسون- براون[1]، وقتی کالیبراسیون به‌نحوی صورت گیرد که محور استوانه بر جهت پرتو فرودی عمود باشد، مرکز مؤثر روی محور استوانه خواهد بود. در حالتی‌که کالیبراسیون به‌نحوی صورت گیرد که محور استوانه موازی با جهت پرتو فرودی باشد، موقعیت مرکز مؤثر می‌تواند تابعی از انرژی باشد. برای این حالت، روش پده[2] (به منبع [8] کتاب‌نامه مراجعه شود) می‌تواند مفید باشد، هر چند امروزه کم‌تر از این روش استفاده می‌شود.

قبل از تعیین تصحیح اثرات پراکندگی، ابتدا تصحیحات باید برای همه اثرات غیرخطی اعمال شود، بنابراین $M_{\mathrm{T}}'(l)$ در معادله (۱۰) را می‌توان با $M_{\mathrm{T}}(l)$، طبق معادله (۱۱) جایگزین کرد:

$$M_{\mathrm{T}}(l) = \frac{M_{\mathrm{T}}'(l)}{F_{\mathrm{L}}} \qquad (۱۱)$$

اندازه‌گیری‌ها باید تحت شرایط کنترل شده و با دقت انجام شود. از آن‌جایی‌که اندازه‌گیری پاسخ ذاتی دستگاه به تنهایی مطلوب است، مستقل از هرگونه خصوصیات ویژه مجموعه دستگاه، بهتر است سیگنال‌های خروجی از آشکارساز با تجهیزات الکترونیکی آزمایشگاهی پردازش شود. اگر این کار عملی نیست، باید اطمینان حاصل شود که خود مجموعه دستگاه الکترونیکی، عامل ایجاد هیچ‌گونه ناپایداری و غیرخطی‌بودن نمی‌باشد. تصحیحات زمان مرده باید اعمال شود و خطی‌بودن آهنگ شمارش با آهنگ معادل دُز با شروع از بالاترین آهنگ شمارش مورد انتظار درحین کالیبراسیون‌ها باید آزموده شود. خطی‌بودن با تعویض دو منبع نوترونی رادیونوکلئیدی از یک نوع و قدرت زاویه‌ای معلوم اما قدرت‌های منبع به‌لحاظ بزرگی حدود یک مرتبه متفاوت، در فاصله یکسان و سپس تکرار این روش اجرایی در فاصله‌های متفاوت، می‌تواند آزموده شود. در حالت کلی، الزامات عملکردی و روش‌های ارزیابی آهنگ‌سنج‌های[3] معادل دُز محیطی نوترونی قابل‌حمل ارائه شده در استاندارد IEC 1005 (به منبع [5] کتاب‌نامه مراجعه شود) ، باید در نظر گرفته شود.

1- Andersson-Braun
2- Padé method
3- Ratemeters

این بند، چهار رویکرد مختلف را برای مسئله تصحیح اثرات پراکندگی توصیه می‌کند. سه روش نخست (مطابق با زیربندهای ۶-۳-۱، ۶-۳-۲ و ۶-۳-۳)، که با عنوان روش مخروط- سایه[1]، روش برازش تعمیم‌یافته[2] و روش نیمه‌تجربی مشخص شده‌اند، به‌طور معمول شامل یک مجموعه اولیه از اندازه‌گیری‌های دقیق به‌عنوان تابعی از فاصله بین آشکارساز و منبع نوترونی است. هر چند برای یک نوع خاص از دستگاه، نیاز است فقط یک بار این اندازه‌گیری‌ها انجام شود و هر بار که دستگاه یکسانی کالیبره می‌شود، دیگر نیاز به تکرار این اندازه‌گیری‌ها نیست.

چهارمین روش که روش ساده شده‌ای است، به‌عنوان روش برازش تقلیل‌یافته[3] (به زیربند ۶-۳-۴ مراجعه شود) معروف است. در این روش نیازی به مجموعه اولیه‌ای از اندازه‌گیری‌ها نیست. همچنین در این روش به دلیل استفاده نکردن از فواصل پرتودهی کوچک، دیگر به تصحیحات هندسی توصیف‌شده در زیربند ۶-۲ نیاز نیست. البته در روش مخروط- سایه هم ممکن است به مجموعه اولیه‌ای از اندازه‌گیری‌های دقیق احتیاج نباشد، چون در این روش می‌توان برای هر وسیله‌ای در یک فاصله پرتودهی دلخواه با انجام یک اندازه‌گیری در این فاصله با و بدون حضور مخروط سایه، تصحیح پراکندگی را تعیین کرد. مزیتی که این رویکرد دارد این است که به این فرض که همه وسیله‌های مشابه باید پاسخ یکسانی به انرژی داشته باشند، بستگی ندارد. موارد مطروحه در ادامه این زیربند برای روش‌های برازش تقلیل‌یافته و مخروط- سایه که در آن‌ها از مجموعه اولیه از اندازه‌گیری‌ها استفاده نشده است، به‌کار نمی‌رود.

گستره فواصل مورد استفاده برای مجموعه اولیه‌ای از اندازه‌گیری‌ها باید به اندازه کافی بزرگ باشد که بتوان بررسی خطی‌بودن انواع دستگاه‌هایی که به‌طور معمول کالیبره می‌شوند را انجام داد، محدودیت‌های مربوط به فاصله منبع-آشکارساز در زیربند ۶-۴ اشاره شده است. گستره فواصل باید طوری انتخاب شود که امکان دسترسی به آهنگ‌های معادل دُز از تقریباً $1\ \mu Sv{\cdot}h^{-1}$ تا تقریباً $10\ \mu Sv.h^{-1}$، برای منبع‌هایی که در آزمایشگاه‌های خاصی استفاده می‌شود، وجود داشته باشد. داده‌ها باید همچنین شامل تخمینی از عدم‌قطعیت‌ها در خوانش و فاصله باشند.

دلایلِ نیاز به مجموعه اولیه‌ای از اندازه‌گیری‌ها و تفسیر داده‌ها، در این سه روش تا حدودی متفاوت است و هر روش مزایا و معایب و گستره کاربردهای خاص خود را دارند که در ادامه اشاره خواهد شد.

هر روشی که استفاده می‌شود، باید با یکی از روش‌های دیگر نیز بررسی شود. توجه شود عوامل کالیبراسیون به‌دست آمده در روش‌های مختلف ممکن است ٪ ۳ تا ٪ ۴ اختلاف داشته باشند (به منبع [7] کتاب‌نامه مراجعه شود).

1 -Shadow-cone method
2- Generalized fit method
3- Reduced-fitting method

۶-۲ تصحیح هندسی

قبل از توصیف سه روش نخست در زیربندهای ۶-۳-۱ تا ۶-۳-۳ که برای تعیین پاسخ نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرد، داده‌های اندازه‌گیری‌شده باید برای اثر اندازه محدود منبع یا آشکارساز تصحیح شود. تصحیح با استفاده از عامل هندسی $F_{\mathrm{l}}(l)$ اعمال می‌شود. برای یک منبع نقطه‌ای که یک آشکارساز کروی را پرتودهی می‌کند، $F_1(l)$ را می‌توان از معادله (۱۲) محاسبه کرد (به منبع [9] کتاب‌نامه مراجعه شود):

$$F_1(l) = 1 + \delta \left\{ \frac{2l^2}{r_{\mathrm{D}}^2} \left[1 - \left(1 - \frac{r_{\mathrm{D}}^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - 1 \right\} \qquad (۱۲)$$

در این زیربند فرض می‌شود که نقطه مرجع در مرکز هندسی دستگاه واقع شده و در نقطه تحت آزمون قرار داده می‌شود. بنابراین، کمّیت l فاصله مرکز منبع تا مرکز آشکارساز است، r_{D} شعاع آشکارساز و δ پارامتر اثربخشی نوترونی[1] هستند. برای $l/r_{\mathrm{D}}>2$ معادله (۱۲) به‌صورت معادله (۱۳) ساده‌سازی می‌شود:

$$F_1(l) = 1 + \delta \left(\frac{r_{\mathrm{D}}}{2l} \right)^2 \qquad (۱۳)$$

کمّیت δ، بستگی ناچیزی به r_{D} دارد (به منبع [9] کتاب‌نامه مراجعه شود)، مقدار توصیه‌شده در همه موارد برای این کمّیت، $\delta = 0.5 \pm 0.1$ است.

شکل کلی‌تر، که می‌تواند برای یک منبع نقطه‌ای نیز استفاده شود و فقط برای منبع کروی به‌کار گرفته می‌شود، (مثل کالیفرنیم با کُندکننده D_2O) به‌صورت معادله (۱۴) است (به منبع [7] کتاب‌نامه مراجعه شود):

$$F_1(l) = 1 + \frac{a_4}{(1 + a_5 L)^2} \qquad (۱۴)$$

با

$$L = \frac{l - r_{\mathrm{S}} - r_{\mathrm{D}}}{r_{\mathrm{D}}} \qquad (۱۴\text{- الف})$$

که در آن r_{S} شعاع منبع است.

برای یک منبع $^{252}\mathrm{Cf}$ با ابعاد کوچک که مانند یک منبع نقطه‌ای رفتار می‌کند، مقادیر توصیه‌شده برای a_4 و a_5 عبارتند از: $a_4 = 0{,}29 \pm 0{,}02$ و $a_5 = 1{,}79 \pm 0{,}02$ برای $8\ \mathrm{cm} \leq 2r_{\mathrm{D}} \leq 25\ \mathrm{cm}$ با این فرض که $r_{\mathrm{S}} = 0$.

1- Neutron effectiveness parameter

در صورتی‌که وسیله‌های کروی تحت کالیبراسیون، ابعاد پایشگرهای نوترونی متداول ($r_D \approx 10$ cm) را داشته باشد این مقادیر برای منبع‌های ^{241}Am-Be نیز توصیه می‌شود. برای منبع‌های با ابعاد فیزیکی بزرگ‌تر، r_S باید با ابعاد منبع متناظر باشد، هر چند کمّیت ثابت مشخصه می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای به r_S وابسته نباشد. برای منبع ^{252}Cf با کُندکننده D_2O به شعاع r_S=15 cm، پارامترهای a_4 و a_5 به قطر آشکارساز بستگی دارد. برای یک آهنگ‌سنج کروی معادل دُز با شعاع ۱۰٫۴ cm، مقادیر $a_4 = 0{,}093 \pm 0{,}004$ و $a_5 = 0{,}76 \pm 0{,}07$ توصیه می‌شود (به منبع [7] کتاب‌نامه مراجعه شود).

اگرچه نشان داده شده است که معادله (۱۲) (فقط برای منبع نقطه‌ای) یا معادله‌های (۱۴) و (۱۴- الف) می‌توانند برای مقادیر l که در آن منبع و آشکارساز واقعاً به هم‌چسبیده‌اند (یعنی $l=r_S+r_D$) مورد استفاده قرار گیرند. در چنین فواصل نزدیکی، آهنگ شمارش با فاصله، خیلی سریع تغییر می‌کند و بنابراین حداقل فاصله بین دو سطح (سطح منبع و آشکارساز) باید بزرگتر یا مساوی ۱ cm باشد و مقدار l باید بسیار بادقت تعیین شود.

در هنگام به‌کارگیری معادله های (۱۲) یا (۱۴) و (۱۴- الف) برای آشکارساز تقریباً کروی یعنی کُندکننده کروی با آشکارساز استوانه‌ای به‌جای آشکارساز مرکزی کروی، دقت ویژه‌ای باید لحاظ شود. برای چنین مواردی، تصحیح هندسی تابعی از هندسه آشکارساز مرکزی و جهت‌گیری آن خواهد بود. در این زمان، داده‌ها برای این نوع از دستگاه به اندازه کافی کامل نیستند که بتوان از مقادیر توصیه‌شده برای δ یا برای a_4 و a_5 استفاده کرد.

برای وسیله‌هایی با اشکال دیگر (مانند استوانه‌ای)، معادله آزموده شده‌ای مشابه معادله (۱۲) یا (۱۴) وجود ندارد. برای چنین حالت‌هایی، باید کمینه مقدار l به‌گونه‌ای انتخاب شود که عامل تصحیح هندسی $F_1(l)$ نزدیک به یک باشد. در عمل، این بدین معنی است که l باید بزرگتر از دو برابر قطر وسیله باشد (به منبع [8] کتاب‌نامه مراجعه شود). اگر استفاده از l با مقادیر کوچک‌تر به‌منظور رسیدن به آهنگ شارش بالا نیاز باشد، یک عدم‌قطعیت اضافه دیگری برای محاسبه عدم‌قطعیت $F_1(l)$ باید وارد شود (به زیربند ۱۰-۲-۵ مراجعه شود).

به‌طور قراردادی، برای دُزسنج‌هایی که روی فانتوم[1] پرتودهی می‌شوند، هیچ تصحیح هندسی انجام نمی‌شود.

۶-۳ آنالیز داده‌ها

۶-۳-۱ روش مخروط- سایه

درستی این روش به‌شدت به طراحی مخروط سایه و موقعیت آن نسبت به هندسه منبع- آشکارساز بستگی دارد. جزئیات موارد توصیه‌شده برای نحوه ساخت و استفاده از مخروط‌های سایه در پیوست **ث** ارائه شده است.

1- Phantom

اگر $M_S(l)$ و $M_T(l)$ خوانش‌های آشکارساز با و بدون حضور مخروط سایه بین منبع و آشکارساز باشند، رابطه زیر بین آن‌ها برقرار خواهد بود:

$$[M_T(l) - M_S(l)]F_A(l) = M_T(l)[1 - M_S(l)/M_T(l)]F_A(l) = \frac{k}{l^2} \qquad (۱۵)$$

که در آن $F_A(l)$ عامل تضعیف هوا (پراکندگی خروجی هوا) است (به منابع [9] و [10] کتاب‌نامه مراجعه شود). (مقادیر توصیه شده ضریب تضعیف خطی میانگین هوا برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی که در استاندارد ISO 8529-1 ارائه شده است، در پیوست **پ** نیز بیان شده است).

به‌طور معمول، اندازه‌گیری‌ها در فاصله l که بزرگتر از دو برابر طول مخروط- سایه است، انجام می‌شود بنابراین تصحیح $F_1(l)$ برای منبع یا آشکارسازی با اندازه محدود، اساساً برابر یک است.

مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها از خوانش کل آشکارساز $M_T(l)$ و خوانش پراکندگی ورودی $M_S(l)$ (در اصل برای هر فاصله، از مخروط سایه بهینه‌شده استفاده می‌شود که اجازه می‌دهد سطحِ در سایه قرار گرفته‌شده با عاملی بزرگتر از ۲ نسبت به سطحِ تصویرشده وسیله قرار گیرد)، به‌عنوان تابعی از فاصله کالیبراسیون مؤثر l، برای صحه‌گذاری معادله (۱۵) استفاده می‌شود. این صحه‌گذاری شامل تأیید این موضوع است که داده‌ها، شکلی مشابه معادله (۱۵) را دارند وهمچنین پاسخ R_Φ به‌دست آمده از k با پاسخ حاصل از یکی دیگر از روش‌های تصحیح پراکندگی سازگار است. زمانی که معادله (۱۵) معتبر است، کالیبراسیون‌ها می‌توانند توسط اندازه‌گیری $M_T(l)$ در فقط یک یا چند فاصله l در گستره‌ای که معادله (۱۵) در آن اعتبار دارد، انجام شود. با معلوم بودن مقدار $M_S(l)/M_T(l)$، می‌توان k را از معادله (۱۵) محاسبه کرد. پاسخ‌های R_Φ و R_H را می‌توان به‌ترتیب از معادله‌های (۸- الف) و (۹) محاسبه کرد.

۶-۳-۲ روش برازش تعمیم‌یافته

با فرض این‌که نوترون‌های پراکنده ورودی را بتوان با معادله (۱۶) بیان کرد، از معادله‌های (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود (به منبع [7] کتاب‌نامه مراجعه شود).

$$F_2'(l) = 1 + A'l + s.l^2 \qquad (۱۶)$$

اندازه‌گیری‌ها باید در حداقل ۳۰ فاصله مختلف با درنظرگرفتن محدودیت‌های اشاره شده در ردیف ت زیربند ۶-۴-۲، انجام شود. مقادیر اندازه‌گیری‌شده با استفاده از معادله‌های (۱۱)، (۱۴)، (۱۴- الف) و (۱۶) باید به معادله (۱۰) برازش شوند. کمّیت‌های k، A'، s، a_4 و a_5 پارامترهای آزادی هستند که بزرگی و عدم‌قطعیت آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های حداقل- مربع‌ها محاسبه می‌شود. معادله‌های (۱۰) و (۱۱) را می‌توان به‌صورت معادله (۱۷) نوشت:

$$M_{\mathrm{T}}(l) = [\frac{k}{l^2}] \times F_3(l) \qquad (۱۷)$$

که در آن:

$$F_3(l) = \frac{F_1(l)}{F_A(l)} + F_2' - 1 \qquad (۱۸)$$

F_1 را می‌توان برای یک منبع نقطه‌ای و آشکارساز کروی با فاصله جدایی $l>2r_D$، از معادله (۱۲)، (۱۳) یا (۱۴) محاسبه کرد [به‌همراه معادله (۱۴- الف)]. در دو حالت پیشین، معادله‌های برای δ به‌منظور تعیین تصحیح هندسی، حل می‌شوند. در حالت بعدی، کمّیت‌های a_4 و a_5، تصحیح هندسی را تعیین می‌کنند. برای منبع کروی در هر مقداری از l، فقط معادله‌های (۱۴) و (۱۴- الف) می‌توانند برای تعیین تصحیحات هندسی استفاده شوند. از آن‌جایی‌که دیگر آشکارساز کروی با منبع نقطه‌ای پرتودهی نمی‌شود، معادله (۱۲) نمی‌تواند استفاده شود.

همان‌طور که معادله (۱۷) ایجاب می‌کند، تابع $F_3(l)$ انحراف آهنگ شمارش از قانون ساده عکس مربع را تصحیح می‌کند. در بزرگترین فواصل منبع- آشکارساز، F_3 توسط اثر نوترون‌های پراکنده تعیین می‌شود. مقدار F_3 با کاهش فاصله، کاهش می‌یابد تا به یک مقدار کمینه رسیده و سپس با نزدیک‌ترشدن به منبع، به‌دلیل اثر هندسی، مقدار آن افزایش می‌یابد. کمینه مقدار مشخصه برای پایشگرهای نوترونی کروی و منبع $^{252}\mathrm{Cf}$ بدون پوشش در $l \approx 3r_D$ و برای منبع کالیفرنیم با کُندکننده D_2O در $l \approx 2r_S + r_D$ رخ می‌دهد. باید تعداد داده‌ها در سی نقطه یا بیشتر که در بالا اشاره شد، در گام‌های ۱ cm تا ۲ cm برای فواصل کمتر از این کمینه مشخصه و سپس با افزایش گام بین ۵ cm تا ۱۰ cm برای فواصل بزرگتر، جمع‌آوری شوند. هنگامی‌که پارامترهای A'، s یا a_4 و a_5 یا δ برای یک ترکیب چیدمان خاص از منبع- آشکارساز محاسبه شده است، کالیبراسیون‌ها می‌توانند در هر فاصله‌ای در گستره اندازه‌گیری برای دیگرآشکارسازها از همان نوع انجام شوند و تصحیحات لازم اعمال شود. برای فواصل بزرگتر ($l \geq 80$ cm)، که در آن $F_1(l) \approx 1$ است، روش برازش تعمیم‌یافته با روش برازش چندجمله‌ای متناظر می‌شود (به منبع [9] کتاب‌نامه مراجعه شود). پاسخ شارش را می‌توان از معادله (۸- الف) تعیین کرد و با معلوم بودن R_Φ در معادله (۹) می‌توان R_H را به‌دست آورد و سپس با استفاده از تعریف زیربند ۳-۶، عامل کالیبراسیون N را می‌توان به‌دست آورد.

۳-۳-۶ روش نیمه‌تجربی

این روش (به منابع [2] و [11] کتاب‌نامه مراجعه شود) بر اساس این فرض استوار است که سهمی از خوانش دستگاه ناشی از نوترون‌های پراکنده می‌تواند از انحراف خوانش از قانون عکس مربع محاسبه شود. سهم‌های مختلف توسط مؤلفه‌ای مستقل از l که به‌دلیل نوترون‌های برگشتی اتاق است (به منبع [11] کتاب‌نامه مراجعه شود) و مؤلفه‌ای که به‌دلیل پراکندگی هوا با فاصله جدایی به‌طور خطی کاهش می‌یابد (به

منبع [12] کتاب‌نامه و پیوست **ت** مراجعه شود)، توصیف می‌شود. خوانش دستگاه، $M_{\mathrm{T}}(l)$، به‌عنوان تابعی از فاصله، ناشی از میدان پرتوی کل (نوترون‌های منبع به‌علاوه نوترون‌های پراکنده) به پاسخ شارش R_{Φ} از طریق معادله (۱۹) مرتبط می‌شوند:

$$\frac{M_{\mathrm{T}}(l)}{\Phi\, F_1(l)(1+Al)} = R_{\Phi}(1+Sl^2) \qquad (۱۹)$$

کمّیت S کسری از سهم نوترون پراکنده اتاق در کالیبراسیون برای فاصله واحد است و باید آن را با s در معادله (۱۶) متمایز کرد.

تصحیح کل پراکندگی ناشی از هوا (پراکندگی ورودی منهای پراکندگی خروجی) با $(1+Al)$ داده می‌شود. توجه داشته باشید که درحالی‌که A در معادله (۱۹) و A' در معادله (۱۶) ممکن است ظاهراً شبیه هم باشند، A اثر پراکندگی خالص ناشی از هوا است (پراکندگی ورودی هوا منهای پراکندگی خروجی هوا) درحالی‌که A' فقط مؤلفه پراکندگی ورودی ناشی از هوا را محاسبه می‌کند، اما ممکن است شامل هر سهم دیگری از نوترون‌های پراکنده‌شده ورودی که با فاصله l به‌طور عکس تغییر می‌کند نیز باشد. مقادیر محاسبه‌شده مؤلفه پراکندگی ناشی از هوا A برای برخی وسایل متداول استفاده‌شده برای چهار منبع نوترونی توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1 ، در پیوست **ت** ارائه شده است.

معادله (۱۹) می‌تواند با معادله (۱۰) و (۱۱) مقایسه شود. جمله $(1+Al)$ در معادله (۱۹) مشابه $F_{\mathrm{A}}(l)$ در معادله (۱۰) است، تفاوت مهم این دو در این است که Al اثر پراکندگی کل ناشی از هوا است (یعنی پراکندگی ورودی منهای پراکندگی خروجی) درحالی‌که $F_{\mathrm{A}}(l)$ در معادله (۱۰) فقط پراکندگی خروجی است و پراکندگی ورودی در جمله $F_2'(l)$ در معادله (۱۰) گنجانده شده است. بنابراین اگر $\bar{\Sigma}$ ضریب تضعیف خطی هوا باشد، در صورتی که $l\bar{\Sigma} \ll 1$ باشد، آن‌گاه $F_{\mathrm{A}}(l) \approx (1+l\bar{\Sigma})$ است که می‌تواند قابل مقایسه با جمله $(1+Al)$ در معادله (۱۹) باشد (پیوست **پ** نشان می‌دهد که برای l کوچکتر از چند متر، $l\bar{\Sigma} \ll 1$ است). علاوه بر این، درصورتی‌که $l^2 \ll (r_S+r_D)^2$ باشد، آن‌گاه $F_1 \approx 1$ است (به معادله‌های (۱۲) و (۱۳) یا (۱۴) و (۱۴- الف) مراجعه شود). برای چنین فواصلی و با چشم‌پوشی از جمله l^3، معادله (۱۹) با معادله (۱۰) متناظر می‌شود.

در محدودیت‌های اشاره‌شده در زیربند ۶-۴-۳، نمودار سمت چپ در معادله (۱۹) برحسب l^2 باید یک خط راست باشد. از یک برازش خطی به‌روش حداقل مربعات با تابع وزنی به داده‌ها، عرض از مبدأ برابر با پاسخ شارش R_{Φ} و شیب خط برابر با مؤلفه کسر پراکندگی اتاق، S، خواهد بود. وقتی S برای یک وسیله خاص تعیین شده باشد، کالیبراسیون وسیله‌های مشابه را می‌توان با استفاده از تعیین $M_{\mathrm{T}}(l)$ در یک یا چند فاصله l و با استفاده از معادله‌های (۶) و (۱۹) برای تعیین پاسخ شارش R_{Φ}، انجام داد.

اگر الزامات ذکرشده در زیربند ۶-۴-۳ رعایت نشود، نمودار ذکرشده در بالا کاملاً یک خط راست نخواهد بود. برخی انحراف‌ها از خط راست چندان مسأله‌ساز نبوده و به‌عنوان یک عدم‌قطعیت در مقدار S و در نتیجه در

عامل کالیبراسیون تأثیرگذار است (به زیربند ۶-۲-۱۰ مراجعه شود). از آن‌جا که سهم پراکندگی نسبی ناشی از اتاق با l_2 تغییر می‌کند، کارکردن در l هایی با مقادیر کوچک، تصحیح پراکندگی اتاق را کوچک نگه خواهد داشت و بنابراین عدم‌قطعیت در عامل کالیبراسیون ناشی از عدم‌قطعیت در این تصحیح کوچک و ناچیز خواهد بود. با معلوم بودن R_Φ، معادله (۹) را می‌توان برای به‌دست‌آوردن R_H و به‌طور متقابل برای عامل کالیبراسیون N استفاده کرد.

۶-۳-۴ روش برازش تقلیل‌یافته

اگر مقدار کمینه l خیلی کوچک نباشد به‌طوری که تقریباً ۱٫۵ برابر بزرگترین بُعد وسیله تحت کالیبراسیون باشد، می‌توان از روشی ساده استفاده کرد (به منبع [13] کتاب‌نامه مراجعه شود). بدین صورت که برای یک آشکارساز کروی، $l \geq 3R_\mathrm{D}$ است. در این فواصل می‌توان فرض کرد که $F_1(l) \approx 1$ و هم این‌که جمله تصحیح پراکندگی ورودی خطی $A'l$ [در معادله (۱۶) یا Al در معادله (۱۹)] در مقایسه با جمله از مرتبه دو، قابل صرف‌نظرکردن است (این مطلب ایجاب می‌کند که پراکندگی هوا در مقایسه با پراکندگی اتاق قابل صرف‌نظرکردن می‌باشد، که مطمئناً در اکثر سالن‌های کالیبراسیون با مقادیر بزرگ l رخ خواهد داد). بنابراین، با این تقریب‌ها، می‌توان یک نسخه ساده‌سازی‌شده از معادله‌های (۱۰) و (۱۱) را به‌صورت معادله (۲۰) نوشت:

$$M_\mathrm{T}(l) = k/l^2 + S \qquad (۲۰)$$

در این حالت نمی‌توان فرض کرد که نقطه مرجع بر مرکز هندسی دستگاه متقارن، منطبق است، چون با فرض زیربند ۶-۲ تناقض دارد. بنابراین معادله (۲۰) را می‌توان به‌صورت معادله (۲۱) نوشت:

$$M_\mathrm{T}(l) = \frac{k}{(d+a)^2} + S \qquad (۲۱)$$

که کمّیت $(d+a)$ به جای l به‌کار رفته است. کمّیت d فاصله مرکز منبع تا سطح آشکارساز است و a به‌عنوان پارامتر آزاد در نظر گرفته شده که با برازش بر معادله (۲۱) تعیین می‌شود (به شکل ج-۱ در پیوست **ج** مراجعه شود). تجربه نشان می‌دهد که در معادله (۲۱) برای یک وسیله کروی، a تقریباً برابر با شعاع فیزیکی دستگاه است. بنابراین، با وجود این که a، تا حدودی، پارامتر برازش است (به منبع [13] کتاب‌نامه مراجعه شود)، ولی ارتباط نزدیکی با شعاع آشکارساز دارد.

برای استفاده از معادله (۲۱)، اندازه‌گیری $M_\mathrm{T}(l)$ تقریباً در ۱۰ نقطه که فواصل آن‌ها در مقیاس لگاریتمی تقریباً برابر هستند، انجام شود. از آن‌جایی‌که به‌طور معمول دقت آماری بالا مد نظر است، نتایج کاربردی با عدم‌قطعیت آماری تقریباً ٪ ۱۰ را می‌توان به‌دست آورد. پارامترهای k، a و S توسط برازش حداقل مربعات وزن‌داده‌شده به معادله (۲۱) تعیین می‌شوند. مهم است وزن‌هایی انتخاب شود که نقاط داده تقریباً قدرت

تأثیر یکسانی روی برازش داشته باشد. این امر با تخصیص وزن‌های، w_i، که متناسب با عکس مربع خوانش است، صرف‌نظر از دقت آماری داده‌های واقعی، به‌دست می‌آید. این فرآیند معادل با انجام برازشی است که مجموع مربعات نسبی باقیمانده‌ها را کمینه کند؛ به این‌معنی که کمّیت G در معادله (۲۲) کمینه شود:

$$G = \sum_i (w_i (y_i - \hat{y}_i)^2) = \sum_i (\frac{1}{y_i}(y_i - \hat{y}_i))^2 = \sum_i (1 - \hat{y}_i / y_i)^2 \qquad (۲۲)$$

که در آن y_i نقاط داده‌های مجزا هستند، $\hat{y}_i$ مقادیرمتناظری هستند که با برازش به‌دست می‌آید، w_i طوری انتخاب می‌شودکه متناسب با عکس مربع y_i باشد و جمع روی همه i نقطه از داده‌ها است.

یک تفاوت بسیار مهم در فلسفه استفاده از روش‌های زیربندهای ۶-۳-۱، ۶-۳-۲ و ۶-۳-۳ و این روش ساده‌شده وجود دارد. در زیربندهای ۶-۳-۱، ۶-۳-۲ و ۶-۳-۳، همان‌طور که در زیربند ۶-۱ نیز بیان شده است، یک مجموعه دقیق اولیه از اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود تا بتوان مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای تصحیح اثرات هندسه و پراکندگی را به‌دست آورد. برای کالیبراسیون‌های بعدی دستگاه‌های مشابه، ممکن است کالیبراسیون فقط برای یک یا چند نقطه انجام شود و سپس با استفاده از این پارامترها، تصحیحات لازم صورت گیرد. از سوی دیگر، روش ساده‌شده در این زیربند، اساساً هر کالیبراسیون را به‌طور مستقل انجام می‌دهد و پارامترهای معادله (۲۱) را برای هر دستگاه مجزا به‌طور جداگانه تعیین می‌کند. البته توصیه می‌شود نتایج کالیبراسیون‌های قبلی وسیله‌های مشابه به‌منظور بازبینی پایداری و خطی‌بودن به‌کار روند.

قبل از اتخاذ این روش کالیبراسیون، باید نتایج به‌دست آمده با یکی از روش‌های شرح داده شده در زیربندهای ۶-۳-۱، ۶-۳-۲ و ۶-۳-۳، بازبینی شود.

۶-۴ انتخاب روش‌ها

۶-۴-۱ روش مخروط- سایه

محدودیت‌ها:

الف- اندازه اتاق: ترجیحاً اندازه اتاق بزرگ باشد، همان‌طور که در ردیف (ت) اشاره شده است؛

ب- شکل اتاق: بدون محدودیت؛

پ- اندازه منبع/ آشکارساز: ترجیحاً کوچک، مثلاً وقتی از منبع کالیفرنیم با کُندکننده D_2O با قطر ۳۰ cm استفاده می‌شود، به مخروط- سایه بزرگ و سنگین نیاز است؛

ت- فاصله منبع-آشکارساز: فاصله کمینه باید بزرگتر از دو برابر طول مخروط- سایه باشد (به این موضوع اشاره دارد که منبع‌هایی با شدت خیلی زیاد برای کالیبراسیون در آهنگ‌های معادل دُز بالا نیاز است).

فاصله بیشینه بر این اساس که افزایش خوانش ناشی از پراکندگی اتاق باید کمتر از ٪۴۰ باشد، تنظیم می‌شود.

روش مخروط-سایه به یک مجموعه اندازه‌گیری‌های بیشتری با مخروط- سایه مناسب در آن مکان نیاز دارد. به پیوست **ث** مراجعه شود. این اندازه‌گیری‌ها باید دقیقاً در همان فواصل، *l*، مثل حالت اندازه‌گیری‌های بدون مخروط، انجام شود.

مزایا: اندازه‌گیری مستقیم اثرات نوترون‌های پراکنده؛

معایب: یک مجموعه از مخروط‌های سایه با تجهیزات بیشتر مورد نیاز است.

۶-۴-۲ روش برازش تعمیم‌یافته

محدودیت‌ها:

الف- اندازه اتاق: بدون محدودیت؛

ب- شکل اتاق: بدون محدودیت؛

پ- اندازه منبع/ آشکارساز: در وسیله‌های کروی بدون محدودیت؛

د- فاصله منبع- آشکارساز: فاصله کمینه ۱ cm بین سطوح منبع و آشکارساز باید وجود داشته باشد. فاصله بیشینه بر این اساس که افزایش خوانش ناشی از پراکندگی اتاق باید کمتر از ٪۴۰ باشد، تنظیم می‌شود (به پیوست **ب** مراجعه شود)؛

ث- گسیل منبع نوترونی: همسانگرد یا تقریباً همسانگرد باشد؛

ج- مزایا: کم‌ترین محدودیت، روش انتخابی برای آشکارسازهایی با کُندکننده کروی و آشکارساز مرکزی کروی را می‌توان برای هر منبع توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1 استفاده کرد؛

چ- معایب: فقط برای آشکارسازهایی با کُندکننده کروی و آشکارسازهای مرکزی کروی قابل استفاده است. برای هر نوع دستگاهی که کالیبره می‌شود، لازم است یک مجموعه کامل از اندازه‌گیری‌ها انجام شود. خوانش‌های غیرخطی یا رانشی باید به‌دقت تصحیح شوند، چون آن‌ها می‌توانند در روش برازش، پوشانده شوند. موقعیت‌یابی دقیق و دقت آماری خوب نیز مورد نیاز است.

۶-۴-۳ روش نیمه‌تجربی

محدودیت‌ها:

الف- اندازه اتاق: بدون محدودیت؛

ب- شکل اتاق: مکعبی یا تقریباً مکعبی؛

پ- اندازه منبع/ آشکارساز: بدون محدودیت؛

ت- فاصله منبع- آشکارساز: به‌طور تقریبی فاصله کمینه برابر با حاصل جمع قطر منبع و قطر آشکارساز است (به زیربند ۶-۲ مراجعه شود)، فاصله بیشینه بر این اساس که افزایش خوانش ناشی از پراکندگی اتاق باید کمتر از ٪۴۰ باشد، تنظیم می‌شود (به پیوست **ب** مراجعه شود)؛

ث- گسیل منبع نوترونی: همسانگرد یا تقریباً همسانگرد؛

ج- مزایا: اندازه‌گیری‌های اولیه‌ای که منجر به تولید مقادیر عددی برای تصحیح پراکندگی اتاق می‌شود و می‌توان در آینده از آن‌ها برای کالیبراسیون دستگاه‌های مشابه استفاده کرد، به‌طور معمول می‌توانند پراکندگی اتاق را با استفاده از روابط تحلیلی ساده پیش‌بینی کنند (به منبع [2] کتاب‌نامه مراجعه شود)؛

چ- معایب: فقط برای حالتی که منبع اصلی پراکندگی نوترون از دیوارها، کف و سقف اتاق باشند، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. برای دستگاه‌های چند آشکارسازی و همچنین برای وسیله‌های استوانه‌ای که به‌صورت موازی با محور آن پرتودهی انجام می‌شود، مناسب نیستند. تصحیحات محاسبه‌شده پراکندگی ناشی از هوا ضروری است.

۶-۴-۴ روش برازش تقلیل یافته

محدودیت‌ها:

الف- اندازه اتاق: بدون محدودیت؛

ب- شکل اتاق: بدون محدودیت؛

پ- اندازه منبع/ آشکارساز: بدون محدودیت؛

ت- فاصله منبع- آشکارساز: برای منبع نقطه‌ای، فاصله کمینه، حداقل ۱٫۵ برابر بزرگترین بُعد آشکارساز می‌باشد و برای یک منبع کروی، فاصله کمینه حدأقل برابر $2(r_S+r_D)$ است؛

ث- مزایا: به جزئیات و اندازه‌گیری‌های با دقت آماری بالا نیاز ندارد؛

ج- معایب: چون فاصله منبع- آشکارساز را نمی‌توان از یک حدی کوچک‌تر کرد، به منبعی قوی برای کالیبراسیون در آهنگ‌های معادل دُز بالا نیاز است. برای هر کالیبراسیون به مجموعه کاملی از داده‌ها نیاز است. روش برازش ممکن است رانش‌ها و غیرخطی‌بودن‌ها را بپوشاند. عدم تمایز بین پراکندگی اتاق و پراکندگی هوا و همچنین صرف‌نظرکردن از تصحیحات هندسی ممکن است درستی را محدود کند.

۷ تعیین خطی بودن

غیرخطی بودن ممکن است ناشی از رانش و غیرخطی بودن خود آشکارساز یا ناشی از مجموعه دستگاه و همچنین انباشتگی تپ[1] در آهنگ‌های دُز بالا باشد. تعیین خطی‌بودن (یعنی وابستگی خوانش دستگاه به آهنگ معادل دُز) به‌ویژه در آهنگ‌های معادل دُز بالا، بسیار مهم است. برای تعیین خطی‌بودن، دو یا سه نقطه در هر بازه دَه‌دَهی باید اندازه‌گیری شود. هر چند این اندازه‌گیری‌ها باید در گستره فواصلی که در ابتدا تکنیک در آن آزمون شده است، انجام شود. به‌طور معمول استفاده از دو منبع با قدرت‌های مختلف یا تعداد بیش‌تر ضروری است و تغییر فاصله منبع- آشکارساز به‌منظور پوشش‌دهی کامل گستره آهنگ معادل دُز که دستگاه ممکن است در آن گستره استفاده شود نیز ضروری است (به زیربند ۵-۲-۱ مراجعه شود). از آن‌جایی‌که تصحیحات پراکندگی، به فاصله وابسته است، تعیین اولیه این تصحیحات با استفاده از یکی از روش‌های ارائه شده در زیربندهای ۶-۳ و ۶-۴، روش مناسبی برای انجام اندازه‌گیری خطی‌بودن طبق یک روال معمول می‌باشد.

اگر تصحیحات پراکندگی و تصحیحات هندسی معلوم نباشند، خطی‌بودن می‌تواند توسط دو منبع مختلف با قدرت زاویه‌ای معلوم B_Ω یا تعداد بیشتر [طبق معادله (۶)] در فواصل انتخاب‌شده بررسی شود (به زیربند ۶-۱ مراجعه شود).

۸ کالیبراسیون با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها و راکتورها

۸-۱ مقدمه

هرچند استفاده از نوترون‌های تک‌انرژی تولیدشده در شتاب‌دهنده، بهترین روش برای تعیین وابستگی انرژی تابع پاسخ در گستره وسیعی از انرژی می‌باشد، اما کالیبراسیون با استفاده از نوترون‌های شتاب‌دهنده نسبت به منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی به‌دلیل هزینه و پیچیدگی‌های سامانه موردنیاز، اغلب کمتر انجام می‌شود. به‌طور کلی سامانه شتاب‌دهنده علاوه بر کالیبراسیون برای اهداف دیگری نیز استفاده می‌شود و هر کدام مشخصه‌های خاص خود را دارند. توضیحاتی که در بالا برای شتاب‌دهنده‌ها ذکر شده برای سامانه راکتور نیز صادق است. در این استاندارد فقط روش اجرایی کلی چنین کالیبراسیون‌هایی ارائه شده است و جزئیات کالیبراسیون با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها و راکتورها، همانند کالیبراسیون با منبع‌های نوترونی رادیونوکلیدی در این استاندارد ارائه نشده است.

1- Pulse pile-up

۸-۲ نوترون‌های تولیدشده در شتاب‌دهنده

۸-۲-۱ مقدمه

کالیبراسیون‌ها باید طبق اصول کلی بیان‌شده در بند ۵ انجام شود، تعیین پراکندگی ناشی از هوا و اتاق باید بر اساس روش‌های اجرایی بیان‌شده در زیربند ۵-۳ و تعیین اثرات پرتوهای فوتونی باید بر اساس زیربند ۵-۴ انجام شود. برای میدان‌های نوترونی تولیدی از شتاب‌دهنده، پراکندگی ناشی از مجموعه هدف نوترونی باید کمینه شود و اعمال تصحیحات در صورت نیاز ضروری است.

۸-۲-۲ آهنگ شارش نوترونی

آهنگ شارش نوترونی با یک وسیله انتقالی اندازه‌گیری می‌شود که کالیبراسیون این وسیله به یک استاندارد اولیه قابل ردیابی می‌باشد (به بند ۴ مراجعه شود). همان اصولی که در زیربند ۵-۲ استفاده شده است، در این زیربند نیز استفاده می‌شود.

۸-۲-۳ پایش

خروجی نوترون باید از طریق یک دستگاه مناسب پایش شود. خوانش وسیله تحت آزمون و اندازه‌گیری‌های مرجعِ آهنگ شارش، می‌تواند از طریق خوانش‌های پایشگر به‌هنجار شود. با توجه به وسیله‌های پایش مورد استفاده (مانند شمارنده طویل[1])، پایشگر ممکن است نوترون‌ها را به داخل وسیله کالیبراسیون پراکنده کرده و وسیله کالیبراسیون (یا مخروط- سایه، در صورت استفاده) ممکن است نوترون‌ها را به داخل پایشگر پراکنده کند. اثر پیشین با دیگر مؤلفه‌های نوترون‌های پراکنده شده زمینه، تعیین خواهد شد. اثر بعدی نیز باید از طریق قراردادن و برداشتن وسیله تحت آزمون (یا مخروط- سایه) و مشاهده هرگونه تغییر در خوانش پایشگر در شرایطی که آهنگ شارش نوترون ثابت نگه داشته شده است، بررسی شود. این مشکلات برای سیستم‌های پایشی مانند سیستم هایی بر پایه تکنیک ذرات، که نه خود حساس به نوترون هستند و نه به‌عنوان منبع پراکندگی عمل می‌کنند، رخ نمی‌دهد. هر چند، کارایی چنین سیستم‌هایی به‌طور معمول به گستره انرژی خاصی محدود می‌شود.

۸-۲-۴ وابستگی پاسخ به انرژی

ویژگی‌های انرژی نوترونی مورد نظر و روش‌های تولید آن در استاندارد ISO 8529-1 ارائه شده است. ضرایب تبدیل شارش به معادل دُز در استاندارد ISO 8529-3 ارائه شده است. توجه داشته باشید هرچند ضرایب تبدیل برای نوترون‌های تک‌انرژی ارائه شده است، اما ممکن است لازم باشد برای تعیین مقدار مناسب ضریب تبدیل، پهن‌شدگی[2] واقعی انرژی نوترون‌ها درنظر گرفته شود.

1- Long counter
2- Spread

۸-۲-۵ منابع آلاینده نوترونی

ممکن است منابع نوترونی دیگری در کالیبراسیون میدان نوترونی وجود داشته باشند، یعنی نوترون‌های کم‌انرژی که در واکنش D(d,n) از طریق دوتریم جذب‌شده در خطوط پرواز[1] تولید می‌شود یا در هدف‌های استفاده شده برای واکنش T(d,n)، نوترون‌های کم‌انرژی‌تری که از طریق برهمکنش‌های C(d,n) و O(d,n) ناشی از کربن و اکسیژن جذب‌شده توسط هدف‌های جامد تریتیمی یا دوتریم، تولید می‌شوند. تصحیحات را هم می‌توان با استفاده از هدف‌های زمینه سازگار که هیچ ماده تولیدکننده نوترونی در آن وجود ندارد، اعمال کرد. این تصحیحات در برخی موارد می‌توانند بزرگ باشند و باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرند تا عدم‌قطعیت کل به کمینه مقدار ممکن برسد.

اگر نوترون‌های آلاینده با برخورد باریکه شتاب‌دهنده به اجزای خط باریکه به غیر از خود هدف تولید نوترون (مانند شکاف‌های تعیین‌کننده انرژی)، تولید شوند، اثرات آن‌ها را می‌توان با استفاده از روش مخروط- سایه تعیین کرد (به زیربند ۱-۳-۶ مراجعه شود). در این حالت M_S [طبق معادله (۱۵)] شامل این نوترون‌های آلاینده به‌همراه نوترون‌های پراکنده ورودی هوا و اتاق خواهد بود. بزرگی این اثر در هر چیدمان تغییر می‌کند (به منبع [10] کتاب‌نامه مراجعه شود)، که در هر چیدمان نسبت $M_S(l)/M_T(l)$ ثابت نخواهد بود ولیکن به‌راحتی می‌توان این نسبت را اندازه‌گیری کرد.

۸-۲-۶ انرژی نوترون و پهن‌شدگی انرژی

توزیع طیف نوترونی مربوط به میدان نوترونی تولیدشده در شتاب‌دهنده به چند عامل وابسته است، که این عوامل شامل انرژی باریکه ذرات برخوردی و پهنای باریکه و ضخامت ماده هدف است. توزیع طیفی باید اندازه‌گیری یا محاسبه شود. در صورتی‌که پاسخ وسیله با انرژی خیلی سریع تغییر کند، باید یک تصحیح برای پاسخ اندازه‌گیری‌شده جهت لحاظ‌کردن این اثر، اعمال شود.

۸-۲-۷ تغییرات طیف نوترونی با زوایه گسیل

به‌طور کلی، انرژی نوترون به‌صورت تابعی از زوایه گسیل نوترون‌های تولیدی از هدف، تغییر می‌کنند. اگر وسیله نزدیک هدف قرار گیرد، آن‌گاه انرژی نوترون در راستای وجه جلوی وسیله تغییر می‌کند. به‌منظور کمینه‌کردن پهن‌شدگی انرژی، توصیه می‌شود که کالیبراسیون در زاویه 0°، جایی‌که تغییرات انرژی با زاویه به‌طور معمول مقدار کمینه است، انجام شود. برای نوترون‌هایی تولیدشده از واکنش ^{3}H(d,n)، ممکن است استفاده از زوایای دیگری برای به‌دست‌آوردن انرژی‌های نوترون خاص ضروری باشد.

۸-۲-۸ تصحیحات پراکندگی در هدف

ماده تولیدکننده نوترون به‌طور معمول روی یک دیسک پشتیبان نشانده می‌شود و هم‌چنین برای درزبندی مسیر خلأ نیز استفاده می‌شود. نوترون‌های گسیل‌شده در زوایایی غیر از زوایای موردنیاز، می‌توانند در دیسک

1- Flight lines

پشتیبان پراکنده شوند و روی پاسخ وسیله تحت آزمون اثر بگذارند. به وضوح، بزرگی این اثر با کاهش ضخامت دیسک پشتیبان کاهش می‌یابد. هر چند به‌منظور حفظ خلأ، کمینه ضخامت دیسک پشتیبان حدود ۰٫۲۵ cm خواهد بود. اگر کالیبراسیون‌ها در زاویه 0° انجام شود، نوترون‌هایی با انرژی کمتر نیز وجود خواهند داشت، که پیک انرژی این نوترون‌ها تقریباً با پیک انرژی نوترون‌های گسیل‌شده در زوایه 90°، برابر است. محاسبات باید برای تعیین طیف نوترونی کل در محل کالیبراسیون انجام شود و تصحیحی بر روی نتایج برای لحاظ‌کردن این اثرات اعمال شود. اگر پاسخ وسیله با کاهش انرژی نوترون افزایش یابد در این صورت تصحیح تا بزرگی ٪ ۱۰ هم می‌تواند باشد.

۸-۲-۹ اثرات پراکندگی نوترون

اثرات نوترون‌های پراکنده‌شده از اتاق و جزئیات آن برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی در زیربند ۵-۳ بیان شده است. اثرات آن‌ها باید برای نوترون‌های تولیدشده در شتاب‌دهنده‌ها نیز درنظرگرفته شود. به‌طور کلی نوترون‌های تولیدی از شتاب‌دهنده‌ها در حین اندازه‌گیری‌ها پایش می‌شوند. هرچند، ممکن است نوترون‌های توسط وسیله اندازه‌گیری شارش و دستگاه تحت آزمون به داخل پایشگر و بالعکس نیز پراکنده شوند. این اثرات باید درنظرگرفته شوند و در صورت لزوم تصحیحات لازم اعمال شوند.

۸-۳ باریکه‌های نوترونی راکتورها

۸-۳-۱ مقدمه

در راکتورها، برای اهداف کالیبراسیون، باریکه‌های همسوشده نوترون‌های حرارتی یا نوترون‌هایی با انرژی‌های میانی فیلترشده (با فیلترهای آهن، سیلیکون، اسکاندیم یا ^{238}U) می‌تواند تولید شوند (به منابع [15] و [16] کتاب‌نامه مراجعه شود). کالیبراسیون‌ها باید بر اساس اصول کلی که در بند ۶ شرح داده شده است، انجام شوند. برای باریکه‌های همسوشده، باید از پراکندگی اتاق و پراکندگی ورودی هوا صرف‌نظر شود، اما لازم است تصحیحات مربوط به پراکندگی خروجی هوا اعمال شود (به زیربند ۵-۳-۳ مراجعه شود). تعیین اثرات پرتو فوتونی طبق موارد بیان شده در زیربند ۵-۴، باید انجام شود.

۸-۳-۲ باریکه‌های نوترونی فیلترشده

یک طیف‌سنج پس‌زنی پروتون یا ^{3}He باید برای اندازه‌گیری‌های طیفی و تعیین جریان نوترونی استفاده شود (یعنی تعداد نوترون‌هایی که در هر ثانیه از سطح جلویی آشکارساز عبور می‌کنند). برای کالیبراسیون دستگاه‌هایی با ابعاد بزرگ در مقایسه با قطر باریکه، پاسخ باید برای یک باریکه پهن و موازی با استفاده از روش اجرایی روبشی[1] تعیین شود (به منابع [16] و [17] کتاب‌نامه مراجعه شود).

1- Scanning procedure

۸-۳-۲-۱ پهن‌شدگی انرژی

میزان پهن‌شدگی انرژی در باریکه‌های فیلترشده از تقریباً کمتر از ٪ ۱ برای ^{238}U تا تقریباً ٪ ۳۰ برای اسکاندیم (پهنای کل در نصف ارتفاع بیشینه) می‌باشد (به منبع [15] کتاب‌نامه مراجعه شود).

۸-۳-۲-۲ انرژی‌های آلاینده

به‌طور کلی در طیف باریکه فیلترشده علاوه بر انرژی‌هایی که مد نظر است، انرژی‌های دیگری نیز وجود خواهند داشت. این انرژی‌ها ممکن است به لحاظ شدت، قابل صرفنظرکردن باشند یا می‌توانند یک آلودگی جدی را نشان دهند. به‌عنوان مثال، در باریکه فیلترشده با اسکاندیم، وجود ٪ ۴ تا ٪ ۵ آلودگی در شارش نوترون‌های انرژی بزرگ می‌تواند باعث ایجاد آلودگی در حدود ٪ ۲۵ تا ٪ ۳۰ در دُز معادل شوند.

۸-۳-۳ نوترون‌های حرارتی

نوترون‌های حرارتی با کُندکردن نوترون‌های سریع در یک مجموعه مناسب از کُندکننده (به‌طور معمول از گرافیت یا آب‌سنگین تهیه می‌شوند) به‌دست می‌آیند. به‌منظور کالیبراسیون، استفاده از باریکه‌های نوترون‌های حرارتی با کمینه آلودگی از نوترون‌های با انرژی‌های دیگر مورد نیاز است. از ستون حرارتی راکتور می‌توان به‌عنوان یک منبع باریکه پهن نوترون حرارتی مناسب استفاده کرد.

در محل کالیبراسیون، آهنگ شارش نوترون‌های حرارتی در هوای آزاد باید اندازه‌گیری شود، همچنین تمام تغییرات توزیع آن در کل حجم اشغال‌شده توسط وسیله تحت آزمون باید اندازه‌گیری شود. روش‌های مناسبی برای اندازه‌گیری آهنگ شارش وجود دارد که شامل استفاده از ورقه طلا، استفاده از شمارشگر تناسبی BF_3 و ^3He و اتاقک‌های شکافت می‌باشند. تکنیک‌ها باید با همکاری با یک آزمایشگاه مرجع، استانداردسازی شوند. فرض می‌شود طیف شارش خروجی از ستون حرارتی، دارای شکل ماکسولینی[1] با یک دنباله $1/E$ در انرژی بالا باشد. طیف را می‌توان با دمای توزیع ماکسولین و مقدار نسبت کادمیومی[2] مشخص کرد (به منبع [18] کتاب‌نامه و پیوست **B** استاندارد ISO 8529-1 مراجعه شود). اثرات ناشی از پرتو گاما نیز باید تعیین شوند.

در حالت یک باریکه تک‌سویه، آهنگ شارش و توزیع نوترون‌های فرودی حرارتی و فوق حرارتی باید در سرتاسر سطح دستگاه با دستگاهی که در موقعیت کالیبراسیون نیست، اندازه‌گیری شوند.

۹ ملاحظات ویژه برای دُزسنج‌های فردی

دُزسنج‌های فردی باید روی سطح یک فانتوم مناسب کالیبره شوند. نوع و شکل فانتوم و چیدمان دُزسنج‌ها روی سطح فانتوم باید در توافق با استاندارد ISO 8529-3 باشد. این کالیبراسیون‌ها را می‌توان با منبع‌های

1- Maxwellian shape
2- Cd-ratio

رادیونوکلئیدی، منبع‌های هدف شتاب‌دهنده یا باریکه‌های راکتور انجام داد. اگر دُزسنج‌ها بر اساس اصول آلبدو[1] نباشند، می‌توان کالیبراسیون‌های روزمره را به‌صورت آزاد در هوا انجام داد.

چیدمان فانتوم و منبع باید در یک‌راستا باشند به‌طوری که سطح جلویی منبع بر خط بین مرکز منبع و مرکز سطح جلویی فانتوم عمود باشد. خوانش دُزسنجی که به فانتوم متصل شده شامل سهم ناشی از نوترون‌های مستقیم، سهم ناشی از نوترون‌های پس‌پراکنده از فانتوم و سهم ناشی از نوترون‌های پراکنده از هوا و اتاق می‌باشد. به‌طور کلی، همان اصول آهنگ‌سنج‌های دُز فعال که در بندهای ۶ و ۷ شرح داده شده است، در این‌جا اعمال و استفاده می‌شود. هرچند ممکن است به‌دلیل عدم‌قطعیت‌های خوانش در دُزسنج‌های فردی غیرفعال، روش‌های تعیین پارامترهای توصیف‌کننده اثرات هندسه و سهم‌های پراکندگی، ناکارآمد باشند.

بنابراین، به‌عنوان یک رویکرد عملی و توافقی بین الزامات سهم پراکندگی کم، یکنواختی خوب پرتودهی و اثر کم مکان مرکز مؤثر، توصیه می‌شود که فاصله، l_C، بین صفحه جلویی فانتوم و مرکز منبع ۷۵ cm درنظرگرفته شود (به منابع [19] و [20] کتاب‌نامه مراجعه شود).

بر اساس توافق، فاصله کالیبراسیون، l، فاصله بین مرکز منبع و نقطه‌ای روی سطح جلویی فانتوم که به‌طور مستقیم پشت دُزسنج قرار دارد، است. بنابراین، برای کالیبراسیون یک تک‌دُزسنج، باید آن را روی مرکز سطح جلویی فانتوم نصب کرد، که در این صورت: $l=l_C$

در صورت پرتودهی همزمان چندین دُزسنج خواهیم داشت:

$$l = (l_c^2 + x^2)^{1/2} \qquad (۲۳)$$

که در آن l_C=75 cm و x فاصله از مرکز سطح جلویی فانتوم تا نقطه‌ای روی سطح فانتوم به‌طور مستقیم پشت دُزسنج است. اگر از میدان‌های نوترونی شتاب‌دهنده استفاده می‌شود، باید به غیریکنواختی ناشی از ناهمسانگردی منبع هدف، توجه ویژه‌ای شود (به منبع [21] کتاب‌نامه مراجعه شود).

۱۰ عدم‌قطعیت‌ها

۱۰-۱ مقدمه

مقدار گزارش‌شده برای عامل کالیبراسیون (یا پاسخ) باید با یک عبارت عدم‌قطعیت همراه باشد. عدم‌قطعیت‌ها به‌صورت یک عدم‌قطعیت استاندارد با عامل پوشش یک (٪ ۶۸ سطح اطمینان) یا عامل پوشش ۲ (٪ ۹۵ سطح اطمینان) ذکر می‌شود. در این استاندارد، همه عدم‌قطعیت‌ها، عدم‌قطعیت استاندارد با عامل پوشش یک هستند.

1- Albedo principle

۱۰-۲ مؤلفه‌های عدم‌قطعیت قابل اعمال مربوط به منبع رادیونوکلئیدی کالیبراسیون

۱۰-۲-۱ کلیات

مؤلفه‌های مختلف عدم‌قطعیت کل برای موارد معمول که شامل منبع‌های پرتوزا هستند، در زیربندهای ۱۰-۲-۲ تا ۱۰-۲-۹ بیان شده است. ممکن است موارد خاصی هم وجود داشته باشند که منابع عدم‌قطعیت آن‌ها در این‌جا درنظرگرفته نمی‌شود: برای عدم‌قطعیت در این موارد خاص باید نقطه‌نظرات بیشتری ذکر شود، راهنمایی برای بررسی این موارد در این زیربندها ارائه شده است. باید تأکید کرد که این رویکرد نظام‌مند برای تعیین عدم‌قطعیت‌ها تقریباً به تازگی توسعه یافته است و پژوهش بر روی این موضوع هنوز ادامه دارد. بنابراین، درحالی‌که برخی از مؤلفه‌های عدم‌قطعیت به‌خوبی تعیین شده‌اند، ولیکن بقیه مؤلفه‌ها فقط بر اساس تجربه‌های کلی و تعداد معدودی اندازه‌گیری تخمین زده می‌شوند.

۱۰-۲-۲ عدم‌قطعیت در قدرت منبع نوترون B

به‌طور معمول مقدار B توسط یک آزمایشگاه استانداردهای اولیه که در آن عدم‌قطعیت نسبی تقریباً ٪ ۱ است، تعیین می‌شود؛ از این رو این مؤلفه به‌طور معمول سهم کوچک‌تری در عدم‌قطعیت کل دارد (به منبع [22] کتاب‌نامه مراجعه شود).

۱۰-۲-۳ عدم‌قطعیت در تابع ناهمسانگردی $F_1(\theta)$

با یک اندازه‌گیری دقیق می‌توان به عدم‌قطعیت نسبی حدود ٪ ۰/۵ یا کمتر در عامل تصحیح $F_1(\theta)$ دست یافت. اگر میزان ناهمسانگردی معلوم نباشد، باید یک عدم‌قطعیت نسبی دیگری در شارش لحاظ شود (به معادله (۶) مراجعه شود). بزرگی این عدم‌قطعیت به مقدار تخمینی (ولی نامشخص) ناهمسانگردی بستگی خواهد داشت.

مثال‌هایی از ناهمسانگردی در استاندارد ISO 8529-1، در جدول ۲ منبع [2] کتاب‌نامه و منبع [6] کتاب‌نامه ارائه شده است. توجه داشته باشید اگر چندین اندازه‌گیری در فواصل مختلف از منبع یکسان انجام شود (به‌عنوان مثال برای بازبینی خطی‌بودن)، سپس آن قسمت از عدم‌قطعیت کل مربوط به عدم‌قطعیت در تابع ناهمسانگردی را باید به‌عنوان عدم‌قطعیتی ناشی از خطای سیستماتیک در نظر گرفت.

۱۰-۲-۴ عدم‌قطعیت در فاصله کالیبراسیون l

عدم‌قطعیت فاصله باید کمتر یا برابر با ۱ mm نگه داشته شود که این امر با یک طراحی دقیق قابل دستیابی است. عدم‌قطعیت ۱ mm، عدم‌قطعیت نسبی برابر با ٪ $(0.2 \times l^{-1})$ در آهنگ شارش محاسبه‌شده به‌وجود می‌آورد، که در آن l برحسب متر است. این عدم‌قطعیت در فواصل کالیبراسیون معمول قابل صرف‌نظرکردن است. اما در صورت فواصل نزدیک به منبع، این عدم‌قطعیت باید محاسبه شود.

توجه داشته باشید اگر چندین اندازه‌گیری در یک فاصله خاص انجام شود، سپس عدم‌قطعیت فاصله در این حالت ناشی از خطای سیستماتیک خواهد بود. اگر اندازه‌گیری‌ها در چندین فاصله انجام شود، عدم‌قطعیت

در l باید به‌عنوان عدم‌قطعیتی که از خطاهای تصادفی ناشی می‌شود، درنظرگرفته شود. در هر روش اجرایی که از برازش داده‌ها به‌عنوان تابعی از فاصله استفاده شود، عدم‌قطعیت فاصله باید به‌عنوان بخشی از داده‌های ورودی لحاظ شود.

۱۰-۲-۵ عدم‌قطعیت در عامل هندسی $F_1(l)$

همان‌طور که در زیربند ۶-۲ اشاره شده است، وقتی از معادله‌های (۱۲) و (۱۳) (آشکارساز کروی که تحت پرتودهی منبع نقطه‌ای قرار می‌گیرد) برای تعیین F_1 استفاده شود، یک عدم‌قطعیت نسبی ٪ ۲۰ در مقدار پارامتر اثربخشی[1] δ وجود خواهد داشت و در نتیجه یک عدم‌قطعیت نسبی ٪ ۲۰ ناشی از انحراف $F_1(l)$ از مقدار یک خواهیم داشت. وقتی از شکلی کلی‌تر یعنی معادله‌های (۱۴) و (۱۴- الف)، استفاده شود، عدم‌قطعیت نسبی در $F_1(l)$ را می‌توان از طریق عدم‌قطعیت‌های a_4 و a_5 تخمین زد.

۱۰-۲-۶ عدم‌قطعیت تصحیح پراکندگی

عدم‌قطعیت در تصحیح پراکندگی را می‌توان از چگونگی برازش به داده‌ها که در زیربند ۶-۳ شرح داده شده است، به‌دست آورد. وقتی از پارامترهای پراکندگی که توسط اندازه‌گیری‌های اولیه برای کالیبراسیون‌های روزمره (به زیربند۶-۱ مراجعه شود) تعیین می‌شود، استفاد شود باید این حقیقت را پذیرفت که دستگاه‌هایی که به ظاهر مشابه هستند همیشه یکسان نیستند و ممکن است پاسخ یکسانی به نوترون‌های پراکنده ندهند. دانستن مقدار عدم‌قطعیت مجاز مربوط به این اثر، بدون انجام تعداد زیادی اندازه‌گیری روی تعداد زیادی دستگاه مجزا، کار بسیار دشواری است. بدون داشتن این پایگاه داده‌ها، لحاظ‌کردن ٪ ۱۰ عدم‌قطعیت نسبی دیگر در تصحیح پراکندگی به‌نظر منطقی می‌باشد.

اگر مؤلفه‌های ترکیبی پراکندگی ورودی هوا و اتاق با تکنیک مخروط سایه تعیین شوند، آن‌گاه تجربیات چندین ساله نشان می‌دهد که این مؤلفه‌ها می‌توانند با عدم‌قطعیت نسبی حدود ٪ ۳ تعیین شوند. بنابراین، یک تصحیح P % می‌تواند منجر به سهمی برابر با ٪ P ۰٫۰۳ در عدم‌قطعیت نسبی کل شود. چون اثر تضعیف هوا ناچیز و کوچک است بنابراین عدم‌قطعیت ناشی از تصحیح تضعیف هوا، $F_A(l)$، قابل صرف‌نظرکردن است.

مقادیر محاسبه‌شده برای افزایش خالص در پاسخ ناشی از پراکندگی هوا (به پیوست **ت** مراجعه شود) مورد نیاز در استفاده از روش نیمه‌تجربی [طبق معادله (۱۹)]، به‌طور تخمینی عدم‌قطعیت نسبی تقریباً ٪ ۱۵ را ایجاد می‌کند. عدم‌قطعیت نسبی متناظر برای پاسخ تصحیح‌شده کمتر از ٪ ۱ است. چون پراکندگی نسبی اتاق به‌صورت l^2 افزایش می‌یابد، عدم‌قطعیت در این تصحیح، در صورتی‌که مقادیر l بزرگ باشد، می‌تواند قسمت مهمی از عدم‌قطعیت کل باشد.

1- Effectiveness parameter

۱۰-۲-۷ عدم‌قطعیت در خوانش M

برای یک دستگاه فعال شمارش تپ با خروجی دیجیتالی، تعیین عدم‌قطعیت بسیار ساده است، چون عدم‌قطعیت به‌دست آمده از توزیع پوآسون[1] شمارش‌ها، دقیقاً برابر با ریشه دوم تعداد شمارش‌ها (تصحیح‌شده نسبت به زمان مرده) است. هرچند، در برخی انواع دستگاه‌های مشابه ممکن است تعیین تعداد شمارش‌های مربوط به خوانش خروجی دشوار باشد.

در دستگاه‌هایی با خروجی آنالوگ، ممکن است افت و خیز عقربه که بیشترین (یعنی ٪ ۹۵) خوانش را شامل می‌شود، یادداشت شوند و یک عدم‌قطعیت استاندارد با عامل پوشش ۲ برای خوانش ذکر می‌شود. سپس این مقدار تقسیم بر ۲ می‌شود که عدم‌قطعیت استاندارد با عامل پوشش ۱ حاصل می‌شود.

بنابراین عدم‌قطعیت خوانش باید برای اکثر دستگاه‌های دیجیتالی تصحیح شود و تا حدی به‌طور موردی در دستگاه‌هایی با خروجی فقط آنالوگ نیز تصحیح شود. این عدم‌قطعیت می‌تواند در حالت کم‌ترین آهنگ معادل دُز، عدم‌قطعیت غالب بوده و در آهنگ معادل دُز بالاتر، قابل صرف‌نظرکردن باشد.

عدم‌قطعیت در «بازخوانش[2]» یک دُزسنج غیرفعال مربوط به عدم‌قطعیت در خوانش یک دستگاه فعال است. هر چند این عدم‌قطعیت ممکن است تا حدی قابل ملاحظه باشد، اما بحث در مورد عدم‌قطعیت در خوانش دُزسنج‌ها فراتر از دامنه کاربرد این استاندارد است. به‌علاوه، در بسیاری از موارد، دُزسنج‌ها در یک آزمایشگاهی به غیر از آزمایشگاه کالیبراسیون خوانش می‌شوند که در این صورت آزمایشگاه کالیبراسیون ممکن است از بزرگی عدم‌قطعیت اطلاعی نداشته باشد. به‌طور کلی، وقتی این عدم‌قطعیت معلوم شود، باید در بازخوانش گزارش شود و به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های عدم‌قطعیت کل وارد می‌شود. در مواردی اگر مقدار این عدم‌قطعیت معلوم نشده باشد، این موضوع هم باید بیان شود.

۱۰-۲-۸ عدم‌قطعیت در زمان‌گیری

به‌طور کلی، عدم‌قطعیت فقط در زمان پرتودهی یک وسیله جمع‌آوری‌کننده معادل دُز[3] مانند دُزسنج‌های غیرفعال، اهمیت دارد. در این حالت، عدم‌قطعیت تابعی از زمان مورد نیاز برای انتقال منبع از داخل حفاظ به به مکان پرتودهی و سپس بازگرداندن به داخل حفاظ است. این عدم‌قطعیت برای مواردی که زمان پرتودهی نسبت به زمان انتقال خیلی بزرگ‌تر است، قابل صرف‌نظرکردن است.

۱۰-۲-۹ عدم‌قطعیت در مقادیر ضریب تبدیل شارش به معادل دُز متوسط‌گیری شده نسبت به طیف

ضرایب تبدیل برای طیف منبع‌های نوترونی ، در استاندارد ISO 8529-3 ارائه شده است. این ضرایب فقط برای منبع‌های نوترونی توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1، کاربرد دارد. برای لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت‌ها در طیف شارش، یک عدم‌قطعیت نسبی ٪ ۱ برای ضریب تبدیل منبع ^{252}Cf و ٪ ۴ برای دیگر منبع‌ها (^{252}Cf

1- Poisson distribution
2- Reading out
3- Dose-equivalent integrating device

با کُندکننده D_2O (به منبع [23] کتاب‌نامه مراجعه شود) ^{241}Am-Be، ^{241}Am-B) مجاز به‌شمار می‌آیند. هر چند در منبع‌هایی با پوشینه‌دارسازی سنگین ممکن است تغییرات طیفی ایجاد شود و در نتیجه عدم‌قطعیت بزرگتری در ضریب تبدیل به‌وجود خواهد آمد.

۱۰-۳ عدم‌قطعیت‌ها برای شتاب‌دهنده‌ها و راکتورها

۱۰-۳-۱ مقدمه

نوترون‌های تک‌انرژی تولیدشده در شتاب‌دهنده‌ها، نوترون‌های تولیدی در راکتور و منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی خاص برای کالیبراسیون در آزمایشگاه‌های مجهز، تولید و استفاده می‌شوند. این آزمایشگاه‌ها باید در ارزیابی عدم‌قطعیت‌های مربوط به کالیبراسیون وسیله‌های حساس به نوترون در چنین میدان‌های نوترونی به‌خوبی تبحر داشته باشند، بنابراین فقط حداقل جزئیات در این زیربند ارائه شده است.

اغلب عدم‌قطعیت‌های بیان‌شده در زیربند ۱۰-۲ باید در این‌جا در نظر گرفته شود و یک ارزیابی از بزرگی هر یک از مؤلفه‌های عدم‌قطعیت نیز انجام شود. هر چند، وقتی از شتاب‌دهنده‌ها برای تولید نوترون استفاده می‌شود، مؤلفه‌های اضافه در عدم‌قطعیت به‌وجود می‌آید که آن‌ها هم باید درنظرگرفته شوند.

۱۰-۳-۲ انرژی نوترون و پهن‌شدگی انرژی

به‌طور کلی این تصحیح کوچک خواهد بود و در نتیجه عدم‌قطعیت مربوط به آن، سهم ناچیزی در عدم‌قعطیت کل خواهد داشت و قابل صرف‌نظرکردن است.

۱۰-۳-۳ تغییرات طیف نوترون با زاویه گسیل

به‌طور کلی تصحیح مربوط به تغییرات طیف نوترون با زاویه گسیل کوچک خواهد بود و درنتیجه عدم‌قطعیت مربوط به آن نیز کوچک است.

۱۰-۳-۴ تصحیح پراکندگی از هدف

عدم‌قطعیت مربوط به تصحیح پراکندگی از هدف، به درستی محاسبات و کیفیت اطلاعات مربوط به وابستگی پاسخ دستگاه تحت آزمون به انرژی، بستگی دارد و می‌تواند عدم قطعیتی تا حدود ٪ ۲۵ به‌وجود آورد.

۱۰-۳-۵ اثرات پراکندگی نوترونی

عدم‌قطعیت مربوط به اثر نوترون‌های پراکنده از اتاق و جزئیات آن شبیه به مبحث ارائه شده در زیربند ۱۰-۲-۶ است.

۱۰-۳-۶ تعیین شارش

آزمایشگاه‌هایی که این نوع از کالیبراسیون‌ها را انجام می‌دهند باید اطلاعاتی دقیق از همه مؤلفه‌های عدم‌قطعیت که توسط وسیله‌های اندازه‌گیری شارش نوترونی ایجاد می‌شود، داشته باشند. با توجه به تکنیک مورد استفاده و انرژی نوترون، عدم قطعیت نسبی ناشی از شارش ممکن است بین ٪ ۲ تا ٪ ۴ باشد.

به‌طور معمول، اثرات ذیل باید درنظرگرفته شوند:

- نوترون‌های پراکنده‌شده از اتاق؛
- پراکندگی بین وسیله تحت‌آزمون و پایشگر؛
- تغییر در نوترون‌های خروجی با زاویه گسیل نوترون (با آهنگ شارش یکنواخت)؛
- تغییر در انرژی نوترون با زاویه گسیل نوترون (با کیفیت طیفی یکنواخت)؛
- میدان آلوده به پرتو گاما؛
- تولید نوترون‌های مزاحم از طریق پشتیبان هدف، مؤلفه‌های خط باریکه و یا مگنت منحرف‌کننده[1]؛
- پراکندگی از مجموعه هدف.

سامانه کالیبراسیون باید طوری طراحی شوند که عدم‌قطعیت کل در کالیبراسیون کمینه شود.

1- Bending magnet

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

فهرست علائم به‌کار رفته در این استاندارد

پارامتر اثر بخشی	δ
آهنگ شارش نوترون	φ
شارش نوترون	Φ
زاویه در دستگاه آزمایشگاه	θ
زاویه فضایی	Ω
ضریب تضعیف خطی (انرژی متوسط‌گیری‌شده)	$\bar{\Sigma}$
پارامتر آزاد مربوط به شعاع آشکارساز (روش برازش تقلیل‌یافته)	a
پارامترهای آزاد مورد استفاده برای تصحیح هندسی	a_5، a_4
تعداد نوترون‌های برخوردی	dN
ضریب تبدیل شارش به معادل دُز	h_Φ
ثابت مشخصه برای چیدمان آشکارساز- منبع	k
فاصله جدایی	l
فاصله بین صفحه جلویی فانتوم و مرکز منبع	l_c
فاصله از مرکز صفحه جلویی فانتوم کالیبراسیون	x
فاصله از مرکز منبع تا سطح آشکارساز	d
پارامتر آزاد برای تصحیح پراکندگی ورودی که به‌صورت مربع فاصله تغییر می‌کند (روش برازش تعمیم‌یافته)	s
وزن‌های مورد استفاده در روش برازش حداقل مربعات وزن داده‌شده	w

ادامه پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

فهرست علائم به‌کار رفته در این استاندارد

مقدار نقطه داده‌های مجزا	y
مقداری به‌دست آمده از روش برازش حداقل مربعات	$\hat{y}$
مؤلفه پراکندگی کل ناشی از هوا	A
پارامتر آزاد برای تصحیح پراکندگی ورودی که به‌صورت خطی با فاصله تغییر می‌کند (روش برازش تعمیم‌یافته)	A'
قدرت منبع نوترون	B
قدرت زاویه‌ای منبع	B_Ω
دُز جذبی	D
انرژی نوترون	E
عامل تصحیح هندسی	F_1
عامل تصحیح برای نوترون‌های پراکنده‌شده ورودی	F_2'
تصحیح برای انحراف آهنگ شمارش از قانون عکس مربع (روش برازش تعمیم‌یافته)	F_3
عامل پراکندگی خروجی هوا	F_A
عامل تصحیح ناهمسانگردی	F_I
تصحیح خطی‌بودن	F_L
مجموع مربعات نسبی از باقی مانده‌ها در حداقل مربعات وزنی	G
معادل دُز	H
معادل دُز فوتون	H_γ
معادل دُز محیطی	$H^*(10)$

ادامه پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

فهرست علائم به‌کار رفته در این استاندارد

معادل دُز فردی در عمق ۱۰ mm و برخورد سر به سر	$H_{\mathrm{p}}(10,0^{\circ})$
پارامتر مورد استفاده برای تصحیح هندسی	L
مقدار کمّیتی که توسط دستگاه نشان داده می‌شود (به زیربند ۳-۱ مراجعه شود)	M
خوانش دستگاه تحت شرایط میدان- آزاد	M_{C}
خوانش دستگاه ناشی از فقط نوترون‌های پراکنده ورودی، حین روش اجرایی کالیبراسیون مخروط- سایه	M_{S}
خوانش کل دستگاه حین روش اجرایی کالیبراسیون	M_{T}
خوانش تصحیح‌نشده از یک وسیله	M'_{T}
عامل کالیبراسیون	Q
پاسخ یک دستگاه آشکارکننده نوترون	R
پاسخ معادل دُز	R_{H}
پاسخ شارش	R_{Φ}
شعاع آشکارساز	r_{D}
شعاع منبع نوترونی	r_{S}
مؤلفه پس‌پراکندگی از اتاق	S

پیوست ب

(آگاهی‌دهنده)

کمینه طول‌های اتاق برای برگشت٪ ۴۰ از اتاق

جدول زیر اندازه اتاق را برحسب متر می‌دهد که تقریباً برگشت ٪ ۴۰ از اتاق را برای منبع‌های نوترونی توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1، برای فاصله منبع تا آشکارساز l_c= 75 mm خواهد داد. این مقادیر برای دو نوع از دستگاه ارائه می‌شود: دُزسنج آلبدو معمولی یا کره های بونر[1] کوچک (۵٫۱ cm یا ۷٫۶ cm) (۲ in. یا ۳ in.) و پایشگر نوترونی متداول یا کره‌های بونر بزرگ (۲۰٫۳ cm یا ۲۵٫۴ cm) (۸ in. یا ۱۰ in.).

سه نوع اتاق درنظرگرفته می‌شود: یک اتاق مکعبی [طول (L)= عرض(W)=ارتفاع(H)]؛ یک اتاق با کفی با صفحه مربعی اما ارتفاع برابر نصف عرض ($L=W=2H$)؛ و یک اتاق شبیه «نیم‌مکعبی» اما با سقفی با پراکندگی کم. دو مورد اول شش سطح بتونی دارند و اتاق سوم دارای پنج سطح بتونی است.

توجه داشته باشید که برگشت ٪ ۴۰ از اتاق باعث افزایش ٪۴۰ در خوانش دستگاه ناشی از پراکندگی اتاق می‌شود، ولی باعث افزایش ٪۴۰ در معادل دُز یا شارش نمی‌شود.

جدول ب-۱– کمینه طول اتاق (برحسب متر) برای برگشت ۴۰٪ از اتاق (l_c=75 cm)

منبع	$^{252}Cf+D_2O$	^{252}Cf	AmB یا AmBe
۱ اتاق مکعبی ($L=W=H$)			
کره کوچک یا دُزسنج آلبدو	۴٫۲	۷٫۵	۸٫۲
کره بزرگ یا پایشگر	۳٫۰	۳٫۰	۳٫۰
۲ اتاق نیم‌مکعبی ($L=W=2H$)			
کره کوچک یا دُزسنج آلبدو	۶٫۱	۱۰٫۹	۱۲٫۱
کره بزرگ یا پایشگر	۴٫۴	۴٫۴	۴٫۳
۳ سقف باز ($L=W=2H$)			
کره کوچک یا دُزسنج آلبدو	۴٫۲	۷٫۱	۸٫۰
کره بزرگ یا پایشگر	۳٫۰	۲٫۹	۲٫۹

1- Bonner spheres

پیوست پ

(آگاهی‌دهنده)

عوامل تصحیح تضعیف هوا

تنها سهم قابل ملاحظه‌ای برای تضعیف در هوا (پراکندگی خروجی) ناشی از پراکندگی اکسیژن و نیتروژن می‌باشد. عامل تضعیف هوا، F_A، است که توسط معادله (پ-۱) برای شرایط محیطی: دمای ۲۱ °C، فشار ۱۰۰٫۴ kPa و رطوبت ٪ ۵۰ داده می‌شود:

$$F_A(l,E) = \exp[l\ \Sigma(E)] = \exp\{[3{,}88\,\sigma_N(E) + 1{,}04\,\sigma_O(E)]10^{-5}\mathrm{l}\} \qquad (پ-۱)$$

که در آن:

l فاصله است، برحسب سانتی‌متر، از مرکز منبع تا مرکز وسیله؛

σ_N و σ_O سطح مقطع نوترونی کل برای نیتروژن و اکسیژن به‌صورت تابعی از انرژی نوترون (برای مثال، فایل داده‌های هسته‌ای ارزیابی‌شده ENDF/B-V[1]) برای میدان‌های نوترونی تک‌انرژی هستند.

$\bar{\Sigma}$ ضریب تضعیف خطی است که با متوسط‌گیری از سطح مقطع نوترونی کل نیتروژن و اکسیژن روی توزیع طیفی منبع نوترونی به‌دست می‌آید. مقادیر متوسط‌گیری‌شده $\bar{\Sigma}$ برای میدان‌های موردنظر تولیدشده توسط منبع‌های رادیونوکلیدی (به استاندارد ISO 8529-1 مراجعه شود) در جدول پ-۱ ارائه شده است.

جدول پ-۱ – ضرایب تضعیف خطی $\bar{\Sigma}$ متوسط‌گیری‌شده روی طیف منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی که در استاندارد ISO 8529-1 و منابع [9] و [10] کتاب‌نامه توصیه شده است (عدم‌قطعیت استاندارد: ٪ ۱/۵ ±)

منبع نوترونی	ضریب تضعیف خطی $\bar{\Sigma}$ (10^{-7} cm^{-1})
^{252}Cf با کُندکننده D_2O به قطر ۱۵ cm	۲ ۹۶۴
شکافت خودبه‌خودی ^{252}Cf	۱ ۰۵۵
$^{241}AmB(\alpha,n)$	۸۳۳
$^{241}AmBe(\alpha,n)$	۸۹۰

1- Evaluated nuclear data file/ Binary-variable

پیوست ت

(آگاهی دهنده)

تصحیح پراکندگی کل ناشی از هوا

افزایش خالص محاسبه‌شده در پاسخ (پراکندگی ورودی منهای پراکندگی خروجی)، ناشی از پراکندگی هوا، برای چندین مقدار و برای پاسخ چندین وسیله اندازه‌گیری نوترونی برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی توصیه‌شده در استاندارد ISO 8529-1، در جدول ت-۱ ارائه شده است (به منبع [12] کتاب‌نامه مراجعه شود).

جدول ت-۱ - درصد افزایش در انواع پاسخ ناشی از پراکندگی هوا برای منبع‌های نوترونی رادیونوکلئیدی مختلف

نوع پاسخ	^{252}Cf	^{252}Cf (با ۱۵ cm کُندکننده D_2O)	^{241}AmB	$^{241}AmBe$
شارش	۱٫۴	۴٫۴	۱٫۰	۱٫۰
کِرما[1] (بافت ماهیچه‌ای ICRU)	۱٫۲	۱٫۱	۰٫۸	۰٫۶
$H^*(10), H_p(10, 0^\circ)$	۱٫۲	۱٫۷	۱٫۰	۰٫۸
آهنگ‌سنج معادل دُز متداول	۱٫۲	۲٫۶	۱٫۰	۰٫۹
فیلم NTA، پلی‌کربنات	۰٫۵	۰٫۹	۰٫۵	۰٫۵
دُزسنج آلبدوی متداول روی فانتوم	۱٫۲	۳٫۷	۰٫۸	۱٫۰

1- Kerma

پیوست ث

(آگاهی‌دهنده)

معیارهایی برای ساخت و استفاده از مخروط سایه

انتخاب مناسب ابعاد برای یک مخروط سایه به هندسه‌ای که کاربر استفاده می‌کند، بستگی دارد. یک طراحی خاص از مخروط سایه در شکل ت-۱ نشان داده شده است (به منبع [10] کتاب‌نامه مراجعه شود). این مخروط شامل دو قسمت است: یک قسمت جلو (نسبت به چشمه)، که ۲۰ cm طول دارد و از آهن ساخته شده است؛ و قسمت پشتی، که از پلی‌اتیلنی با ٪ ۵ بور و طول ۳۰ cm ساخته شده است. قطر قسمت جلویی بر اساس اندازه منبع‌های نوترونی موجود و هدف‌های نوترونی انتخاب می‌شود. برای منبع‌هایی که بزرگ‌تر از آشکارساز هستند، قطر قسمت جلویی مخروط سایه نسبت به قسمت پشتی مخروط بزرگ‌تر خواهد بود، برای مثال وقتی از منبع ^{252}Cf - D_2O با آشکارساز کروی کوچک استفاده می‌شود.

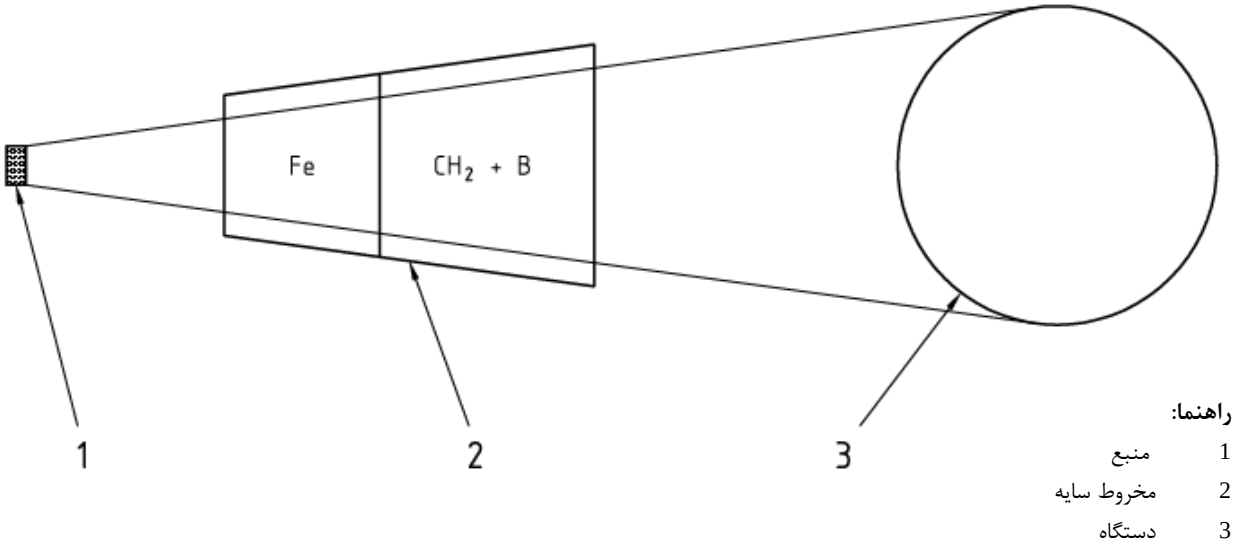
مخروط سایه باید نوترون‌هایی که به‌طور مستقیم از منبع می‌آیند را به‌طور ناچیز عبور دهد. هر چند، اندازه نشان‌داده‌شده برای همه انرژی‌های نوترون که در استاندارد ISO 8529-1 توصیه شده، مناسب است. یک مخروط سایه بهینه‌شده برای انرژی‌های خاص ممکن است ابعادی متفاوت از آن‌چه که نشان داده‌شده‌اند، داشته باشند. علاوه بر این، ممکن است مزایایی برای استفاده از مواد دیگر مانند مس به‌جای آهن نیز وجود داشته باشد.

برای استفاده درست از مخروط سایه، نکات زیر باید درنظرگرفته شود.

در فاصله جدایی بسیار کوچک بین مخروط و منبع نوترونی، خوانش ناشی از نوترون‌های ورودی کم است، چون مخروط به‌طور مؤثر از از پراکندگی بیش‌تر نوترون‌های تولیدشده در نیم‌کره جلویی هم‌مرکز با محور آشکارساز نوترونی به داخل آن جلوگیری می‌کند. با افزایش فاصله جدایی، خوانش ناشی از نوترون‌های پراکنده ورودی افزایش می‌یابد و سپس در یک گستره از فاصله ثابت باقی می‌ماند، این گستره به فاصله مخروط از آشکارساز بستگی دارد. افزایش بیشتر فاصله جدایی مخروط یک افزایش ناگهانی در خوانش به‌وجود می‌آورد، چون آشکارساز نوترونی دیگر به‌طور کامل نمی‌تواند در سایه مخروط قرار گیرد.

دوم این‌که، وقتی آشکارساز به مخروط سایه خیلی نزدیک باشد، سایه قسمت پشتی مخروط، از نوترون‌های پراکنده ورودی به آشکارساز جلوگیری می‌کند و درنتیجه باعث کاهش خوانش به‌دلیل نرسیدن نوترون‌های پراکنده ورودی به آشکارساز می‌شود. تعیین نزدیک‌ترین فاصله که در آن می‌توان خوانش‌های منسجمی به‌دست آورد، به‌لحاظ تجربی دشوار است، اما توصیه می‌شود که اندازه‌گیری فاصله‌ها به فاصله قسمت پشتی مخروط و آشکارساز که حداقل برابر طول کل مخروط سایه است، محدود شود. اگر از این قواعد پیروی شود، می‌توان نتایج منسجمی برای پراکندگی ورودی کل با یک عدم قطعیت کمتر از ٪ ۳ به‌دست آورد.

زاویه مخروط طوری انتخاب می‌شود که مخروط زاویه‌ای بزرگتر از زاویه فضایی وسیله تحت آزمون در برگیرد، اما بزرگتر از دو برابر این زاویه فضایی هم نشود. این موضوع، نیازمند استفاده از چندین مخروط سایه برای یک مجموعه کامل از اندازه‌گیری‌ها خواهد بود.



راهنما:

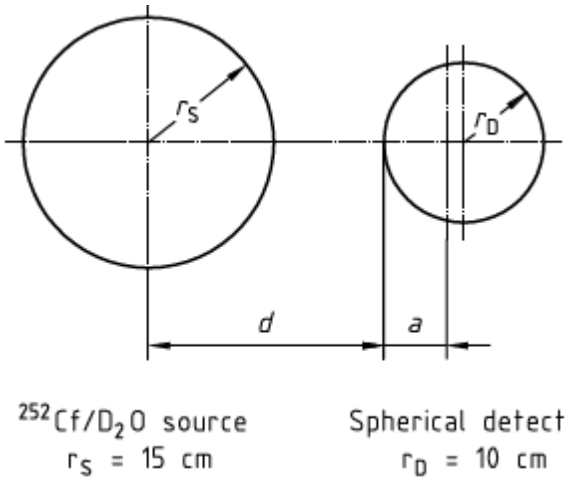
1 منبع
2 مخروط سایه
3 دستگاه

شکل ت-۱- شکل طرح کلی چیدمان منبع نوترون، مخروط سایه (ترکیبی از آهن و پلی‌اتیلن) و دستگاه کروی را نشان می‌دهد

پیوست ج

(آگاهی‌دهنده)

نمایش پارامترها و متغییرها در روش برازش تقلیل‌یافته



راهنما:

a پارامتر آزاد مربوط به شعاع آشکارساز

d فاصله از مرکز منبع تا سطح آشکارساز

شکل ج-۱ -چیدمان کالیبراسیون یک منبع کروی (منبع ^{252}Cf با شکافت خودبه‌خودی در مرکز یک کُندکننده آب‌سنگین با هندسه کروی) و یک آشکارساز کروی (به زیربند ۶-۳-۴ مراجعه شود)

کتاب‌نامه

[1] GRIFFITH, R., HANKINS, D.E., GAMMAGE, R.B. and TOMMASINO, L. (1979): *Recent Developments in Personnel Neutron Dosimeters.* Review Health Physics 36, p. 235.

[2] EISENHAUER, C.M., HUNT, J.B., and SCHWARTZ, R.B. (1985): *Calibration Techniques for Neutron Personal Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosimetry 10, pp. 43-57.

[3] BURGER, G. and SCHWARTZ, R.B. (1988): *Guidelines on Calibration of Neutron Measuring Devices*. IAEA Technical Report Series No. 285.

[4] GIBSON, J.A.B. and PIESCH, E. (1985): *Neutron Monitoring for Radiological Protection*. IAEA Technical Report Series No. 252.

[5] IEC 1005: 1990, Portable neutron ambient dose equivalent ratemeters for use in radiation protection.International Electrotechnical Commission.

[6] EISENHAUER, C.M. and HUNT, J.B. (1988): *Anisotropic Neutron Emission from a ^{252}Cf Source*. Radiat. Prot. Dosim. 22, pp. 253-258.

[7] KLUGE, H., WEISE, K. and HUNT, J.B. (1990): *Calibration of Neutron Sensitive Spherical Devices with Bare and D_2O-Moderated ^{252}Cf Sources in Rooms of Different Sizes*. Rad. Prot. Dosim. 32, pp. 233-244.

[8] WEISE, K. and KLUGE, H. (1994): *Calibration of Neutron-Sensitive Non-Spherical Devices*. KOELZER, W. and MAUSHART, R.: Strahlenschutz: Physik und Messtechnik, Vol. I, pp. 248-253. Verlag TÜV Rheinland, Köln, Germany.

[9] HUNT, J.B. (1984): *The Calibration of Neutron Sensitive Spherical Devices*. Radiat. Prot. Dosim. 8, pp. 239- 251.

[10] HUNT, J.B. (1976): *The Calibration and Use of Long Counters for the Accurate Measurement of Neutron Flux Density*. NPL Report RS5.

[11] EISENHAUER, C.M. (1989): *Review of Scattering Corrections for Calibration of Neutron Instruments*. Radiat. Prot. Dosim. 28, pp. 253-262.

[12] EISENHAUER, C.M., SCHWARTZ, R.B. and McCALL, R.C. (1987): *Effect of Air Scatter on Calibration of Instruments for Detecting Neutrons*. Radiat. Prot. Dosim. 19, pp. 77-84.

[13] SCHRAUBE, H., GRÜNAUER, F. and BURGER, G. (1973): *Calibration Problems with Neutron Moderator Detectors. Proc. Symp. on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*. Vienna, Austria, 1972. IAEA STI/PUB/318, Vol. II, pp. 453-464.

[14] ALBERTS, W.G., COSACK, M., DIETZE, G., JAHR, R., KLUGE, H., KNAUF, K., LIESECKI, M., MATZKE, M.,SCHUSTER, H.J., WAGNER, S. and ZILL, H.W. (1979), *in Advances in Radiation Protection Monitoring*, IAEA STI/PUB/494, p. 625.

[15] SCHWARTZ, R.B. (1977): *Calibration and Use of Filtered Beams. Proc. Symp. on Neutron Standards and Applications*: NBS Special Publication 493, p. 250. U.S. National Bureau of Standards.

[16] ALBERTS, W.G. and DIETZ, E. (1987): Filtered Beams at the FMRB — *Review and Current Status PTBFMRB- 112*, Braunschweig, December 1987.

[17] ALBERTS, W.G. and SCHWARTZ, R.B. (1985): *Comparison of the Filtered Neutron Beams at the NBS and PTB Reactors by Calibrating a Spherical Rem-meter*. Proc. Fifth Symposium Neutron Dosimetry in Biology and Medicine. EUR 9762, pp. 629-636

[18] IAEA (1970): *Neutron Fluence Measurements*. Technical Report Series No. 107, IAEA STI/DOC/10/107, Vienna.

[19] SCHRAUBE, H., CHARTIER, J-L., COSACK, M., DELAFIELD, H.J., HUNT, J.B., SCHWARTZ, R.B. (1988). *Calibration Procedures for Determining the Radiation Response Characteristics of Neutron Measuring Devices Used for Radiation Protection*. Radiat. Prot. Dosim. 23, pp. 217-221.

[20] HUNT, J.B. (1989). *Determination of the Source-to-Detector Effective Calibration Distance for a 1/v-Detector mounted upon a Water-Filled Phantom*. Radiat. Prot. Dosim. 27, pp. 111-114.

[21] SCHRAUBE, H., ALBERTS, W.G., WEEKS, A.R. (1997*): Fast and High-Energy Neutron Detection with Nuclear Track Detectors. Results of the European Joint Experiments 1992/93*. EURADOS Report 1995-01, GSFBericht 15/95 ISSN 0721-1694.

[22] AXTON, E.J. (1986/1987): *Intercomparison of Neutron-Source Emission Rates* (1979-1984). Metrologia 23, pp. 129-144.

[23] SCHWARTZ, R.B., EISENHAUER, C.M. and GRUNDL, J.A. (1983): *Experimental Verification of the Neutron Spectrum from the NBS D_2O-Moderated ^{252}Cf Source*. NUREG/CR 3399.

[24] ICRP Publication 51: 1987, Data for Use in Protection Against External Radiation.

[25] ICRP Publication 74: 1996, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation.

[26] ICRU Report 20: 1971, Radiation Protection Instrumentation and its Application.

[27] ICRU Report 26: 1977, Neutron Dosimetry for Biology and Medicine.

[28] ICRU Report 39: 1985, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources.

[29] ICRU Report 43: 1988, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources — Part 2.

[30] ICRU Report 47: 1992, Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations.

[31] ICRU Report 51: 1993, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry.

[32] ICRU Report 57: 1997, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation.

[33] BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML: 1993, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.