



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۴۵۲۹-۱

چاپ اول

INSO

14529-1

1st. Edition

دزیمتری مربوط به پرتوگیری از پرتوهای  
کیهانی در هواپیماهای غیر نظامی  
قسمت ۱:  
مبنای مفهومی در اندازه‌گیری

**Dosemetry for exposures to cosmic  
radiation in civilian aircraft  
Part 1:  
Conceptual basis for measurements**

ICS:13.280;49.020

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی 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.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود 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، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادات در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (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 of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

## کمیسیون فنی تدوین استاندارد

"دزیمتری مربوط به پرتوگیری از پرتوهای کیهانی در هواپیماهای غیر نظامی - قسمت ۱: مبنای مفهومی در اندازه‌گیری"

### رئیس:

حسینی پویا، سید مهدی  
(دکترای مهندسی هسته‌ای-پرتوپزشکی)

### سمت و/یا نمایندگی

عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان  
انرژی اتمی و کارشناس دزیمتری

### دبیر:

ذاکری، فریده  
(دکترای بیولوژی)

عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان  
انرژی اتمی و کارشناس دزیمتری بیولوژیکی

### اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

حائری، ابوالقاسم  
(دکترای فیزیک پزشکی)

عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان  
انرژی اتمی و کارشناس دزیمتری بیولوژیکی

سلامیان، نیما  
(فوق لیسانس میکروبیولوژی)

کارشناس بخش دزیمتری سازمان انرژی اتمی

طاهری، مهران  
(فوق لیسانس مهندسی شیمی)

کارشناس دزیمتری نوترون و ذرات باردار سازمان انرژی  
اتمی

هنرجو، مرضیه  
(لیسانس علوم آزمایشگاهی)

کارشناس بخش دزیمتری سازمان انرژی اتمی

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ج	آشنایی با مؤسسه استاندارد
۵	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
ز	پیش‌گفتار
۱	مقدمه
۴	۱ هدف و دامنه کاربرد
۴	۲ مراجع الزامی
۴	۳ اصطلاحات، تعاریف و نمادها
۴	۳-۱ کمیت‌ها و یکاها
۱۱	۳-۲ میدان پرتو جوئی
۱۴	۴ ملاحظات کلی
۱۴	۴-۱ توصیف کلی میدان پرتوهای کیهانی در اتمسفر
۱۶	۴-۲ ملاحظات کلی کالیبراسیون برای دزیمتری میدان‌های پرتو کیهانی
۲۱	۴-۳ ضرایب تبدیل
۲۱	۵ وسائل دزیمتری
۲۱	۵-۱ مقدمه
۲۱	۵-۲ وسائل فعال
۲۸	۵-۳ وسائل غیرفعال
۳۳	پیوست الف (اطلاعاتی)
۳۷	کتابنامه

## پیش گفتار

استاندارد "دزیمتری مربوط به پرتوگیری از پرتوهای کیهانی در هواپیماهای غیر نظامی - قسمت ۱: مبنای مفهومی در اندازه‌گیری" که پیش نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده و در سیصد و پنجاه و دومین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۹۱/۵/۳ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک 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.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO20785-1:2006, Dosemetry for exposures to cosmicradiation in civilian aircraft -Part 1:  
Conceptual basis for measurements

## مقدمه

خدمه هواپیما در معرض سطوح بالایی از پرتوهای کیهانی با منشأ کهکشانی و خورشیدی و پرتوهای ثانویه تولید شده در جو، ساختار هواپیما و محتویات آن قرار دارند. پیرو توصیه‌های کمیسیون بین‌المللی حفاظت رادیولوژیکی در نشریه شماره ۶۰ [۱] اتحادیه اروپا (EU)، یک رهنمود استانداردهای ایمنی پایه تجدید نظر یافته [۲] معرفی شد که شامل پرتوگیری از منابع طبیعی پرتوهای یونساز از جمله پرتوهای کیهانی به عنوان پرتوگیری شغلی است.

این رهنمود الزام می‌نماید که پرتوگیری خدمه هواپیما مشمول دریافت دز بیش از ۱ mSv در سال در نظر گرفته شود. آنگاه چهار اقدام حفاظتی زیر را تعیین می‌کند: (۱) ارزیابی پرتوگیری خدمه مورد نظر؛ (۲) در نظر گرفتن پرتوگیری ارزیابی شده، هنگام ساماندهی زمان‌بندی‌های کاری با دیدگاه کاهش دز خدمه‌ای که پرتوگیری بالا داشته‌اند؛ (۳) آگاه کردن کارکنان مورد نظر نسبت به مخاطرات احتمالی که این شغل برای سلامتی آنها ایجاد می‌کند؛ و (۴) اعمال موارد حفاظتی خاص یکسان برای خدمه زن در طی بارداری نسبت به "فرزندی که متولد می‌شود" مانند سایر کارکنان زن. رهنمود شورای اتحادیه اروپا از قبل در قوانین و مقررات کشورهای عضو اتحادیه اروپا ادغام شده است و در استانداردهای ایمنی هوانوردی و روش‌های اجرایی نظام‌های مشترک هوانوردی و آژانس ایمنی هوایی اروپا در برگرفته می‌شوند.

برای اهداف قانونی و نظارتی، دز معادل (برای جنین) و دز موثر، کمیت‌های مورد نظر حفاظت در برابر پرتو می‌باشند. پرتوگیری بدن از پرتوهای کیهانی اساساً یکنواخت بوده و شکم مادر هیچگونه حفاظ موثری برای جنین فراهم نمی‌کند. در نتیجه، بزرگی دز معادل برای جنین می‌تواند با دز موثر دریافت شده توسط مادر برابر باشد. دزها در هواپیما عموماً قابل پیش‌بینی هستند، و رویدادهایی قابل مقایسه با پرتوگیری‌های غیر برنامه‌ریزی شده به طور معمول در سایر مکان‌های کار با پرتو نمی‌توانند رخ دهند (بجز موارد استثناء نادر در رویدادهای ناشی از ذرات به شدت قوی و پرنانژی خورشیدی). دزیمترهای فردی برای کاربردهای روزمره ضروری به نظر نمی‌رسند [۲ و ۳]. رویکرد ارجح برای ارزیابی دزهای دریافتی خدمه هواپیما در مواقع ضروری، محاسبه مستقیم دز موثر در واحد زمان به صورت تابعی از مکان جغرافیایی، ارتفاع و فاز گردش خورشیدی، و ترکیب نمودن این مقادیر با اطلاعات فهرست پرواز و کارکنان برای بدست آوردن برآوردهایی از دز موثر افراد می‌باشد. این رویکرد توسط راهنمای کمیسیون اروپا و نشریه شماره ۷۵ ICRP پشتیبانی می‌شود [۳].

نقش محاسبات در این فرآیند در حفاظت در برابر پرتو جاری منحصر به فرد است و بطور گسترده پذیرفته شده است که دزهای محاسبه شده باید با اندازه‌گیری اعتباردهی شوند. دز موثر به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. کمیت عملیاتی مناسب، معادل دز محیطی،  $H^*(10)$  می‌باشد. به منظور اعتباردهی دزهای بدست آمده ارزیابی شده بر حسب دز موثر، محاسبات می‌تواند با استفاده از آهنگ معادل دز محیطی یا دز مسیر بر حسب معادل دز محیطی انجام شود، و مقادیر این کمیت‌ها توسط اندازه‌گیری‌های قابل ردیابی به استانداردهای ملی تعیین شوند. اعتباردهی محاسبات معادل دز محیطی برای یک شیوه محاسبه خاص ممکن است بصورت اعتباردهی محاسبه دز موثر توسط همان کد کامپیوتری باشد، اما تأیید این مرحله در

فرایند می‌تواند ضروری باشد. روش دیگر بنا نهادن این پیش فرض است که کمیت عملیاتی معادل دز محیطی، تخمین‌گر خوبی از دز موثر و دز معادل جنین برای میدان‌های پرتوی مورد نظر است، به همان شکلی که استفاده از کمیت عملیاتی معادل دز فردی برای تخمین دز موثر پرتوکاران توجیه می‌شود. آنگاه آهنگ معادل دز محیطی به صورت تابعی از مکان جغرافیایی، ارتفاع و فاز گردش خورشید محاسبه می‌شود و در اطلاعات فهرست پرواز و کارکنان گنجانده می‌شود. سپس محاسبات آهنگ‌های معادل دز محیطی یا دزهای مسیر می‌توانند با اندازه‌گیری‌های قابل ردیابی به استانداردهای ملی اعتباردهی شوند.

در ارتفاع، میدان پرتوی در هواپیما با وجود انواع بسیاری از پرتوهای یونساز با گستره انرژی تا چندین GeV بسیار پیچیده است. تعیین معادل دز محیطی برای چنین میدان پرتوی پیچیده‌ای مشکل است، و هدف این استاندارد ملی ارائه اصول مفهومی جهت انجام چنین اندازه‌گیری‌ها و برای کالیبراسیون وسایل مورد استفاده برای این هدف می‌باشد. در بسیاری از موارد، روش‌های مورد استفاده برای تعیین معادل دز محیطی در هواپیما مشابه روش‌های مورد استفاده در شتاب‌دهنده‌های با انرژی بالا در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی می‌باشد. بنابراین پیشنهاد روش‌های دزیمتری و شیوه‌هایی جهت کالیبراسیون وسایل دزیمتری و همچنین تکنیک‌هایی برای حفظ قابلیت ردیابی اندازه‌گیری‌های دزیمتری با استانداردهای ملی امکان‌پذیر است. اندازه‌گیری‌های دزیمتری بدست آمده برای ارزیابی معادل دز محیطی باید با استفاده از روش‌های دقیق و قابل اطمینانی باشد تا از کیفیت قرائت‌هایی که برای کارکنان و واحد قانونی انجام شده اطمینان حاصل شود. در آینده، قسمت ۲ ISO 20875، دستورالعمل‌هایی برای تعیین مشخصه‌های پاسخ دستگاه‌ها (تجهیزات) برای تعیین معادل دز محیطی در هواپیما را ارائه خواهد کرد. هماهنگی روش‌های مورد استفاده برای تعیین معادل دز محیطی و کالیبراسیون دستگاه‌ها به منظور حصول اطمینان از سازگاری اندازه‌گیری‌های انجام شده با دستگاه‌ها مطلوب است.

این استاندارد ملی برای استفاده توسط آزمایشگاه‌های کالیبراسیون اولیه و ثانویه پرتوهای یونساز، کارکنان حفاظت در برابر پرتو استخدام شده در موسسات دولتی و شرکت‌های صنعتی مرتبط با تعیین معادل دز محیطی برای خدمه هواپیما، می‌باشد.

# دزیمتری مربوط به پرتوگیری از پرتوهای کیهانی در هواپیماهای غیر نظامی

## قسمت ۱: مبنای مفهومی در اندازه‌گیری

### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین اصول کلی اندازه‌گیری معادل دز محیطی برای ارزیابی پرتوگیری از پرتوهای کیهانی در هواپیماهای غیرنظامی و کالیبراسیون دستگاه‌هایی که برای این هدف به کار می‌روند، است.

### ۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی به آنها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آنها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن مورد نظر است. استفاده از مرجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

2-1 ICRU Report 60:1998, Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation

یادآوری- مدارک منتشر شده بوسیله ICRP (کمیسیون بین‌المللی حفاظت رادیولوژیکی) و ICRU (کمیسیون بین‌المللی پرتو و اندازه‌گیری‌ها) مورد تأیید کمیته ایزو می‌باشند.

### ۳ اصطلاحات، تعاریف و نمادها

در این استاندارد اصطلاحات، تعاریف و نمادهای زیر به کار می‌رود:

#### ۱-۳ کمیت‌ها و یکاها

۱-۱-۳

فلوئنس<sup>۱</sup> ذره

فلوئنس

$\Phi$

نسبت  $dN$  به  $da$ ، که  $dN$  تعداد ذراتی است که بر روی کره‌ای با سطح مقطع  $da$  برخورد می‌کند.

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

یادآوری ۱- یکای فلوئنس ذره  $m^{-2}$  است، اما اغلب از واحد  $cm^{-2}$  استفاده می‌شود.



یادآوری ۲- توزیع انرژی فلوننس ذره،  $\Phi_E$ ، نسبت  $d\Phi$  به  $dE$  می‌باشد، که  $d\Phi$  فلوننس ذرات دارای انرژی بین  $E$  و  $E + dE$  است. یک تعریف مشابه برای توزیع جهت‌دار فلوننس ذره،  $\Phi_n$ ، وجود دارد. نمایش کامل فلوننس ذرات دیفرانسیلی دوگانه را می‌توان (با الگوهای)  $\Omega(E, \Omega)$  نوشت، به طوری که زیرنگاشت‌ها متغیرها (کمیت‌ها) را برای مشتق‌گیری مشخص می‌نمایند و نمادها در گروه مقادیر متغیرها را شرح می‌دهند. مقادیر در گروه‌ها برای مقادیر تابعی خاص مورد نیاز هستند، مانند توزیع انرژی فلوننس ذره در انرژی مورد نظر،  $E=E_0$ ، به صورت  $\Phi_E(E_0)$  نوشته می‌شود. چنانچه هیچ مقادیر خاصی مشخص نشده باشد، گروه‌ها می‌توانند حذف شوند.

۲-۱-۳

آهنگ فلوننس ذره

آهنگ فلوننس

$\dot{\Phi}$

نسبت  $d\Phi$  به  $dt$  می‌باشد، که  $d\Phi$  افزایش فلوننس ذره در بازه زمانی  $dt$  است:

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{da \cdot dt}$$

یادآوری- یکای آهنگ فلوننس ذره  $m^{-2}/s$  است، اما اغلب از یکای  $cm^{-2}/s$  استفاده می‌شود.

۳-۱-۳

انرژی داده شده

$\varepsilon$

انرژی داده شده توسط پرتوهای یونساز به حجم معینی از ماده می‌باشد.

یادآوری- یکای انرژی داده شده ژول (J) می‌باشد.

۴-۱-۳

متوسط انرژی داده شده

$\bar{\varepsilon}$

مقدار مورد انتظاری از انرژی داده شده توسط پرتوهای یونساز به حجم معینی از ماده می‌باشد.

یادآوری- یکای متوسط انرژی داده شده ژول (J) می‌باشد.

۵-۱-۳

انرژی داده شده ویژه

$Z$

نسبت  $\varepsilon$  به  $dm$ ، که  $\varepsilon$  انرژی داده شده توسط پرتوهای یونساز به ماده‌ای با جرم  $dm$  می‌باشد.

$$Z = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

یادآوری - یکای انرژی ویژه J/kg، با نام خاص گری (Gy) می‌باشد.

۳-۱-۶

دز جذبی

D

نسبت  $d\bar{E}$  به  $dm$ ، که  $d\bar{E}$  متوسط انرژی داده شده به ماده با جرم  $dm$  می‌باشد.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

یادآوری - یکای دز جذبی J/kg، با نام خاص گری می‌باشد.

۳-۱-۷

کرما

K

نسبت  $dE_{tr}$  به  $dm$ ، که  $dE_{tr}$  مجموع انرژی‌های جنبشی اولیه تمام ذرات باردار آزاد شده توسط ذرات بدون بار در جرم (dm) ماده می‌باشد.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

یادآوری - یکای کرما، J/kg، با نام خاص گری می‌باشد.

۳-۱-۸

انتقال خطی انرژی

LET

L

نسبت  $dE$  به  $dl$ ، که  $dE$  انرژی تلف شده توسط یک ذره باردار در ماده به علت برخوردهای الکتریکی در عبور از یک مسافت  $dl$  می‌باشد.

$$L = \frac{dE}{dl}$$

یادآوری - یکای انتقال خطی انرژی J/m است، اما اغلب از یکای keV/ $\mu m$  استفاده می‌شود.

۳-۱-۹

معادل دز

H

برابر است با حاصل ضرب Q در D در نقطه مورد نظر از بافت، که D دز جذبی، Q ضریب کیفیت در نقطه مورد نظر،  $D_L$  ضریب توزیع دز D در انتقال خطی انرژی L و  $Q(L)$  ضریب کیفیت به عنوان تابعی از L در آب می‌باشد.

$$H = Q \cdot D = \int Q(L) D_L dL$$

یادآوری ۱- واحد معادل دز J/kg، با نام خاص سیورت (Sv) می‌باشد.

یادآوری ۲- مقادیر برای رابطه Q(L) در نشریه شماره ۶۰ ICRP سال ۱۹۹۰ ارائه شده است.

۱۰-۱-۳

انرژی ویژه دز میانگین در هر رویداد

انرژی ویژه دز میانگین در یک رویداد منفرد

$\bar{z}_D$

مقدار انتظاری  $\bar{z}_D = \int_0^{\infty} z d_1(z) dz$  که چگالی احتمال دز Z می‌باشد.

یادآوری- چگالی احتمالی دز Z از رابطه  $d_1(z) = dD_1(z)/dz$  به دست می‌آید، بطوری که  $D_1(z)$  کسری از دز جذبی آزاد شده در هر رویداد است که با انرژی ویژه کمتر یا برابر Z تحویل می‌شود.

۱۱-۱-۳

انرژی خطی

y

نسبت  $\bar{y}$  به  $\bar{L}$ ، که انرژی داده شده به حجم معینی از ماده توسط یک رویداد نشست انرژی و  $\bar{L}$  میانگین طول وتر در آن حجم می‌باشد.

$$y = \frac{E_2}{L}$$

یادآوری- یکای انرژی خطی J/m است، اما اغلب از واحد keV/ $\mu m$  استفاده می‌شود.

۱۲-۱-۳

انرژی خطی دز میانگین

$\bar{y}_D$

مقدار مورد انتظار  $\bar{y}_D = \int_0^{\infty} y d(y) dy$  که چگالی احتمالی دز y می‌باشد.

یادآوری ۱- چگالی احتمالی دز y، از رابطه  $d(y) = dD(y) / dy$  به دست می‌آید به طوری که D(y) کسری از دز جذبی آزاد شده است که با انرژی خطی کمتر یا برابر با y تحویل می‌شود.

یادآوری ۲-  $\bar{y}_D$  و توزیع d(y)، هر دو مستقل از دز جذبی یا آهنگ دز می‌باشند.

۱۳-۱-۳

معادل دز محیطی

H\*(10)

معادل دز در هر نقطه در یک میدان پرتوی که توسط میدان گسترش یافته و هم سو شده، در عمق ۱۰ mm روی شعاعی از کره ICRU در خلاف جهت آن میدان هم سو شده ایجاد شده باشد.

یادآوری- یکای معادل دز محیطی J/kg، با نام خاص سیورت (Sv) است.

ضریب تبدیل فلوئنس ذره به معادل دز محیطی

$h_{\Phi}^*$

نسبت معادل دز محیطی ذره،  $H^*(10)$ ، به فلوئنس ذره،  $\Phi$ :

$$h_{\Phi}^* = \frac{H^*(10)}{\Phi}$$

یادآوری - یکای ضریب تبدیل فلوئنس ذره به معادل دز محیط  $J.m^2/kg$  می باشد. نام ویژه این واحد  $Sv.m^2$  می باشد که معمولاً از واحد  $Sv.cm^2$  استفاده می شود.

صفحه نمایش

قرائت

M

(از یک دستگاه اندازه گیری) مقدار نشان داده شده از یک کمیت توسط دستگاه اندازه گیری.

یادآوری ۱- مقدار خوانده شده از نمایشگر دستگاه را می توان قرائت مستقیم نامید؛ این مقدار در ثابت دستگاه ضرب و نشان داده می شود .

یادآوری ۲- کمیت مورد نظر یا چیزی که اندازه گیری می شود، یک سیگنال اندازه گیری یا کمیت دیگری که برای محاسبه آن مقدار مورد اندازه گیری استفاده می شود.

یادآوری ۳- ضروری است که به صورت مستند نشان داده شود که آیا مقدار نمایش داده شده (قرائت شده) نسبت به شرایط مرجع به منظور محسوب نمودن کمیت های تأثیرگذار، نرمالیزه شده اند و از نظر زمینه ذاتی و سایر عوامل تصحیح گردیده اند.

مشخصه پاسخ

پاسخ

R

نسبت مقدار نشان داده شده (قرائت)، M، توسط یک دستگاه اندازه گیری به مقدار کمیت، X، که باید توسط دستگاه برای یک نوع، توزیع انرژی و جهت خاص از پرتو اندازه گیری شود .

$$R = \frac{M}{X}$$

یادآوری ۱- VIM به عنوان یک یادآوری در تعریف "سیگنال اندازه گیری" بیان می کند که، "سیگنال ورودی به یک سیستم اندازه گیری می تواند محرک و سیگنال خروجی پاسخ نامیده شود". اصطلاح "مشخصه پاسخ" به عنوان "ارتباط بین

یک محرک و پاسخ متناظر در شرایط معین " تعریف می‌شود. در علم اندازه‌گیری پرتو به طور کلی اصطلاح " پاسخ " خلاصه شده "مشخصه پاسخ " است.

یادآوری ۲- به منظور جلوگیری از سردرگمی، بیان نوع پاسخ ضروری است، به عنوان مثال پاسخ فلوئنس (پاسخ نسبت به  $\Phi$ ):

$$R_{\Phi} = \frac{M}{\Phi}$$

و یا پاسخ معادل دز (پاسخ نسبت به معادل دز):

$$R_H = \frac{M}{H}$$

۱۷-۱-۳

عمق جو

$X_{\nu}$

جرم یک ستون مساحت- واحد از هوای بالای یک نقطه از جو

یادآوری- یکای عمق جو  $kg/m^2$  می‌باشد، اما اغلب از یکای  $g/cm^2$  استفاده می‌شود.

۱۸-۱-۳

سختی مغناطیسی

سختی

اندازه حرکت به ازای یکای بار (از یک ذره در یک میدان مغناطیسی)

یادآوری ۱- یکای سختی  $T. m$  می‌باشد. اغلب یکای مورد استفاده در سیستم یکاها جائیکه اندازه حرکت،  $P$ ، به صورت  $eV/c$  (یا  $GeV/c$ ) ارائه شود،  $V$  (یا  $GV$ ) است، و جائیکه سختی  $c$  برابر مقدار اندازه حرکت به ازای یکای بار باشد  $P.c/Q$ .

یادآوری ۲- سختی به خصوص در مشخص نمودن مسیر حرکت ذره باردار در میادین مغناطیسی مفید می‌باشد. تمام ذراتی که دارای سختی مغناطیسی مشابهی هستند، مستقل از جرم ذره یا بار اتمی، مسیر یکسانی در میدان مغناطیسی دارند.

۱۹-۱-۳

سختی برش مغناطیسی زمین

سختی برش<sup>۱</sup>

$r_c$

کمینه سختی مغناطیسی که یک ذره برخوردی دارا بوده و کماکان در میدان مغناطیسی زمین برای رسیدن به یک مکان مشخص بالای سطح زمین بتواند نفوذ نماید.

یادآوری- سختی برش به زاویه برخورد بستگی دارد. اغلب برخورد عمود فرض می‌شود.

## سختی برش عمودی مغناطیسی زمین

برش عمودی<sup>۱</sup>

## برش

کمینه سختی مغناطیسی که یک ذره برخوردی عمودی دارا بوده و کماکان در میدان مغناطیسی زمین برای رسیدن به یک مکان مشخص بالای سطح زمین بتواند نفوذ نماید.

## ۳-۲ میدان پرتو جوئی

## ۳-۲-۱

## پرتوهای کیهانی

## اشعه کیهانی

## ذرات کیهانی

پرتوهای یونساز شامل ذرات با انرژی بالا، هسته‌های یونیزه شده اولیه با منشاء فرازمینی و ذراتی که از برهم-کنش با جو و سایر مواد تولید می‌شوند.

## ۳-۲-۲

## پرتوهای کیهانی اولیه

## اشعه‌های کیهانی اولیه

پرتوهای کیهانی رخ دهنده از فضا

## ۳-۲-۳

## پرتوهای کیهانی ثانویه

## اشعه کیهانی ثانویه

## ذرات بوجود آورنده جهان

ذراتی که بطور مستقیم یا طی واکنش‌های متوالی در اثر پرتوهای کیهانی اولیه برهم‌کنش‌کننده با جو یا سایر مواد بوجود می‌آیند.

یادآوری- ذرات مهم، در ارتباط با حفاظت در برابر پرتو و اندازه‌گیری پرتو در هواپیما، عبارتند از نوترون‌ها، پروتون‌ها، فوتون‌ها، الکترون‌ها، پوزیترون‌ها و موان‌ها و در گستره کمتر پایون‌ها و یون‌های هسته‌ای سنگین تر از پروتون‌ها

۴-۲-۳

پرتوهای کیهانی کهکشانی

اشعه کیهانی کهکشانی<sup>۱</sup>

GCR

پرتوهای کیهانی با منشا خارج از منظومه شمسی.

۵-۲-۳

پرتوهای کیهانی خورشیدی

اشعه‌های کیهانی خورشیدی

ذرات خورشیدی

پرتوهای کیهانی با منشا خورشیدی.

۶-۲-۳

رویداد ذرات خورشیدی<sup>۲</sup>

SPE

آهنگ بزرگی از فلوننس ذرات خورشیدی پرنرژی پرتاب شده به فضا بوسیله انفجار خورشیدی، یا افزایش ناگهانی پرتوهای کیهانی مشاهده شده هنگامی که ذرات به زمین می‌رسند .

۷-۲-۳

رویداد سطح زمین<sup>۳</sup>

GLE

افزایش ناگهانی پرتوهای کیهانی، مشاهده شده روی سطح زمین و در ارتفاعات پروازی مربوط به رویداد ذرات خورشیدی که دارای شار بالایی از ذرات با انرژی بالا است (بیشتر از ۵۰۰ MeV).  
یادآوری: GLE ها نادر می‌باشند و به طور متوسط یک بار در سال اتفاق می‌افتند.

۸-۲-۳

مدولاسیون خورشیدی

تغییر میدان GCR (خارج از مگنتوسفر زمین) ناشی از تغییر فعالیت خورشید و در نتیجه تغییر میدان مغناطیسی هلیوسفر.

۹-۲-۳

چرخه خورشیدی

---

1- Galactic cosmic rays  
2- solar particle event  
3- ground level event

دوره‌ای که طی آن فعالیت خورشیدی با بیشینه توالی تفکیک شده توسط یک میانگین فاصله زمانی حدود ۱۱ سال تغییر می‌کند، چرخه خورشیدی نامیده می‌شود.

**یادآوری ۱-** اگر واژگونی قطبیت میدان مغناطیسی خورشید به طور متوالی در یک دوره زمانی ۱۱ سال باشد، چرخه خورشیدی کامل به طور میانگین ۲۲ سال در نظر گرفته می‌شود.

**یادآوری ۲-** چرخه لکه خورشیدی، که بوسیله تعداد نسبی لکه‌های خورشیدی اندازه‌گیری شده طول تقریبی ۱۱ سال دارد، بین ۷-۱۷ سال متغیر می‌باشد. چرخه تقریبی ۱۱ سال در ژئومغناطیس، تکرار فجر و سایر مشخصه‌های یونوسفری یافت یا پیشنهاد شده است. اندیس  $U$  تغییر شدت ژئومغناطیس، یکی از قوی‌ترین همبستگی‌های شناخته شده با فعالیت خورشیدی را نشان می‌دهد.

۱۰-۲-۳

### تعداد نسبی لکه‌های خورشیدی

میزان فعالیت لکه خورشیدی محاسبه شده با عبارت  $k(10g + f)$  که  $f$  تعداد لکه‌های منفرد،  $g$  تعداد گروه لکه‌ها و  $k$  ضریبی است که با شناخت تجربه شخصی مشاهده کننده و با رصدخانه (محل و تجهیزات) تغییر می‌کند.

**یادآوری-** تعداد نسبی لکه خورشیدی به نام "تعداد wolf" نیز شناخته می‌شود.

۱۱-۲-۳

### بیشینه خورشیدی

دوره زمانی بیشینه فعالیت خورشید طی یک چرخه خورشیدی که معمولاً بر حسب تعداد نسبی لکه‌های خورشیدی تعریف می‌شود.

۱۲-۲-۳

### کمینه خورشیدی

دوره زمانی کمینه فعالیت خورشید طی یک چرخه خورشیدی که معمولاً بر حسب تعداد نسبی لکه‌های خورشیدی تعریف می‌شود.

۱۳-۲-۳

### پایش اشعه نوترون کیهانی

پایش نوترون سطح زمین<sup>۱</sup>

GLNM



آشکارساز بزرگ به منظور استفاده در اندازه‌گیری آهنگ فلوننس نسبی وابسته به زمان پرتوهای کیهانی با انرژی بالا، که بطور خاص نوترون‌های ثانویه ایجاد شده در جو می‌باشند، اما می‌تواند شامل پروتون‌ها، سایر هادرون‌ها، و موآن‌ها نیز باشند.

یادآوری- این آشکارسازها در مکان‌ها و ارتفاعات مختلف از سطح زمین در جهان نصب شده‌اند (و گهگاه روی کشتی‌ها و هواپیما قرار می‌گیرند)، پیشگرهای پرتو نوترون کیهانی برای مطالعات پرتوی کیهانی گوناگون و تعیین مدولاسیون خورشیدی استفاده می‌شوند.

## ۴ ملاحظات کلی

### ۱-۴ توصیف کلی میدان پرتوهای کیهانی در اتمسفر

زمین به طور مداوم توسط ذرات پرنرژی بنام پرتوهای کیهانی کهکشانی (GCR) که از خارج از منظومه شمسی می‌آیند، بمباران می‌شود و گاهی نیز در معرض انفجارهای ذرات پرنرژی ساطع شده از خورشید قرار می‌گیرد. این پرتوهای کیهانی اولیه که با هسته‌های اتمی سازنده اتمسفر برهمکس می‌کنند، با ایجاد زنجیره‌ای از برهمکنش‌ها و محصولات واکنش ثانویه در تابش پرتوهای کیهانی سهیم می‌شوند و چگالی آنها با عمق در اتمسفر از ارتفاع‌های هواپیما تا سطح دریا کاهش می‌یابد [۶-۴]. پرتوهای کیهانی خورشیدی که در انتهای این بخش بحث شده است دز بسیار کوچکتري از GCR دارند. در حدود ۹۸٪ از GCR، هسته‌های اتمی یونیزه شده و ۲٪ الکترون‌ها هستند. از هسته‌ها، ۹۰٪ پروتون‌ها (هسته‌های هیدروژن)، ۹٪ یون‌های هلیوم و ۱٪ یون‌های سنگین‌تر هستند [۷]. آنها می‌توانند انرژی تا حدود  $10^{20}$  eV داشته باشند، اما ذرات کم انرژی‌تر فراوانی بیشتری دارند. پس از نفوذ GCR در میدان مغناطیسی منظومه شمسی، قله توزیع انرژی آن، بسته به فعالیت مغناطیسی خورشید از چند صد MeV تا ۱ GeV به ازای هر نوکلئون می‌باشد، و این طیف از تابعی نمایی از  $eV^{-2.7}$  تا  $10^{15}$  eV پیروی می‌کند؛ بالاتر از آن انرژی، طیف به  $E^{-3}$  eV سرایشی پیدا می‌کند. آهنگ فلوننس GCR وارد شده به منظومه شمسی به خوبی نسبت به زمان ثابت است، و این یون‌های پرنرژی از تمام جهات نسبتاً یکسان به زمین می‌رسند.

از آنجایی که ذرات پرتوهای کیهانی دارای بار الکتریکی هستند، مسیر آنها هنگام عبور از میدان مغناطیسی خمیده می‌شود. هرچه اندازه حرکت هر یون به ازای واحد بار (سختی مغناطیسی) کمتر باشد، خمیدگی مسیر آن بیشتر می‌شود. میدان مغناطیسی که در منظومه شمسی نفوذ می‌کند و میدان مغناطیسی قوی‌تر زمین، به عنوان محافظی عمل می‌کنند که تعداد اندازه حرکت‌های پایین GCR برخوردکننده با اتمسفر و در نتیجه آهنگ دز اشعه کیهانی پایین‌تر را کاهش می‌دهد.

خورشید دارای میدان مغناطیسی متغیر با یک ترکیب پایه‌ای دو قطبی است که جهت آن تقریباً هر ۱۱ سال معکوس می‌شود. نزدیک به زمان معکوس شدن، در «بیشینه خورشیدی»، تعداد زیادی لکه‌های خورشیدی و سایر جلوه‌های آشفتگی‌های مغناطیسی وجود دارد، و پلاسمای پروتون‌ها و الکترون‌های پرتاب شده از خورشید (بادهای خورشیدی) میدان مغناطیسی نسبتاً قوی و پیچ و تاب خورده‌ای را به سمت خارج از درون منظومه شمسی حمل می‌نماید. در بیشینه خورشیدی، GCR بیشترین انحراف را در حین وارد شدن به منظومه شمسی دارد، در نتیجه کمترین پرتودهی در زمین ایجاد می‌شود. در بین زمان‌های معکوس شدن،

در «کمینه خورشیدی»، تعداد کمی لکه خورشیدی وجود دارد و میدان مغناطیسی هلیوسفر نسبتاً ضعیف و ملایم است. بنابراین یک کمینه خورشیدی زمانی است که پرتودهی بیشینه است. تغییر نسبی در آهنگ‌های دز ناشی از این مدولاسیون خورشیدی به دو متغیر اصلی موثر بر پرتودهی کیهانی در اتمسفر یعنی عرض جغرافیایی ژئومغناطیسی و ارتفاع بستگی دارد.

میدان مغناطیسی زمین نسبت به میدان مغناطیسی خورشید تاثیرات بیشتری بر ذرات پرتوهای کیهانی که به اتمسفر می‌رسند دارد. نزدیک خط استوا، جایی که میدان ژئومغناطیسی تقریباً موازی با زمین است، ذرات با سختی مغناطیسی کمتر از ۱۵ GV که بصورت عمودی برخورد می‌کنند با خمش به سمت فضا برمی‌گردند. حداقل سختی‌ای که یک ذره عمودی بتواند داشته باشد تا کماکان به جایگاه معینی برسد را «سختی برش<sup>۱</sup> ژئومغناطیسی عمودی» برای آن نقطه می‌گویند. نزدیک به قطب‌های مغناطیسی، جایی که میدان ژئومغناطیسی تقریباً عمودی است، میزان برش عمودی به صفر نزدیک می‌شود، و بیشترین تعداد پرتوهای کیهانی اولیه می‌توانند به اتمسفر برسند. در نتیجه، آهنگ پرتودهی تابش کیهانی در مناطق قطبی بیشترین است و به سمت استوا کاهش می‌یابد. اندازه این اثر بستگی به ارتفاع و فاز چرخه خورشیدی دارد.

میدان‌های مغناطیسی زمین و خورشید نیز تعداد نسبی پروتون‌ها و یون‌های سنگین‌تر GCR رسیده به اتمسفر را تغییر می‌دهند. ترکیب یون‌های GCR وارد شونده به اتمسفر با فرض فوق (۹۰٪ پروتون‌ها، ۹٪ یون‌های هلیوم و ۱٪ هسته‌های سنگین‌تر)، برای برش ژئومغناطیسی کم و فعالیت خورشیدی کم، صحیح است. در برش عمودی ۱۵ GV، این ترکیب تقریباً به صورت ۸۳٪ پروتون‌ها، ۱۵٪ یون‌های هلیوم و تقریباً ۲٪ یون‌های سنگین‌تر است.

تغییر در مؤلفه‌های معادل دز محیط<sup>۲</sup> که در اثر ساختارهای مختلف پرتوهای کیهانی ثانویه به صورت تابعی از ارتفاع، در اتمسفر ایجاد می‌شوند در شکل ۱ شرح داده شده است. در ارتفاعات کم، مؤلفه موآن<sup>۳</sup> مهم‌ترین سهم در معادل دز محیط و دز موثر می‌باشد؛ در ارتفاعات هواپیمایی، نوترون‌ها، الکترون‌ها، پوزیترون‌ها، فوتون‌ها و پروتون‌ها مهم‌ترین مؤلفه‌ها هستند. در ارتفاعات بالاتر یون‌های هسته‌ای سنگین‌تر از پروتون‌ها شروع به سهم شدن می‌کنند. شکل‌های نمونه نشان دهنده توزیع انرژی نرمالیزه شده آهنگ‌های فلوننس همه ذرات مهم در برش‌های کم و زیاد و ارتفاعات در کمینه و بیشینه خورشیدی در پیوست الف نشان داده شده است.

همچنین زمین در معرض انفجار پروتون‌ها و ذرات سنگین‌تر پر انرژی حاصل از آشفتنگی‌های مغناطیسی نزدیک به سطح خورشید و پرتاب مقادیر عظیم مواد (توده‌های تاج خورشیدی<sup>۴</sup>) است، که در بعضی موارد همراه با شتاب گرفتن توسط CME ها و امواج ضربه‌ای به بادهای خورشیدی وابسته می‌باشند. ذرات این رویدادهای ذره‌ای خورشیدی یا رخداد‌های پروتون‌های خورشیدی<sup>۵</sup> (که هر دو آنها SPE نامیده می‌شوند)، از نظر انرژی بسیار کمتر از GCR می‌باشند: عموماً کمتر از ۱۰۰ MeV و به ندرت بالاتر از ۱۰ GeV SPE ها

---

1- Cut off

2- Ambient dose equivalent

3- Muon

4 -CME

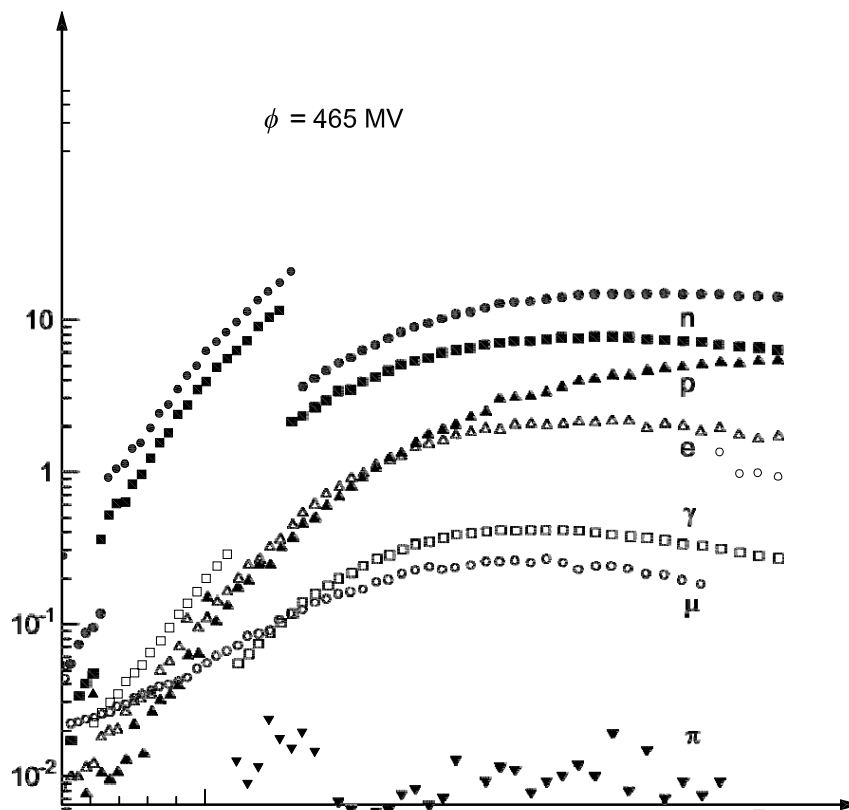
5 - Solar particle/proton events

دوره کوتاهی دارند، چند ساعت تا چند روز، و آهنگ فلوننس ذرات به شدت متغیر است. تنها بخش کوچکی از SPE ها، به طور میانگین یک مورد در هر سال، تعداد زیادی ذرات پر انرژی تولید می کند، که آهنگ های دز چشمگیری را در ارتفاعات بالا و برش های ژئومغناطیسی کم ایجاد می کند و می تواند به وسیله پایشگرهای نوترونی روی زمین مشاهده شود. چنین رویدادهایی را رخدادهای سطح زمین<sup>1</sup> (GLE) می نامند. برای خدمه هواپیما، دز جمعی حاصل از GCR بسیار بیشتر از دز SPE ها است. SPE های قوی می توانند آهنگ دز GCR را با آشفته ساختن میدان مغناطیسی زمین به شکل تغییر آهنگ فلوننس ذرات GCR رسیده به اتمسفر، تحت تاثیر قرار دهند.

#### ۲-۴ ملاحظات کلی کالیبراسیون برای دزیمتری میدان های پرتو کیهانی در هواپیما

##### ۱-۲-۴ رویکرد

رویکرد کلی ضروری برای اندازه گیری و کالیبراسیون در بخش ۲-۴ ارائه شده است. جزئیات میدان ها و فرآیندهای کالیبراسیون در آینده در قسمت ۲ استاندارد ISO 20785 ارائه خواهد شد.



راهنما:

X ارتفاع (km)

Y نرخ معادل دز محیط ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ )

شکل شماره ۱- نرخ های معادل دز محیط محاسبه شده به عنوان فاکتور ارتفاع بارومتری استاندارد برای پرتوهای کیهانی جوئی مختلف حاوی ذرات

1 - ground level events

#### ۴-۲-۲ ملاحظات اندازه‌گیری

معادل دز محیط را نمی‌توان مستقیماً با استفاده از فن‌آوری‌های رایج دزیمتری اندازه‌گیری کرد [۹]. تعیین تجربی معادل دز محیط برای میدان‌های پرتوی پیچیده‌ای که در اینجا در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱ را ببینید) نیز بطور ویژه دشوار است. یک رویکرد تقریبی استفاده از شماره‌های تناسبی معادل بافت<sup>۱</sup> (TEPC) برای اندازه‌گیری معادل دز در توده کوچکی از بافت با اندازه‌گیری توزیع دز جذبی در انرژی خطی (که یک تقریب برای انتقال خطی انرژی LET است) با تصحیحات بکار رفته، و بکارگیری مستقیم ضریب کیفیت وابسته به LET می‌باشد.

دزیمتری میدان پرتو دهی در هواپیما نیازمند فن‌آوری‌های اختصاصی اندازه‌گیری و محاسبه است. رویکرد ترجیحی آن استفاده از ابزارهایی است که دارای پاسخ معادل دز محیطی مستقل از انرژی و جهت کلی میدان یا مؤلفه آن میدانی که تعیین می‌گردد، باشد. به طور کلی به کارگیری تصحیحات با استفاده از مشخصه‌های انرژی و جهت میدان و مشخصه‌های پاسخ معادل دز محیطی انرژی و زاویه ابزار ضروری می‌باشد.

#### ۴-۲-۳ ملاحظاتی در خصوص میدان پرتوی

میدان به طور اساسی شامل فوتون‌ها، الکترون‌ها، پوزیترون‌ها، موآن‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها است. سهم عمده‌ای از معادل دز ناشی از ذرات باردار سنگین پرنرژی اولیه<sup>۲</sup> (HZE) یا پاره‌ها وجود ندارد. الکترون‌ها، پوزیترون‌ها و موآن‌ها پرتوهای مستقیم یونساز هستند، و به همراه فوتون‌های یونساز غیر مستقیم و الکترون‌های ثانویه، از طریق نیروهای الکترومغناطیسی با مواد برهم‌کنش می‌کنند. نوترون‌ها (و بخش کوچکی از پایون‌ها)، از طریق این نیروی قوی با ایجاد ذرات مستقیم یونساز ثانویه برهم‌کنش می‌کنند. پروتون‌ها از طریق نیروی الکترومغناطیسی و از طریق واکنش‌های قوی شبه نوترونی هم مستقیم و هم غیرمستقیم یونساز هستند.

مؤلفه مستقیم یونساز و الکترون‌های ثانویه از فوتون‌های غیر مستقیم یونساز، مؤلفه غیرنوترونی را تشکیل می‌دهند. نوترون‌ها به علاوه واکنش‌های شبه نوترونی پروتون‌ها، مؤلفه نوترونی را تشکیل می‌دهند. برای اهداف دزیمتری، میدان می‌تواند به صورت دیگر به مؤلفه‌های انتقال خطی با انرژی پائین (low-LET) (بیشتر از  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) و انتقال خطی با انرژی بالا (high-LET) (کمتر از  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) تقسیم شود. این تعریف بر اساس وابستگی ضریب کیفیت به LET است. ضریب کیفیت کمتر از  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  مقدار واحد است. این تفکیک بین ذرات با LET پائین و LET بالا می‌تواند در مورد TEPC ها و سایر مواد و آشکارسازها بکار رود، اما آستانه low-LET/ high-LET می‌تواند بین  $5 \text{ keV}/\mu\text{m}$  تا  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  متغیر باشد. مؤلفه LET پائین شامل الکترون‌های مستقیم یونساز، پوزیترون‌ها و موآن‌های مستقیم یونساز؛ الکترون‌های ثانویه حاصل از برهم‌کنش‌های فوتونی، که بیشترین سهم را در پس گذاشتن انرژی به وسیله برهم‌کنش‌های مستقیم یونساز پروتون‌ها را دارا می‌باشند؛ و بخشی از پس گذاشتن انرژی به وسیله ذرات

1-tissue equivalent proportional counter  
2- Energetic primary heavy charged particles

ثانویه ناشی از برهم‌کنش‌های قوی پروتون‌ها و نوترون‌ها می‌باشد. مؤلفه LET بالا از بُرد نسبتاً کوتاه از ذرات ثانویه ناشی از برهم‌کنش‌های قوی پروتون‌ها و نوترون‌ها می‌باشد. سهم نسبی به معادل دز محیطی کل در مؤلفه LET پائین و نوترونی، و مؤلفه LET بالا و نوترونی و شبه نوترونی لزوماً یکسان نیستند، اما عموماً در بزرگی مشابه‌اند.

کمیت دز عملیاتی مرتبط برای این اهداف، معادل دز محیطی، با فرض کالیبراسیون و نرمالیزاسیون مناسب، بوسیلهٔ شمارندهٔ تناسبی معادل بافت (TEPC)، اتاقک یونساز ترکیب مجدد یا طیف نگار نیمه‌هادی بطور منطقی برآورد می‌شود. پس گذاشتن انرژی LET پائین یا غیرنوترونی می‌تواند با استفاده از یک اتاقک یونساز، آشکارساز سیلیکونی یا سوسو زن؛ یا یک لومینسانس غیرفعال یا آشکارساز انباشت یونی تعیین شود. LET بالا یا مؤلفهٔ نوترونی می‌تواند با استفاده از طیف وسیعی از نوترون‌سنج‌ها یا طیف‌نگارهای چند گره‌ای؛ و یا یک آشکارساز ردپای خورشی غیرفعال؛ آشکارساز حبایی و یا فویل شکافت با آشکارساز ردپای آسیب اندازه‌گیری شود. مجموع مؤلفه‌ها، LET پائین به علاوهٔ LET بالا، یا غیرنوترونی به علاوه نوترونی و شبه نوترونی، با کالیبراسیون و نرمالیزاسیون مناسب، معادل دز محیط کل را ایجاد می‌کند. برای اندازه‌گیری میدان‌های پرتوی پیچیده ضروری است که ابزارهای استفاده شده کاملاً در آزمایشگاه‌های کشوری جائیکه امکان آن وجود دارد شناسایی شوند، و به این ترتیب قابلیت ردیابی بطور کامل برقرار گردد.

تعاریف، اصطلاحات و جزئیات روش‌های معمول مورد استفاده در کالیبراسیون و استفاده از وسائل اندازه‌گیری، در اسناد ISO و ICRU های مختلف ارائه شده است (به عنوان مثال ISO 4037-3 [۸۵]، ISO 8529-3 [۸۸]، و گزارش ICRU 66 [۹]). تعیین عدم قطعیت‌های مربوط به هر دسته از اندازه‌گیری‌ها، بخش مهمی از دزیمتری است. عدم قطعیت‌های مربوط به روش‌های خاص دزیمتری اغلب از لحاظ آماری مستقل نیستند. حتی هنگامی که مستقل هستند، عدم قطعیت کل اغلب فقط ریشه مربع میانگین عدم قطعیت‌های منفرد نیست اما به روش اندازه‌گیری و تحلیل بستگی دارد. جزئیات در GUM آورده شده است.

#### ۴-۲-۴ ملاحظات کالیبراسیون

سهم اصلی میدان پرتوهی بر حسب معادل دز محیطی در ارتفاعات هواپیمایی حاصل از نوترون‌ها از چند صد keV تا چند GeV، پروتون‌ها از چند ده MeV تا چند GeV، الکترون‌ها، پوزیترون‌ها و فوتون‌ها از چند MeV تا چند GeV می‌باشد. تعیین هر دو مشخصه پاسخ، وابستگی انرژی و زاویه، برای ابزار مورد استفاده در تعیین معادل دز محیط در میدان پرتو کیهانی در هواپیما، در صورت امکان باید با استفاده از پرتوهای مرجع ISO انجام شود. با این حال، پرتوهای مرجع ISO نمی‌توانند به طور کامل گستره انرژی فوتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها را برای محسوب نمودن اکثریت سهم معادل دز محیطی پوشش دهند. به این ترتیب، میدان‌های کالیبراسیون اضافی برای برخی وسائل از جمله میدان‌های پرتو پروتونی مورد نیاز است.

برای تعیین مشخصه‌های پاسخ به مؤلفه‌های میدان پرتو LET پائین با انرژی بالا که برای آنها میدان‌های مرجع در دسترس نمی‌باشد، با اندازه‌گیری و محاسبه برای وسائل خاص، برای مثال شمارنده تناسبی معادل

بافت (TEPC) می‌توان نشان داد که جزئیات توزیع پس گذاشتن انرژی<sup>۱</sup> در حجم حساس این وسیله برای این مؤلفه‌ها مشابه آنهایی است که برای میدان R-F مرجع فوتونی انرژی بالا ISO است. چنین چیزی مشکلات خاصی در رابطه با تنظیم آستانه LET پائین در TEPC ها و سایر وسایل را مورد ملاحظه قرار می‌دهد [۱۰-۱۲]. میدان‌های نوترونی شبه- تک انرژی برای انرژی‌هایی تا حدود ۲۰۰ MeV در دسترس می‌باشند [۱۳-۱۷]. برای تعیین مشخصه‌های پاسخ نوترونی وسایل برای انرژی‌های بالاتر، گاهی ممکن است اندازه‌گیری‌ها با استفاده از پرتوهای پروتونی تک انرژی با تلفیقی از محاسبه، یا در میدان‌های نوترونی با توزیع انرژی گسترده همچنان با تلفیقی از محاسبه، صورت گیرد.

برای میدان‌های غیر ISO، تکنیکی قابل ردیابی برای اندازه‌گیری فلوئنس ذرات و تبدیل آن به معادل دز محیط با به کارگیری ضرایب تبدیل فلوئنس به دز می‌تواند استفاده شود.

#### ۴-۲-۵ شبیه سازی میدان‌های هواپیمایی

##### ۴-۲-۵-۱ میدان‌های بر مبنای شتاب‌دهنده

اندازه‌گیری پاسخ ابزار و مقایسه بین آنها را می‌توان در میدان نوترونی پرتو کیهانی شبیه سازی شده که توسط CERN<sup>۲</sup> طراحی و تولید شده و به عنوان CERF<sup>۳</sup> شناخته می‌شود، انجام داد [۱۸-۲۰]. میدان‌های مورد بحث توسط باریکه پروتون‌های پر انرژی و پایون‌ها با اندازه حرکت‌هایی برابر با ۱۲۰ GeV/c (مثبت یا منفی) یا ۲۰۵ GeV/c (مثبت) که بر هدف مسی برخورد می‌کنند تشکیل می‌شوند. حفاظ بتونی ضخیمی در طرف باریکه در جایگاه‌های هدف وجود دارد، و بسته به جایگاه هدف، یا آهن یا حفاظ بتونی در بالای آن قرار می‌گیرد. توده ۸۰ سانتی‌متری حفاظ بتونی تقریباً برابر با لایه هوایی در ارتفاعات پروازی ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری است. میدان‌های نوترونی با مشخصه مناسب در هر دو طرف ناحیه هدف و حفاظ‌های سقف جای گرفته‌اند. مؤلفه نوترونی (به علاوه سایر هادرون‌های) میدان پرتوی در هر جایگاه کالیبراسیون با استفاده از کد مونت کارلو FLUKA محاسبه شده است [۲۱]. شماری از اندازه‌گیری‌های اسپکترومتری چندگانه‌ای نیز اجرا شده‌اند. در حال حاضر، اندازه‌شناسی این میدان‌ها با استانداردهای ملی قابل ردیابی نیست.

##### ۴-۲-۵-۲ میدان پرتوهای کیهانی در کوهستان‌ها

میدان پرتوهای کیهانی زمین در ارتفاعات بالا، نزدیک‌ترین میدان‌های پرتوی به هواپیما می‌باشند [۲۲-۲۵]. اما همانند میدان‌های هواپیمایی شبیه‌سازی شده به وسیله شتاب‌دهنده‌ها، تفاوت این میدان‌ها با میدان‌های هواپیمایی واقعی می‌تواند بر مقایسه و/یا ارزیابی برخی دستگاه‌ها اثر بگذارد، لذا باید در نظر گرفته شوند. ترکیب و فلوئنس طیفی میدان پرتو کیهانی بر روی زمین، حتی در ارتفاع ۴ کیلومتری، دقیقاً شبیه میدان پرتو کیهانی در ارتفاعات هواپیمایی نیست. کسر دز حاصل از میون‌ها در ارتفاعات کمتر، بیشتر است. طیف نوترونی پرتو کیهانی بر روی زمین نسبتاً نوترون‌های با انرژی بیش از ۱۰ MeV بیشتری و با انرژی از ۱ eV تا حدود ۲ MeV کمتری داشته، و بیشتر نوترون‌های با انرژی دارد [۲۶]. مواد مختلف "زمین"،

---

1- Energy deposition  
 2- European organization for nuclear research  
 3- CERN-EU High-Energy Reference Field

مانند خاک، آب یا برف، بتن یا سایر مصالح ساختمانی، نوترون را به اشکال متفاوت پراکنده می‌کنند و می‌توانند بر شکل طیف نوترون اثر بگذارند.

#### ۳-۴ ضرایب تبدیل

ضرایب تبدیل فلوئنس به معادل دز محیطی به نوع ذرات و انرژی آنها بستگی دارد. داده‌های تا  $20 \text{ MeV}$  به حد کافی تهیه شده‌اند و بخشی از پیشنهادات بین‌المللی (ISO, IEC, ICRU 57) می‌باشند [۲۷]. مجموعه-ای از ضرایب تبدیل فلوئنس به معادل دز محیطی، برای همه ذرات و انرژی‌های مرتبط را می‌توان در مرجع [۲۸] یافت.

ضرایب تبدیل پیشنهادی در قسمت ۲ سند ISO 20785 ارائه خواهد شد.

### ۵ وسائل دزیمتری

#### ۱-۵ مقدمه

انواع آشکارسازهایی که می‌توانند برای اندازه‌گیری‌ها در تعیین معادل دز محیطی سرنشین هواپیما استفاده شوند، مشابه وسائل هستند که در آزمایشگاه‌های شتاب‌دهنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها می‌توانند به فعال یا غیرفعال، و یا بر اساس مؤلفه میدان مورد اندازه‌گیری، دسته‌بندی شوند (به عنوان مثال به منبع [۲۹] مراجعه شود). این قسمت از سند ISO 20785 اصولی را برای استفاده از این ابزارها در تعیین معادل دز محیطی ارائه می‌دهد.

#### ۲-۵ وسائل فعال

#### ۱-۲-۵ وسائلی برای تعیین تمامی مؤلفه‌های میدان

#### ۱-۱-۲-۵ طیف‌نگارهای پس‌گذاری انرژی

دو نوع اصلی از طیف‌نگارهای پس‌گذاری انرژی عبارتند از وسائل پر شده از گاز، به ویژه شمارنده‌های تناسبی معادل بافت (TEPC ها) و وسائل حالت جامد (عموما سیلیکون).

#### ۱-۱-۱-۲-۵ شمارنده‌های تناسبی معادل بافت

یک شمارنده تناسبی معادل بافت (TEPC) به ذرات مستقیم یونساز و ذرات غیرمستقیم یونساز از طریق ذرات باردار ثانویه‌ای که به وسیله آنها در دیواره‌های شمارنده به وجود می‌آید، حساس است. حجم حساس از گازی با ترکیب شیمیایی مشابه بافت، در یک فشار کم پر شده است تا محل بیولوژیکی به کوچکی چند میکرون را شبیه‌سازی کند. اگرچه تقارن کروی ایده‌آل است، TEPC ها عموماً استوانه‌ای هستند. پرتوهای برخوردی باعث تولید الکترون‌هایی در گاز می‌شوند که هنگام برقراری میدان الکتریکی بین آند و دیواره آشکارساز، توسط آند مرکزی جمع می‌شوند. هر رویداد (یا مسیر عبور ذره در گاز) یک سیگنال خروجی ایجاد می‌کند که بزرگی آن متناسب با انرژی پس‌گذاشته شده اولیه است. هر رویداد آشکار شده با استفاده از یک تحلیل‌گر ارتفاع پالس تحلیل می‌شود و به منظور ایجاد طیف توزیع انرژی خطی،  $d(y)$  ذخیره می‌شود، جاییکه  $y$  انرژی پس‌گذاشته شده تقسیم بر میانگین طول وتر آشکارساز است. برای بسیاری از اهداف عملی،

$\gamma$  به عنوان تقریبی از LET به کار می‌رود. مجموع انرژی پس‌گذاشته شده برای هر رویداد تقسیم بر جرم گاز، دز جذبی را حاصل می‌نماید. معادل دز را می‌توان به وسیله حاصل ضرب توزیع دز جذبی در فاکتور کیفی محاسبه کرد.

معادل دز محیطی بوسیله یک کالیبراسیون در میدان‌های مرجع تعیین می‌شود، اما توجه نمایید که برای استفاده، عموماً تصحیحی برای آستانه LET پایین‌تر وسیله به منظور تعیین معادل دز محیطی برای میدان‌های پرتوی کیهانی ضروری است. یک منبع داخلی ذرات آلفا ( $^{244}\text{Cm}$ ) می‌تواند برای کالیبره کردن بر حسب  $\gamma$  استفاده شود. به منابع [۳۰ و ۳۱] و منابع موجود در آنها مراجعه شود.

#### ۵-۲-۱-۱-۲-۵ طیف‌نگارهای پس‌گذاری انرژی حالت جامد

طیف‌نگارهای پس‌گذاری انرژی حالت جامد، انرژی پس‌گذاشته شده در یک یا چند آشکارساز سیلیکونی را اندازه‌گیری می‌کنند. اگر از یک آشکارساز استفاده شود، یک توزیع ارتفاع پالس ثبت می‌شود [۳۲]. در شکل دیگر ممکن است از چند آشکارساز با آستانه‌های LET متفاوت استفاده شود [۳۳]. دز کل سیلیکونی و توزیع LET آن می‌تواند به دز و/یا معادل دز بافت ارتباط داده شود. تعیین کالیبراسیون مناسب، امکان تعیین معادل دز محیطی را فراهم می‌سازد.

#### ۵-۲-۱-۲-۵ وسایلی بر پایه تعیین دز جذبی و میانگین ضریب کیفیت

معادل دز می‌تواند زمانی که یک وسیله توانایی تعیین همزمان دز جذبی و میانگین ضریب کیفیت در یک میدان پرتوی را دارد، نیز تعیین شود. این رویکرد شامل TEPC فعال شده در حالت واریانس/کوواریانس و اتاقک ترکیب مجدد است.

#### ۵-۲-۱-۲-۵ روش واریانس TEPC

روش واریانس [۳۴ و ۳۵]، روشی برای استفاده از یک TEPC یا سایر آشکارسازهای میکرودمتری برای اندازه‌گیری دز انرژی خطی میانگین،  $Y_D$  یک میدان پرتوی، بدون اندازه‌گیری طیف  $\gamma$  است. در این روش، نوسان در مقدار انرژی خاص، زمانی که انرژی به وسیله ذرات فراوان مستقل (رویدادها) در فواصل زمانی برابر پس‌گذاشته می‌شوند، تعیین می‌گردد. انرژی خاص دز میانگین تک رویداد برابر است با واریانس نسبی اندازه‌گیری‌ها ضرب در میانگین آنها. این میانگین، دز جذبی در آشکارساز است. استفاده از روش واریانس به مواردی محدود می‌شود که تابش نسبتاً ثابت باشد و نوسانات میکرودمتری تنها منشأ مهم تغییر در مقادیر اندازه‌گیری شده باشد. هنگامی که فرکانس تغییرات میدان پرتو قابل مقایسه و یا کمتر از زمان کلی ۱۰۰ میلی ثانیه باشد، روش واریانس-کوواریانس با استفاده از دو آشکارساز، برای اندازه‌گیری مورد نیاز است. با این حال عدم کوواریانس مشاهده شده قابل توجه بین دو آشکارساز در قسمت سرنشین هواپیما [۳۶]، نشان دهنده آن است که تغییرات شدت میدان در مقایسه با واریانس میکرودمتری کوچک بوده و روش واریانس با استفاده از یک آشکارساز نیز می‌تواند برای اندازه‌گیری‌های دزمتری هواپیما کافی باشد. برای کاربردهای عام، میانگین ضریب کیفیت از تابع خطی  $Y_D$  تعیین می‌شود. شیب و عرض از مبدا<sup>۱</sup> از مشخصات ابزار در



میدان‌های مختلف استاندارد تابش فوتونی و نوترونی تعیین می‌شود. در برخی کاربردها از جمله اندازه‌گیری تابش کیهانی، رویدادهای منفرد با LET بالا (بیش از  $150 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) را می‌توان در طیف رویداد چندگانه تفکیک و ضریب کیفیت را سازگار با سند ICRU 60 برای این کسر تعیین کرد.

#### ۵-۲-۱-۲-۲ اتاقک‌های ترکیب مجدد

اتاقک ترکیب مجدد از این واقعیت که ترکیب مجدد اولیه یون‌ها در حفره گاز اتاقک یونش بستگی به چگالی یونش موضعی دارد، استفاده می‌کند. چگالی یونش موضعی می‌تواند به LET ربط داده شود و اطلاعاتی درباره کیفیت پرتو در میدان‌های پرتوی مورد بررسی، فراهم کند [۳۷]. جریان اشباع اتاقک ترکیب مجدد متناسب با کل دز جذبی،  $D$  است. اندازه‌گیری‌های جریان یونش در یک ولتاژ "ترکیب مجدد" منتخب خاص، تعیین شاخص ترکیب مجدد کیفیت پرتو را و به این ترتیب، معادل دز را، و پس از تعیین مشخصات و کالیبراسیون، معادل دز محیطی را، ممکن می‌سازد [۳۸ و ۳۹].

تلفیق داده‌های اتاقک یونش با داده‌های به دست آمده از یک آشکارساز سوسو زن<sup>۱</sup> در حالت جریان بر اساس اصول مشابه در روش ترکیب مجدد است. اتاقک یونش دز جذبی را اندازه‌گیری می‌کند و میانگین ضریب کیفیت بر اساس کاهش بهره سوسو زنی در سوسو زن‌های آلی با افزایش LET ذرات انتقال دهنده انرژی، تعیین می‌شود [۴۰].

#### ۵-۲-۱-۳ شمارنده‌های سوسو زن

سوسو زن‌های آلی و معدنی عموماً با کارایی بالایی برای آشکارسازی فوتون‌ها و ذرات باردار به کار می‌روند. به علت محتوای زیاد هیدروژن و کربن، سوسو زن‌های آلی حجیم به عنوان آشکارسازهای نوترون نیز به کار می‌روند که کارایی آشکارسازی نوترون آنها بستگی به ضخامت ماده سوسو زن دارد. بنابراین، شمارنده‌های سوسو زن کوچک (با ضخامت سوسو زن در مرتبه سانتی‌متر)، که به عنوان دزیمر استفاده می‌شوند، اغلب کارایی آشکارسازی کافی برای دزیمتری نوترون ندارند، اما سوسو زن‌های آلی با اندازه مناسب (با ضخامتی در مرتبه چند ده سانتی‌متر) می‌توانند برای اهداف طیف‌نگاری استفاده شوند [۴۱ و ۴۲].

استفاده از شمارنده‌های سوسو زن به عنوان دزیمر در میدان‌های فوتونی با انرژی کم، به منظور تطبیق با یک پاسخ وابسته به انرژی تخت برحسب  $H^*(10)$  نیازمند الگوی ویژه‌ای از مواد جاذب در اطراف خود سوسو زن است. اگر چه شمارنده‌های سوسو زن با استفاده از میدان‌های فوتونی مرجع کالیبره می‌شوند، قرائت دستگاه‌ها در میدان تابش کیهانی می‌تواند به طور قابل توجهی با مقادیر واقعی و یا با قرائت یک اتاقک یونش، متفاوت باشد. این تفاوت را می‌توان با گستره محدود انرژی‌های اندازه‌گیری شده توسط این وسائل توضیح داد. ذرات باردار پر انرژی بالا می‌توانند انرژی بالاتر از حد بالای انرژی چند MeV را پس بگذارند که منجر به یک کاهش کارایی آشکارسازی برای این ذرات می‌گردد. قرائت دزیمر باید با در نظر گرفتن این مورد، تصحیح شود.

## ۵-۲-۲ وسائلی برای پرتوهای غیرنوترونی/LET پائین

### ۵-۲-۲-۱ اتاقک‌های یونش

اتاقک‌های یونش بر پایه جمع‌آوری الکترون‌ها و یون‌های ایجاد شده به وسیله پرتو در داخل یک گاز می‌باشند. تشکیل هر جفت الکترون-یون نیازمند حدود  $30 \text{ eV}$  انرژی است. یک میدان الکتریکی بین الکترودها اعمال می‌شود. الکترون‌ها و یون‌ها به وسیله الکترودها جمع‌آوری می‌شوند و بار یا جریان کل به وسیله یک الکترومتر اندازه‌گیری می‌شود. این سیگنال با انرژی کلی پس‌گذاشته شده بوسیله پرتو یونساز در گاز متناسب است. اتاقک‌های یونش می‌توانند در وضعیت‌های جریان یا پالس کار کنند [۴۳]. در بیشتر کاربردهای رایج، اتاقک‌های یونش در وضعیت جریان به صورت وسائلی جریان مستقیم استفاده می‌شود. اگرچه آشکارساز قادر به عمل کردن در هوای آزاد است، معمولاً اتاقک به صورت محفظه‌ای نفوذناپذیر نسبت به هوا استفاده می‌شود، که عموماً کروی یا استوانه‌ای شکل است. برای اندازه‌گیری‌های آهنگ دز پایین، به منظور افزایش حساسیت، اتاقک‌ها عموماً با گازهای بی اثر در یک فشار بالاتر پر می‌شوند. برای اندازه‌گیری در میدان‌های پرتوی مخلوط، یک ابزار نمونه دارای یک حجم حساس ۸ لیتری است که با آرگون در فشار  $2/5 \text{ MPa}$  پر شده است. پوسته و اجزای داخلی اتاقک با فولاد ضد زنگ جوشکاری شده‌اند.

### ۵-۲-۲-۲ شمارنده‌های گایگر مولر

تجهیزات بر پایه شمارنده گایگر مولر (GM) که بیشتر به صورت تجاری در دسترس هستند، اغلب برای تخمین پرتوهای با LET پایین در قسمت سرنشین هواپیما نیز استفاده می‌شوند. کاربرد این تجهیزات بسیار ساده بوده و اندازه‌گیری‌های از سطوح مربوط به پرتوهای طبیعی زمینه تا ارتفاعات بالا را با دقت بالای آماری انجام می‌دهند. شمارنده‌های GM رویدادهای ناشی از ذرات مستقیم یونساز و فوتون‌ها را، تقریباً بدون پاسخ به نوترون‌ها (کمتر از ۰.۵٪) ثبت می‌کنند. شمارنده‌های GM با کالیبره شدن در یک میدان پرتو استاندارد  $^{60}\text{Co}$ ، پاسخ تقریباً مشابه با پاسخ اتاقک یونش نسبت به پرتو کیهانی نشان می‌دهند.

### ۵-۲-۲-۳ دزیمترهای فردی الکترونیکی

شماری از دزیمترهای فردی الکترونیکی پاسخ آبی غالباً با استفاده از آشکارسازهای سیلیکونی و نیز نوع دیگری که یک اتاقک یونش کوچک پر شده از گاز با یک سلول حافظه نیمه‌هادی غیرفرار را به هم می‌پیوندد، در دسترس می‌باشند [۴۷ تا ۴۹]. بیشتر این دزیمترها برای اندازه‌گیری پرتوهای فوتون و بتا طراحی شده‌اند. برخی از آنها دارای کپسوله‌های معادل بافت هستند و می‌توانند برای اندازه‌گیری مؤلفه LET پایین میدان هواپیما در نظر گرفته شوند. تعداد کمی از دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری میدان‌های نوترون تا حدود  $10 \text{ MeV}$ ، به صورت مجزا یا به صورت وسائلی تلفیقی فوتون-نوترون طراحی شده‌اند. قبل از استفاده از چنین دزیمترهایی باید مشخصات پاسخ آنها به پروتون‌ها و نوترون‌های پر انرژی به صورت کامل شناسایی شود.

## ۵-۲-۳ وسائلی برای مؤلفه پرتوهای نوترونی/LET بالا

### ۵-۲-۳-۱ وسائلی کندشونده

وسائل کُندشونده-گیراندازی یک آشکارساز نوترون حرارتی احاطه شده با یک کُندکننده هیدروژنی را به کار می‌گیرد و غالباً برای تعیین  $H^*(10)$  در میدان‌های نوترونی به کار می‌رود [۹]. چنین وسائلی، که اغلب رم متر<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند، عموماً با افزایش انرژی در محدوده MeV، یک پاسخ معادل دز کاهشی را نشان می‌دهند. این مسئله هم برای گره‌های همگن (شامل آشکارسازهای طیف نگار چندگره‌ای) و هم برای آشکارسازهایی با لایه‌های جاذب نوترون برای شبیه سازی پاسخ معادل دز مورد نیاز، صدق می‌کند. در پایش‌های نوترونی پرتوهای کیهانی، از سرب برای تبدیل ذرات پرنرژی، به خصوص نوترون‌ها، به نوترون‌های کم انرژی چندگانه که به آسانی کُند و آشکار می‌شوند، استفاده می‌گردد [۵۰]. این اصل تبدیلی در ابزارهای جستجوگر برای استفاده روزمره در شتاب‌دهنده‌های پرنرژی LINUS (جستجوگرهای نوترون سنج طویل) که از یک مبدل سرب استفاده می‌کنند [۵۱ و ۵۲]، یک وسیله مشابه (NM500X) [۵۳]، و WENDI (ابزار آشکارسازی نوترون با انرژی گسترده) [۵۴]، که از تنگستن هم به عنوان ماده تولید کننده نوترون بالاتر از ۸ MeV و هم به عنوان ماده جاذب برای نوترون‌های کمتر از چندین keV استفاده می‌کند، اجرا می‌گردد. وسایل اندازه‌گیری نوترون، مانند وسایل کُندشونده با طیف گسترده که در اینجا شرح داده شد، همچنین می‌توانند به واکنش‌های شبه‌نوترونی (نیروی قوی) پروتون‌ها و، با اهمیت کمتر به پایون‌ها، پاسخ دهند. با کالیبراسیون مناسب، این وسایل می‌توانند سهم معادل دز محیطی مؤلفه نوترونی، به علاوه مؤلفه‌های شبه-نوترونی در میدان را، اندازه‌گیری کنند.

#### ۵-۲-۲-۲-۵ طیف‌سنج‌ها

#### ۵-۲-۳-۲-۵ ملاحظات عمومی

طیف‌سنج‌ها تجهیزاتی هستند که برای اندازه‌گیری توزیع انرژی فلوننس ذره،  $\Phi_E$ ، یا آهنگ فلوننس به کار می‌روند. اگر  $\Phi_E$  برای یک نوع ذره معلوم، مشخص باشد، معادل دز محیطی ناشی از آن نوع ذره از رابطه

$$H^*(10) = \int \Phi_E h^* \cdot dE$$

تعیین می‌شود که E انرژی ذره و  $h^*$  ضریب تبدیل فلوننس به معادل دز محیطی ذره می‌باشد. مقادیر  $h^*$  برای نوترون‌ها، فوتون‌ها، الکترون‌ها و پروتون‌ها در سراسر گستره وسیع انرژی موجود در میدان‌های پرتو کیهانی اتمسفری محاسبه شده است [۲۸]. اندازه‌گیری‌ها با طیف‌سنج‌ها می‌تواند تاییدی برای محاسبات  $\Phi_E$  که بر مبنای دزسنجی عددی هستند، باشد. طیف‌سنج‌ها همچنین در اندازه‌گیری  $H^*(10)$  مخصوصاً از پرتوها با LET بالا، مفید می‌باشند مانند نوترون‌ها و یون‌های هسته‌ای که Q و  $h^*$  قویاً به انرژی ذره بستگی دارد.

#### ۵-۲-۳-۲-۵ طیف‌سنج‌های نوترونی

از میان انواع زیاد طیف‌سنج‌های نوترونی فعال [۵۵]، دو نوع آنها دارای حساسیت کافی بالا جهت اندازه‌گیری توزیع انرژی پرتو نوترونی کیهانی در هواپیما می‌باشند: طیف‌سنج‌های آشکارساز- چندگانه کُندشونده- و-

1- rem meter

گیراندازی (چندگُره‌ای) و طیف‌سنج‌های پروتون پس‌زنی با بکارگیری سوسو زن‌های جامد یا مایع آلی. برای اندازه‌گیری در هواپیما فقط طیف‌سنج‌های چندگُره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

یک طیف‌سنج نوترونی چندگُره‌ای [۵۶ و ۵۷] شامل مجموعه‌ای از گُره‌های کُندکننده پلی‌اتیلنی و هرکدام با یک آشکارساز در مرکز آن با دارا بودن پاسخی بزرگ نسبت به نوترون‌های حرارتی می‌باشد. کندکننده بزرگتر برای نوترون‌های فرودی با انرژی بالاتر می‌باشد که در مجموعه آشکارساز-گُره راندمان آشکارسازی خوبی دارد. در صورتی که آهنگ شمارش نوترون‌ها و تابع‌های پاسخ آشکارسازها معلوم باشند یک کد محاسبه‌گر بازیابی طیف (آنفولدینگ)<sup>۱</sup> برای مشخص کردن طیف نوترون به کار می‌رود. گزارش ICRU 66 [۹] شامل مقدمه‌ای بر اصول و بکارگیری طیف‌سنج‌های نوترونی چندگُره‌ای برای توصیف میدان‌های نوترونی در محل کار همراه با فهرست جامعی از منابع و بحث بر روی اصلاحات لازم جهت بکارگیری در میدان‌های با انرژی بالا است. مبدل‌ها با عدد اتمی بالا (بند ۱-۲-۲-۵ را ببینید) برای ساخت مجموعه‌های آشکارسازهای انرژی بالا به کار می‌روند و اجازه می‌دهند تا طیف‌سنج‌های چندگُره‌ای برای اندازه‌گیری تمامی توزیع انرژی نوترون‌های پرتو کیهانی (حرارتی تا انرژی بیشتر از ۱۰ GeV) بر روی سطح زمین [۲۲ و ۲۴ و ۲۶] و در هواپیما [۲۴ و ۲۶] بکار روند. برای اندازه‌گیری توزیع انرژی نوترون به تنهایی، آهنگ شمارش‌های خام مجموعه آشکارسازها مخصوصاً با مبدل‌های فلزات سنگین بایستی برای شمارش‌های ناشی از پروتون‌های پرنرژی پرتوهای کیهانی تصحیح شوند [۲۶]. طیف‌سنج‌های نوترونی چند گُره‌ای برای بکارگیری در هواپیما تا حدی بزرگ و سنگین هستند و تحلیل داده‌های آنها پیچیده است بنابراین بهتر است برای تعیین مقادیر مرجع آهنگ‌های  $H^{*(10)}$  و تأیید محاسبات  $\Phi_E$  برای نوترون‌ها به کار برده شوند تا برای پایش مداوم و رایج. طیف‌سنج‌های چندگُره‌ای غیرفعال برای اندازه‌گیری در هواپیما ایجاد شده‌اند [۵۸ و ۵۹]. این چنین طیف-سنج‌ها خیلی فشرده هستند و احتیاجی به منبع تغذیه یا مداخله فنی در هنگام پرواز ندارند اما نسبتاً غیرحساس هستند. طیف‌سنج‌های چندگُره‌ای غیرفعال بر پایه انواع آشکارسازهای خورشی بهبود یافته (۲-۳-۵) آشکارسازهای فویلی شکافت (۳-۳-۵) استوار است. به عنوان یک گزینه برای تعیین توزیع انرژی نوترون، تخمین سختی طیف می‌تواند با ارزیابی نسبت پاسخ آشکارسازها با مبدل‌های شکافت‌پذیر مختلف صورت گیرد [۵۹ و ۶۰]. همچنین طیف آشکارسازهای شکافت در طیف‌سنج‌های چندگُره‌ای به منظور پوشش دادن قسمت انرژی بالای طیف به کار گرفته شده‌اند [۵۷].

### ۳-۵ وسایل غیرفعال

#### ۱-۳-۵ ملاحظات عمومی

آشکارسازهای غیرفعال برای اندازه‌گیری معادل دز تجمعی محیطی در طول پروازها یا شماری از پروازها مناسب هستند. حساسیت و زمینه ذاتی باید در نظر گرفته شود. انواع اصلی وسایل غیرفعال برای مولفه‌های نوترون با LET بالا شامل آشکارسازهای ردپای خورشی و امولسیون فوق گرم هستند (همچنین به عنوان آشکارسازهای تخریب حباب یا قطره فوق گرم شناخته شده‌اند). هر دو نوع این آشکارسازها نسبت به پروتون‌های پرنرژی پاسخ دارند؛ بعید است که سهم قابل انتظار از پروتون‌های پرنرژی نسبت به قرائت از ۵

1- unfolding

تا ۱۰ درصد تجاوز کند. عموماً پاسخ معادل دز محیطی این نوع آشکارسازهای غیرفعال نوترون برای میدان‌های نوترونی در هواپیما پایین‌تر از میدان‌های مرجع ISO که تا ۲۰ MeV گسترش می‌یابد می‌باشد. عدم قطعیت بزرگ مرتبط با یک اندازه‌گیری با بکارگیری آشکارساز ردپای منفرد می‌تواند با بکارگیری تعداد زیادتری از آنها کاهش یابد. همچنین آشکارسازهای ردپا می‌تواند با فویل‌های شکافت با حساسیت کافی به کار گرفته شود.

انواع اصلی آشکارسازهای غیرفعال برای مولفه غیرنوترونی با LET پایین شامل آشکارسازهای ترمولومینسانس، لومینسانس تحریک نوری و فوتولومینسانس (TL، OSL و RPL) است. انواع متعددی می‌تواند برای تعیین سطح پرتوگیری در محل به کار گرفته شود مانند LiF:Mg,Cu,P؛ LiF:Mg,Ti و یا CaSO<sub>4</sub>:Dy؛ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C؛ شیشه‌های Al-P. اخیراً مواد TL حساس‌تری ایجاد شده‌اند که اجازه می‌دهد مقادیر اندازه‌گیری معادل دز محیطی تا حدود ۱ μSv پایین‌تر بیاید. پاسخ به نوترون‌ها مخصوصاً نوترون‌های پراثری بایستی مورد بررسی قرار گیرد.

### ۵-۳-۲ آشکارسازهای ردپای خورشی<sup>۱</sup>

ردپاهای ذرات ثانویه ایجاد شده بر روی ماده آشکارساز با عبور ذرات باردار اولیه و یا تولید شده در طی واکنش‌های هسته‌ای نوترون در آشکارساز و/یا اطراف آن، بوسیله خورش شیمیایی محل تخریب «دنباله‌ها» ثبت می‌شود. جزئیات ویژگی‌های آشکارساز ردپای خورشی را در مراجع [۶۱ و ۶۲] می‌توان یافت. متداول‌ترین ماده استفاده شده برای اندازه‌گیری‌های GCR، پلی‌آلیل‌دی‌گلایکول کربنات (PADC)، و همچنین با نام شناخته شده تجاری (CR-39) [۶۳] است. همچنین آشکارسازهای مشابه نیز می‌تواند برای تعیین طیف ذرات با LET بین حدود ۵ keV/μm تا ۱۰ keV/μm و ۵۰۰ keV/μm تا ۱۰۰۰ keV/μm در آب به کار گرفته شود. توزیع دز جذبی در LET نیز می‌تواند اندازه‌گیری شود و از روی آن می‌توان دز معادل را تعیین کرد. ابعاد بزرگی تعداد ردپای ذرات ثانویه، که اکثریت پروتون‌ها هستند، اندازه‌گیری می‌شوند و LET این ذرات از طریق توصیف پارامترهای ردپا از نمونه‌هایی از مواد ردپای خورشی برای پروتون و پرتوهای ذرات باردار سنگین تعیین می‌گردد [۶۴].

در میان انواع دیگر مواد، پلی‌کربنات به دلیل پایین بودن پایدار زمینه آن و تکرارپذیری پاسخ مورد توجه قرار دارد. علاوه بر این، بطری‌ها و لوله‌های آزمایش پلی‌کربناتی شامل بطری‌های آشکارسازهای حبابی ممکن است به عنوان آشکارسازهای ردپا به کار گرفته شوند [۶۵]. این بطری‌های پلی‌کربناتی به عنوان آشکارسازهای پشتیبان برای وسایل حبابی، زمانی که پاسخ در حالت رخداد فعالیت شدید خورشیدی اشباع می‌شود می‌تواند مفید باشد. مشکلات محدودیت پاسخ و نسبت سیگنال به نویز پایین این آشکارسازها با ردپاهای شمارش همزمانی بر سطوح تطبیق یافته آشکارسازهای جفتی حل شده‌اند.

### ۵-۳-۳ آشکارسازهای فویلی شکافت<sup>۲</sup>

1- Etched track detectors  
2- Fission foil detectors

ثبت حفره‌های میان جرقه‌ای تولید شده به وسیله ردپاهای خورشی پاره‌های شکافت در فیلم‌های پلاستیکی نازک (پلی‌اتیلن تترافتالات و پلی‌کربنات) برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون از سال ۱۹۷۵ به کار گرفته شده‌اند [۶۶]. سطح مقطع‌های شکافت حاصل از برخورد نوترون برای بعضی هسته‌های سنگین ( $^{232}\text{U}$ ،  $^{238}\text{U}$ ،  $^{209}\text{Bi}$ ،  $^{232}\text{Th}$ ) به طور بین‌المللی به عنوان استانداردهای ثانویه پایش شار نوترون در ناحیه انرژی بالای MeV ۲۰ توصیه می‌شود. در میان این عناصر سنگین،  $^{209}\text{Bi}$  مفیدترین استاندارد برای مطالعات نوترون‌ها با انرژی بالا به دلیل زیر است:

(الف) نداشتن واکنش با نوترون‌های کم انرژی

(ب) تغییر ملایم سطح مقطع با انرژی نوترون

(ج) استفاده و حمل و نقل ساده و آسان تا زمانی که پرتوزا نباشد

ویژگی‌های جالب واکنش‌های شکافت با به کارگیری انواع مختلف آشکارسازهای پاره‌های شکافت می‌تواند برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون به کار گرفته شود که بیشترین موارد مورد توجه به شرح زیر است:

- اتاقک‌های شکافت

- شمارنده‌های پارگی فیلم نازک

- آشکارسازهای ردپای تخریبی پاره‌های شکافت

حساسیت پایین می‌تواند جهت به کارگیری آشکارسازهای نوع شکافت در خیلی از وضعیت‌های انرژی بالا یک ایراد جدی باشد، اما می‌توان بر آن حتی در یک چنین سطح مقطع شکافت پایینی همانند بیسموت با به کارگیری یک شمارنده پیشرفته و دستورالعمل‌های ویژه شمارش، فائق آمد [۶۷].

### ۵-۳-۴ آشکارسازهای امولسیون فوق گرم نوترون (آشکارسازهای حبابی)

آشکارسازهای امولسیون فوق گرم نوترون (با آشکارسازهای حبابی نوترون) به عنوان آشکارسازهای غیرفعال برای پایش نوترون در ارتفاعات پروازی هواپیما به دلیل قابلیتشان به عنوان یک آشکارساز قرائت مستقیم و کاملاً غیرحساس به پرتو گاما به کار گرفته شده‌اند و آنها می‌توانند دز معادل محیطی را تا حد پایین  $1 \mu\text{Sv}$  برآورد کنند [۶۸ و ۶۹].

آشکارساز امولسیون فوق گرم نوترون یک بطری پلی‌کربنات کوچک است که حاوی قطره‌های کوچک یک مایع فوق گرم پخش شده در سراسر یک محیط ماده چسبناک لزج (وسیکوالاستیک) است. هنگامی که نوترون‌ها به آشکارساز وارد می‌شوند می‌توانند ذرات باردار پس‌زنی تولید نمایند که می‌تواند هسته‌دار شدن حباب‌ها و رشد حباب‌های گازی را آغاز نماید [۷۰ و ۷۱]. همچنین آشکارسازی به دما و فشار ماده واسط بستگی دارد. تغییرات عادی در فشار هواپیما در حساسیت اختلاف قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. در بعضی از موارد آشکارساز می‌تواند با پیچاندن سر بطری به سمت پایین که فشاری بر ماده چسبناک لزج اعمال می‌کند به حالت اولیه بازگردانده شود<sup>۱</sup> (یعنی حباب‌ها متراکم شود). با کم کردن این فشار، آشکارساز بار دیگر برای

اندازه‌گیری حساس می‌شود. با وارد نمودن یک ماده قابل انبساط بر بالای ژل، جبران تغییرات دمایی می‌تواند حاصل شود. آشکارسازها می‌توانند با حساسیت‌های متفاوت ساخته شوند. هنگامی که مجموعه‌ای از آشکارسازها با پاسخ‌های متفاوت نسبت به انرژی به کار گرفته شوند، برآوردی از توزیع‌های انرژی فلوئنس نوترون می‌تواند حاصل شود.

### ۵-۳-۵ آشکارسازهای ترمولومینسانس<sup>۱</sup>

ترمولومینسانس، به عبارت صحیح‌تر رادیوترمولومینسانس، پدیده ساطع شدن نور در اثر گرما دادن به ماده پرتودیده که عموماً ساختار کریستالی دارد، می‌باشد. کسری از انرژی پس‌گذاشته شده به وسیله پرتو در «دام‌های» نیم‌پایدار ذخیره می‌شود [۷۲]. رایج‌ترین آشکارسازهای ترمولومینسانس (TLDs) امکان تعیین خوب پرتوها با LET پایین یا مولفه‌های میدان پرتوی غیرنوترونی حاصل از پرتوهای مستقیم یونساز و از ذرات ثانویه ناشی از برهمکنش‌های فوتون در آشکارساز و کپسول آن را فراهم می‌آورد. با بعضی از مواد و/یا تکنیک‌های ویژه می‌توان مولفه با LET بالا و نوترون را برآورد کرد. با این حال بطور کلی TLDها تنها برای اندازه‌گیری مؤلفه LET پایین یا غیر نوترونی و هر پاسخ به نوترون یک عدم قطعیت ایجاد می‌کند. با این حال، از آنجائی که سهم نوترون‌ها در حدود ۵۰٪ از کل دز معادل محیطی میدان GCR سرنشین هواپیما است، سهم آن نسبت به کل دز جذبی در بافت فقط در حدود ۱۰٪ است. در TLDها، کرمای نوترون (برای توزیع انرژی برای میدان‌هایی که در نظر گرفته می‌شوند) در بافت پایین‌تر است. به طور کلی برای TLDها بازده نسبی تبدیل نور برای ذرات باردار ثانویه نیز روی هم رفته پایین است. در نتیجه، بعید به نظر می‌رسد که پاسخ ناخواسته نوترون از حدود ۵٪ کل  $H^*(10)$  فزونی یابد. عدم قطعیت اندازه‌گیری یک TLD می‌تواند با به کارگیری چندین آشکارساز کاهش یابد.

### ۵-۳-۶ آشکارسازهای فوتولومینسانس

یکی از معایب استفاده از بعضی مواد با حساسیت بالا برای دزیمتری ترمولومینسانس بستگی آهنگ گرمادهی مشاهده شده ناشی از فرونشانی دمایی بازدهی لومینسانس است. این نقصان می‌تواند با به کارگیری آشکارسازهای فوتولومینسانس (PLD) مانند یک شیشه رادیوفوتولومینسانس (RPL) یا یک آشکارساز لومینسانس تحریک نوری (OSL) مانند  $Al_2O_3:C$  رفع گردد. سیگنال لومینسانس القا شده با پرتو با به کارگیری نور ناشی از یک لیزر تحریک می‌شود. چندین شیوه قرائت فوتولومینسانس با موفقیت گسترش یافته است [۷۳ و ۷۴ و ۷۵]. PLDها دارای راندمان‌های تبدیل نور پایینی برای انرژی پس‌گذاشته شده با LET بالا هستند [۷۶ و ۷۷].

---

1- Thermoluminescent detectors

## پیوست الف (اطلاعاتی)

### شاخص توزیع‌های انرژی شار ذره برای میدان پرتو کیهانی در ارتفاعات پروازی برای بیشینه و کمینه شرایط خورشیدی و برای بیشینه و کمینه سختی برش عمودی

یادآوری: این پیوست از منبع [۷۸] اقتباس شده است.

شکل‌های الف-۱ تا الف-۶ طیف محاسبه شده آهنگ‌های شار ذرات بدون وجود هوا را برای نوترون‌ها، پروتون‌ها، پایون‌ها، الکترون‌ها، فوتون‌ها و میون‌ها نمایش می‌دهد. مقادیر فعالیت خورشیدی، برش ژئومغناطیسی و ارتفاع حداکثر مقادیر تقریبی که می‌توان برای هواپیماهای غیرنظامی انتظار داشت فرض می‌شود.

- کمینه و بیشینه فعالیت خورشیدی، توصیف شده به وسیله پتانسیل کاهش سرعت خورشیدی به ترتیب  $\Phi=456$  MV و  $1700$  MV که احتمالاً تمامی بازه دینامیکی نوسان فرکانسی خورشیدی را می‌پوشاند.

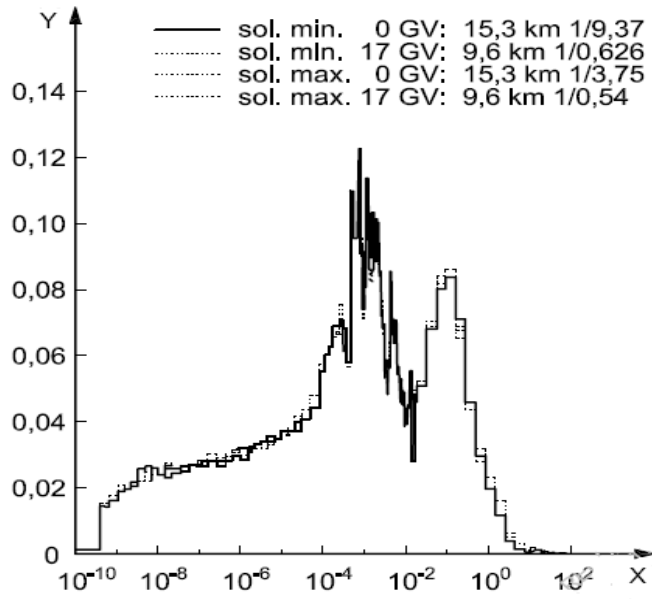
- کمینه و بیشینه سختی برش ژئومغناطیسی به ترتیب  $r_c=456$  GV و  $17$  GV

- کمینه و بیشینه ارتفاع پروازی بارومتری استاندارد به ترتیب  $9.6$  km و  $15.3$  km

بیشینه و کمینه فعالیت خورشیدی می‌تواند از یک دوره به دوره دیگر تغییر کند. بنابراین، مقادیر تعیین شده ممکن است برای درون‌یابی شرایط واقعی استفاده شود.

در هر شکل، طیف‌های آهنگ شار ذره ( $d^2\Phi/dt.dE$  ( $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{GeV}^{-1}$ )) شامل شار ذره در بازه زمان،  $dt$ ، و بازه انرژی،  $dE$ ، در انرژی  $E$  ضرب و نسبت به آهنگ‌های شار تجمعی انرژی نرمالیزه می‌شود (فاکتور نرمالیزاسیون در هر شکل برای منحنی‌های مربوطه داده شده است).



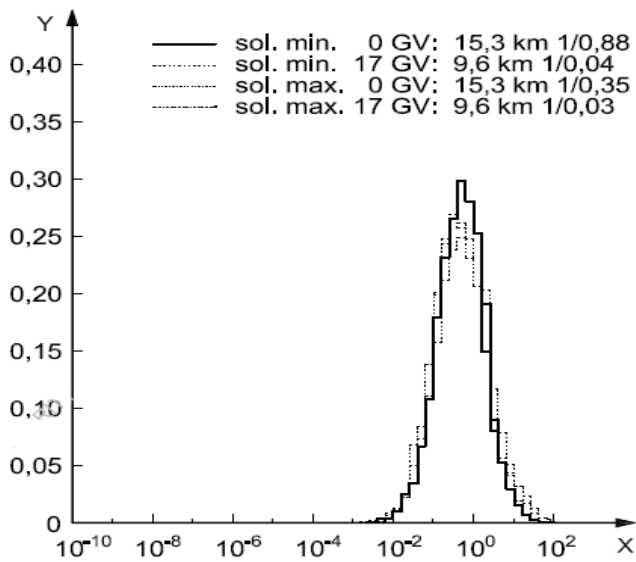


راهنما:

X انرژی (GeV)

Y آهنگ شار نرمالیزه شده نوترون ها

شکل الف ۱- طیف آهنگ شار نرمالیزه شده نوترون

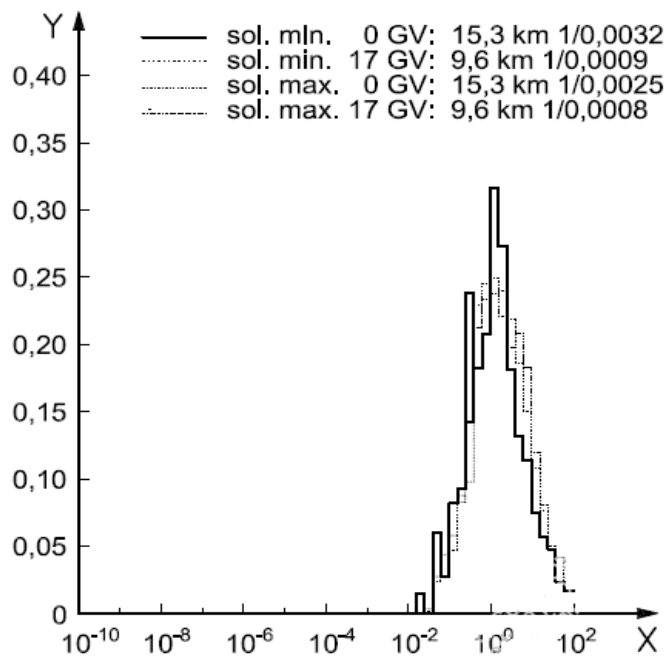


راهنما:

X انرژی (GeV)

Y آهنگ شار نرمالیزه شده پروتون ها

شکل الف ۲- طیف آهنگ شار نرمالیزه شده پروتون

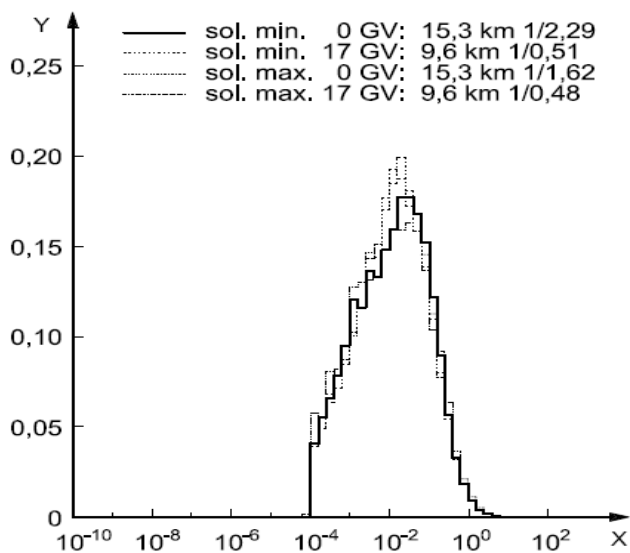


راهنما:

X انرژی (GeV)

Y آهنگ شار نرمالیزه شده پایون های باردار

شکل الف ۳- طیف آهنگ شار نرمالیزه شده پایون های باردار

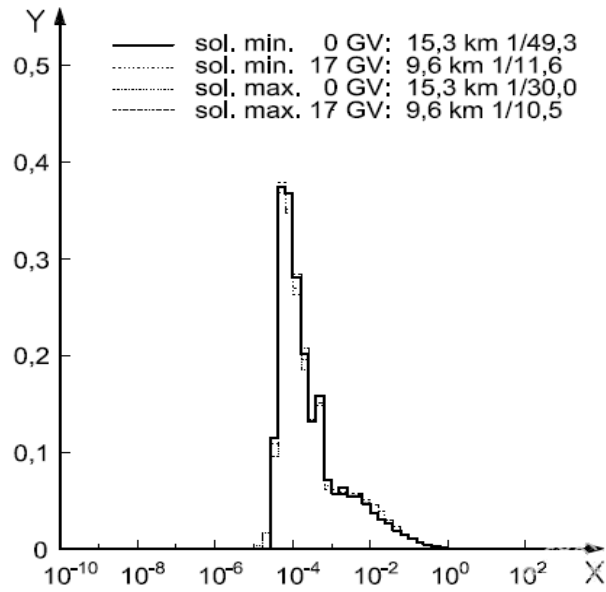


راهنما:

X انرژی (GeV)

Y آهنگ شار نرمالیزه شده الکترون ها

شکل الف ۴- طیف آهنگ شار نرمالیزه شده الکترون ها

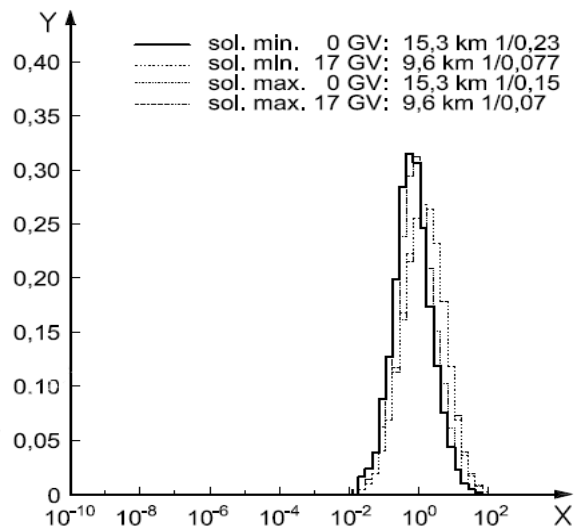


راهنما:

X انرژی (GeV)

Y آهنگ شار نرمالیزه شده فوتونها

شکل الف ۵- طیف آهنگ شار نرمالیزه شده فوتون



راهنما:

X انرژی (GeV)

Y آهنگ شار نرمالیزه شده میونها

شکل الف ۶- طیف آهنگ شار نرمالیزه شده میون

- [1] ICRP Publication 60:1990, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford
- [2] EUROPEAN UNION (1996). Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation, Official Journal of the European Communities L159, Vol. 39, 29 June 1996
- [3] ICRP Publication 75 (1997). General Principles for the Radiation Protection of Workers, Pergamon Press, Oxford
- [4] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, (2000). UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Vol. I: Sources. United Nations, New York
- [5] O'BRIEN, K. (1972). The Cosmic Ray Field at Ground Level. Proc. 2nd Int. Conference on Natural Radiation Environment, August 1972, Honiton, USA. US Dept of Commerce Report Conf-720805-PC, pp.15-54
- [6] HEINRICH, W., ROESLER, S. and SCHRAUBE, H. (1999). Physics of Cosmic Radiation Fields. Radiat. Prot. Dosim. **86**, pp. 253-258
- [7] GAISSER, T. (1990). Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge University Press
- [8] FERRARI, A., PELLICIONI, M. and RANCATI, T. (2001). Calculation of the Radiation Environment caused by Galactic Cosmic Rays for Determining Air Crew Exposure. Radiat. Prot. Dosim. **93**, pp. 111-114
- [9] ICRU Report 66 (2001). Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons. ICRU, Bethesda
- [10] WISSMANN, F., LANGNER, F., ROTH, J. and SCHREWE, U. (2004). A Mobile TEPC-based System to Measure the Contributions to  $H^*(10)$  at Flight Altitudes. Radiat. Prot. Dosim. **110**, pp. 347-349
- [11] WISSMANN, F., DANGENDORF, V. and SCHREWE, U. (2005). Radiation Exposure at Ground Level by Secondary Cosmic Radiation. Radiat. Meas. **39**, pp. 95-104
- [12] BECK, P., FERRARI, A., PELLICIONI, M. and ROLLET, S. (2003). TEPC Simulation with FLUKA, ARCS Report, ARC-G-0004/03
- [13] DUPONT, C., LELEUX, P., LIPNIK, P., MACQ, P. and NINANE, A. (1987). Study of a Collimated Fast Neutron Beam. Nucl. Instrum. Meth. **A256**, pp. 197-206
- [14] SCHUHMACHER, H., BREDE, H.J., DANGENDORF, V., KUHFUSS, M., MEULDERS, J.P., NEWHAUSER, W.D. and NOLTE, R. (1999). Quasi-monoenergetic Neutron Beams with Energies from 25 to 70 MeV. Nucl. Instrum. Meth. **A421** pp. 284-295
- [15] CONDÉ, H., HULTQVIST, S., OLLSON, N., RÖNNQVIST, T., ZORRO, R., BLOMGREN, J., TIBELL, G., HÅKANSSON, O., JONSSON, O., LINDHOLM, L., RENBERG, P.-U., BROCKSTEDT, A., EKSTRÖM, P., ÖSTERLUND, M., BRADY, F.P. and SZEFLINSKI, Z. (1990). A Facility for Studies of Neutron-induced Reactions in the 50-200 MeV Range. Nucl. Instrum. Meth. **A292**, pp. 121-128
- [16] MCMURRAY, W.R., ASHMAN, D.G., BHARUTH-RAM, K. and FEARICK, R.W. (1993). The Faure Cyclotron Neutron Source and a Particle Spectrometer for Neutron Induced Emission of Charged Particles at Energies

- between 60 and 200 MeV. Nucl.Instrum.Meth.**A329**, pp. 217-222
- [17] NOLTE, R., ALLIE, M.S., BINNS, P.J., BROOKS, F., BUFFLER, A., DANGENDORF, V., MEULDERS, J.P., ROOS, F., SCHUHMACHER, H. and WIEGEL, B. (2002). High-energy Reference Fields for the Calibration of Detectors used in Neutron Spectrometry. Nucl.Instrum.Meth.**A476**, pp. 369-373
- [18] HÖFERT, M. and STEVENSON, G.R. (1994). The CERN-CEC Reference Field Facility. Proc. Annual Nucl.Soc. 8th Int. Conf. Radiation Shielding. Arlington, Texas, USA, April 1994. American Nuclear Society, pp. 635-642
- [19] STEVENSON, G.R., FASSÓ, A., HÖFERT, M. and TUYN, J.W.N. (1996). Dosimetry at High Energy Accelerators, Radioprotection **31**, pp. 193-210
- [20] MITAROFF, A. and SILARI, M. (2002). The CERN-EU High-energy Reference Field (CERF) Facility for Dosimetry at Commercial Flight Altitudes and in Space. Radiat. Prot. Dosim. **102**, pp. 7-22
- [21] BIRATTARI, C., RANCATI, T., FERRARI, A., HÖFERT, M., OTTO, T. and SILARI, M. (1998). Recent results at the CERN-EC high energy reference facility. In: Proceedings of the SATIF-3 meeting, May 12-13, 1997, Sendai, Japan, OECD-AEAEA, pp. 219-234
- [22] SCHRAUBE, H., JAKES, J., SANNIKOV, A.V., WEITZENEGGER, E., RÖSLER, S. and HEINRICH, W. (1997). The Cosmic Ray Induced Neutron Spectrum at the Summit of the Zugspitze (2963 m). Radiat. Prot. Dosim. **70**, pp. 405-408
- [23] TOMMASINO, L. (1999). In-flight measurements of radiation fields and doses. Radiat. Prot. Dosim. **86**, pp. 297-301
- [24] WIEGEL, B., ALEVRA, A.V., MATZKE, M., SCHREWE, U.J. and WITTSTOCK, J. (2002). Spectrometry Using the PTB Neutron Multisphere Spectrometer (NEMUS) at Flight Altitudes and at Ground Level. Nucl.Instr. and Meth.**A 476**, pp. 52-57
- [25] ROESLER, S., HEINRICH, W. and SCHRAUBE, H. (2002). Monte Carlo Calculation of the Radiation Field at Aircraft Altitudes. Radiat. Prot. Dosim. **98**, pp. 367-388
- [26] GOLDHAGEN, P., CLEM, J. M. and WILSON, J. W. (2003). Recent Results from Measurements of the Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons Aboard an ER-2 High-Altitude Airplane and on the Ground. Adv. Space Res. **32**, pp. 35-40
- [27] ICRU Report 57:1998, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Bethesda
- [28] PELLICIONI, M. (2000). Overview of Fluence-to-effective Dose and Fluence-to-ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Radiation Calculated Using the FLUKA Code. Radiat. Prot. Dosim. **88**, pp. 279-297
- [29] EURADOS (1996). Exposure of Air Crew to Cosmic Radiation. Eds.: I.R. McAulay, D.T., Bartlett, G., Dietze, H., Menzel, Schnuer, K. and Schrewe, U.J. Report 1996-01, Luxembourg
- [30] ROSSI, H.H. and ROSENZWEIG, W.A. (1955). A Device for the Measurement of Dose as a Function of Specific Ionization. Radiology. **64**, pp. 404-411
- [31] EURADOS (1995). Design, Construction and use of Tissue Equivalent Proportional Counters; Eds: Schmitz, T., Waker, A.J., Kliuga, P. and Zoetelief, H, Radiation Protection Dosimetry **61**
- [32] SPURNY, F., DACHEV, T.S.P. (2003). Long-term monitoring of the onboard aircraft exposure level with a Silicon based spectrometer. Adv. Space Res. **1**, pp. 53-58
- [33] DYER, C.S., SIMS, A.J., FARREN, J. and STEPHEN, J. (1989). Measurements of the SEU environment in the upper atmosphere. IEEE Trans. Nucl. Sci. **36**, pp. 2275-2280

- [34] BENGTSSON, L.G. (1970). Assessment of Dose Equivalent from Fluctuations of Energy Depositions, in: Proc. 2nd Symposium on Microdosimetry. Ed. Ebert, H.G., Brussels, pp. 375-400
- [35] KELLERER, A.M. and ROSSI, H.H. (1984). On the Determination of Microdosimetric Parameters in Time-Varying Radiation Fields: the Variance-Covariance Method. *Radiat. Res.* **97**, pp. 237-245
- [36] LINDBORG, L., GRINDBORG, J.E., GULLBERG, O., NILSSON, U., SAMUELSON, G. and UOTILA, P. (1995). TEPC Measurements with the Variance-Covariance Method on Board Aircraft. *Radiat. Prot. Dosim.* **61**, pp. 119-124
- [37] ZIELCZYŃSKI, M., GOLNIK, N., MAKAREWICZ, M. and SULLIVAN, A.H. (1980). Definition of Radiation Quality by Initial Recombination of Ions. In: Proc. 7th Symp. Microdosimetry. Oxford, pp. 853-862, Harwood Academic Publishers
- [38] ZIELCZYŃSKI, M. and GOLNIK, N. (1994). Recombination Index of Radiation Quality — Measuring and Applications. *Radiat. Prot. Dosim.* **52**, pp. 419-422
- [39] ZIELCZYŃSKI, M., GOLNIK, N. and SHVIDKIJ, S.V. (1996). Recombination Chamber and a Measuring System with Sensitivity Sufficient for In-Flight and Low-Level Dosimetry, *Nukleonika* **41**, pp. 127-132
- [40] PSZONA, S. and HÖFERT, M., (1977): A Rapid Method for the Determination of Dose Equivalent in Mixed Radiation Fields, *Nuclear Instruments and Methods* **A146**, pp. 509-512
- [41] NAKAMURA, T., (2003): Recent Developments of Advanced Neutron Detection Technology. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* **4**, pp. R15-R24
- [42] BUFFLER, A., BROOKS, F.D., ALLIE, M.S., BINNS, P.J., DANGENDORF, V., LANGEN, K.M., NOLTE, R., and SCHUHMACHER, H. (2002): Measurement of Neutron Energy Spectra from 15 to 150 MeV using Stacked Liquid Scintillators. *Nucl. Instrum. Method* **A476**, pp. 181-185
- [43] BOAG, J.W. (1966). Ionization Chambers, In *Radiation Dosimetry*, Vol II, Eds. F.H. Attix and W.C. Roesch, Academic Press New York
- [44] GE Reuter Stokes. (2000). RSS-131 User's Manual. Part No. RSS131-O&M Revision F, March 2000
- [45] BECK, P., AMBROSI, P., SCHREWE, U. and O'BRIEN, K. (1999). ACREM, Aircrew Radiation Exposure Monitoring, ARCS Report OEFZS-G-0008
- [46] KYLLÖNEN, J.-E., LINDBORG, L. and SAMUELSON, G. (2001). Measurements on-board aircraft with the variance method, *Radiat. Prot. Dosim.* **93**, pp. 197-205
- [47] TEXIER, C., ITIÉ, C., SERVIÈRE, H., GRESSIER, V. and BOLOGNESE-MILSZTAJN, T. (2001). Study of the Photon Radiation Performance of Electronic Personal Dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* **96**, pp. 245-249
- [48] WERNLI, CH. and KAHILAINEN, J. (2001). Direct Ion Storage Dosimetry Systems for Photon, Beta and Neutron Radiation with Instant Readout Capabilities, *Radiat. Prot. Dosim.* **96**, pp. 255-259
- [49] D'ERRICO, F., LUSZIK-BHADRA, M. and LAHAYE, T. (2003). State of the Art of Electronic Personal Dosimeters for Neutrons, *Nuclear Instruments and Methods* **A505**, pp. 411-414
- [50] SIMPSON, J.A., FONGER, W. and TREIMAN, S.B. (1953). Cosmic radiation intensity-time variations and their origin. I. Neutron intensity variation method and meteorological factors, *Phys. Rev.* **90**, pp. 934-950
- [51] BIRATTARI, C., FERRARI, A., NUC CETELLI, C., PELLICIONI, M. AND SILARI, M. (1990). An extended

- rangeneutron rem counter, Nucl. Instr. Meth. **A297**, pp. 250-257
- [52] BIRATTARI, C., ESPOSITO, A., PELLICIONI, M., RANCATI, T. AND SILARI, M. (1998). The extended rangeneutron rem counter 'Linus' — Overview and latest developments. Radiat. Prot. Dosim. **76**, pp. 133-148
- [53] MARES, V., SANNIKOV, A.V. and SCHRAUBE, H. (2002). Response functions of the Anderson-Braun and extended range REM counters for neutron energies from thermal to 10 GeV. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A476**, pp. 341-346
- [54] OLSHER, R.H., HSU, H.H., BERVERDING, A., KLECK, J.H., CASSON, W.H., VASILIK, D.G. and DEVINE, R.T. (2000). WENDI: An improved neutron rem meter. Health Phys. **79**, pp. 170-181
- [55] BROOKS, F.D. and KLEIN, H. (2002). Neutron Spectrometry — Historical Review and Present Status. Nucl. Instr. and Meth. **A476**, pp. 1-11
- [56] BRAMBLETT, R.L., EWING, R.I. and BONNER, T.W. (1960). A New Type of Neutron Spectrometer. Nucl. Instr. and Meth. **A9**, pp. 1-12
- [57] THOMAS, D.J. and ALEVRA, A.V. (2002). Bonner sphere spectrometers — a critical review. Nucl. Instr. and Meth. **A476**, pp. 12-20
- [58] TOMMASINO, L. (1998). In-flight measurements of radiation fields and doses. Radiat. Prot. Dosim. **86**, pp. 297-301
- [59] TOMMASINO, L. and TRIPATHY, S.P. (2004). Hardness Ratios of Different Neutron Spectra. Radiat. Prot. Dosim. **110**, pp. 227-231
- [60] AROUA, A., GRECESCU, M., PRÉTRE, S. and VALLEY, J.F. (1997). Use of Passive Detectors to Characterize Neutron Field Hardness. Health Phys. **72**, pp. 779-773
- [61] TOMMASINO, L. and HARRISON, K.G. (1985). Damage Track Detectors for Neutron Dosimetry:
- i. Registration and Counting Methods. Radiat. Prot. Dosim. **10**, pp. 207-218
  - [62] HARRISON, K.G. and TOMMASINO, L. (1985). Damage track detectors for neutron dosimetry:
  - ii. characteristics of different detection systems. Radiat. Prot. Dosim. **10**, pp. 219-236
  - [63] BARTLETT, D.T., TANNER, R.J. and HAGER, L.G. (2002). The High Energy Neutron Response Characteristics of a Passive Survey Instrument for the Determination of Cosmic Radiation Fields in Aircraft. Radiat. Prot. Dosim. **100**, pp. 519-524
  - [64] O'SULLIVAN, D., ZHOU, D., HEINRICH, W., ROESLER, S., DONNELLY, J., KEEGAN, R., FLOOD, E. and TOMMASINO, L. (1999). Cosmic Rays and Dosimetry at Aviation Altitudes. Radiat. Meas. **31**, pp. 579-584
  - [65] LOUNIS, Z., CAVAIOLI, M. and TOMMASINO, L. (1995). The Combined Use of Bubble Dosimeters and Electrochemical Etched Track Detectors. Radiat. Prot. Dosim. **59**, pp. 299-302
  - [66] CROSS, W. G. and TOMMASINO, L. (1970). A rapid reading technique for nuclear particle damage tracks in thin foils. Radiat. Effects **5**, pp. 85-89
  - [67] JAIN, R.K., PROKOFIEV, A.V., SMIRNOV, A.N. and TOMMASINO, L. (2001). Measurement of high energy neutrons by fission reactions. Radiat. Meas. **34**, pp. 129-132
  - [68] TUME, P., LEWIS, B.G., BENNETT, L.G.I. and COUSINS, T. (1998). Characterization of Neutron-Sensitive Bubble Detectors for Application in the Measurement of Jet Aircrew Exposure to Natural Background Radiation, Nucl. Instrum. and Meth. **A406**, pp. 153-168
  - [69] SPURNÝ, F. (2002). Exposure of Air Crew to Cosmic Radiation. Calculation and Experimental Approach. in High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects. Eds.:

W. Burkart, M., Sohrabi, A., Bayer; Elsevier Science, pp. 121-129

[70] ING, H. and BIRNBOIM, H.C. (1984). A Bubble-damage Polymer Detector for Neutrons. *Nucl. TracksRadiat. Meas.* **8**, pp. 285-288

[71] APFEL, R.E. and ROY, S.C. (1984). Investigations on the Applicability of Superheated Drop Detection in Neutron Dosimetry. *Nucl. Instrum. Meth.* **219**, pp. 582-587

[72] MCKEEVER, S.W.S., MOSCOVITCH, M. and TOWNSEND, P.D. (1995). *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*. Nuclear Technology Publishing, Ashford

[73] PIESCH, E., BURGKHARDT, B. and VILGIS, M. (1990). Photoluminescence Dosimetry: Progress and Present State of Art. *Radiat. Prot. Dosim.* **33**, pp. 215-226

[74] BØTTER-JENSEN, L., AGERSNAP LARSEN, N., MARKEY, B.G. and MCKEEVER, S.W.S. (1997). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C as a Sensitive OSL Dosimeter for Rapid Assessment of Environmental Photon Dose Rates in Luminescence Dating. *Radiat. Meas.* **27**, pp. 295-298

[75] AKSELROD, M.S. and MCKEEVER, S.W.S. (1999). A Radiation Dosimetry System using Pulsed Optically Stimulated Luminescence. *Radiat. Prot. Dosim.* **81**, pp. 167-176

[76] YASUDA, H. and FUJITAKA, K. (2000). Responses of TLD-Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Tb and Radiophotoluminescent Glass to Heavy Charged Particles and Space Radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* **87**, pp. 115-120

[77] YASUDA, H. and KOBAYASHI, I. (2001). Optically Stimulated Luminescence from Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Irradiated with Relativistic Heavy Ions. *Radiat. Prot. Dosim.* **95**, pp. 339-343

[78] SCHRAUBE, H., HEINRICH, W., LEUTHOLD, G., MARES, V. and ROESLER, S. (2000). Aviation route dose calculation and its numerical basis. (2000). In: Proc. 10th International Congress of the International Radiation

Protection Association IRPA, Hiroshima, Japan (May 2000). Paper T-4-4, pp. 1-9

[79] Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML, 1995

[80] International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM), BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML, 1993

[81] ISO 31-10, Quantities and units — Part 10: Nuclear reactions and ionizing radiations

[82] ISO 1000, SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units

[83] ISO 4037-1, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods

[84] ISO 4037-2, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV

[85] ISO 4037-3, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence

[86] ISO 8529-1:2001, Reference neutron radiations — Part 1: Characteristics and methods of production

[87] ISO 8529-2, Reference neutron radiations — Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field

[88] ISO 8529-3, Reference neutron radiations — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination



of response as a function of energy and angle of incidence  
[89] ICRU Report 36, Microdosimetry  
[90] ICRU Report 47, Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations

[91] ICRU Report 51, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry  
[92] ISO 12789, Reference neutron radiations — Characteristics and methods of production of simulated workplace neutron fields