



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 مستمر عملکرد 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 سازگار کنید...





جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran  
سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۹۹۵۴

چاپ اول

۱۳۹۸

INSO

19954

1st Edition

2019

Identical with  
ASTM E666:  
2014

محاسبه دُز جذبی ناشی از پرتو گاما یا ایکس—  
آیین کار

Calculating absorbed dose from gamma or X  
radiation— Standard practice

ICS: 17.240

استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۹۵۴ (چاپ اول) : سال ۱۳۹۸

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: [standard@isiri.gov.ir](mailto: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](mailto:standard@isiri.gov.ir)

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

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

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

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

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

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

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

«محاسبه دُز جذبی ناشی از پرتو گاما یا ایکس — آیین کار»

رئیس:

حاجیلو، ناهید  
(دکتری فیزیک هسته‌ای)

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده کاربرد پرتوها

دبیر:

بهشتی، زهرا سادات  
(کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای)

شرکت توسعه کاربرد پرتوها

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اربابی، کوروش  
(کارشناسی ارشد فیزیک پزشکی)

شرکت پارس ایزوتوپ

اردانه، مرتضی  
(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی

جزایری قره‌باغ، الهه  
(دکتری فیزیک پزشکی)

دانشکده پیراپزشکی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشت  
درمانی تهران

سمیع‌پور، فرهاد  
(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی

سیحون، مرضیه  
(کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع غذایی)

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده کاربرد پرتوها

شیخ‌زاده، پیمان  
(دکتری فیزیک پزشکی)

دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشت درمانی تهران

طاهری، مهرا  
(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

عسکری، محمد علی  
(دکتری فیزیک پزشکی)

سازمان انرژی اتمی ایران

عطائی‌نیا، وحیده  
(کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای)

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده کاربرد پرتوها

**اعضا:** (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

نیکوگفتار مفرد، آزاده

(کارشناسی ارشد فیریک هسته‌ای)

**سمت و/یا محل اشتغال:**

دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشت درمانی تهران

**ویراستار:**

صبور گیلوان، عباس

(کارشناسی مهندسی مکانیک- ساخت و تولید)

**سمت و/یا محل اشتغال:**

سازمان ملی استاندارد ایران- مرکز اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌ها

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیش‌گفتار
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۲	۲ مراجع الزامی
۲	۳ اصطلاحات و تعاریف
۳	۴ اهمیت و کاربرد
۴	۵ محاسبه دُز جذبی
۵	۶ تخمین دُز جذبی در یک ماده از دُز جذبی اندازه‌گیری شده در ماده دیگر
۷	۷ درستی
۸	پیوست الف (آگاهی‌دهنده) عمق تعادل ذره باردار
۱۰	پیوست ب (آگاهی‌دهنده) نمونه محاسبه دُز جذبی برای طیف گسترده انرژی فوتون
۱۶	پیوست پ (آگاهی‌دهنده) نمونه محاسبه دُز جذبی برای طیف انرژی فوتون تقریباً تک انرژی
۱۷	پیوست ت (آگاهی‌دهنده) تضعیف باریکه
۱۹	پیوست ث (آگاهی‌دهنده) توجیه تجربی معادله (۳)
۲۱	پیوست ج (آگاهی‌دهنده) محاسبه دُز
۲۲	کتاب‌نامه

## پیش‌گفتار

استاندارد «محاسبه دُز جذبی ناشی از پرتو گاما یا ایکس – آیین کار» 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 ایران شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در چهارصد و ششمین اجلاس کمیته ملی استاندارد اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌های مورخ ۱۳۹۸/۰۳/۱۹ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران - ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، 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:

ASTM E666: 2014, Standard Practice for Calculating Absorbed Dose From Gamma or X Radiation.



## محاسبه دُز جذبی ناشی از پرتو گاما یا ایکس – آیین کار

هشدار – در این استاندارد تمام موارد ایمنی و بهداشتی درج نشده است. در صورت مواجهه با چنین مواردی، مسئولیت برقراری شرایط بهداشت و ایمنی مناسب و اجرای آن و همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌های قانونی، برعهده کاربر این استاندارد است.

### ۱ هدف و دامنه کاربرد<sup>۱</sup>

۱-۱ هدف از تدوین این استاندارد، ارائه تکنیکی برای محاسبه دُز جذبی در ماده با آگاهی از میدان پرتو، ترکیب ماده (به منابع [1] تا [5] کتاب‌نامه مراجعه شود)<sup>۲</sup> و اندازه‌گیری‌های مربوطه است. این استاندارد برای پرتو گاما و ایکس تولیدشده با فوتون‌هایی با انرژی در گستره ۰٫۰۱ MeV تا ۲۰ MeV کاربرد دارد.

۲-۱ این استاندارد، روشی را برای محاسبه دُز جذبی در ماده با دانستن دُز جذبی در ماده دیگری که در همان میدان پرتوی در معرض پرتو قرار گرفته است، ارائه می‌دهد. این روش اجرایی به مواد همگن ترکیب‌شده از عناصری که ضرایب جذب آن‌ها در جداول مربوط مشخص شده است، محدود می‌شود. این جداول برای تمام ۹۲ عنصر طبیعی در منبع [2] کتاب‌نامه ارائه شده است. همچنین به برخی از اطلاعات طیف انرژی میدان پرتوی تولیدشده به وسیله چشمه تحت ملاحظات مربوطه، لازم است. به طور کلی درستی این روش محدود به درستی اطلاعات طیف انرژی میدان پرتوی است.

۳-۱ نتایج این استاندارد فقط در صورتی صحت دارد که در عمق موردنظر از ماده، تعادل ذره باردار برقرار باشد. بنابراین، این استاندارد برای تعیین دُز جذبی در مجاورت مرزهای بین مواد با اختلاف عدد اتمی زیاد کاربرد ندارد. برای اطلاعات بیشتر در این مورد، به استاندارد ASTM E1249 مراجعه شود.

۴-۱ کدهای کامپیوتری انتقال انرژی وجود دارند که برای محاسبه دقیق‌تر دُز جذبی در مواد، نسبت به این استاندارد، به کار می‌روند. استفاده از این کدها، نیازمند صرف تلاش، زمان و هزینه بیشتری است. در شرایط مناسب، به جای روشی که در این استاندارد توضیح داده شده است بهتر است از چنین محاسباتی استفاده شود.

---

۱- توضیحات تکمیلی در خصوص دامنه کاربرد این استاندارد، در بند اهمیت و کاربرد (به بند ۴ مراجعه شود) ارائه شده است.  
۲- همچنین به مدرک ICRU 80 مراجعه شود. محاسبه دُز جذبی در سیستم‌های دُزسنجی و مواد مورد استفاده در پرتوآوری، ضرایب تضعیف جرمی و ضرایب جذب انرژی جرمی برای عناصر کلیدی، ترکیبات و مواد مورد استفاده در دُزسنجی پرتوآوری با فوتون‌هایی با انرژی در گستره ۱۰۰ keV تا ۲۰ MeV، در پیوست 1 مدرک ICRU 80 ارائه شده است.

## ۲ مراجع الزامی

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

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

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

- 2-1 ASTM E170, Terminology Relating to Radiation Measurements and Dosimetry
- 2-2 ASTM E668, Practice for Application of Thermoluminescence-Dosimetry (TLD) Systems for Determining Absorbed Dose in Radiation-Hardness Testing of Electronic Devices
- 2-3 ASTM E1249, Practice for Minimizing Dosimetry Errors in Radiation Hardness Testing of Silicon Electronic Devices Using Co-60 Sources
- 2-4 ICRU Report 18, Specification of High Activity Gamma-Ray Sources
- 2-5 ICRU Report 21, Radiation Dosimetry: Electrons with Initial Energies Between 1 and 50 MeV
- 2-6 ICRU Report 34, The Dosimetry of Pulsed Radiation
- 2-7 ICRU Report 51, Radiation Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry
- 2-8 ICRU Report 60, Radiation Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation
- 2-9 ICRU Report 80, Dosimetry Systems for Use in Radiation Processing

## ۳ اصطلاحات و تعاریف

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

۱-۳

طیف شارش انرژی

$\psi(E)$

**energy fluence spectrum**

حاصل ضرب طیف شارش ذره (به استاندارد ASTM E170 مراجعه شود) در انرژی ذره. در این استاندارد، «ذرات» به فوتون‌ها اشاره دارد. طیف شارش انرژی همان شارش انرژی بر واحد انرژی است.

۲-۳

## شارش انرژی

۷

### energy fluence

انتگرال طیف شارش انرژی روی تمام گستره انرژی‌های موجود ذره است.

۳-۳

### عمق جرمی و ضخامت جرمی

t

### mass-depth and mass-thickness

حاصل ضرب طول مسیر طی شده درون یک ماده در چگالی جرمی ماده. عمق جرمی و ضخامت جرمی، بُعد جرم بر واحد سطح دارد.

## ۴ اهمیت و کاربرد

۱-۴ برای بیان اثرات پرتو بر مواد، دُز جذبی نسبت به پرتوگیری<sup>۱</sup> پارامتر معنی‌دارتری است. دُز جذبی، انرژی جذب شده در واحد جرم ماده پرتودهی شده است درحالی که پرتوگیری، مقدار بار تولیدشده در واحد جرم هوا است. دُز جذبی، بر انجام اندازه‌گیری در شرایط تعادل ذره باردار (الکترون) دلالت دارد (به پیوست الف مراجعه شود). در عمل، دستیابی به چنین شرایطی به سختی امکان‌پذیر است اما در برخی موارد، به صورت تقریبی می‌توان به این شرایط نزدیک شد.

۲-۴ مواد مختلف، هنگامی که در میدان پرتوی یکسان در معرض پرتو قرار می‌گیرند، مقادیر متفاوتی از انرژی را جذب می‌کنند. برای استفاده از تکنیک‌های این استاندارد، برای بیان دُز جذبی در یک ماده نسبت به دُز جذبی در ماده دیگر، باید تعادل ذره باردار وجود داشته باشد. همچنین اگر پرتو به وسیله ضخامت معنی‌داری از یک جاذب تضعیف شود، طیف انرژی پرتو تغییر خواهد کرد که این موضوع لازم است تصحیح شود.

یادآوری - برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد روش‌های دُزسنجی متنوع کاربردی برای انواع پرتوها و انرژی‌ها و گستره‌های آهنگ دُز جذبی تشریح شده در این روش، به مدرک‌های ICRU 34 و نیز ICRU 80 مراجعه شود.

## ۵ محاسبه دُز جذبی

۱-۵ دُز جذبی،  $D$ ، در یک نقطه می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$D = I \int_0^{\infty} \Psi(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE \quad (1)$$

که در آن:

$\Psi(E)$  شارش انرژی بر واحد انرژی در نقطه مورد نظر؛

$\mu_{en}(E)/\rho$  ضریب جذب انرژی جرمی؛ و

$I$  فاکتور بهنجارش است.

اگر تمام متغیرها در معادله (۱) در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) بیان شوند،  $I$  برابر ۱ خواهد بود. یکای دُز جذبی ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )،  $\text{Gy}$ ، یکای  $\Psi(E)$ ،  $\text{m}^{-2}$  و  $\mu_{en}(E)/\rho$ ،  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  و  $E$ ،  $\text{J}$  است. برای مقادیر جایگزین  $I$  به پیوست ب مراجعه شود. برای اطلاعات بیشتر در مورد استفاده از ضرایب جذب انرژی برای محاسبه دُز جذبی به منبع [1] کتاب‌نامه مراجعه شود. طیف شارش انرژی،  $\Psi(E)$ ، ورودی در نقطه‌ای است که دُز در آن باید تعیین شود. در عمل، حدود انتگرال همان حدود انرژی است که در آن،  $\Psi(E)$  بزرگی معنی‌داری دارد. اگر ماده‌ای حائل در بین چشمه و نقطه‌ای که دُز در آن به دست می‌آید، باشد، طیف مورد استفاده در محاسبات باید طیف خروجی چشمه تغییر یافته با اثرات جذب ماده حائل باشد. مقادیر  $\mu_{en}(E)/\rho$  در جداول منبع [2] کتاب‌نامه آورده شده‌اند.

یادآوری - برای اصطلاحات، تعاریف و یکاهای به کار رفته در گزارش داده‌ها، می‌توان از استاندارد ASTM E170 و نیز مدارک ICRU 51 و ICRU 60 به عنوان راهنما استفاده کرد.

۲-۵ اگر ماده‌ای که دُز جذبی در آن محاسبه می‌شود ترکیبی همگن از موادی باشد که در فهرست جدول ارائه شده در منبع [2] کتاب‌نامه وجود نداشته باشد،  $\mu_{en}(E)/\rho$  به روش زیر به دست می‌آید:

۱-۲-۵ از منبع [2] کتاب‌نامه مقادیر  $\mu_{en}^i(E)/\rho$  را برای هر یک از اجزای  $i$  به دست آورید.

۲-۲-۵ سهم جرمی،  $w_i$ ، هر یک از اجزاء را به دست آورید.

۳-۲-۵  $\mu_{en}(E)/\rho$  را از معادله زیر محاسبه کنید:

$$\mu_{en}(E)/\rho = \sum_i w_i [\mu_{en}^i(E)/\rho] \quad (2)$$

۴-۲-۵ مقادیر  $\mu_{en}(E)/\rho$  باید برای هر مقدار انرژی فوتون،  $E$ ، که در آن  $\psi(E)$  معنی دار است، به دست آید.

۳-۵ انتگرال در معادله (۱) به صورت عددی محاسبه می شود. مقادیر  $\mu_{en}(E)/\rho$  در منبع [2] کتاب نامه برای انرژی های خاصی ارائه شده اند. در ارزیابی انتگرال مربوط به عملیات واقعی، به طور معمول بازه های انرژی مورد نظر با مقادیر ارائه شده در منبع [2] کتاب نامه مطابقت ندارند. در این موارد، مقدار مناسب  $\mu_{en}(E)/\rho$  برای انرژی های انتخاب شده باید طی روش درونیابی قابل قبول به دست آیند. گستره انرژی روی طیف کلی فوتون به بازه های انرژی کوچک تر تقسیم می شود. پهنای این بازه ها تقریباً انعطاف پذیر است اما باید به اندازه ای کوچک باشد که شکل طیف تغییر نکند. به منظور انتخاب مقادیر مناسب  $\mu_{en}(E)/\rho$ ، مقدار انرژی انتخاب شده برای هر بازه انرژی می تواند انرژی نقطه شروع یا نقطه وسط هر بازه انرژی برای کل طیف باشد.

۴-۵ طیف شارش انرژی،  $\psi(E)$ ، به طور رایج بر حسب یکاهای دلخواه داده می شود و می تواند به برخی پارامترهای چشمه بهنجار شود. در صورت استفاده از دُزسنج استاندارد یا کالیبره شده، انتگرال معادله (۱) باید برای ماده سازنده دُزسنج محاسبه شود. مقدار  $I$  با تقسیم دُز جذبی،  $D$ ، اندازه گیری شده به وسیله دُزسنج بر مقدار بازه، به دست می آید.

## ۶ تخمین دُز جذبی در یک ماده از دُز جذبی اندازه گیری شده در ماده دیگر

۱-۶ اگر دُز جذبی در یک ماده  $A$ ، مشخص باشد، دُز جذبی در ماده دیگر  $B$ ، با استفاده از روش توضیح داده شده در این بند می تواند تخمین زده شود.

۱-۱-۶ دُز جذبی مشاهده شده در  $A$  در عمقی از ماده  $A$  اتفاق می افتد، به طور مشابه اطلاع از دُز جذبی در  $B$  در عمق مشخصی از ماده  $B$  مورد نظر است. اگر فرض شود که طیف شارش انرژی سطح،  $\psi_0(E)$ ، (طیف شارش انرژی ورودی روی سطح ماده  $A$  و  $B$ ) شناخته شده باشد، طیف شارش انرژی،  $\psi(E)$  مورد استفاده در معادله (۱) باید به طیف شارش انرژی سطح  $\psi_0(E)$  نسبت داده شود. یک تقریب خوب برای طیف شارش انرژی تضعیف شده در عمق جرمی  $t$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\psi_t(E) = \psi_0(E) \exp\left(-\left[\frac{\mu_{en}(E)}{\rho}\right] t\right) \quad (3)$$

که در آن:

$t$  عمق جرمی ماده (بر حسب  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) بین سطح و عمق مورد نظر؛

$E$  انرژی مشخصی در طیف؛

$\psi_t(E)$  شارش انرژی به ازای واحد انرژی در عمق جرمی  $t$  است.

برای نحوه استنتاج معادله (۳) به پیوست ت مراجعه شود. همچنین به زیربندهای ۳-۱-۶ و ۴-۱-۶ مراجعه شود. برای نشان دادن امکان پذیر بودن معادله (۳) از نظر تجربی به پیوست ت مراجعه شود.

۴-۱-۶ با استفاده از معادله‌های (۱) و (۳)، ارتباط بین دُز معلوم  $D_A$  و دُز مورد نظر  $D_B$  می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\frac{D_A}{D_B} = \frac{\int_0^\infty \left[ \psi_0(E) \exp\left(-\left[\frac{\mu_{en}^A(E)}{\rho_A}\right] t_A\right) \right] \left[\frac{\mu_{en}^A(E)}{\rho_A}\right] dE}{\int_0^\infty \left[ \psi_0(E) \exp\left(-\left[\frac{\mu_{en}^B(E)}{\rho_B}\right] t_B\right) \right] \left[\frac{\mu_{en}^B(E)}{\rho_B}\right] dE} \quad (۴)$$

که  $\mu_{en}^A$ ،  $\rho_A$  و  $t_A$  به ترتیب ضریب جذب انرژی، چگالی و عمق جرمی مربوط به نقطه A هستند و ماده B نیز به طور مشابه نامگذاری می‌شود. برای جزئیات بیشتر در مورد چگونگی استنتاج معادله (۴)، به پیوست ج مراجعه شود. تمام متغیرها در معادله (۴) به استثنای مقدار مورد نظر  $D_B$  معلوم فرض می‌شوند. انتگرال معادله (۴) باید به صورت عددی حل شود.

۴-۱-۶ استفاده از معادله (۳) منوط به وجود تعادل ذره باردار است (برای توضیح بیشتر به زیربند ۳-۱-۶ مراجعه شود). به طور منطقی این شرایط در ناحیه‌ای می‌تواند اتفاق بیافتد که به اندازه کافی از مرزهایی که در آن تغییر در عدد اتمی یا چگالی ماده وجود دارد، فاصله داشته باشد (به پیوست الف مراجعه شود).

#### ۴-۱-۶ تقریب باریکه پهن در مقایسه با باریکه باریک

۴-۱-۶-۱ استفاده از ضریب انرژی  $\mu_{en}$  در معادله (۳) براساس این فرض است که پرتو به شرایط «باریکه پهن» تمایل پیدا کند که مخالف با شرایط باریکه باریک است. شرایط «باریکه پهن» و «باریکه باریک» بیانگر حالت‌های محدودی است که تقریباً برای تجربه واقعی در نظر گرفته می‌شود. در مورد باریکه باریک، فرض می‌شود فوتون‌هایی که از باریکه به بیرون پراکنده می‌شوند، از باریکه حذف شده و پس از آن در عمل اهمیتی ندارند. در مورد باریکه گسترده، فرض می‌شود فوتون‌هایی که از ناحیه کوچکی از باریکه گسترده به بیرون پراکنده می‌شوند، با فوتون‌های پراکنده شده از نواحی مجاور در باریکه جایگزین می‌شوند. در مورد باریکه باریک معادله (۳) می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\psi_t(E) = \psi_0(E) \exp\left(-\left[\frac{\mu(E)}{\rho}\right] t\right) \quad (۵)$$

که در آن:

$\mu$  ضریب تضعیف فوتون است. مقادیر  $\mu(E)/\rho$  در جداول منبع [2] کتاب‌نامه ارائه شده‌اند. در بسیاری از مسائل تجربی نتایج تضعیف فوتون بین نتایج معادله‌های (۳) و (۵) است.

۲-۴-۱-۶ می‌توان برای تعیین بزرگی تغییر به جای معادلات (۱) و (۳) از معادلات (۱) و (۵) استفاده کرد که معادله (۴) حاصل شود. این نتیجه تغییر در نسبت  $D_A/D_B$  محاسبه شده با معادله (۴) به فاکتور  $F(E)$  مربوط است

$$F(E) = \frac{\exp\left(-\left[\frac{\mu_{en}^B(E)}{\rho_B}\right]t\right) \exp\left(-\left[\frac{\mu^A(E)}{\rho_A}\right]t\right)}{\exp\left(-\left[\frac{\mu^B(E)}{\rho_B}\right]t\right) \exp\left(-\left[\frac{\mu_{en}^A(E)}{\rho_A}\right]t\right)} \quad (۶)$$

اگر در گستره انرژی مورد نظر،  $F(E)$  با درصدی بزرگتر از خطای قابل قبول دُرسنجی از عدد یک، اختلاف داشته باشد، به کاربردن این استاندارد مناسب نخواهد بود. در این موارد محاسبات انتقال مناسب توصیه می‌شود (به زیربند ۵-۱ مراجعه شود).

۳-۴-۱-۶ بسته به هندسه پراکندگی، ممکن است دُز جذبی از آنچه با استفاده از  $\mu$  یا  $\mu_{en}$  محاسبه شده است متفاوت باشد. استفاده از  $\mu_{en}$  در معادله (۳) روشی مناسب برای حصول این نتیجه است که مقدار احتمالی چقدر است، به گونه‌ای که می‌توان مؤلفه پراکندگی را به‌طور واقعی محاسبه کرد. برای توضیحات بیشتر و اثرهای مشابه به منبع [1] کتاب‌نامه مراجعه شود.

## ۷ درستی

۱-۷ درستی این استاندارد اساساً به درستی اطلاعات طیف انرژی ورودی بستگی دارد. به‌طور کلی، حتی تخمین ضعیفی از طیف نسبت به تخمین بر اساس فرض تک «انرژی مؤثر فوتون»، می‌تواند تخمین بهتری از دُز جذبی در مکان مشخص ارائه دهد. اگرچه کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ انرژی‌های پرتو-گامای اولیه خوش تعریفی دارند، طیف انرژی پرتو بسیاری از چشمه‌ها شامل مؤلفه پراکنده کامپتون معنی‌داری هستند که در صورت نادیده گرفته شدن، می‌تواند منجر به خطاهای معنی‌دار شوند (به مدرک ICRU 18 مراجعه شود).

۲-۷ همان‌طور که در زیربند ۱-۳ بیان شده است، نتایج این استاندارد فقط در صورتی صحت دارد که در عمق موردنظر از ماده، تعادل ذره باردار برقرار باشد. برای عمق‌های کمتر از آنچه برای تعادل مورد نیاز است دُز جذبی می‌تواند کمتر یا بیشتر از آنچه که این روش پیش‌بینی می‌کند، باشد. در عمق‌های بیشتر از عمق مورد نیاز برای تعادل، اساساً درستی نتایج به درستی تصحیح تضعیف به‌کاربرده شده در معادله (۳) و آگاهی از طیف انرژی ورودی بستگی دارد.

۳-۷ این روش از واگذاری محتمل نابه‌جای انرژی توسط الکترون‌های ثانویه صرف‌نظر می‌کند اما تولید تابش ترمزی توسط الکترون‌های ثانویه، آن را تصحیح می‌کند. برای گستره انرژی مشخص در این استاندارد، این ملاحظات در حدود ۵٪ یا کمتر در عدم قطعیت کل سهمیم هستند.

## پیوست الف

### (آگاهی دهنده)

#### عمق تعادل ذره باردار

**الف-۱** هنگامی که ماده با پرتوهای گاما یا ایکس پرتو دهی می شود، همان طور که پرتو در ماده نفوذ می کند، در ابتدا یک افزایش در جذب انرژی وجود دارد. پس از عمق محدودی، جذب انرژی پرتو به یک بیشینه می رسد و پس از آن کاهش می یابد. عمق لازم برای رسیدن به بیشینه جذب انرژی، عمق «تعادل ذره باردار» نامیده می شود که تابعی از انرژی پرتو و ضریب جذب انرژی جرمی ماده مورد پرتو دهی است.

**الف-۲** شکل الف-۱ نمونه ای از نمودار جذب انرژی به صورت تابعی از عمق در ماده است. دُز جذبی ۰,۸۵ فقط به منظور نمایش استفاده شده است. هر چشمه و ترکیب ماده جاذب، منحنی مشخصه خود را خواهد داشت. هرگاه آزمون از تمام جهات پرتو دهی شود، لازم است که آزمون از تمام جهات با برقرارکننده تعادل<sup>۱</sup> احاطه شود تا اطمینان حاصل شود که در سراسر نمونه تعادل ذره باردار برقرار است. اگرچه، هنگامی که نمونه در بیش از یک جهت پرتو دهی می شود، با قراردادن برقرارکننده تعادل در تماس با سطوح روبه رو و پشت ماده، می توان به تعادل تقریبی ذره باردار در آن دست یافت. افزایش اولیه در شکل الف-۱ به طور متناوب دیده نمی شود. این موضوع به این دلیل است که الکترون ها از محیط در راستای فوتون های ورودی به هدف برخورد می کنند.

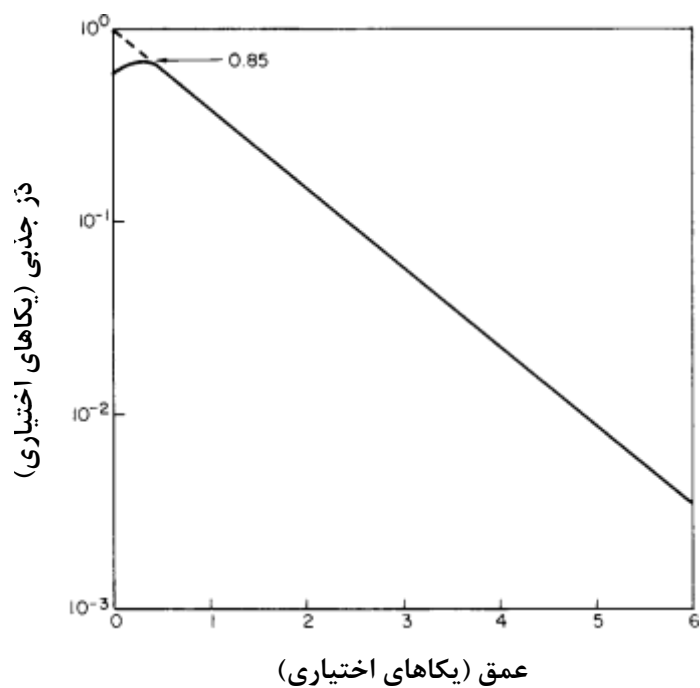
**الف-۳** در برخی موارد، عمق تعادل باید برابر با برد تجربی،  $R_p$ ، برای الکترون های ثانویه دارای بیشینه انرژی، در نظر گرفته شود. برای آلومینیم،  $R_p$  بر حسب  $g \cdot cm^{-2}$  می تواند از معادله (الف-۱) محاسبه شود (به مدرک ICRU 21 مراجعه شود):

$$R_p = 0,530E_0 - 0,0106 \quad (\text{الف-۱})$$

که در آن:

$E_0$  انرژی الکترون های ثانویه دارای بیشینه انرژی تولید شده از فوتون های چشمه بر حسب MeV، است. مقدار عمق تعادل به دست آمده از این روش بزرگتر از آنچه که در زیربندهای الف-۱ و الف-۲ توضیح داده شده است، می باشد ( برای جزئیات بیشتر شرایط مناسب برای اعمال هر یک از دو روش، به پیوست X3 استاندارد ASTM E668 مراجعه شود).





شکل الف-۱- یک نمونه از دز جذبی بر حسب عمق در ماده

## پیوست ب

### (آگاهی‌دهنده)

#### نمونه محاسبه دُز جذبی برای طیف گسترده انرژی فوتون

ب-۱ برای نشان دادن این روش، یک نمونه محاسبه در این پیوست ارائه شده است. این محاسبه بر اساس فرض‌های زیر است:

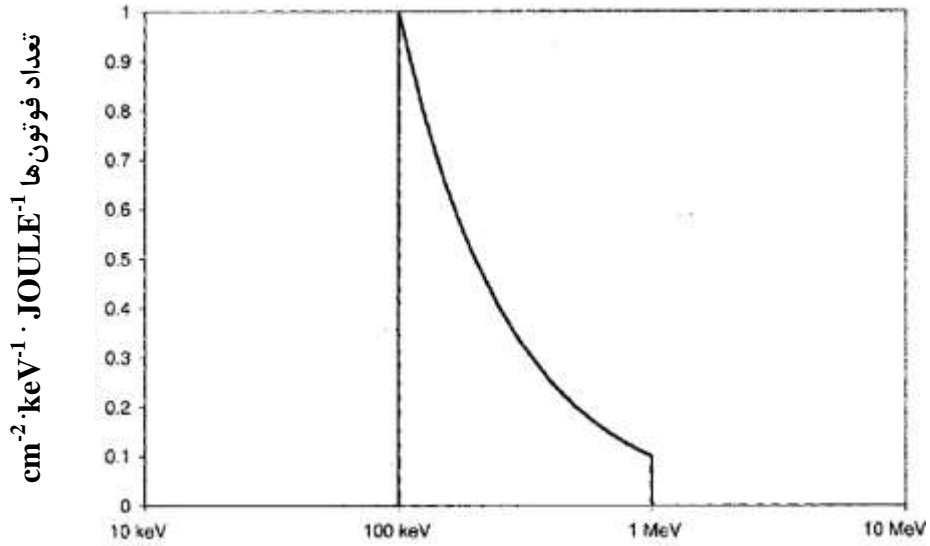
ب-۱-۱ یک دُزسنج سیلیکونی مناسب، خروجی ماشین پرتو ایکس را در یک مکان مشخص  $15 \text{ Gy}$  ( $1.5 \times 10^3 \text{ rad}$ ) اندازه‌گیری کرده است.

یادآوری- یکای دُز جذبی در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI)، گری است که با علامت Gy نشان داده می‌شود. یک گری، برابر یک ژول بر کیلوگرم است. یکای سابق دُز جذبی راد می‌باشد. هر گری برابر ۱۰۰ راد است.

ب-۱-۲ طیف خروجی پرتو ایکس از ماشین همان‌طور که در شکل ب-۱ نشان داده شده است، به صورت  $1/E$  از  $100 \text{ keV}$  تا  $1 \text{ MeV}$  تغییر می‌کند که  $E$  انرژی فوتون است. شارش خروجی فوتون از ماشین پرتو ایکس که در شکل ب-۱ نشان داده شده است، به انرژی فوتون بر حسب کیلو الکترون ولت در نقطه اندازه‌گیری و انرژی ورودی به ماشین بر حسب ژول، بهنجار شده است. بنابراین، یکاهای مقیاس قراردادی محور عمودی برابر تعداد فوتون‌ها در  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{keV}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$  است.

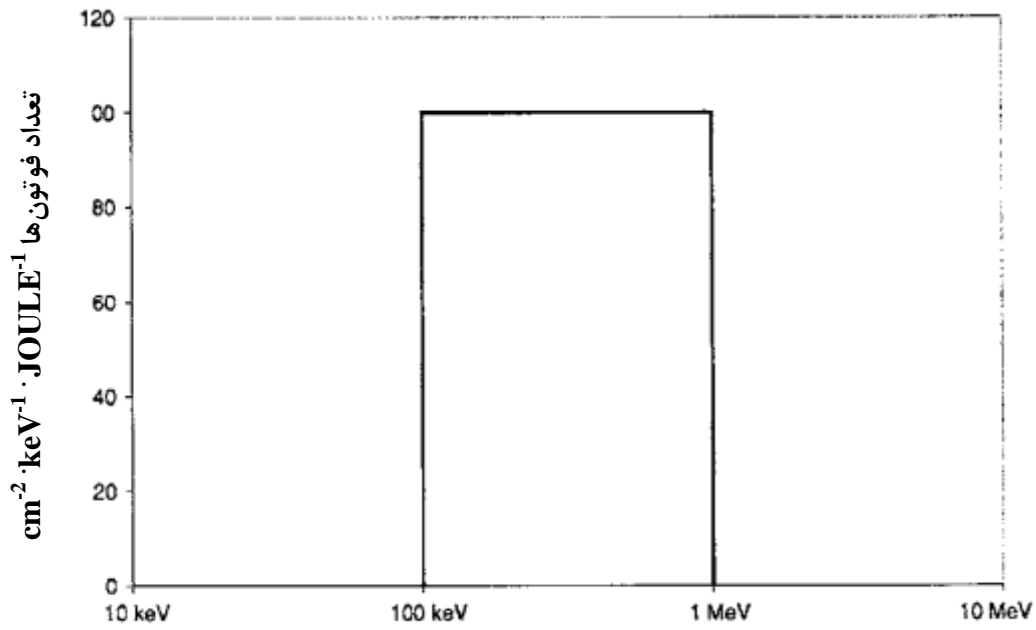
ب-۲ از آنجایی که کمیت موردنظر دُز جذبی است، به‌جای شارش فوتون، شارش انرژی خروجی بهنجار شده لازم است. شارش انرژی بهنجار شده برای هر بازه انرژی می‌تواند از حاصل ضرب شارش فوتون بهنجار شده در شکل ب-۱ در مقدار مربوط به انرژی فوتون به ازای بازه انرژی به‌دست بیاید. نتایج در شکل ب-۲ نشان داده شده است که در آن شارش انرژی بهنجار شده مقاداری ثابت برابر  $100 \text{ keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{keV}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$  بر روی تمام گستره انرژی دارد.

ب-۳ توجه داشته باشید در این نقطه دُزسنج بر حسب دُز جذبی در سیلیکون کالیبره شده است و حاوی لایه‌ای از ماده‌ای است که آن را در قله منحنی دُز جذبی بر حسب عمق قرار می‌دهد. نمونه‌ای از طیف توصیف شده، در شکل الف-۱ نشان داده شده است. اگرچه این منحنی، نمونه‌ای برای اندازه‌گیری است، همواره باید برای هر چشمه پرتو دهی و شرایط مربوط به آن به‌صورت تجربی به‌دست بیاید.



انرژی فوتون ( $E$ )

شکل ب-۱- نمودار تعداد- طیف انرژی ناشی از پرتو ایکس ماشین فلاش<sup>۱</sup>



انرژی فوتون ( $E$ )

شکل ب-۲- طیف شارش انرژی فرضی از پرتو ایکس ماشین فلاش

ب-۳-۱ شکل الف-۱، نشان می‌دهد که قله منحنی دُز جذبی سیلیکون بر حسب عمق، % ۸۵ دُز سطحی برون‌یابی شده برای طیف فرودی در شکل ب-۱ است. بنابراین دُز سطحی برون‌یابی شده در این مثال با تقسیم دُز جذبی اندازه‌گیری شده (۱۵ Gy) بر ۰٫۸۵ به دست می‌آید و برابر با ۱۷٫۶ Gy است.

ب-۳-۲ بر طبق دُز تعریف شده در معادله (۱)، دُز سطحی محاسبه شده رابطه تابعی یکسانی با  $\psi(E)$  دارد. سایر پارامترها در آن معادله برای این مثال به این صورت فرض شده است که  $\psi(E)$  طیف شارش انرژی فرودی،  $\mu_{en}(E)/\rho$  ضریب جذب انرژی جرمی برای سیلیکون و  $I$ ، ثابت بهنجارش است. حدهای انرژی برای انتگرال همان طور که در شکل ب-۲ نشان داده شده، از ۰٫۱ MeV تا ۱ MeV است. مقادیر ضرایب جذب انرژی جرمی،  $\mu_{en}(E)/\rho$ ، برای بازه انرژی مورد استفاده، در جدول ب-۲ داده شده‌اند. مطابق با زیربند ب-۲،  $\psi(E)$  به انرژی ورودی ماشین، بهنجار شده است و یکای آن  $\text{keV}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  است.

جدول ب-۱- ارزیابی عددی انتگرال در معادله (ب-۱) برای نمودار تعداد- طیف انرژی نشان داده شده در شکل ب-۱ به منظور تعیین ثابت بهنجارش  $I$

شارش انرژی نرمال $\text{keV} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	$\mu_{en}/\rho$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	شارش انرژی در بازه‌های زمانی $\text{keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}$	انرژی فوتون keV
$۲,۲۹ \times ۱۰^۲$	۰٫۴۵۹	$۵۰ \times ۱۰^۲$	۱۰۰
$۱,۵۶ \times ۱۰^۲$	۰٫۳۱۲	$۵۰ \times ۱۰^۲$	۱۵۰
$۲,۹۳ \times ۱۰^۲$	۰٫۲۹۳	$۱۰۰ \times ۱۰^۲$	۲۰۰
$۲,۹۴ \times ۱۰^۲$	۰٫۲۹۴	$۱۰۰ \times ۱۰^۲$	۳۰۰
$۲,۹۸ \times ۱۰^۲$	۰٫۲۹۸	$۱۰۰ \times ۱۰^۲$	۴۰۰
$۲,۹۸ \times ۱۰^۲$	۰٫۲۹۸	$۱۰۰ \times ۱۰^۲$	۵۰۰
$۵,۹۰ \times ۱۰^۲$	۰٫۲۹۵	$۲۰۰ \times ۱۰^۲$	۶۰۰
$۵,۷۶ \times ۱۰^۲$	۰٫۲۸۸	$۲۰۰ \times ۱۰^۲$	۸۰۰
$۲۷,۳۴ \times ۱۰^۲$			مجموع

ب-۳-۳ ثابت بهنجارش،  $I$ ، با استفاده از معادله (۱) به صورت معادله (ب-۱) به دست می‌آید:

$$I = \frac{D}{\int_{0,1}^{1 \text{ MeV}} \psi(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE}$$

$$= \frac{17,6}{27,34 \times 10^2} \quad (\text{ب-۱})$$

$$= 6,4 \times 10^{-3} \text{Gy} \cdot \text{J} \cdot \text{g} \cdot \text{keV}^{-1}$$

که در آن:

$D$ ، دُز سطحی، و از محاسبات زیربند ب-۳-۱ به دست می‌آید و انتگرال با نتایج نشان داده شده از جدول ب-۱ به صورت عددی محاسبه می‌شود.

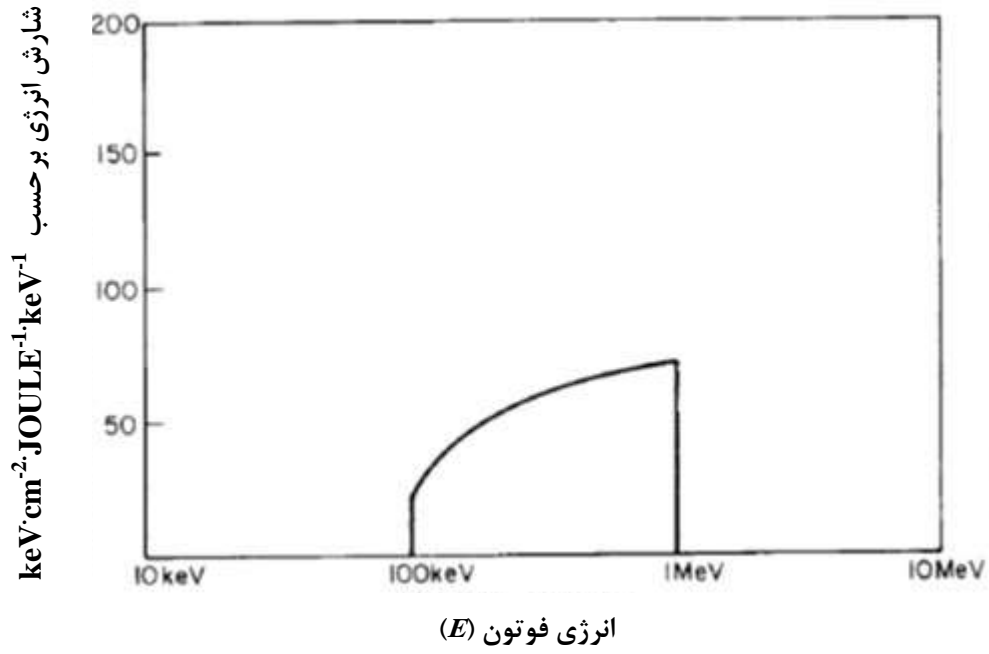
ب-۴ حال، در نظر بگیرید در این نمونه محاسبات چه مقدار دُز جذبی در چه عمقی از آزمون آهن اتفاق می‌افتد. عمق مورد نظر ۶/۴ mm (در حدود ۰/۲۵ in.) معادل با  $5 \text{ g cm}^{-2}$  است.

ب-۴-۱ برای انجام این محاسبات، از معادله (۱) استفاده می‌شود که در آن  $\Psi(E)$  طیف شارش انرژی در عمق  $5 \text{ g cm}^{-2}$  در آهن است و طیف فرودی در سطح نیست. طیف تضعیف شده مناسب با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود. مقادیر ضرایب جذب انرژی جرمی از منبع [2] کتاب‌نامه و طیف فرودی از شکل ب-۱ به دست می‌آیند. جزئیات این محاسبه در جدول ب-۲ همراه با نتیجه طیف شارش انرژی در شکل ب-۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود  $5 \text{ g cm}^{-2}$  از آهن، شکل طیف شارش انرژی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد.

جدول ب-۲- تبدیل طیف پرتوایکس فرودی نشان داده شده در شکل ب-۱ به طیف شارش- انرژی تضعیف شده نشان داده شده در شکل ب-۳

طیف شارش انرژی $\text{keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{keV}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$	طیف تضعیف شده $\text{cm}^{-2} \cdot \text{keV}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}/\rho \text{ (cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}\text{)}$	طیف ورودی $\text{cm}^{-2} \cdot \text{keV}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$	انرژی فوتون keV
۳۳	۰/۳۳	۰/۲۱۹	۱/۰	۱۰۰
۶۷	۰/۴۵	۰/۰۸۱۴	۰/۶۷	۱۵۰
۷۸	۰/۳۹	۰/۰۴۹۵	۰/۵۰	۲۰۰
۸۴	۰/۲۸	۰/۰۳۳۵	۰/۳۳	۳۰۰
۸۴	۰/۲۱	۰/۰۳۰۸	۰/۲۵	۴۰۰
۸۵	۰/۱۷	۰/۰۲۹۵	۰/۲۰	۵۰۰
۹۰	۰/۱۵	۰/۰۲۸۶	۰/۱۷	۶۰۰
۸۸	۰/۱۱	۰/۰۲۷۳	۰/۱۳	۸۰۰

ب-۴-۲ انتگرال معادله (۱) در زیربند ب-۳-۳، با استفاده از مقادیر  $\mu_{\text{en}}(E)/\rho$  برای آهن (به منبع [2] کتاب‌نامه مراجعه شود) و طیف تضعیف شده از جدول ب-۲ محاسبه شده است. نتیجه در جدول ب-۳ آورده شده است.



شکل ب-۳- طیف شارش انرژی تضعیف شده حاصل در عمق  $5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  از آهن

جدول ب-۳- ارزیابی عددی انتگرال معادله ب-۱ برای طیف شارش- انرژی نشان داده شده در شکل ب-۳ برای تعیین دُز جذبی آهن در عمق  $5 \text{ g cm}^{-2}$

شارش انرژی نرمال $\text{keV} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}/\rho$ $(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	شارش انرژی در بازه‌های زمانی $\text{keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}$	انرژی فوتون $\text{keV}$
$3,61 \times 10^2$	۰,۲۱۹	$16,5 \times 10^2$	۱۰۰
$2,69 \times 10^2$	۰,۰۸۱۴	$33 \times 10^2$	۱۵۰
$3,86 \times 10^2$	۰,۰۴۹۵	$78 \times 10^2$	۲۰۰
$2,81 \times 10^2$	۰,۰۳۳۵	$84 \times 10^2$	۳۰۰
$2,59 \times 10^2$	۰,۰۳۰۸	$84 \times 10^2$	۴۰۰
$2,51 \times 10^2$	۰,۰۲۹۵	$85 \times 10^2$	۵۰۰
$5,15 \times 10^2$	۰,۰۲۸۶	$180 \times 10^2$	۶۰۰
$4,80 \times 10^2$	۰,۰۲۷۳	$176 \times 10^2$	۸۰۰
$28,02 \times 10^2$			مجموع

ب-۳-۴ دُز جذبی در این نمونه محاسبه برای آهن، حاصل ضرب نتیجه ارزیابی عددی انتگرال معادله (ب-۱) که در جدول ب-۳ ارائه شده است در فاکتور بهنجارش،  $I$ ، که در زیربند ب-۳-۳ به دست آمده است، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D = 6,4 \times 10^{-3} \times 28,02 \times 10^2 = 18 \text{ Gy(Fe)} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ rad(Fe)} \quad (\text{ب-۲})$$

پیوست پ

(آگاهی‌دهنده)

یک نمونه محاسبه دُز جذبی برای طیف انرژی فوتون تقریباً تک‌انرژی

پ-۱ ایزوتوپ‌های پرتوزایی مانند سزیم-۱۳۷ و کبالت-۶۰، نمونه‌هایی از چشمه‌های با طیف فوتون تقریباً تک‌انرژی هستند. این نمونه محاسبات برای این قبیل چشمه‌های ایزوتوپی به کار می‌روند. فرض می‌شود فوتون‌های پراکنده‌شده از این‌گونه از چشمه‌ها، یک مؤلفه قابل صرف‌نظر از شارش فوتون فرودی است. در عمل، غالباً این فرض معتبر نیست، اما اگر طیف واقعی انرژی فوتون مشخص باشد، روش اجرایی محاسبات تشریح‌شده در پیوست ب قابل استفاده است.

پ-۲ برای مثال، فرض کنید سامانه پرتودهی با چشمه کبالت-۶۰، آهنگ پرتوگیری،  $\dot{X}$ ، با مقدار  $1.5 \times 10^3$  رونتگن<sup>۱</sup> بر ساعت را در یک مکان مشخص ایجاد می‌کند. فرض می‌شود طیف انرژی فوتون فرودی در مکان مورد نظر، مؤلفه پراکندگی قابل اغمازی داشته باشد.

پ-۲-۱ برای همان آزمون ذکرشده در پیوست ب، آهنگ دُز جذبی در عمق  $5 \text{ g cm}^{-2}$  طبق معادله زیر به دست می‌آید:

$$D = 8,69 \times 10^{-3} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Fe}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}} \cdot X \exp \left[ - \left( \mu_{\text{en}}(E)/\rho \right)_{\text{Fe}} \cdot t \right] \quad (\text{پ-۱})$$

که مقدار  $8,69 \times 10^{-3}$  رونتگن را به گری (در هوا) تبدیل می‌کند؛  $\mu_{\text{en}}/\rho$  ضریب جذب انرژی جرمی برای انرژی‌های فوتون (میانگین  $1,25 \text{ MeV}$ ) چشمه کبالت-۶۰ است؛  $\dot{X}$ ، آهنگ پرتوگیری و  $t$  عمق آهن است. (برای کسب جزئیات بیشتر در مورد محاسبات، به مدرک ICRU 80 مراجعه شود).

پ-۲-۲ نسبت ضرایب جذب انرژی جرمی آهن به هوا فقط از  $0,942$  در  $1 \text{ MeV}$  تا  $0,940$  در  $2 \text{ MeV}$  تغییر می‌کند. بنابراین، برای این محاسبه  $1 \text{ MeV}$  انتخاب شده است. با استفاده از معادله (پ-۱) نتیجه برای این مثال، به صورت زیر است:

$$D_{\text{Fe}} = 8,69 \times 10^{-3} \cdot 0,942 \cdot 1,5 \times 10^3 \cdot 0,886 = 11 \text{ Gy(Fe)} \cdot \text{h}^{-1} \quad (\text{پ-۲})$$

$$= 1,1 \times 10^3 \text{ rad(Fe)} \cdot \text{h}^{-1}$$



پیوست ت

(آگاهی دهنده)

تضعیف باریکه

ت-۱ معادله (۳) (به بند ۵ مراجعه شود) تقریب مناسبی برای محاسبه تضعیف طیف شارش انرژی در عمق جرمی  $t$  است. این پیوست، استنتاجی از معادله (۳) را فراهم می‌کند که تقریب‌های به‌کار رفته در آن به‌طور شفاف، ارائه شده است.

ت-۲ فرض‌های استفاده‌شده در این استنتاج به شرح زیر است:

ت-۱-۲ فرض می‌شود تعادل ذره باردار برقرار است. برای توضیح بیشتر به زیربند ۶-۱-۳ و پیوست الف مراجعه شود.

ت-۲-۲ فرض می‌شود هندسه باریکه، گسترده باشد. برای توضیح بیشتر به زیربند ۶-۱-۴ مراجعه شود.

ت-۲-۳ فرض می‌شود عمق جرمی  $t$ ، کوچک است. برای توضیح بیشتر به زیربند ۴-۵ مراجعه شود. توجه به این نکته نیز اهمیت دارد که برای استفاده از معادله (۶) نیز الزام استفاده از مقادیر کوچک  $t$  برقرار است.

ت-۲-۴ فرض می‌شود هندسه مسطح و یک بُعدی است. این فرض با فرض هندسه باریکه گسترده سازگار است. برای توضیح بیشتر به زیربند ۶-۱-۴ مراجعه شود.

ت-۳ اگر طیف شارش انرژی  $\psi_0(E)$  فرودی در صفحه باشد، در آن صورت  $\psi_t(E)$  را می‌توان به‌صورت طیف شارش انرژی در عمق جرمی  $t$  تعریف کرد:

$$\psi(t) = \int_0^{\infty} \psi_t(E) dE \quad (ت-۱)$$

به‌طوری که  $\psi(t)$  شارش انرژی در عمق جرمی  $t$  است. به‌علاوه، انرژی واگذارشده در واحد سطح در یک صفحه بسیار کوچک با ضخامت جرمی  $dt$  به‌صورت زیر است:

$$-\frac{d\psi(t)}{dt} \cdot dt \quad (ت-۲)$$

ت-۴ معادله (۱) دُر جذبی را به صورت زیر تعریف کرده است:

$$D = \int_0^{\infty} \Psi_t(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE \quad (\text{ت-۳})$$

و معادله (ت-۲) انرژی واگذار شده را بیان می کند، که به صورت زیر است:

$$\int_0^{\infty} \Psi_t(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (\text{ت-۴})$$

ت-۵ سپس، حالت طیف فرودی، تکفام با انرژی  $E_0$  در نظر گرفته خواهد شد. به علاوه فرض می شود که  $\mu_{en}(E)$  در گستره مورد نظر انرژی فوتون خیلی تغییر نمی کند. برای شرح دقیق تر معادله، فرض می شود  $\mu_{en}(E)$  تفاوت ناچیزی با گستره های انرژی شامل انرژی فوتون های اولیه (فرودی) و انرژی اکثر فوتون های پراکنده شده تولید شده توسط باریکه اولیه را دارد. اگر باریکه اولیه از میان ضخامت جرمی به اندازه کافی کوچک عبور کند، این فرض قابل قبول است. به این معنی که اگر  $\mu_{en}(E)$  به اندازه کافی کوچک باشد، تغییرات انرژی فوتون از انرژی فرودی  $E_0$  نیز به اندازه کافی کوچک خواهد بود. با این فرض این تقریب برای خارج کردن ضریب جذب انرژی جرمی از انتگرال زیر، قابل قبول خواهد بود

$$[\mu_{en}(E_0)/\rho] \int_0^{\infty} \Psi_t(E) dE = -\frac{d\psi(t)}{dt} \quad (\text{ت-۵})$$

یا، با استفاده از معادله (ت-۱)

$$[\mu_{en}(E_0)/\rho] \psi(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} \quad (\text{ت-۶})$$

که پاسخ آن به صورت زیر است:

$$\psi(t) = \psi(0) e^{-[\mu_{en}(E_0)/\rho]t} \quad (\text{ت-۷})$$

که با استفاده از معادله (ت-۱) مانند معادله زیر است:

$$\int_0^{\infty} \Psi_t(E) dE = \psi_0(E_0) e^{-[\mu_{en}(E_0)/\rho]t} \quad (\text{ت-۸})$$

ت-۶ این محاسبه می تواند به باریکه فرودی چندفام تعمیم داده شود:

$$\int_0^{\infty} \Psi_t(E) dE = \int_0^{\infty} \psi_0(E) e^{-[\mu_{en}(E_0)/\rho]t} dE \quad (\text{ت-۹})$$

که معادله (۳) را نشان می دهد.

## پیوست ث

### (آگاهی دهنده)

#### توجیه تجربی معادله (۳)

ث-۱ در منبع [5] کتابنامه، عبور پرتوهای گامای کبالت-۶۰ از میان حفاظهای سربی استوانه‌ای نشان داده شده است (به شکل ث-۱ مراجعه شود). منحنی میانی در شکل، داده‌های تجربی را نشان می‌دهد و عبور تمام فوتون‌ها (فوتون‌های اولیه و پراکنده‌شده) را به صورت تابعی از ضخامت دیواره ارائه می‌دهد.

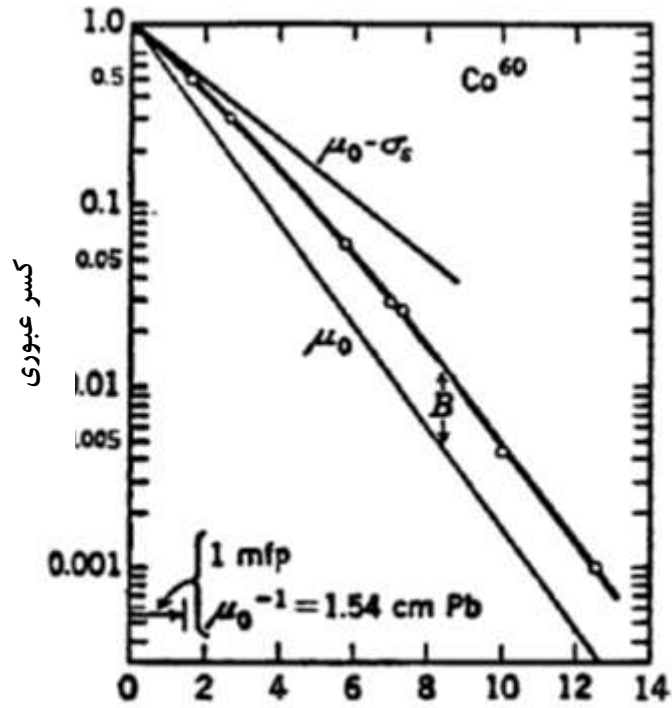
ث-۲ اولین تقریب عبور فوتون در منحنی پایینی شکل ث-۱ نشان داده شده است. این منحنی عبور محاسبه‌شده پرتوهای گامای اولیه (غیرپراکنده) را ارائه می‌دهد. به این معنی که فرض می‌شود پرتو پراکنده کامپتون از باریکه عبوری حذف شده است. این عبور محاسبه‌شده در منحنی نیمه‌لگاریتمی به شکل خط راست با شیب ضریب تضعیف کل،  $\mu_0$ ، است.

ث-۳ دومین تقریب عبور فوتون در منحنی بالایی شکل ث-۱ نشان داده شده است. برای مقادیر کم ضخامت دیواره، عبور به‌عنوان تابعی از ضخامت می‌تواند با یک خط راست با شیب برابر با  $\mu_0 - \delta S$  تقریب زده شود. توجه شود که این خط راست تقریب خوبی برای داده تجربی به ازای ضخامت‌های کمتر از یک پویش آزاد میانگین<sup>۱</sup> (۱ mfp) است. با استفاده از بند اصطلاحات و تعاریف این استاندارد،  $\mu_0 - \delta S$  برابر ضریب جذب انرژی  $\mu_{en}$  است. توجه کنید که استفاده از خط راست بر این فرض دلالت دارد که  $\mu_{en}$  به‌عنوان تابعی از ضخامت به‌طور معنی‌داری تغییر نمی‌کند. برای توضیحات بیشتر به زیربند ت-۵ مراجعه شود.

ث-۴ مثال تجربی شکل ث-۱ برای حالت حفاظ سربی است. این مثال بهتر است به بدترین حالت نزدیک باشد که در آن سرب سطح مقطع برخورد نسبتاً بالایی برای پراکندگی کامپتون دارد. بنابراین معادله (۳) برای مقادیر به اندازه کافی کوچک عمق جرمی  $t$  قابل استفاده است.

---

1 -Mean free path



ضخامت دیواره استوانه سربی (cm)

شکل ۱- عبور پرتوهای گامای کبالت-۶۰ از میان حفاظ استوانه‌ای سربی. خطوط تئوری برای عبور فوتون‌های اولیه،  $\mu_0$ ، و جذب واقعی انرژی اولیه،  $\mu_0 - \sigma_s$ ، به منظور مقایسه نشان داده شده‌اند (به منبع [5] کتاب‌نامه مراجعه شود)

### پیوست ج

#### (آگاهی دهنده)

#### محاسبه دُز

ج-۱ این پیوست استخراج دُز از معادله (۴) را ارائه می‌دهد (به بند ۶ مراجعه شود). این استخراج نتایج پیوست ت را مورد استفاده قرار می‌دهد.

ج-۲ جایگزین کردن معادله (ت-۱) در معادله (ت-۴) نتیجه می‌دهد:

$$\int_0^{\infty} \psi_t(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE = -\frac{d}{dt} \int_0^{\infty} \psi_t(E) dE \quad (\text{ج-۱})$$

جایگزینی معادله (۱) و (۳) می‌دهد:

$$D = \int_0^{\infty} \psi_t(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE = -\frac{d}{dt} \int_0^{\infty} \psi_0(E) e^{-[\mu_{en}(E_0)/\rho]t} dE \quad (\text{ج-۲})$$

یا

$$D = \int_0^{\infty} \psi_0(E) e^{-[\mu_{en}(E)/\rho]t} [\mu_{en}(E)/\rho] dE \quad (\text{ج-۳})$$

این معادله به ما اجازه می‌دهد معادله (۴) را استخراج کنیم.

### کتابنامه

- [1] Attix, F. H., Introduction to Radiological Physics and Radiation *Dosimetry*, John Wiley and Sons, 1986.
- [2] Hubbel, J. H., and Seltzer, S. M., "Table of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest," National Institute of Standards and Technology *Report NISTIR 5632*, May 1995. For latest update see <http://physics.Nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>.
- [3] Hubbel, J. H. and Berger, M. J., "Attenuation Coefficients, Energy Absorption Coefficients, and Related Quantities," *Engineering Compendium on Radiation Shielding*, Vol 1, Chapter 5.1, Springer-Verlag, New York, N.Y., 1968.
- [4] Chilton, A. B., "Broad Beam Attenuation," *Engineering Compendium on Radiation Shielding*, Vol 1, Chapter 5.3, Springer-Verlag, New York, N.Y., 1968.
- [5] Evans, R. D., *The Atomic Nucleus*, (McGraw Hill Book Co., Inc., New York, 1955), p. 732.