بسم الله الرحمن الرحیم

انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
nstp.nstri.ir

پیامدهای بهداشتیِ پرتوهای یون‌ساز

تألیف

ایوب بنوشی
زهره بیگدلی

عنوان و نام پدیدآور: پیامدهای بهداشتیِ پرتوهای یون‌ساز / مؤلفان: ایوب بنوشی، زهره بیگدلی
مشخصات نشر: تهران: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۲۵۲ ص.: مصور.
فروست: (انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، شماره ۹۵۸۳).
شابک: (ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۴۵-۳)
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا
عنوان فرعی: تشعشع یونیزه‌کننده، جنبه‌های بهداشتی، پیش‌بینی‌های ایمنی
رده‌بندی کنگره: QC۷۵۹
رده‌بندی دیویی: ۵۳۹/۷۲۲
شماره‌ی کتابخانه ملی: ۷۳۴۰۱۹۰

انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
nstp.nstri.ir

پیامدهای بهداشتیِ پرتوهای یون‌ساز

تألیف: ایوب بنوشی و زهره بیگدلی
ویراستاری علمی: محمدرضا کاردان
ناظر علمی ـ فنی: سیدابوالفضل قاسمی
طراح جلد: مریم رحیمی
وزیری، ۲۵۲ صفحه، ۱۰۰ نسخه، چاپ اول، پاییز ۹۹
چاپ و صحافی: دیجیتال آبنوس
کلیه‌ی حقوق چاپ و انتشار این اثر متعلق به پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای است.
بها: ۳۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۳-۴۵-۷۴۱۴-۶۰۰-۹۷۸ ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۴۵-۳

پیشگفتار ناشر

انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

یک ناشر تخصصی دولتی است که از سال ۱۳۸۶ فعالیت خود را آغاز کرده است و با توجه به تخصصی بودن موضوع، بیش‌تر کتب در حوزه‌ی علوم تئوری و تجربی، به‌ویژه آن‌هایی که به علوم و فنون هسته‌ای مربوط می‌شوند، منتشر می‌کند.

از سوی دیگر، انتشارات همتش را بر انتشار کتب به زبان فارسی، اعم از ترجمه، تألیف و گردآوری و تدوین معطوف ساخته است تا از این راه هم دانش هسته‌ای برای فارسی زبان‌ها به آسانی در دسترس و قابل استفاده باشد و هم با نشر واژه‌های معادل فارسی برای واژگان لاتین حوزه‌ی علوم و فنون هسته‌ای به غنای این زبان کمک کند.

اهداف مهم، انتشارات پژوهشگاه را می‌توان در چند محور بیان کرد:

- اعتلای دانش هسته‌ای کشور و ایجاد تعامل سازنده میان پژوهشگران، انتشار کتب تخصصی و ترویجی مرتبط با علوم و فنون هسته‌ای؛
- انتشار کتبی که از دیدگاه تاریخ علم اهمیّت دارند؛
- انتشار کتب مشاهیر و دانشمندان بزرگ علوم و فنون هسته‌ای، از جمله برندگان جوایز نوبل و ... ؛
- انتشار کتب در حوزه‌های مرتبطی که به هر دلیل در زبان فارسی مورد غفلت قرار گرفته است یا از آن‌ها یاد نشده است.

همچنین انتشارات در نظر دارد شماری از کتب را با حفظ حقوق مؤلفان و مترجمان، به صورت الکترونیکی، ارزان‌قیمت یا رایگان، در اختیار خوانندگان بگذارد. همه‌ی این اهداف تنها به‌کمک مؤلفان و مترجمان خبره و علاقه‌مند ممکن است که انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای از همکاری ایشان استقبال می‌کند.

فهرست

فهرست I

داستانِ این کتاب V

فصلِ ۱ فیزیکِ پرتوها

۱ـ۱ـ موج و مشخصه‌های آن ۱

۱ـ۲ـ موجِ الکترومغناطیسی و ویژگی‌های آن ۲

۱ـ۲ـ۱ـ بیناب اموا‌جِ الکترومغناطیسی ۵

۱ـ۲ ـ۲ـ فوتون ۷

۱ـ۳ ـ یونش و پرتوهای یون‌ساز (یونیزان) ۸

۱ـ۴ ـ تابشِ ایکس (X) ۱۰

۱ـ۴ ـ۱ـ فرایندهای تولیدِ تابشِ ایکس ۱۱

۱ـ۴ ـ۲ـ لامپ‌های مولدِ ایکس ۱۴

۱ـ۴ ـ۳ـ بیناب تابشِ ایکس ۱۶

۱ـ۴ ـ۴ـ کاربردی برای تابشِ ایکس ۱۸

۱ـ۵ ـ تابشِ هسته‌ای ۱۸

۱ـ۵ ـ۱ـ دسته‌بندیِ هسته‌های اتمی ۱۹

۱ـ۵ ـ۲ـ نیروهای بینِ ذراتِ هسته‌ای ۲۰

۱ـ۵ ـ۳ـ ناپایداری و واپاشیِ هسته‌ای ۲۰

۱ـ۶ ـ تابشِ آلفا (α) و ایزوتوپ‌های آلفازا ۲۵

۱ـ۶ ـ۱ـ بُردِ تابشِ آلفا ۲۵

۱ـ۶ ـ۲ـ کاربردی برای تابشِ آلفا ۲۷

۱ـ۷ ـ تابشِ بتا (β) و ایزوتوپ‌های بتازا ۲۸

۱ـ۷ـ۱ـ تابشِ بتا و بُردِ آن ۲۹

۱ـ۷ـ۲ـ کاربردی برای تابشِ بتا ۲۹

۱ـ۸ ـ تابشِ گاما (γ) و واپاشی‌های گامازا ۳۰
۱ـ۸ ـ۱ـ ویژگی‌های تابشِ گاما ۳۲
۱ـ۸ ـ۲ـ کاربردی برای تابشِ گاما ۳۴
۱ـ۹ ـ نوترون ۳۵
۱ـ۹ـ۱ـ منابعِ تولیدِ نوترون ۳۷
۱ـ۹ـ۲ـ کاربردهای نوترون ۳۹
فصلِ ۲ منابعِ تابش و پیشه‌های پرتوی
۲ـ۱ ـ مشخصه‌های یک چشمه‌ی پرتوزا ۴۴
۲ـ۱ـ۱ ـ فعالیّتِ یک ماده‌ی پرتوزا ---------- ۴۵
۲ـ۱ـ۲ ـ نیمه‌عمر ---------- ۴۶
۲ـ۲ ـ منابعِ تابشِ طبیعی ۴۷
۲ـ۲ـ۱ ـ تابشِ کیهانی ---------- ۴۸
۲ـ۲ـ۲ ـ عناصرِ پرتوزای جهان‌خلقتی ---------- ۴۹
۲ـ۲ـ۳ ـ عناصرِ پرتوزای اَزلی ---------- ۴۹
۲ـ۲ـ۴ ـ تابشِ زمینه ---------- ۵۱
۲ـ۳ ـ منابعِ تابشِ مصنوعی ۵۲
۲ـ۴ ـ پیشه‌های پرتوی ۵۴
۲ـ۴ـ۱ ـ تأسیساتِ هسته‌ای ---------- ۵۵
۲ـ۴ـ۲ ـ تأسیساتِ تابش‌دهی ---------- ۵۸
۲ـ۴ـ۳ ـ پرتونگاریِ صنعتی ---------- ۶۴
۲ـ۴ـ۴ ـ کاربردهای صنعتیِ چشمه‌های پرتوزا ---------- ۶۹
۲ـ۴ـ۵ ـ رادیولوژی و رادیوتراپی ---------- ۶۹
۲ـ۴ـ۶ ـ رادیوتراپی ---------- ۷۷
۲ـ۵ ـ رده‌بندیِ چشمه‌های پرتوزا ۷۸
فصلِ ۳ پیامدهای زیستیِ پرتوگیری
۳ـ۱ـ دسته‌بندیِ پیامدهای مخربِ تابش ۸۱
۳ـ۱ـ۱ـ پیامدهای قطعی/اتفاقی ---------- ۸۲
۳ـ۱ـ۲ـ پیامدهای زودرس/دیررس ---------- ۸۵

۳ـ۲ـ سازوکارهای آسیب‌رسانیِ تابش ۸۵
۳ـ۲ـ۱ـ تغییراتِ DNA در اثرِ پرتوگیری ---------- ۸۶
۳ـ۲ـ۲ـ آسیب‌های سلولی ---------- ۹۱
۳ـ۳ـ پیامدهای بالینیِ پرتوگیری ۱۰۰
۳ـ۳ـ۱ـ پیامدهای مزمن: سرطان و پیامدهای ارثی ---------- ۱۰۱
۳ـ۳ـ۲ـ پیامدهای حاد ---------- ۱۰۱
۳ـ۳ـ۳ـ پرتوگیریِ جنین ۱۰۳

فصلِ ۴ سنجشِ آسیب‌های تابش

۴ـ۱ ـ عاملِ زهراگینیِ تابشِ یون‌ساز ۱۰۵
۴ـ۲ ـ دُزِ جذبیِ تابش و یکای گری (Gy) ۱۰۶
۴ـ۲ ـ۱ـ یکاهای دُز جذبی ---------- ۱۰۹
۴ـ۲ ـ۲ـ آهنگِ دُز جذبی ---------- ۱۱۰
۴ـ۲ ـ۳ـ دُزِ جذبی و پیامدهای قطعیِ پرتوگیری ---------- ۱۱۱
۴ـ۲ ـ۴ـ کاراییِ زیستیِ تابش ---------- ۱۱۲
۴ـ۳ ـ دُزِ اندام ۱۱۵
۴ـ۴ ـ دُزِ معادل ۱۱۸
۴ـ۵ ـ دُزِ مؤثر ۱۲۰
۴ـ۵ ـ۱ـ منحنیِ دُز ـ پاسخ برای پیامدهای اتفاقی ---------- ۱۲۳
۴ـ۵ ـ۲ـ دُزِ اجباری و تخمینِ پرتوگیریِ داخلی ---------- ۱۲۶
۴ـ۶ ـ کمیّت‌های عملیاتی ۱۲۸
۴ـ۶ ـ۱ـ کمیّت‌های عملیاتی برای پایشِ فردی ---------- ۱۳۱
۴ـ۶ ـ۲ـ کمیّت‌های عملیاتی برای پایشِ محیطی ---------- ۱۳۱

فصلِ ۵ پیامدهای قطعیِ تابش

۵ ـ۱ـ سندرُم پرتویِ حاد (ARS) ۱۳۶
۵ ـ۱ـ۱ـ مراحلِ پیش‌رویِ ARS ---------- ۱۳۶
۵ ـ۱ـ۲ـ مدیریّتِ پزشکیِ ARS ---------- ۱۳۹
۵ ـ۱ـ۳ـ درمان ---------- ۱۴۹

۵ ـ۲ـ ضایعه‌ی پرتویِ موضعی (LRI) ۱۵۰
۵ ـ۲ـ۱ـ مراحلِ پیش‌رویِ LRI ---------- ۱۵۱
۵ ـ۲ـ۲ـ مدیریتِ پزشکی: تشخیص و درمان ---------- ۱۵۳

فصلِ ۶ حفاظت در برابرِ اشعه

۶ ـ۱ـ فنونِ مهندسیِ حفاظت در برابرِ اشعه ۱۵۸
۶ ـ۱ـ۱ـ عاملِ مدت‌زمان ---------- ۱۵۹
۶ ـ۱ـ۲ـ عاملِ فاصله ---------- ۱۵۹
۶ ـ۱ـ۳ـ عاملِ حفاظ ---------- ۱۶۲
۶ ـ۲ـ پارادایمِ حفاظتِ پرتوی ۱۶۳
۶ ـ۲ـ۱ـ هدف از حفاظت در برابرِ اشعه ---------- ۱۶۴
۶ ـ۲ـ۲ـ اصولِ ایمنی و حفاظتِ پرتوی ---------- ۱۶۷
۶ ـ۲ـ۳ـ وضعیّت‌ها و گونه‌های پرتوگیری ---------- ۱۸۱
۶ ـ۳ـ روش‌های اجرا در پارادایمِ حفاظتِ پرتوی ۱۸۷
۶ ـ۳ـ۱ـ قانون ---------- ۱۸۷
۶ ـ۳ـ۲ـ استاندارد ---------- ۱۸۷
۶ ـ۳ـ۳ـ نهادِ انتظامی ---------- ۱۸۸

پیوستِ I ساختمانِ سلول ۱۸۹

پیوستِ II پرتوگیریِ جنین و تصویربرداریِ ایکس ۱۹۳

پیوستِ III محاسبه‌ی آهنگِ دُزِ یک چشمه‌ی پرتوزا ۱۹۹

کتاب‌نامه ۲۰۵

واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی ۲۰۹

واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۲۲۱

نمایه ۲۳۳

داستانِ این کتاب

هر کتاب داستانی دارد؛ حتا اگر کتابِ داستان نباشد.

داستانِ این کتاب از برگزاریِ دوره‌های آموزشی‌ای با عنوانِ "ارزیابی و مدیریّتِ سلامتِ پرتوکاران" آغاز می‌شود. این دوره برای پزشکانی برگزار می‌شد که می‌خواستند درباره‌ی تابش و پیامدهای مخربِ آن، و نیز بیماری‌های متعاقبِ پرتوگیری و نحوه‌ی مدیریّتِ بیمارها چیزی بدانند. در این دوره‌ها، مراجعِ متعددی برای درس‌های مختلف به مخاطب‌ها معرفی می‌شد که عمدتاً به‌زبانِ انگلیسی بودند؛ در حالی که مخاطب‌های دوره به‌حق انتظار داشتند مرجعی فارسی و جامع در دسترس‌شان باشد. کلیدِ نوشتنِ این کتاب از همان‌جا، یعنی سالِ ۱۳۹۴ ه.ش.، زده شد.

همه‌ی کتاب‌هایی که موضوعاتِ مورد نظرِ ما را پوشش می‌دهند در عنوان‌شان عبارت‌هایی هم‌چون فیزیک‌بهداشت (health physics)، حفاظت در برابرِ اشعه (radiation protection)، یا چیزی شبیه به این‌ها دارند و کم‌وبیش مسیری یکسان را می‌پیمایند؛ از فیزیکِ پرتوها شروع می‌کنند، منابعِ تابش را معرفی می‌کنند، به سنجشِ پرتوها می‌پردازند؛ آسیب‌های تابشی را مرور می‌کنند، و درنهایت اصولِ حفاظت در برابر اشعه را معرفی می‌کنند؛ بعضی نیز به موضوعِ بیماری‌های ناشی از پرتوگیری و مدیریّت پزشکیِ آن‌ها نگاهی می‌اندازند. تفاوتِ این کتاب‌ها در سطحِ دشواریِ ارائه‌ی مطالب، و نیز تمرکزشان بر هریک از این موضوعات است. با این حساب، کتاب‌های فراوانی برای مخاطب‌های گوناگون، از دانش‌آموزها گرفته، تا مهندس‌ها و پزشک‌ها، تا فیزیک‌دان‌ها و پژوهشگرها نوشته، و منتشر شده است.

ما برای گزینشِ سرفصل‌های کتاب و ترتیبِ موضوعات، گرچه قصدِ تقلید نداشتیم؛ ناخوداگاه به‌همان راهی افتادیم که دیگران پیموده بودند. به این ترتیب، کتابی شش فصلی متولد شد؛ که نامِ فصل‌هاش در فهرست آمده است.

از شروعِ داستانِ کتاب می‌شد دریافت که مخاطبِ اصلی را پزشک‌ها برگزیدیم؛ گرچه در ادامه مخاطب‌ها را تعمیم دادیم و دیگر دست‌اندرکارانِ درمان، یعنی پرستارها و تیم‌های امدادِ پزشکی، را هم به پزشک‌ها افزودیم. با چنین مخاطب‌هایی طبیعی است که فصولِ یکم و دوم کتاب را، که بیش‌تر به فیزیک مرتبط است، ساده‌تر از دیگرِ فصل‌ها نوشته باشیم. با وجودِ این، جمعیّتِ مخاطب‌های برگزیده را به‌تنهایی برای یک کتابِ پایه‌ایِ فارسی‌زبان کافی نیافتیم؛ پس بازهم تلاش کردیم به‌گونه‌ای بنویسیم که دیگرانی هم بتوانند از آن استفاده کنند. برای نمونه، کارشناس‌هایی با تحصیلاتِ گوناگون

که در امورِ حفاظتِ پرتوی در مراکزِ صنعتی، پزشکی، یا نهادهای قانونی مشغول هستند، یا خواهند شد. به این منظور، سطحِ مطالبِ فصل‌های سوم و پنجم را، که به آسیب‌های پرتوی و امورِ پزشکی می‌پردازند، به‌گونه‌ای تعدیل کردیم که برای این افراد هم تا حدودی قابل‌استفاده باشد. می‌مانَد دو فصلِ چهارم و ششم. برای نوشتنِ این دو فصل فرض کردیم که خوانندگان اطلاعاتِ منسجمی درباره‌ی سنجشِ کمیّت‌های حفاظتی، و اصولِ و روش‌های حفاظت در برابر اشعه نداشته باشند.

کتابِ حاصل شاید تشابه‌هایی با دیگر کتاب‌های این حوزه داشته باشد؛ امّا شاخصه‌هایی، گاهاً منحصربه‌فرد، هم دارد:

- ساختارِ زبانیِ کتاب کاملاً فارسی است و از الگوهای زبانِ انگلیسی که به‌ویژه در کتاب‌های ترجمه‌شده دیده می‌شود هیچ اثری نیست.
- کتاب‌هایی که در علومِ تجربی نوشته شده است معمولاً مجموعه‌ای از اطلاعات هستند که برای اقناعِ خواننده تلاش نمی‌کنند؛ در حالی که این کتاب چنین نیست. متن حالتی روایی دارد که تلاش دارد ذهنِ خواننده را هدایت کند. این ویژگی به‌ویژه در فصلِ چهارم که به کمیّت‌ها و یکاهای حفاظتی می‌پردازد مشهود است.
- روایی‌بودنِ متن ویژگیِ کلِ کتاب است و تنها منحصر به مطالبِ تک‌تکِ فصل‌ها نیست. به عبارتِ دیگر، کتاب، برخلافِ بسیاری از کتاب‌های این حوزه، مجموعه‌ای از موضوعاتِ گسسته نیست و داستانی دارد که باید آن را از اول به آخر خواند. خواننده برای خواندنِ یک فصلِ متقدم هیچ‌گاه لازم نیست به فصولِ متأخر مراجعه کند. این ویژگی به‌خصوص نوشتنِ فصل‌های سومِ و چهارم را که مطالبی درهم‌تنیده دارند دشوار کرد.
- در کُلِ کتاب، مگر در چند جا، اثری از فرمول‌های ریاضی نیست که آن هم در ساده‌ترین شکلِ ممکن بیان شده است.
- برای حفظِ پیوستگیِ متن، بر خلافِ معمول، گاهی مطالبی در زیرنویسِ شکل‌ها آمده است که لزوماً در متنِ اصلی نیست. این مطالب نه‌تنها بی‌اهمیّت نیستند که گاهی بسیار مهم‌اند و نباید سرسری از آن‌ها گذشت.
- تلاش کرده‌ایم مطالب به‌سادگی و به‌درستی بیان شود. تلاش به این جهت لازم بود که حفظِ *سادگی* و *درستی* در کنارِ هم همیشه آسان نیست؛ گاهی ساده‌نویسی به نوشتنِ مطالبِ نادرست می‌انجامد و گاهی درست‌نویسی متن را پیچیده می‌کند. ما برای ساده‌نویسی هرجا که لازم بوده است بخشی از حقیقت را نوشته‌ایم، نه همه‌ی آن را.

در هر حال، آن‌هایی که دستی بر قلم دارند می‌دانند که رابطه‌ی نگارنده و قلم رابطه‌ای یک‌طرفه نیست و هرچه نگارنده می‌خواهد لزوماً آن چیزی نیست که قلم می‌نویسد. گاهی نگارنده ناخداست و گاهی قلم. مصداقی از این بیتِ مولانا:

گوی منی و می‌دوی در چوگانِ حکمِ من در پیِ تو همی دَوم، گرچه که می‌دوانم‌ات.

آن‌چه گفتیم چیزی بوده که می‌خواستیم بشود. در نهایت، خواننده است که داوری می‌کند. ما مشتاقیم این داوری‌ها را از نزدیکان‌مان بشنویم یا از خواننده‌هامان بخوانیم.

زمستانِ ۱۳۹۸
ایوب بنوشی و زهره بیگدلی

فصلِ ۱

فیزیکِ پرتوها

تابش یا پرتو[۱] در واقع حاملی است برای انتقالِ انرژی. انتقالِ انرژی می‌تواند توسطِ ذرات انجام شود یا توسطِ امواج. بدین‌سان، پرتو می‌تواند قطاری از ذره‌های پُرـ انرژی باشد که از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر منتقل می‌شود؛ یا موجی باشد که انرژی را حمل می‌کند، بدونِ این‌که در این انتقال ماده‌ای جابه‌جا شود. می‌توانیم اولی را پرتوِ ذره‌ای و دومی را پرتوِ موجی بنامیم.

برای مطالعه‌ی پرتوها می‌شود موضوعات را در سه دسته رده‌بندی کرد:

- نحوه‌ی تولید و منابعِ تابش،
- چه‌گونگیِ انتقالِ تابش در محیط،

و

- نحوه‌ی برخوردِ تابش با مواد.

در این فصل، و همچنین در فصلِ دوم، به دو موضوع نخست می‌پردازیم. در فصلِ سوم، به موضوعِ سوم خواهیم پرداخت؛ گرچه، برخوردِ تابش با مواد را به موادِ زیستی، یا به‌عبارتِ به‌تر بدنِ انسان محدود می‌کنیم.

برای شناختِ فیزیکیِ پرتوها و برهم‌کنش‌هایی که با مواد دارند باید اطلاعاتی در موردِ ساختمانِ اتم و نیزِ امواج داشته باشیم. فرضِ ما این است که خواننده‌ی کتاب حداقل‌هایی را که در موردِ ساختمانِ اتم لازم است می‌داند؛ پس مستقیم به‌سراغِ امواج، به‌ویژه از نوعِ الکترومغناطیسیِ آن، می‌رویم؛ گرچه در ادامه به ساختمانِ اتم باز خواهیم گشت و مختصری نیز در این باره گفت‌وگو خواهیم کرد.

۱ـ۱ ـ موج و مشخصه‌های آن

همه‌ی اجسامِ مادی مشخصه‌ای به‌نامِ جرم دارند. اجرام به‌واسطه‌ی موقعیّت‌شان در جهان و برهم‌کُنش‌هایی که باهم دارند دارای انرژی می‌شوند. انرژیِ این اجرام می‌تواند از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر منتقل شود. ساده‌ترین روشِ انتقالِ انرژی این است که جرم با حرکتِ خود انرژی را منتقل کند.

---

[۱] در این کتاب *تابش* و *پرتو* و *اشعه* در یک معنا استفاده می‌شوند.

برای نمونه، وقتی ما سنگی را پرتاب می‌کنیم انرژیِ بازوی ما که به سنگ داده شده است هم‌راه با آن منتقل می‌شود. با وجودِ این، راهِ دیگری هم برای انتقالِ انرژی هست. وقتی طنابی را به نوسان درمی‌آوریم؛ طناب، پس از انتقالِ انرژی از محلِ دستِ ما به‌سوی دیگرِ طناب، در محلِ پیشینِ خود می‌ماند. به‌عبارتِ دیگر، طناب نوسان‌هایی می‌کند و انرژی را انتقال می‌دهد، بدونِ این‌که خودش جابه‌جا شود. این نوع انتقالِ انرژی موجِ مکانیکی نامیده می‌شود.

امواجِ مکانیکی تنها امواجِ موجود در طبیعت نیستند. نوعِ دیگری از امواج نیز هست که به آن امواجِ الکترومغناطیسی گویند. ما هر روز با این امواج سروکار داریم؛ اما چون رفتارِ موجیِ آن‌ها را با چشم نمی‌بینیم، کم‌تر به آن‌ها موج می‌گوییم. برای نمونه، نوری که گرمای خورشید را به ما می‌رساند یک موجِ الکترومغناطیسی است که رفتارهایی مشابه با امواجِ مکانیکی‌ای همچون صدا دارد.

امواجِ الکترومغناطیسی و امواجِ مکانیکی تفاوت‌هایی دارند و نیز تشابه‌هایی. شاید مهم‌ترین تفاوت این باشد که برای شکل‌گرفتنِ موجِ مکانیکی به محیطی مادی (طناب یا هوا) نیاز هست، اما برای امواجِ الکترومغناطیسی چنین نیست؛ به‌عبارتِ ساده، امواجِ الکترومغناطیسی در خلأ نیز منتشر می‌شوند. تشابه‌هایی نیز بینِ این دو نوع موج می‌شود برشمرد؛ ازجمله این که امواج در مسیر حرکت‌شان کم‌وبیش تضعیف می‌شوند، دارای رفتارِ تناوبی هستند، و . . . .

در این کتاب، موضوعِ بحثِ ما پرتوهای یون‌ساز است؛ یعنی پرتوهایی که می‌توانند اتم‌های مواد را یونیزه کنند. امواجِ مکانیکی چنین قابلیتی ندارند؛ پس آن‌ها را کنار می‌گذاریم و به امواجِ الکترومغناطیسی می‌پردازیم. با وجودِ این، خواهیم دید که همه‌ی امواجِ الکترومغناطیسی هم یون‌ساز نیستند و درنهایت ما تنها با پرتوهای موجیِ یون‌ساز سروکار پیدا خواهیم کرد.

۱ـ۲ ـ موجِ الکترومغناطیسی و ویژگی‌های آن

در فیزیک همواره به‌دنبالِ توصیفِ کمّیِ پدیده‌ها هستند. به عبارتِ دیگر، کمیّت‌هایی را جست‌وجو می‌کنند که بتوانند آن‌ها را اندازه بگیرند و به آن‌ها عدد نسبت دهند. این قاعده درباره‌ی پدیده‌ی موج نیز صادق است. از میانِ کمیّت‌هایی که به امواج نسبت می‌دهند چهار تا پایه‌ای هستند که عبارت‌اند از دامنه[۱]، طول‌موج[۲]، بسامد[۳]، و دوره‌گردش[۴].

تعریفِ این کمیّت‌ها برای امواجِ واقعی، که معمولاً شکل‌هایی بسیار پیچیده دارند، دشوار است. پس معمولاً به‌سراغِ ساده‌ترین نوعِ امواج می‌روند، که موج‌های سینوسی هستند. این کار به کلیّتِ موضوع

---

۱ amplitude

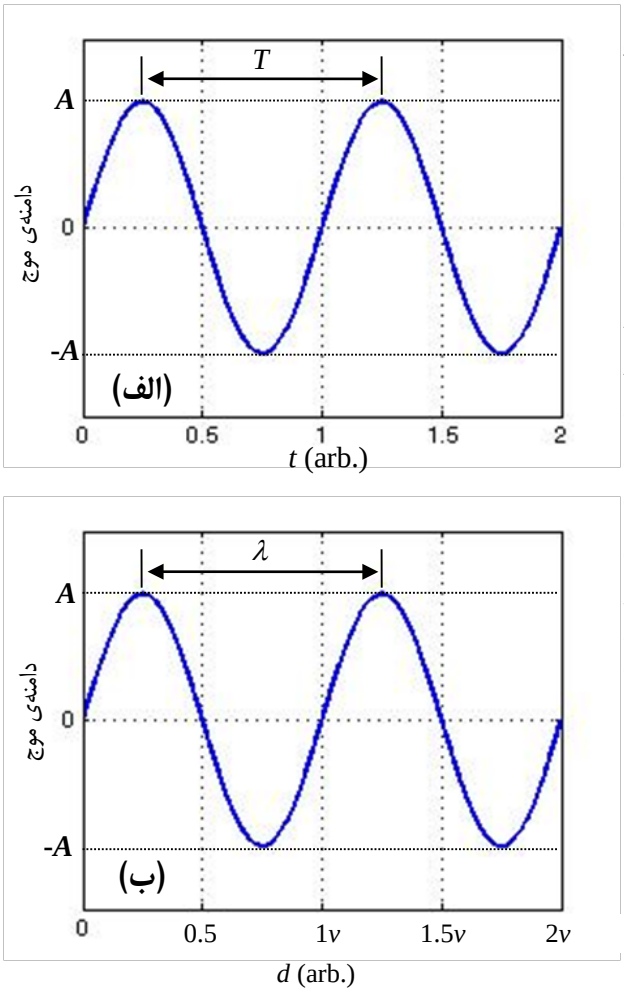
۲ wave length

۳ frequency

۴ period

صدمه نمی‌زند؛ زیرا امواج را، هر چه‌قدر هم که پیچیده باشند، می‌شود به‌صورتِ مجموعه‌ای از امواجِ سینوسی تجزیه کرد.[۱]

شکلِ ۱ـ۱ حاویِ دو نمودار است که موجِ سینوسی و کمیّت‌های منتسب به آن را به‌تصویر می‌کشند. دامنه‌ی یک موج اندازه‌ی نوسانی‌ست که موج در هر لحظه و در هر نقطه از فضا دارد. برای نمونه، اگر از ساحل به نقطه‌ای از دریا خیره شویم؛ اندازه یا دامنه‌ی امواجِ آب در آن نقطه را پیوسته در حالِ بالاوپایین رفتن خواهیم دید. اهمیّتِ دامنه‌ی موج در این است که هرچه دامنه بزرگ‌تر باشد انرژیِ



شکلِ ۱ـ۱. مشخصه‌های اصلیِ یک موجِ سینوسی $y(t) = A\sin(kx \pm \omega t)$. نمودارِ (**الف**) تغییراتِ موج در یک نقطه‌ی ثابت از فضا، و نمودارِ (**ب**) تغییراتِ مکانیِ موج در یک لحظه را نشان می‌دهد. محورِ افقی در نمودارِ (**الف**) زمان است، و در نمودارِ (**ب**) مکان. نسبتِ هر عدد روی محورِ مکان به نظیرش روی محورِ زمان سرعتِ حرکتِ موج (v) را تعیین می‌کند. برای نمونه، این موج دارای دوره‌گردشِ $T = 1$، و طول‌موجِ $\lambda = T.v = 1v$ است. اگر $v = 3\times10^8$، و $T = 1$ ms باشد؛

$\lambda = 3\times10^5$ m،

و

$k = 2.1\times10^{-5}$ m^{-1}

می‌شود. k عددِ موج است.

[۱] این کار در ریاضیات به تجزیه‌ی موج به سریِ فوریه‌اش مشهور است. سریِ فوریه نشان می‌دهد که هر موج از چه امواجِ سینوسی‌ای تشکیل شده است و دامنه و بسامد هر کدام از آن‌ها چه‌قدر است.

موج بیش‌تر می‌شود. همان‌طور که در **شکلِ ۱ـ۱** دیده می‌شود، دامنه‌ی یک موجِ سینوسی با تغییراتِ زمان و مکان تغییر می‌کند؛ اما در هر حال از مقداری که بیشینه‌ی دامنه (A) نام دارد فراتر نمی‌رود.

امواج تغییراتی تکراری‌اند که در فضا منتقل می‌شوند؛ این تکرار سبب می‌شود که همواره نقاطی از فضا باشند که کاملاً شبیه به هم رفتار کنند. فاصله‌ی این نقاط در فضا مقدارِ ثابتی است. این مقدارِ ثابت طول‌موج (λ) نامیده می‌شود. برای نمونه، همان‌طورکه در **شکلِ ۱ـ۱** می‌توان دید، طول‌موجِ یک موج سینوسی برابر است با فاصله‌ی بینِ دو قله‌ی مثبتِ پیاپیِ آن.

از سوی دیگر، اگر در نقطه‌ای از مسیرِ حرکتِ موج به‌ایستیم، قله‌های موج با آهنگِ ثابتی به ما برخورد می‌کنند. این آهنگ *بسامدِ موج* (f) نامیده می‌شود. فاصله‌ی زمانیِ بینِ هر دو برخوردِ قله‌ی موج به ما کمیّتِ دیگری‌ست به‌نامِ *دوره‌گردش* (T). با کمی دقّت می‌توان دریافت که دوره‌گردشِ هر موجی برابر می‌شود با وارونِ بسامدِ آن؛ یعنی

$$T = 1/f \quad . \qquad (۱ـ۱)$$

باتوجه به تعریفِ دوره‌گردش و طول‌موج می‌توان رابطه‌ای بینِ این دو کمیّت برقرار کرد که به‌سادگی عبارت می‌شود از

$$\lambda = vT = v/f \quad . \qquad (۲ـ۱)$$

در این رابطه، v سرعتِ انتقالِ انرژی یا سرعتِ سیرِ موج در فضا است. سرعتِ سیرِ یک موج تابعی از جنسِ محیطِ انتشارش است و به‌طورِ معمول با تغییرِ بسامدِ موج تغییر نمی‌کند. این ویژگیِ مهمی است که باعث می‌شود پرتوهای ایکس، امواجِ رادیویی، و نیز نور (که خواهیم دید همگی موجِ الکترو‌ـ مغناطیسی هستند، گرچه با بسامدهای گوناگون) با سرعتی یکسان سیر کنند؛ همان سرعتی که به آن سرعتِ نور (معمولاً با نمادِ c) می‌گوییم.

سرعتِ انتشارِ امواجِ الکترومغناطیسی در چند محیط در **جدولِ ۱ـ۱** باهم مقایسه شده است. سرعتِ سیرِ صدا نیز در این جدول آمده است تا تفاوتِ فاحشِ آن با سرعتِ سیر نور یاداوری شود. با کمی کنجکاوی، اختلافِ دیگری هم در رفتارِ این دو نوع موج می‌توان دید. سرعتِ انتشارِ امواجِ الکترومغناطیسی در گازها بیش‌تر از نظیرش در مایعات، و در مایعات بیش‌تر از جامدات است. این ترتیب برای امواجِ مکانیکی برعکس است.

جدولِ ۱ـ۱. سرعتِ تقریبیِ چند نوع موج در محیط‌های گوناگون برحسبِ m/s.[@]

	هوا	آب	سرب
موج الکترومغناطیسی*	۳×۱۰^{۸}	$۲/۳\times۱۰^{۸}$	$۱/۲\times۱۰^{۸}$
موجِ مکانیکی (صدا)	۳۳۲	۱۵۰۰	۲۱۶۰

[@] اطلاعات برگرفته از Lide, D. R, *CRC Handbook of chemistry and physics*, 84 ed., 2003-2004 .

* از امواجِ رادیویی گرفته تا پرتوهای گاما.

درباره‌ی این چهار کمیّت بسیار می‌شود گفت؛ اما ما در این‌جا تنها به چند نکته اکتفا می‌کنیم.

- بسامد یا دوره‌گردش را منبعِ تولیدِ موج تعیین می‌کند و در فرایندِ انتقال، این کمیّت همواره ثابت می‌ماند، حتا اگر محیطِ انتشار تغییر کند. برای مثال، گوشیِ تلفنِ همراه است که بسامدِ موجِ رادیوییِ منتشره از آن را تعیین می‌کند؛ یا دستگاهِ رادیولوژیِ ایکس است که تعیین می‌کند بسامدِ تابشِ ایکسِ تولیدی چه‌قدر باشد.
- سرعتِ انتقالِ موج در هر محیط به دامنه و، همان‌طور که گفتیم، بسامد وابسته نیست. به این ترتیب، با توجه به رابطه‌ی (۱ـ۲) می‌توان دریافت که طول‌موج تابعی از بسامدِ منبع و نیز تابعی از محیطِ انتشارِ موج است. مادامی‌که بسامدِ یک موج و محیطِ انتشارِ آن تغییر نکند، طول‌موج ثابت می‌ماند. برعکس، اگر موج از محیطی به محیطِ دیگر وارد شود، طول‌موجِ آن عوض می‌شود. این تغییرات است که سبب می‌شود موج هنگامِ گذر از مرزِ دو ماده تغییرِ مسیر دهد؛ همان پدیده‌ای که ما به‌نامِ *شکست*[۱]، مثلاً، نور می‌شناسیم.
- هرچه از منبعِ مولدِ موج دور شویم، دامنه‌ی آن کم‌تر می‌شود. علت این است که موج هنگامِ پیش‌روی بخشی از انرژی‌اش را، در اثرِ پراکندگی یا جذب، به محیط تحویل می‌دهد و درنتیجه ضعیف می‌شود. این تضعیف به‌معنای کوچک‌شدنِ دامنه‌ی موج است. برای نمونه، وقتی یک موجِ الکترومغناطیسی (مثلاً تابشِ ایکس) به بدنِ انسانی می‌تابد به آن انرژی می‌دهد و از سوی دیگرِ بدن با دامنه‌ای کم‌تر خارج می‌شود.

۱ـ۲ ـ۱ـ بیناب امواجِ الکترومغناطیسی

امواجِ الکترومغناطیسی می‌توانند بسامدهایی گوناگون داشته باشند. گرچه در بخشِ پیشین گفتیم که تغییرِ بسامد سرعتِ موج را عوض نمی‌کند، این تغییر پیامدهایی دارد که می‌تواند مهم باشد؛ از جمله این که تغییرِ بسامد باعث می‌شود رفتارِ موج در برخورد با مواد تغییر کند. یک مثالِ آشنا و روشن‌گر اختلافِ رفتارِ نورِ مرئی با رفتارِ پرتوِ ایکس در برخورد با مواد است. همه می‌دانیم که نور نمی‌تواند در یک لایه‌ی هرچند نازکِ فلز نفوذ کند، اما پرتوِ ایکس به‌راحتی چنین می‌کند. این تغییرِ رفتار به‌دلیلِ اختلافِ بسامدِ این دو نوع موج است.

تابعیّتِ رفتارِ امواجِ الکترومغناطیسی از بسامد انگیزه‌ای شده است تا کلِ گستره‌ی بسامدیِ امواجِ الکترومغناطیسی را به محدوده‌های مختلفی تقسیم کنند. هرکدام از این محدوده‌ها نام و کاربردی دارند. برای نمـونه، امـواجِ الکترومغناطیسی با بسامدِ چند هرتز (Hz) تا چند مگاهرتز (MHz ـ $۱۰^{۶}$ Hz) امواجِ رادیویی نام دارند، و امواجِ با گستره‌ی بسامدیِ چند هزار گیگاهرتز (GHz ـ $۱۰^{۹}$ Hz) یا چند تراهرتز (THz ـ $۱۰^{۱۲}$ Hz) تا چند صد هزارگیگاهرتز (چند صد تراهرتز) امواج نوری. به این تقسیم‌بندیِ

---

[۱] refraction

شکلِ ۱ـ۲. بیناب (طیف) امواجِ الکترومغناطیسی. بسامد و طول‌موج در خلافِ جهتِ هم تغییر می‌کنند. تابش گاما دارای بیش‌ترین بسامد و کم‌ترین طول‌موج است.
[شکل برگرفته از دانشنامه‌ی Wikipedia به‌نشانی https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum (۹۷/۰۲/۱۰) با اندکی دخل‌وتصرف.]

بسامدیِ امواجِ الکترومغناطیسی *بیناب*[۱] امواجِ الکترومغناطیسی گویند (**شکلِ ۱ـ۲**). توجه کنید که مرزِ بینِ نواحیِ مجاور دقیق نیست و هم‌پوشانی‌هایی در این مرزها ممکن است. مقایسه‌ی بینِ طول‌موج و ابعادِ بعضی چیزها از آن جهت انجام شده است که نسبتِ طول‌موج به ابعادِ جسم رفتارِ موج در برخوردِ با اجسام را تعیین می‌کند. اگر طول‌موج بسیار بزرگ‌تر از ابعادِ جسمی باشد؛ به اصطلاح موج جسم را نمی‌بیند و از فرازِ آن عبور می‌کند. نور، برای نمونه، اتم‌ها را نمی‌بیند، بلکه با سلول‌ها و مولکول‌ها برخورد می‌کند. به همین دلیل است که نور در سطحِ پوست جذب می‌شود؛ اما پرتوهای ایکس در بدن کم‌وبیش نفوذ می‌کنند.

۱ـ۲ ـ۲ـ فوتون

عکس‌های نشان داده شده در **شکلِ ۱ـ۳** را ببینید. این هر دو عکس یک پدیده را به‌تصویر می‌کشند: *سرعت*. هر دو عکس هدف را که نشان‌دادنِ سرعت است برمی‌آورند؛ هرچند ممکن است در شرایطی یکی را بر دیگری ترجیح دهیم. مثلاً، تصویرِ کیلومترشمار برای یک آدمِ بی‌سواد به‌کار نمی‌آید؛ اما عکسِ دیگر چرا.

در فیزیک، پدیده‌ها را بررسی می‌کنند و برای آن‌چه می‌یابند تصویری می‌سازند. به این کار مدل-سازی گویند. این مدل‌ها، درست مانندِ عکس‌های **شکلِ ۱ـ۳**، ممکن است تا جایی که پاسخ‌گوی پرسش‌های ما باشد به‌کار آیند و گاهی به‌دردمان نخورند. برای نمونه، وقتی می‌گوییم تابشِ ایکس موج است، مدلی برای توصیفِ این پدیده در نظر گرفته‌ایم. تا وقتی این مدل رفتارهای تابشِ ایکس را توضیح دهد خوب است؛ در غیر این صورت، می‌شود از مدلی دیگر استفاده کرد.

پرتوهای ایکس و مانندِ آن گاهی رفتارهایی از خود نشان می‌دهند که با مدلِ موجِ الکترومغناطیسی جور در نمی‌آید. این رفتارها به‌گونه‌ای‌ست که گویی پرتوِ ایکس مجموعه‌ای از ذره‌هایی مادی است.

شکلِ ۱ـ۳. دو روش برای به‌تصویرکشیدنِ سرعت. هر دو عکس به‌درستی پدیده‌ای را توصیف می‌کنند؛ هر چند ممکن است گاهی یکی بر دیگری ترجیح داده شود.

[۱] spectrum. طیف هم می‌گویند.

در این شرایط، برای توجیهِ رفتارهای ذره‌ایِ این‌گونه پرتوها، بسته‌ها یا کوانتم‌هایی از انرژی به‌نامِ فوتون تعریف می‌شود. این دیدگاه را دیدگاهِ کوانتومی گویند.

از دیدگاهِ کلاسیک یا موجی، انرژیِ موج تنها به دامنه‌ی موج بستگی دارد؛ در حالی که از دیدگاهِ کوانتومی، انرژیِ موج تابعی از تعداد و انرژیِ فوتون‌ها است. مقدارِ انرژیِ هر فوتون (E_p) به بسامدِ موج (f) بستگی دارد:

$$E_p = hf \quad . \qquad (۳ـ۱)$$

در این رابطه $h = ۶٫۶۳\times۱۰^{-۳۴}$ J.s یک عددِ ثابت به‌نامِ *ثابتِ پلانک*[۱] است. با نگاهی به این رابطه می‌توان دریافت که از دیدگاهِ کوانتومی، هرچه بسامدِ موجی بزرگ‌تر باشد، انرژیِ فوتون‌های منتسب به آن بیش‌تر می‌شود.[۲]

انرژیِ فوتون‌ها کوچک‌تر از آن است که به‌راحتی بتوان آن را برحسبِ یکاهای معمولِ انرژی مانندِ ژول (J) نمایش داد. برای نمونه، اگر انرژیِ یک فوتونِ نوعی با بسامدِ $۱۰^{۲۰}$ Hz را به‌کمکِ رابطه‌ی (۱ـ۳) حساب کنیم؛ خواهیم داشت:

$$E_p = ۶٫۶۳\times۱۰^{-۳۴}[\text{J.s}] \times ۱۰^{۲۰}\ [\text{s}^{-1}] = ۶٫۶۳\times۱۰^{-۱۴}\ \text{J} \quad .$$

این عددِ بسیار کوچکی‌ست که کار با آن سخت است؛ از این‌رو، انرژیِ فوتون‌ها را معمولاً با یکایی کوچک‌تر به‌نامِ الکترون‌ولت (eV) و یکاهای فرعیِ آن یعنی کیلوـ الکترون‌ولت ($۱\ \text{keV} = ۱۰۰۰\ \text{eV}$) و مگاـ الکترون‌ولت ($۱\ \text{MeV} = ۱۰^{۶}\ \text{eV}$) می‌سنجند:

$$۱\ \text{J} = ۱٫۶\times۱۰^{-۱۹}\ \text{eV} \quad . \qquad (۴ـ۱)$$

۱ـ۳ ـ یونش و پرتوهای یون‌ساز (یونیزان)

در بخشِ ۱ـ ۲ اشاره شد که امواجِ الکترومغناطیسی ویژگی‌های متفاوتی دارند. یکی از این ویژگی‌ها نحوه‌ی برهم‌کنشِ این امواج یا پرتوها با ماده است.

وقتی تابش بر ماده‌ای می‌تابد، بخشی از انرژی‌اش را به ذراتِ آن ماده منتقل می‌کند. این انرژیِ انتقالی ممکن است

- اتم‌های ماده را برنگیزاند (برنگیزش[۳] ـ یعنی الکترون‌ها را از مدارهای پایینی به مدارهای بالاتر ببرد)،

---

[۱] Planck constant

[۲] به یاد بیاورید که از دیدگاهِ موجی انرژیِ موج تابعی از بسامد نیست! گاهی مدل‌های مختلفی که یک پدیده را توضیح می‌دهند را نمی‌توان به‌آسانی انطباق داد.

[۳] excitation

- اتم‌ها را یونیزه کند (یعنی الکترون‌های مداری را از قیدِ اتم‌ها رها کند)؛
  یا (با احتمالی کم‌تر)
- اتم‌ها را مرتعش و ماده را گرم کند،
- (اگر تابش از ذره‌های بسیار پُر ـ انرژی تشکیل شده باشد) با هسته‌ی اتم‌ها برخورد کند.

از این میان، موردِ دومی برای ما مهم‌تر از بقیه است؛ چون یون‌سازی یا *یونش*[۱] مبنای نوعی دسته‌بندیِ پرتوهاست که در مقوله‌ی حفاظتِ پرتوی بسیار رایج است.

می‌دانیم که هر اتم هسته‌ای دارد که الکترون‌های اتمی به‌دورِ آن می‌چرخند. درون هسته‌ی اتم، پروتون‌ها و نوترون‌ها جا دارند. نوترون ذره‌ای بی‌بار است؛ درحالی‌که پروتون و الکترون، به‌ترتیب، یک واحد بارِ الکتریکیِ مثبت ($۱٫۶\times۱۰^{-۱۹}$ کولن) و یک واحد بار الکتریکیِ منفی ($-۱٫۶\times۱۰^{-۱۹}$ کولن) دارند. از آن‌جا که تعدادِ الکترون‌ها و پروتون‌های یک اتم در شرایطِ عادی باهم برابر است، اتم از نظرِ الکتریکی خنثاست. اگر به هر دلیلی الکترون یا الکترون‌هایی از مدارهای اتمی کنده شود، این تعادلِ الکتریکی مختل می‌شود.

فرایندی که طیِ آن الکترون یا الکترون‌هایی از یک اتم کنده می‌شود یونش نام دارد. اتمِ یونیده دارای بارِ الکتریکیِ مثبت می‌شود و مقدارِ بارِ الکتریکیِ آن به تعدادِ الکترون‌هایی بستگی دارد که از اتم کنده شده است. انرژیِ لازم برای رهانیدنِ الکترون از هسته، که تابعی از نوعِ اتم است، *انرژیِ یونشِ اتم* نامیده می‌شود. انرژیِ یونشِ اتمِ عنصرهای مختلف در **شکلِ ۱ـ۴** داده شده است.

در بحثِ حفاظتِ پرتوی، اثرِ تابش بر بدنِ انسان بیش از هر مقوله‌ی دیگری اهمیّت دارد؛ از این‌رو، معیارِ *یون‌ساز بودن یا نبودنِ* تابش توانایی فوتون‌های آن برای یون‌سازی در بافت‌های بدن است. از آن‌جا که هیدروژن فراوان‌ترین اتم در بافت‌ها است و انرژیِ لازم برای کندنِ نخستین الکترونِ اتمِ هیدروژن ۱۲٫۵ eV است (**شکلِ ۱ـ۴**)، پرتوهایی که انرژیِ فوتون‌های آن‌ها از این حدود بیش‌تر باشد یون‌ساز، و در غیر این‌صورت غیریون‌ساز نامیده می‌شوند.[۲]

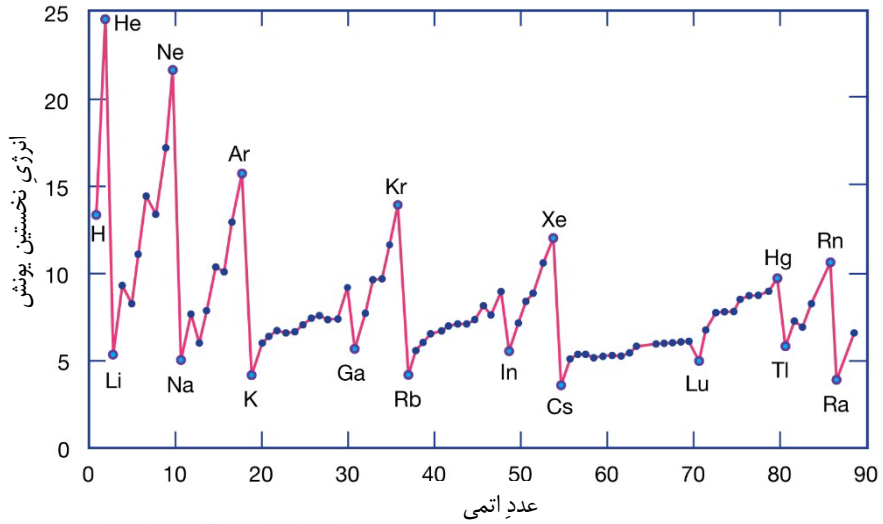
باتوجه به رابطه‌ی (۱ـ۳)، فوتونی که انرژی‌اش ۱۲٫۵ eV است به موجی تعلق دارد که بسامدش (f) حدودِ ۳×۱۰^{۱۵} Hz باشد. اگر به **شکلِ ۱ـ۲** بنگرید، می‌بینید که این بسامد در محدوده‌ی پرتوهای فرابنفشِ پرـ انرژی است (که به آن‌ها UVC گویند). بر این اساس، تابش‌های ایکس و گاما، که بسامدی فراتر از UVC دارند، از جمله‌ی پرتوهای یون‌ساز؛ و امواجِ رادیویی و نوری (لیزر)، که بسامدی کم‌تر از UVC دارند، از جمله‌ی پرتوهای غیریون‌ساز هستند.

مهم است توجه کنیم که پرتوهای غیریون‌ساز هرچه‌قدر هم که شدت‌شان زیاد باشد قادر به یون‌سازی نیستند؛ زیرا افزایشِ شدتِ یک نوع تابش، از دیدگاهِ کوانتومی، به‌معنای افزایشِ تعدادِ

---

[۱] ionization

[۲] یونیزان و غیریونیزان نیز می‌گویند.



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

شکلِ ۱ـ۴. انرژیِ یونشِ خارجی‌ترین الکترونِ عنصرهای مختلف. الکترون‌های لایه‌های عمیق‌ترِ اتم‌ها به هسته‌ی اتم نزدیک‌ترند و به‌تبع انرژیِ یونش برای آن‌ها بزرگ‌تر است. در مقامِ مقایسه‌ی عنصرها، بیش‌ترین انرژیِ یونش را گازهای بی‌اثری مانندِ هلیم (He) دارند. انرژیِ یونشِ هیدروژن (H)، که فراوان‌ترین عنصرِ بدن است، حدودِ ۱۲٫۵ eV است.

فوتون‌های آن نوع تابش است و نه افزودنِ انرژیِ تک‌تکِ فوتون‌ها؛ این درحالی‌ست که انرژیِ لازم برای کندنِ یک الکترون از اتم را تنها یک فوتون باید تأمین کند.[۱]

پرتوهای موجیِ یون‌ساز را، در دسته‌بندی‌ای دیگر، می‌توان بر دو گونه دانست. گونه‌ی نخست آن‌هایی هستند که از جابه‌جاییِ الکترون‌ها بینِ لایه‌های اتمی سرچشمه می‌گیرند و به آن‌ها پرتوهای ایکس گویند. گونه‌ی دوم آن‌هایی هستند که از درونِ هسته‌ی اتم‌ها می‌آیند و به‌قرینه آن‌ها را تابشِ هسته‌ای می‌نامیم. این دو گونه در بحثِ حفاظتِ پرتوی مهم‌اند و به آن‌ها مفصلاً می‌پردازیم.

۱ـ۴ ـ تابشِ ایکس (X)

تابشِ ایکس بخشی از طیفِ امواجِ الکترومغناطیسی است که برخلافِ نام‌اش، که حکایت از مجهول‌بودنِ آن دارد، ویژگی‌های شناخته‌شده‌ای بسیار دارد. بخشی از این ویژگی‌ها (طول‌موج، بسامد، و انرژی) در **جدولِ ۱ـ۲** با ویژگی‌های نورِ مرئی مقایسه شده است. آن‌طور که در این جدول دیده

[۱] شدتِ (Intensity) یک باریکه یا موج تعریفِ دقیقی دارد: $I = E/(A.t)$ ،I شدتِ باریکه است. E انرژی‌ای است که در مدتِ t از ناحیه‌ای به مساحتِ A می‌گذرد. انرژی از دیدگاهِ کوانتومی برابر است با تعدادِ فوتون‌ها ضرب در انرژیِ تک‌تکِ آن‌ها. به این ترتیب، می‌بینیم که افزایشِ شدتِ یک پرتو می‌تواند به‌معنای افزایشِ شمارِ فوتون‌ها باشد.

می‌شود، انرژیِ فوتون‌های ایکس به‌مراتب از انرژیِ فوتون‌های نورِ مرئی بیش‌تر است (دستکم صد برابر). این انرژیِ بیش‌تر به فوتون‌ها اجازه می‌دهد عمیق‌تر در مواد نفوذ کنند.

جدولِ ۱ـ۲. مقایسه‌ی ویژگی‌های تابشِ ایکس و نورِ مرئی.

ویژگی	تابشِ ایکس	نورِ مرئی
طول‌موج	۰٫۰۱ nm ـ ۱۰ nm	۴۰۰ ـ ۷۰۰ nm
بسامد	۳×۱۰^{۱۶} Hz ـ ۳×۱۰^{۱۹} Hz	$۴٫۳\times۱۰^{۱۴}$ Hz ـ $۷٫۷\times۱۰^{۱۴}$ Hz
انرژیِ فوتون‌ها	۱۰۰ eV ـ ۰٫۱ MeV	۱ eV ـ ۳ eV
ویژگی‌های دیگر	ـ در اجسامِ تیره نفوذ می‌کند. ـ نادیدنی	ـ تنها در اجسامِ شفاف نفوذ می‌کند. ـ دیدنی

بدین‌سان، نورِ مرئی روی پوستِ بدن متوقف می‌شود (و نقطه‌ی تابش را گرم می‌کند) ولی تابشِ ایکس در بدن نفوذ می‌کند. البته می‌شود حدس زد که این قدرتِ نفوذ بی‌نهایت نیست و فوتون‌های ایکس هم بالاخره در اثرِ برخورد با اتم‌های تشکیل‌دهنده‌ی بافت‌های بدن ممکن است متوقف شوند.

این که تابشِ ایکس در چه عمقی از بدن متوقف شود به دو عامل بستگی دارد؛ یکی انرژیِ فوتونِ ایکس و دیگری نوع بافت. **شکلِ ۱ـ ۵** تضعیفِ پرتوهای ایکسِ با انرژی‌های مختلف در دو گونه از بافت‌های بدنِ انسان را نشان می‌دهد. همان‌طورکه دیده می‌شود، تابشِ ایکس در بافت‌های نرم بیش از استخوان نفوذ می‌کند. همین ویژگی باعث شده است که از تابشِ ایکس برای تصویربرداری از بافت‌های داخلیِ بدن استفاده شود. فوتون‌های تابشِ ایکس، اگر انرژیِ مناسبی داشته باشند، در برخورد با استخوان‌ها جذب می‌شوند ولی از بافت‌های نرم می‌گذرند؛ درنتیجه، اگر مانندِ **شکلِ ۱ـ ۶**، یک فیلمِ حساس در سوی خروجِ پرتوها از بدن قرار داده شود، سایه‌ای از بافت‌های سخت‌تر روی آن پدیدار می‌شود. این فرایند برای تشخیصِ شماری از ضایعات در بدن کاربرد دارد و رادیولوژیِ ایکس نامیده می‌شود.

۱ـ۴ ـ۱ـ فرایندهای تولیدِ تابشِ ایکس

دو سازوکار تا به‌امروز برای تولیدِ تابشِ ایکس شناخته شده است. یکی جابه‌جاییِ الکترون‌ها در لایه‌های الکترونی و دیگری شتاب‌گیریِ[۱] الکترون هنگامِ عبور از نزدیکیِ هسته‌ی یک اتم. تابشِ حاصل از اولی را *ایکسِ مشخصه*[۲]، و تابشِ حاصل از دومی را *ایکسِ ترمزی*[۳] یا *برم‌اشترلانگ*[۴] گویند.

---

[۱] در گفت‌وگوهای روزمره، شتاب‌گیری به‌معنای افزایشِ سرعت تعبیر می‌شود؛ در حالی‌که در فیزیک، هرگونه تغییرِ سرعت، افزایش یا کاهش یا حتا تغییرِ جهت، به‌معنای شتاب‌گرفتن است.

[۲] characteristic X

[۳] braking X

[۴] Bremssttrahlung