



دانشگاه سامان نور
پیم

فیزیک راکتورهای هسته‌ای ۱

(رشته فیزیک)

مزدک زبردست علیرضا گوشه

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب کتاب

سیزده

پیشگفتار

۱	فصل اول: مقدمه و مروری بر فیزیک هسته‌ای
۱	هدف کلی
۱	هدف‌های یادگیری
۲	مقدمه
۲	۱-۱ ذرات بنیادی
۳	۲-۱ ساختمان اتمی و هسته‌ای
۴	۳-۱ جرم اتمی
۵	۴-۱ شعاع اتمی و هسته‌ای
۷	۵-۱ جرم و انرژی
۹	۶-۱ طول موج ذره
۱۰	۷-۱ حالت‌های برانگیخته و تابش
۱۳	۸-۱ پایداری هسته‌ای و واپاشی رادیواکتیو
۱۹	۹-۱ محاسبات رادیواکتیویته
۲۵	۱۰-۱ برهم‌کنش‌های هسته‌ای
۳۱	۱۱-۱ انرژی بستگی
۳۶	۱۲-۱ مدل‌های هسته‌ای
۳۶	۱-۱۲-۱ مدل لایه‌ای
۳۹	۲-۱۲-۱ مدل قطره مایع
۴۴	۳-۱۲-۱ سهمی‌های جرم
۴۷	۱۳-۱ سایر مدل‌های هسته‌ای
۴۸	۱-۱۳-۱ مدل لایه‌ای ذره مستقل
۴۹	۲-۱۳-۱ مدل لایه‌ای چندذره‌ای

۴۹	۳-۱۳-۱ مدل هسته تجمعی
۵۰	۴-۱۳-۱ نوسان‌های هسته‌ای
۵۲	۵-۱۳-۱ دوران‌های هسته‌ای (هسته‌های تغییر شکل یافته)
۵۲	۶-۱۳-۱ مدل تک‌ذره‌ای در هسته‌های تغییر شکل یافته (مدل نیلسون)
۵۵	۷-۱۳-۱ مدل اپتیکی
۵۵	۸-۱۳-۱ مدل گاز فرمی
۵۶	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول
۵۷	خودآزمایی تشریحی فصل اول
۶۱	فصل دوم: برهم‌کنش نوترون با ماده
۶۱	هدف کلی
۶۱	هدف‌های یادگیری
۶۲	مقدمه
۶۲	۱-۲ نوترون و چشمه‌های نوترونی
۶۳	۲-۲ برهم‌کنش‌های نوترون با هسته اتم
۶۳	۱-۲-۲ پراکندگی کشسان
۶۴	۲-۲-۲ پراکندگی ناکشسان
۶۴	۳-۲-۲ گیراندازی توسط هسته و تشکیل هسته مرکب
۶۵	۴-۲-۲ گیراندازی تابشی
۶۶	۵-۲-۲ شکافت
۶۶	۳-۲ پراکندگی نوترون توسط هسته
۷۷	۴-۲ شکافت هسته‌ای
۷۹	۵-۲ مکانیسم فرایند شکافت
۷۹	۱-۵-۲ فرایند شکافت از دیدگاه مدل قطره‌مایع
۸۲	۲-۵-۲ فرایند شکافت از دیدگاه انرژی
۸۴	۶-۲ فراورده‌های شکافت
۸۸	۷-۲ پیشروهای نوترون تأخیری
۹۱	۸-۲ انرژی آزادشده در هر شکافت
۹۳	۹-۲ شار نوترون، سطح مقطع‌ها و آهنگ‌های برهم‌کنش
۹۸	۱۰-۲ تغییر سطح مقطع‌ها با انرژی نوترون
۱۰۴	۱۱-۲ نوترون‌های حرارتی
۱۰۷	۱۲-۲ شار نوترون حرارتی، آهنگ جذب و سطح مقطع جذب
۱۱۰	۱۳-۲ توان، توان ویژه، مصرف سوخت و سوخت‌سوزی در راکتورها
۱۱۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۱۱۴	خودآزمایی تشریحی فصل دوم

۱۱۷	فصل سوم: برهم‌کنش زنجیره‌ای و اصول کار راکتورهای هسته‌ای
۱۱۷	هدف کلی
۱۱۷	هدف‌های یادگیری
۱۱۸	مقدمه
۱۲۱	۱-۳ چرخهٔ نوترون در راکتورهای حرارتی
۱۲۴	۲-۳ نشت نوترون‌ها از راکتور
۱۲۸	۳-۳ غنی‌سازی سوخت هسته‌ای
۱۲۹	۱-۳-۳ روش‌های غنی‌سازی اورانیوم
۱۲۹	۲-۳-۳ روش پخش‌گازی
۱۳۰	۳-۳-۳ روش سانتریفیوژ گازی
۱۳۱	۴-۳-۳ روش جداسازی توسط لیزر
۱۳۳	۴-۳ تبدیل و زایش
۱۳۷	۵-۳ اجزای راکتورهای هسته‌ای
۱۳۷	۱-۵-۳ قلب راکتور
۱۳۷	۲-۵-۳ سوخت
۱۳۸	۳-۵-۳ کندکننده
۱۳۹	۴-۵-۳ خنک‌کننده
۱۳۹	۵-۵-۳ پوشش یا پتو
۱۴۰	۶-۵-۳ بازتابنده
۱۴۰	۷-۵-۳ میله‌های کنترل
۱۴۱	۸-۵-۳ مخزن یا محفظهٔ راکتور
۱۴۲	۹-۵-۳ حفاظ حرارتی و ساختمان راکتور
۱۴۳	۱۰-۵-۳ سایر اجزای راکتور
۱۴۳	۶-۳ دسته‌بندی انواع راکتورها
۱۴۵	۱-۶-۳ راکتورهای آب‌جوشان (BWR)
۱۴۵	۲-۶-۳ راکتورهای آب تحت فشار (PWR)
۱۴۶	۳-۶-۳ راکتورهای با خنک‌کنندهٔ گازی (GCR)
۱۴۶	۴-۶-۳ راکتورهای زایندهٔ سریع فلزمايع (LMFBR)
۱۴۷	۵-۶-۳ راکتورهای کندو (CANDU)
۱۴۸	۷-۳ راکتورهای پژوهشی
۱۴۸	۱-۷-۳ راکتورهای تریگا
۱۴۹	۲-۷-۳ راکتورهای تحقیقاتی همگن آبی (AHR)
۱۵۰	۳-۷-۳ راکتورهای تحقیقاتی استخری
۱۵۰	۴-۷-۳ راکتورهای آزمایش بحرانی قدرت - پایین ایمن (SLOWPOKE)
۱۵۱	۵-۷-۳ راکتورهای تحقیقاتی چشمه‌نوترونی مینیاتوری (MNSR)
۱۵۲	۸-۳ تاریخچهٔ گسترش راکتورهای هسته‌ای

۱۵۳	۳-۸-۱ راکتورهای نسل اول (۶۵-۱۹۴۵)
۱۵۴	۳-۸-۲ راکتورهای نسل دوم (۹۵-۱۹۶۵)
۱۵۵	۳-۸-۳ راکتورهای نسل سوم (۲۰۱۰-۱۹۹۵)
۱۵۵	۳-۸-۴ راکتورهای نسل ۳+ (۲۰۳۰-۲۰۱۰)
۱۵۶	۳-۸-۵ راکتورهای نسل چهارم (۲۰۳۰ به بعد)
۱۵۶	۳-۹ حوادث راکتورهای هسته‌ای
۱۵۷	۳-۹-۱ حادثه آتش‌سوزی راکتور واینداسکیل انگلستان
۱۵۷	۳-۹-۲ حادثه تری‌مایل‌آیلند آمریکا
۱۵۷	۳-۹-۳ حادثه چرنوبیل اوکراین
۱۵۸	۳-۹-۴ حادثه راکتورهای فوکوشیمای ژاپن
۱۵۸	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۱۶۰	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۱۶۳	فصل چهارم: نظریهٔ پخش نوترون
۱۶۳	هدف کلی
۱۶۳	هدف‌های یادگیری
۱۶۴	مقدمه
۱۶۴	۴-۱ شار نوترون و آهنگ برهم‌کنش
۱۶۷	۴-۲ چگالی جریان نوترون
۱۶۹	۴-۳ معادلهٔ پیوستگی
۱۷۱	۴-۴ قانون اول فیک
۱۷۵	۴-۵ اعتبار قانون اول فیک
۱۷۵	۴-۵-۱ اگر محیط نامحدود نباشد
۱۷۵	۴-۵-۲ اگر محیط همگن نباشد
۱۷۶	۴-۵-۳ اگر چشمهٔ نوترون در محیط باشد
۱۷۶	۴-۵-۴ اگر پراکندگی همسان‌گرد نباشد
۱۷۷	۴-۵-۵ اگر شار نوترون نسبت به مکان به کندی تغییر نکند
۱۷۸	۴-۵-۶ اگر شار نوترون وابسته به زمان باشد
۱۸۰	۴-۶ معادلهٔ پخش نوترون‌ها
۱۸۱	۴-۷ شرایط فیزیکی و مرزی برای معادلهٔ پخش نوترون حالت پایدار
۱۸۱	۴-۷-۱ شرایط مرزی روی سطوح آزاد
۱۸۴	۴-۷-۲ شار و چگالی جریان نوترون در عبور از مرز جدایی دو محیط
۱۸۴	۴-۷-۳ شرایط فیزیکی و مرزی دیگر
۱۸۵	۴-۸ وضعیت‌های سادهٔ حل معادلهٔ پخش حالت پایدار
۱۸۶	۴-۸-۱ چشمهٔ تخت نامتناهی
۱۸۸	۴-۸-۲ چشمهٔ نقطه‌ای در یک محیط نامتناهی
۱۸۹	۴-۸-۳ چشمهٔ نقطه‌ای در مرکز یک کرهٔ همگن متناهی به شعاع R

۱۹۰	۴-۸-۴ چشمه خطی در یک محیط همگن نامتناهی
۱۹۱	۴-۸-۵ استوانه همگن نامتناهی به شعاع R و چشمه خطی همسانگرد روی محور آن
۱۹۲	۴-۹-۹ سیستم‌های با سطح آزاد
۱۹۳	۴-۹-۱ چشمه سطحی نامتناهی در یک محیط متناهی
۱۹۴	۴-۱۰-۱ شرط مرزی بازتاب
۱۹۶	۴-۱۱-۱ سیستم‌های چندناحیه‌ای
۱۹۶	۴-۱۱-۱ چشمه تخت در تیغه‌ای نامتناهی از ماده پراکنده به ضخامت a
۱۹۸	۴-۱۲-۱ مسائل عمومی پخش
۱۹۸	۴-۱۲-۱ چشمه‌های پراکنده در محیطی نامتناهی
۲۰۰	۴-۱۲-۲ چشمه‌های پراکنده در محیطی متناهی
۲۰۴	۴-۱۳-۱ طول پخش
۲۰۶	۴-۱۴-۱ اندازه‌گیری طول پخش نوترون حرارتی (معادله پخش سه‌بعدی)
۲۰۷	۴-۱۴-۱ آزمایش‌های پیل سیگما
۲۱۱	۴-۱۴-۲ آزمایش‌های نوترون پالسی
۲۱۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۲۱۷	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۲۲۳	فصل پنجم: نظریه راکتورهای هسته‌ای
۲۲۳	هدف کلی
۲۲۳	هدف‌های یادگیری
۲۲۳	مقدمه
۲۲۴	۵-۱ راکتورهای همگن، شبه‌همگن و ناهمگن
۲۲۵	۵-۲ مدل‌های راکتور
۲۲۵	۵-۲-۱ مدل یک‌گروهی
۲۲۵	۵-۲-۲ مدل دوگروهی
۲۲۵	۵-۲-۳ مدل چندگروهی
۲۲۶	۵-۲-۴ مدل کندشدگی پیوسته
۲۲۷	۵-۳ ضریب چهارفاکتوره در راکتورهای همگن
۲۲۷	۵-۳-۱ ضریب η
۲۲۸	۵-۳-۲ ضریب بهره‌وری حرارتی f
۲۳۲	۵-۳-۳ ضریب فرار از تشدید p
۲۳۳	۵-۳-۴ ضریب شکافت سریع ε
۲۳۳	۵-۴ معادله یک‌گروهی پخش در راکتورهای هسته‌ای
۲۳۶	۵-۴-۱ راکتور تیغه‌ای
۲۳۸	۵-۴-۲ راکتور کروی
۲۴۰	۵-۴-۳ راکتور استوانه‌ای نامتناهی
۲۴۳	۵-۴-۴ راکتور استوانه‌ای متناهی

۲۴۶	۵-۴-۵ راکتور مکعب مستطیلی
۲۴۹	۵-۵ بهینه سازی هندسی
۲۵۱	۵-۶ طول کوچ و معادله یک گروهی تعدیل یافته
۲۵۱	۵-۷ نظریه دوگروهی راکتورهای برهنه
۲۵۵	۵-۸ مدل با کندشدگی پیوسته، نظریه سن فرمی
۲۶۰	۵-۹ نظریه یک گروهی راکتورهای بازتابنده
۲۶۴	۵-۱۰ راکتورهای ناهمگن
۲۶۵	۵-۱۰-۱ ضریب η
۲۶۵	۵-۱۰-۲ ضریب بهره وری حرارتی f
۲۶۸	۵-۱۰-۳ احتمال فرار از تشدید p
۲۷۰	۵-۱۰-۴ ضریب شکافت سریع ϵ
۲۷۰	خودآزمایی چهارگزینه ای فصل پنجم
۲۷۲	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۲۷۷	فصل ششم: مواد مورد استفاده در راکتورهای هسته ای
۲۷۷	هدف کلی
۲۷۷	هدف های یادگیری
۲۷۸	مقدمه
۲۸۰	۶-۱ سوخت
۲۸۱	۶-۱-۱ سوخت های فلزی و آلیاژی
۲۸۳	۶-۱-۲ سوخت های سرامیکی
۲۸۶	۶-۱-۳ سوخت های پراکنده
۲۸۶	۶-۱-۴ سوخت های مایع
۲۸۷	۶-۲ چرخه سوخت هسته ای
۲۹۵	۶-۳ کندکننده
۲۹۶	۶-۳-۱ آب معمولی
۲۹۶	۶-۳-۲ آب سنگین
۲۹۷	۶-۳-۳ گرافیت
۲۹۸	۶-۳-۴ برلیوم
۲۹۸	۶-۴ خنک کننده
۲۹۸	۶-۴-۱ خنک کننده های گازی
۲۹۹	۶-۴-۲ خنک کننده های مایع
۲۹۹	۶-۴-۳ خنک کننده های فلز مایع
۳۰۱	۶-۵ میله ها و مجتمع سوخت
۳۰۲	۶-۶ غلاف سوخت
۳۰۶	۶-۷ مواد کنترل گر توان راکتور
۳۰۶	۶-۸ مواد ساختمانی خارج از قلب راکتور

۳۰۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۳۰۸	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۳۱۱	پیوست الف: ثابت‌های فیزیکی و داده‌های هسته‌ای
۳۲۴	پیوست ب: اجزای داخلی انواع راکتورهای هسته‌ای
۳۳۸	پیوست ج: توابع بسل
۳۴۷	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
۳۵۳	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۳۵۹	کتاب‌نامه

پیشگفتار

با آغاز انقلاب صنعتی در اروپا و رشد صنایع، نیاز به انرژی روزبه‌روز افزایش یافت به نحوی که هم‌اکنون هر کشوری که بتواند انرژی را با کمترین هزینه تولید کند، در عرصه جهانی قدرتمند خواهد بود. به همین دلیل مقرون به صرفه بودن روش‌های تولید انرژی یکی از پارامترهای مهم کشورهای صاحب صنایع است. کشف نفت و فراورده‌های آن مقرون به صرفه بودن تولید انرژی را نسبت به سوخت‌های دیگر نظیر زغال‌سنگ افزایش داد، ولی کشف اتفاقی شکافت هسته‌ای و آزاد شدن مقدار زیادی انرژی از چند گرم ماده، ایده استفاده از این انرژی بسیار عظیم را به جای نفت و فراورده‌های آن و زغال‌سنگ در ذهن دانشمندان فیزیک هسته‌ای انداخت کنترل و مهار این انرژی بسیار عظیم نوید گسترش صنایع را می‌داد، اما استفاده نادرست از آن در جنگ جهانی دوم به شکل تسلیحات اتمی و فاجعه انسانی که در شهرهای ناکازاکی و هیروشیما ژاپن رخ داد، تصویر اشتباهی از این انرژی ارزان‌قیمت به جای گذاشت و نظر عموم مردم جهان نسبت به استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای مورد تردید قرار گرفت. با این حال انرژی هسته‌ای به رشد خود ادامه داد، ولی حادثه‌های هسته‌ای واینداسکیل بریتانیا، چرنوبیل اوکراین و تری‌مایل‌آیلند آمریکا و همچنین جهش‌های ژنتیکی و بیماری‌های سرطانی در بازمانده انفجارات هسته‌ای و کارکنان این نیروگاه‌ها و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از پسماندهای رادیواکتیو راکتورهای هسته‌ای، دیدگاه عموم مردم را نسبت به استفاده از تکنولوژی هسته‌ای ناخرسندتر گردانید. در دو دهه اخیر روند رشد احداث راکتورهای شکافت هسته‌ای کاهشی چشم‌گیر و تنها در جهان سوم رشدی نسبتاً محسوس داشته است. با

این حال با توجه به محدود بودن ذخایر انرژی‌های فسیلی و بازده پایین انرژی‌های تجدیدپذیر و نیاز روزافزون به انرژی برای چرخش چرخ‌های صنعت، همچنان استفاده از انرژی شکافت هسته‌ای، یک راه‌حل مناسب به‌شمار می‌آید و راکتورهای شکافت هسته‌ای آینده ضمن اینکه با توان بالاتر کار می‌کنند، ایمنی بسیار بالایی نیز خواهند داشت و برای فراوری پسماندهای رادیواکتیو آن‌ها نیز روش‌های نوینی به‌کار گرفته خواهد شد.

کشور ایران نیز پس از جنگ تحمیلی و پس از دوران سازندگی استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای را در دستور کار خود قرار داد و در همین راستا با توجه به اینکه منابع فارسی جهت بیان مفاهیم و مبانی فیزیک راکتورهای شکافت هسته‌ای بسیار نادر است و بیشتر به زبان لاتین می‌باشند، بنابراین ضرورت تدوین کتابی برای تدریس در دانشگاه‌های ایران بر اساس سرفصل‌های وزارت علوم، تحقیقات و فناوری احساس می‌شد. نظر به اینکه طی سال‌های تدریس دروس فیزیک هسته‌ای به تجربه ثابت شد که دانشجویان و فارغ‌التحصیلان فیزیک هسته‌ای به علت کمبود منابع فارسی با مفاهیم پایه فیزیک هسته‌ای نیز مشکل دارند، به همین دلیل فصل اول کتاب را به مبانی فیزیک هسته‌ای و فصل‌های بعدی را به مبانی فیزیک راکتور اختصاص داده‌ایم، به‌ویژه به مباحث مدل‌های قطره‌مایع و لایه‌ای بیشتر پرداخته شده است. در این کتاب با بهره‌گیری از آخرین مقاله‌ها، دستاوردها و داده‌های قابل دسترس و معتبر فیزیک هسته‌ای و فیزیک راکتور (داده‌های معتبر آزمایشگاه ملی بروکهاون^۱ (BNL) و آرگون^۲ (ANL) کشور آمریکا که منبع کتاب‌های معتبر لاتین فیزیک راکتور نیز هستند) برای هر فصل مثال‌ها و خودآزمایی‌های چهارگزینه‌ای طراحی کرده‌ایم تا خوانندگان محترم کتاب به‌طور مختصر با مسائل فنی فیزیک راکتور آشنا شوند. برای درک بیشتر مطالب، شکل‌ها و نمودارهای مناسب با متن در نظر گرفته‌ایم. تا حد امکان شکل‌ها به فارسی برگردانده و یا از نو به صورت رنگی طراحی شده‌اند. تألیف کتاب به گونه‌ای است که یک دانشجوی عادی کارشناسی فیزیک و یا مهندسی هسته‌ای بتواند به‌طور خودآموز این کتاب را مطالعه و مسائل آن را حل کند. مطالب سطح بالاتر نیز به درس فیزیک راکتور ۲ و فیزیک راکتور پیشرفته واگذار می‌شود.

1. Brookhaven National Lab

2. Argonne National Laboratory

دانشمند بزرگ فیزیک، آلبرت انیشتین چنین گفته است «کسانی که تصور می‌کنند همواره کارها را بدون خطا و اشتباه انجام می‌دهند، همواره در حال انجام کارهای تکراری هستند.» بنابراین معتقدیم که هر اثر نوینی بدون خطا و اشتباه نخواهد بود و بدین جهت پذیرای انتقادات و راهنمایی‌های خوانندگان و همکاران هیأت علمی می‌باشیم و امیدواریم این کتاب بتواند تا حدی نیازهای علمی دانشجویان عزیز فیزیک هسته‌ای و مهندسی هسته‌ای را برآورده سازد.

در پایان از شورای تخصصی گروه محترم فیزیک دانشگاه پیام‌نور برای تصویب این کتاب به‌عنوان منبع درسی، از همکار محترم جناب آقای دکتر سعید محمدی بابت ویراستاری علمی، کلیه همکاران محترم گروه تدوین و همچنین انتشارات دانشگاه پیام‌نور تشکر و قدردانی می‌گردد.

علیرضا گوشه

عضو هیئت علمی فیزیک هسته‌ای

دانشگاه پیام نور

a.goosheh@pnu.ac.ir

مزدک زبردست

عضو هیئت علمی فیزیک هسته‌ای

دانشگاه پیام نور

mazdakz@pnu.ac.ir

فصل اول

مقدمه و مروری بر فیزیک هسته‌ای

هدف کلی

یادآوری و مروری بر مفاهیم فیزیک هسته‌ای، آشنایی با مدل‌های هسته‌ای و کاربرد آنها در شکافت هسته‌ها.

هدف‌های یادگیری

دانشجو پس از مطالعه این فصل می‌تواند:

۱. با ساختمان اتمی، ایزوتوپ، ایزوبار و ایزوتون‌ها و نحوه محاسبه جرم اتمی عناصر آشنا شود.
۲. انواع واپاشی‌های هسته‌ای را به‌طور کامل نوشته و شرح دهد.
۳. قوانین حاکم بر هسته‌های پرتوزا را فراگرفته و با کمیت‌های مهمی به نام فعالیت هسته و زمان نیمه‌عمر آشنا شود.
۴. انرژی بستگی هسته را محاسبه کرده و با رسم سهمی جرم برای خانواده ایزوبارها، عدد اتمی کمینه را برای این خانواده تعیین کند.
۵. برهم‌کنش‌های هسته‌ای را بنویسد و آنها را از لحاظ گرماگیر و گرمازا بودن بررسی کند.
۶. با مدل‌های هسته‌ای آشنا شود و کاربردهای آنها را بیاموزد.

مقدمه

داشتن اطلاعاتی از فیزیک هسته‌ای و اتمی برای آشنایی با اساس کار راکتورهای هسته‌ای ضروری است. در این فصل ابتدا مقدمه‌ای از فیزیک هسته‌ای و برهم‌کنش ذرات هسته‌ای مطرح می‌شود و سپس مدل‌های هسته‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. دنیای فیزیک ترکیبی از ذرات بنیادی و ساختارهای زیراتمی مختلف است. پس از کشف تعدادی از ذرات بنیادی، دانشمندان دریافتند که این ذرات از کوارک‌ها^۱ و آن‌ها نیز از گلوآن‌ها^۲ تشکیل شده‌اند.

۱-۱ ذرات بنیادی

ذرات بنیادی طبق مدل استاندارد^۳ به لپتون‌ها^۴ (بدون ساختار کوارکی) و هادرون‌ها^۵ (دارای ساختار کوارکی) تقسیم‌بندی می‌شوند. الکترون، میون (μ)، تاو (τ) و پادذره‌ها و نوترینوهای وابسته به آن‌ها، در گروه لپتون‌ها هستند. پروتون‌ها و نوترون‌ها در خانواده هادرون‌ها جای می‌گیرند. ذرات بنیادی مورد استفاده در این کتاب، مهندسی هسته‌ای و راکتورهای هسته‌ای عبارت‌اند از:

- الکترون: به شکل واپاشی‌های β^+ و β^- در فراورده‌های شکافت ظاهر می‌شود.
- پروتون: نیروی دافع کولنی پروتون‌ها در هسته‌های سنگین دلیل اصلی شکافت هسته‌ای است. پروتون‌ها در کندسازی نوترون‌ها نیز نقش اساسی دارند.
- نوترون: عامل اصلی ایجاد برهم‌کنش‌های زنجیره‌ای هسته‌ای است.
- فوتون‌های گاما: بعد از واپاشی‌های β^+ و β^- در فراورده‌های شکافت ظاهر می‌شوند.
- نوترینوها و پادنوترینوها: همراه واپاشی‌های β^+ و β^- در پاره‌ها و فراورده‌های شکافت گسیل می‌شوند.

1. Quark
2. Gluon
3. Standard Model
4. Lepton
5. Hadron

۱-۲ ساختمان اتمی و هسته‌ای

مواد موجود در طبیعت از اتم‌ها ساخته شده‌اند؛ اتم‌ها نیز از انبوهی از الکترون‌های متحرک با بار منفی و یک هسته که ترکیبی از پروتون‌ها و نوترون‌ها می‌باشد، تشکیل شده است. تعداد کل پروتون‌ها در هسته، عدد اتمی نام دارد که با علامت Z نشان داده می‌شود. بنابراین بار الکتریکی کل هسته $+Ze$ است. در یک اتم خنثی، تعداد الکترون‌ها به اندازه پروتون‌ها یعنی Z است، که به دور هسته حرکت می‌کنند. برای مثال هیدروژن (H) یک الکترون، هلیوم (He) دو الکترون و لیتیم (Li) سه الکترون دارد.

تعداد نوترون‌ها در یک هسته با عدد نوترونی N و مجموع تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها در یک هسته با عدد جرمی یا عدد هسته $Z+N=A$ علامت‌گذاری می‌شوند. گونه‌های مختلف از اتم‌هایی که شامل تعداد ویژه‌ای از پروتون‌ها و نوترون‌ها هستند، نوکلید^۱ نام دارند. نشانه هر نوکلید مانند عناصر جدول تناوبی مندلیف است و عدد جرمی به شکل بالانویس و عدد اتمی به شکل زیرنویس در سمت چپ آن نشان داده می‌شود (اغلب عدد نوترونی N ، به صورت زیرنویس در گوشه پایین سمت راست وجود دارد و با توجه به $N=A-Z$ ، دیگر نیازی به نوشتن عدد نوترونی نیست). بدین گونه علامت 1_1H به نوکلیدی از هیدروژن ($Z=1$) با یک پروتون تنها اشاره می‌کند، 2_1H (دوتریوم یا هیدروژن سنگین) نوکلیدی دیگر از هیدروژن است که یک نوترون و یک پروتون در هسته دارد. هلیوم 4_2He نیز دارای ۲ پروتون و ۲ نوترون است.

هسته‌هایی مانند 1_1H ، 2_1H که شامل تعداد یکسانی از پروتون‌ها اما تعداد متفاوتی از نوترون‌ها (Z یکسان اما N متفاوت و بنابراین A متفاوت) هستند، با نام ایزوتوپ شناخته می‌شوند. برای مثال ایزوتوپ‌های اکسیژن با $Z=8$ عبارت‌اند از: ${}^{16}_8O$ ، ${}^{17}_8O$ ، ${}^{18}_8O$ ، ${}^{19}_8O$ و ${}^{20}_8O$. بعضی از ایزوتوپ‌ها پایدار و بسیاری دیگر ناپایدار هستند و با درصد فراوانی‌های متفاوت در طبیعت وجود دارند. به هر حال، بعضی از ایزوتوپ‌های یک عنصر نسبت به بقیه ایزوتوپ‌های همان عنصر معین فراوان‌تر هستند. برای مثال ۹۹/۸٪ از اتم‌های اکسیژن طبیعی، ایزوتوپ ${}^{16}_8O$ ، ۰/۳۷٪ ایزوتوپ ${}^{17}_8O$ و ۰/۲۰۴٪ ${}^{18}_8O$ هستند. هسته‌های با عدد جرمی یکسان را ایزوبار^۲، هسته‌های با عدد نوترونی یکسان را ایزوتون^۳ و هسته‌های

1. Nuclide
2. Isobar
3. Isotone

ایزوباری که تعداد پروتون یکی برابر تعداد نوترون دیگری باشد را هسته‌های آینه‌ای می‌نامند. به‌عنوان نمونه هسته‌های $^{36}_{16}\text{S}$ ، $^{37}_{17}\text{Cl}$ ، $^{38}_{18}\text{Ar}$ ، $^{39}_{19}\text{K}$ و $^{40}_{20}\text{Ca}$ ایزوتون و هسته‌های $^{40}_{20}\text{Ca}$ ، $^{41}_{21}\text{K}$ ، $^{42}_{22}\text{Ar}$ ، $^{43}_{23}\text{Cl}$ ، $^{44}_{24}\text{S}$ ایزوبار هستند. هسته‌هایی نظیر $^{19}_{9}\text{F}$ ، $^{18}_{8}\text{O}$ یا $^{41}_{21}\text{K}$ ، $^{41}_{20}\text{Ca}$ را هسته‌های آینه‌ای دوگانه^۱ (زوج‌های آینه‌ای) و هسته‌هایی نظیر $^{12}_{6}\text{C}$ ، $^{11}_{5}\text{B}$ ، $^{10}_{4}\text{Be}$ را هسته‌های آینه‌ای سه‌گانه^۲ می‌نامند. برخی از هسته‌ها مانند $^{180\text{m}}_{73}\text{Tl}$ ، $^{58\text{m}}_{27}\text{Co}$ ، $^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ هسته در یک تراز برانگیخته کم‌پایدار^۳ قرار دارد و به آن‌ها هسته‌های ایزومر می‌گویند. هسته‌های ایزومر به‌دلیل کم‌پایداری با تابش گاما به‌سرعت واپاشی می‌کنند، نماد m نوشته‌شده کنار عدد جرمی این هسته‌ها هم به‌همین دلیل است.

مثال ۱-۱. یک لیوان آب معمولی $10^{-4} \times 6/6$ اتم هیدروژن دارد. چه تعداد از دوتریوم ^2H در این لیوان موجود است؟

حل: فراوانی ایزوتوپ ^2H ، 0.015% است. کسری از هیدروژن شامل ^2H ، $10^{-4} \times 5/1$ می‌شود.

تعداد کل اتم‌های ^2H در لیوان $10^{-2} \times 9/9 = 10^{-4} \times 6/6 \times 10^{-4} \times 5/1$ است.

خودآزمایی ۱-۱. هسته‌های $^{58}_{26}\text{Fe}$ و $^{58}_{27}\text{Co}$ نسبت به هم چگونه‌اند؟

الف) ایزوتون
ب) ایزوتوپ
ج) ایزوبار
د) آینه‌ای

۳-۱ جرم اتمی

در فیزیک اتمی و هسته‌ای برای هر اتم یک جرم اتمی در نظر گرفته می‌شود. در طبیعت جرم یک مول از اتم $^{12}_6\text{C}$ طبیعی به‌طور دقیق $12/000000$ گرم است. بنابراین $\frac{1}{12}$ جرم اتم $^{12}_6\text{C}$ به‌عنوان واحد جرم اتمی ^1u یا amu تعریف می‌شود. به‌عنوان مثال جرم دو ایزوتوپ اورانیوم عبارت است از: $m(^{238}_{92}\text{U}) = 238.0507885 \text{ u}$

1. Double Mirror Nucleus
2. Triple Mirror Nucleus
3. Metastable
4. Atomic Mass Unit

می‌گیرد، به صورت ${}^2\text{MeV}/c^2$ است. این واحد به دلیل استفاده از رابطه هم‌ارزی جرم و انرژی اینشتین $E = mc^2$ به کار می‌رود. این واحد و واحد جرم اتمی با رابطه $1\text{u} \cong 931/5 (\text{MeV}/c^2)$ به همدیگر تبدیل می‌شوند.

عناصر یافته شده در طبیعت اغلب شامل ترکیبی از ایزوتوپ‌ها هستند و جرم اتمی یک عنصر به عنوان جرم متوسط اتمی از مخلوط تعریف می‌شود. بنابراین اگر r_i و m_i به ترتیب درصد فراوانی و جرم اتمی هر ایزوتوپ در مخلوط باشند، جرم اتمی عنصر از رابطه (۱-۱) به دست می‌آید:

$$M = \frac{\sum_i m_i r_i}{100} \quad (1-1)$$

مثال ۱-۲. با استفاده از اطلاعات جدول زیر، جرم اتمی اکسیژن طبیعی را محاسبه کنید.

ایزوتوپ	درصد فراوانی	وزن اتمی (u)
${}^{16}_8\text{O}$	۹۹/۷۵۹	۱۵/۹۹۴۹۲
${}^{17}_8\text{O}$	۰/۰۳۷	۱۶/۹۹۹۱۳
${}^{18}_8\text{O}$	۰/۲۰۴	۱۷/۹۹۹۱۶

حل:

$$M(\text{O}) = \frac{m({}^{16}_8\text{O})r({}^{16}_8\text{O}) + m({}^{17}_8\text{O})r({}^{17}_8\text{O}) + m({}^{18}_8\text{O})r({}^{18}_8\text{O})}{100} \cong 15/99938\text{u}$$

۴-۱ شعاع اتمی و هسته‌ای

ابر الکترونی اتم، تعریف مناسبی برای شعاع اتم نیست، چرا که الکترون‌ها ممکن است گاهی دور از هسته و گاهی از نزدیک هسته گذر کنند. بنابراین تعیین اندازه و شعاع یک اتم تا حدی مشکل است و در نتیجه فاصله متوسط داده شده دورترین الکترون از هسته، اندازه معقول از اندازه اتمی در نظر گرفته می‌شود. شعاع متوسط برای همه اتم‌ها به جز تعداد کمی از سبک‌ترین اتم‌ها، تقریباً حدود ۲ آنگستروم است. زمانی که الکترون‌های اتمی افزایش می‌یابند، بدیهی است که با افزایش عدد اتمی، متوسط تراکم الکترون در ابر الکترونی نیز افزایش یافته و در نتیجه شعاع اتمی نیز افزایش می‌یابد.