فصل ۶

نیروگاه‌های هسته‌ای

۱.۶ مقدمه

بی‌شک می‌توان گفت که برای پاسخگویی به نیازهای بشری نیاز به وجود منابع در حد کافی می‌باشد. با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی، توجه به منابع انرژی جدید، امری اجتناب‌ناپذیر است. تعدادی از منابع جدید انرژی که به نام منابع انرژی نو خوانده می‌شوند، عبارتند از: انرژی باد، اقیانوس، جزر و مد، زمین گرمایی (ژئوترمال)، خورشید و ... . کسب این نوع انرژی‌ها هم از نظر تکنولوژی، گران و هم محدود می‌باشد و مخارج آن‌ها بیش از آن است که در آینده نزدیک، درصد قابل ملاحظه‌ای از کل انرژی تولید شده را تشکیل دهند. به همین خاطر است که توجه انسان به سوی انرژی‌های ناشی از شکافت هسته‌ای و همجوشی هسته‌ای جلب شد.

نیروگاه‌های هسته‌ای از جمله منابع انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت هستند که براساس واکنش شکافت هسته‌ای عمل می‌کنند. بیش از ۱۷ درصد کل انرژی الکتریکی تولیدی جهان بوسیله این نوع نیورگاه‌ها تولید می‌شود. واکنش شکافت هسته‌ای براین اساس است که با بمباران نوترونی هسته اورانیوم ۲۳۵ و جذب نوترون توسط آن، تعادل نیروهای داخلی بین نوترون‌ها و پروتون‌ها در هسته اورانیوم برهم می‌خورد و در نتیجه، این هسته به دو هسته سبک‌تر شکافته می‌شود. این تقسیم هسته با انرژی آزاد شده بسیاری همراه است که درصد بسیار زیادی از این انرژی (که قابل بهره‌برداری هم می‌باشد) به صورت انرژی جنبشی توسط نوترون ساطع می‌گردد و درصد کمی از آن نیز به صورت انرژی تشعشعی انتقال می‌یابد. در عمل، می‌توان با عبور سیالی مثل آب از درون محفظه‌ای که در آن شکافت هسته‌ای صورت می‌گیرد، انرژی جنبشی مذکور را جذب نمود. این عمل در قلب نیروگاه‌های هسته‌ای به نام راکتور انجام می‌شود. با این که بشر با کشف امکان استفاده از واکنش شکافت هسته‌ای برای تولید انرژی در سطح بسیار

گسترده، به یک منبع جدید انرژی متمرکز دست یافته است، ولی این منبع نیز به خاطر محدود بودن منابع اورانیوم نمی‌تواند نگرانی بشر را برای سال‌های پر بحران آینده برطرف نماید. از جمله مشکلات این نوع تولید انرژی در نیروگاه‌های هسته‌ای، آلودگی محیط از نظر مواد رادیواکتیو و آلودگی حرارتی می‌باشد. همچنین زباله‌های اتمی (مواد زائد حاصل از واکنش شکافت هسته‌ای) که دیگر قابل استفاده نیستند نیز برای بشر مساله‌ساز شده است و اما یک نکتع مثبت در مورد تولید انرژی به روش واکنش شکافت هسته‌ای، انتقال ارزان سوخت است؛ زیرا جرم کمی از سوخت هسته‌ای، قادر به تولید انرژی بالایی است. نوع دیگر واکنش هسته‌ای، همجوشی هسته‌ای می‌باشد که از همجوشی هسته اتم‌های سبک بدست می‌آید. این روش تولید انرژی (که در طبیعت هم صورت می‌گیرد) به صورت تبدیل اتم‌های هیدروژن در هم رفته به اتم‌های هلیوم می‌باشد. ابن تبدیل همراه با آزادسازی بسیار زیاد انرژی است. از این روش تولید انرژی در ساخت بمب‌های هیدروژنی استفاده می‌کنند. در این روش در اطراف مخزنی از اتم دوتریم (که ایزوتوپی از هیدروژن است) یک بمب منفجر می‌شود و در نتیجه، هسته اتم‌های دوتریم با هم ترکیب می‌گردند و انرژی فوق‌العاده زیادی تولید می‌شود.

۲.۶ مزایای انرژی هسته‌ای بر سایر انرژی‌ها

بدیهی است در زمینه کاربرد انرژی هسته‌ای به منظور تامین قسمتی از برق مورد نیاز کشور، قیود و عوامل بسیار مهمی از جمله اقتصادی و زیست محیطی مطرح می‌گردد.

۱. **دیدگاه اقتصادی استفاده از برق هسته‌ای:** امروزه کشورهای بسیاری بویژه کشورهای اروپایی، سهم قابل‌توجهی از برق مورد نیاز خود را از انرژِ هسته‌ای تامین می‌نمایند. بطوری که آمارها نشان می‌دهند، از مجموع نیروگاه‌های هسته‌ای نصب شده جهت تامین برق در جهان، به ترتیب ٪۳۵ به اروپای غربی، ٪۳۳ به آمریکای شمالی، ٪۱۶٫۵ به خاور دور، ٪۱۳ به اروپای شرقی و نهایتا فقط ٪۰٫۷۴ به آسیانه میانه اختصاص دارد. بدون شک در توجیه ضرورت ایجاد تنوع در سیستم عرضه انرژی کشورهای مذکور، انرژی هسته‌ای به عنوان یک گزینه مطمئن اقتصادی مطرح است؛ بنابراین، ابعاد اقتصادی جایگزینی نیروگاه‌های هسته‌ای با توجه به تحلیل هزینه تولید برق (قیمت تمام شده) در سیستم‌های مختلف قدرت، قابل تامل و بررسی است. از این رو در اغلب کشورها، نیروگاه‌های هسته‌ای با عملکرد مناسب اقتصادی خود از هر لحاظ با نیروگاه‌های سوخت فسیلی قابل رقابت می‌باشند.

سایر دیدگاه‌های اقتصادی در مورد آینده انرژی هسته‌ای حاکی از آن است که براساس موارد زیر، بدون تردید انرژی هسته‌ای یکی از حامل‌های قابل دسترس و مطمئن انرژی جهان در هزاره سوم بشمار می‌رود:

(آ) تحلیل سطح تقاضا و منابع عرضه انرژی در جهان،

(ب) توجه به توسعه تکنولوژی‌های موجود و حقایقی نظیر روند تهی شدن منابع فسیلی در دهه‌های آینده،

(ج) مزیت‌های زیست محیطی انرژی اتمی،

(د) استناد به آمار و عملکرد اقتصادی و ضریب بالای ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای،

(ه) مضرات کمتر چرخه سوخت هسته‌ای نسبت به سایر گزینه‌های سوخت،

(و) پیشرفت‌های حاصله در زمینه نیروگاه‌های زاینده و مهار انرژی گداخت هسته‌ای در طول نیم قرن آینده.

در این راستا شورای جهانی انرژی تا سال ۲۰۲۰ میلادی، میزان افزایش عرضه انرژی هسته‌ای را نسبت به سطح فعلی، حدود ۲ برابر بیشتر پیش‌بینی نموده است. با توجه به شرایط موجود چنانچه از لحاظ اقتصادی، هزینه‌های فروش نفت و گاز را با قیمت‌های متعارف بین‌المللی در محاسبات هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق منظور نماییم و همچنین تورم و افزایش احتمالی قیمت‌های این حامل‌ها را (براساس روند تدریجی به اتمام رسیدن منابع ذخایر نفت و گاز جهانی) مد نظر قرار دهیم، یقینا در بین گزینه‌های انرژی موجود، استفاده از حامل انرژی هسته‌ای نزدیک‌ترین فاصله ممکن را با قیمت تمام شده برق در نیروگاه‌های فسیلی خواهد داشت.

۲. **دیدگاه زیست‌محیطی استفاده از برق هسته‌ای:** افزایش روزافزون مصرف سوخت‌های فسیلی در دهه‌های اخیر و ایجاد انواع آلاینده‌های خطرناک و سمی و انتشار آن در محیط زیست، نگرانی‌های مهمی را برای بشر به دنبال داشته است.بدیهی است که این روند به دلیل اثرات مخرب مرگبار آن، در آینده تداوم چندانی نخواهد داشت. از این رو به جهت افزایش خطرات و نگرانی‌های تدریجی در مورد اثرات مخرب انتشار گازهای گلخانه‌ای (ناشی از کاربرد فرآیند انرژی‌های فسیلی)، از انرژی هسته‌ای به عنوان یکی از رهیافت‌های زیست محیطی برای مقابله با افزایش دمای کره زمین و کاهش آلودگی محیط زیست یاد می‌شود. چنانچه آمارها نشان می‌دهند در حال حاضر، نیروگاه‌های هسته‌ای جهان با ظرفیت نصب شده فعلی، توانسته‌اند سالانه از انتشار ۸ درصد

از گاز دی‌اکسید کربن در فضا جلوگیری کنند که در این راستا، تقریبا مشابه نقش نیروگاه‌های آبی عمل کرده‌اند. لذا در صورت استفاده از انرژی هسته‌ای در جهان، این انرژی در دهه‌های آینده نقش مهمی در کاهش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا خواهد نمود.
در حالی که آلودگی‌های ناشی از نیروگاه‌های فسیلی، سبب وقوع حوادث و مشکلات بسیار زیادی بر محیط زیست و انسان‌ها می‌شود، سوخت هسته‌ای گازهای سمی و مضر تولید نمی‌کند و مشکل زباله‌های اتمی نیز تا حد قابل قبولی رفع شده است. چرا که در مورد مسایل پسماندهای هسته‌ای با توجه به کم بودن حجم زباله‌های هسته‌ای و پیشرفت‌های بدست آمده در زمینه دفن نهایی این زباله‌ها در صخره‌های عمیق زیرزمینی با توجه به حفاظت و استتار ایمنی کامل، مشکلات موجود تا حدود زیادی از نظر فنی حل شده است.
به هر حال در مورد مزایای نیروگاه‌های هسته‌ای در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی، صرف نظر از مسایل اقتصادی، علاوه بر کم بودن زباله‌های آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(آ) تمیزتر بودن نیروگاه‌های هسته‌ای و عدم آلایندگی محیط زیست به آلاینده‌های خطرناکی نظیر CO_2، CO، NO_2 و SO_2.

(ب) پیشرفت تکنولوژی و استفاده هرچه بیشتر از این علم جدید،

(ج) افزایش کارایی و کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در سایر زمینه‌های صلح‌آمیز در کنار نیروگاه‌های هسته‌ای.

۳.۶ کابردهای انرژی هسته‌ای

انرژی هسته‌ای در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از مهمترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. **کاربرد انرژی هسته‌ای در تولید انرژی الکتریکی:** گرمای حاصل از واکنش هسته‌ای در محیط راکتور هسته‌ای تولید شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارتی در طی مراحلی در راکتور، پس از مهار شدن انرژی آزاد شده واکنش هسته‌ای، گرمای زیادی تولید می‌شود که پس از خنک‌سازی به عنوان خنک‌کننده بکار می‌رود، به بخار آب تبدیل می‌کند. بخار تولید شده به سمت توربین فرستاده می‌شود تا با راه‌اندازی مولد، توان الکتریکی مورد نیاز را تولید کند. در واقع در نیروگاه‌های هسته‌ای، راکتور همراه با مولد بخار، جانشین دیگ‌بخار در نیروگاه‌های بخار معمولی شده است.

۲. **کاربرد انرژی هسته‌ای در علم پزشکی و امور بهداشتی:** در کشورهای پیشرفته صنعتی، از این نوع انرژی به شکل وسیعی در علم پزشکی استفاده می‌شود. با توجه به شیوع برخی از بیماری‌ها از جمله سرطان، ضرورت تقویت طب هسته‌ای در کشورهای در حال توسعه، هر روز بیشتر می‌شود. موارد زیر از مصادیق تکنیک‌های هسته‌ای در علوم پزشکی است:

(آ) تهیه و تولید کیت‌های رادیو دارویی جهت مراکز پزشکی هسته‌ای،

(ب) تهیه و تولید رادیو دارویی جهت تشخیص بیماری تیرویید و درمان آن‌ها،

(ج) تهیه و تولید کیت‌های هورمونی،

(د) تشخیص و درمان سرطان پروستات،

(ه) تشخیص سرطان کولون، روده کوچک و برخی سرطان‌های سینه،

(و) تشخیص تومورهای سرطانی و بررسی تومورهای مغزی، سینه و ناراحتی وریدی،

(ز) تصویربرداری بیماری‌های قلبی، تشخیص عفونت‌ها و التهاب‌های مفصلی، آمبولی و لختی‌های وریدی،

(ح) تشخیص کم‌خونی، کنترل رادیو داروهای خوراکی و تزریقی و ...

۳. **کاربرد انرژی هسته‌ای در بخش دام‌پزشکی و دام‌پروری:** تکنیک‌های هسته‌ای در خوزه دام‌پزشکی، دارای کاربردهایی همچون تشخیص و درمان بیماری‌های دامی، تولید مثل دام، اصلاح نژاد و دام، تغذیه، امور بهداشت و ایمن‌سازی محصولات دامی و خوراک دام می‌باشد.

۴. **کاربرد انرژی هسته‌ای در دسترسی به منابع آب:** تکنیک‌های هسته‌ای برای شناسایی حوزه‌های آب زیرزمینی، هدایت آب‌های سطحی و زیرزمینی، کشف و کنترل نشت و ایمنی سدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در شیرین کردن آب‌های شور نیز انرژی هسته‌ای کاربرد دارد.

۵. **کاربرد انرژی هسته‌ای در بخش صنایع غذایی و کشاورزی.**

۶. **تکنیک‌های هسته‌ای جهت کشف مین‌های ضد نفر.**

۴.۶ ساختمان اتم

۱.۴.۶ مقدمه

همانگونه که می‌دانیم تمام مواد از ذراتی به نام اتم تشکیل شده‌اند. مرکز این اتم‌ها را هسته [۱] می‌نامند. این هسته‌ها، شامل ذرات نسبتا سنگین پروتون (با بار مثبت) و نوترون (با بار خنثی) می‌باشند. لذا مجموع پروتون‌ها و نوترون‌های هر اتم، هسته را تشکیل می‌دهند. این هسته توسط ذرانی به نام الکترون (با بار منفی) احاطه شده‌اند که به دور هسته برروی مدارهای مشخصی می‌چرخند. با توجه به این که تعداد الکترون‌ها و پروتون‌های هر اتم با هم برابر هستند، لذا اتم‌ها از نظر الکتریکی دارای بار خنثی می‌باشند. با توجه به اینکه شعاع هسته به مقدار $۱۰^{-۱۶}$ متر می‌باشد و از شعاع اتم (که $۱۰^{-۱۱}m$ است) بسیار کمتر است و با توجه به وزن بسیار زیاد پروتون‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین وزن هر اتمی در هسته آن متمرکز است؛ بنابراین، بیشتر جرم هر اتمی در بخش کوچکی از اتم متمرکز شده است. ساختمان کلی اتم‌های مختلف را می‌توان در شکل مشاهده نمود.

عموما هر اتم را می‌توان به صورت نمادین $^{A_m}_{Z_e}Y$ نشان داد: Y معرف عنصر شیمیایی، Z_e عدد اتمی و A_m بیان‌کننده جرم اتمی می‌باشد. عدد اتمی Z_e بیانگر تعداد پروتون‌های هسته می‌باشد و جرم اتمی A_m، معرف تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌های آن عنصر می‌باشد. با توجه به این که جرم ذرات وابسته به اتم‌ها خیلی کوچک است، لذا برای بیان جرم آن‌ها از واحدهای اتمی یا amu [۲] استفاده می‌شود که $۱amu = ۱/۶۶۰۵ \times ۱۰^{-۲۷}\,kg$ می‌باشد. در جدول ۱.۶ وزن اجزا تشکیل‌دهنده هر اتم برحسب kg و amu ارائه شده است.

جدول ۱.۶: مشخصات اجزای اساسی یک اتم

عنصر	علامت	بار الکتریکی	جرم (kg)	جرم (amu)
الکترون	e^-	-۱	$۹/۱۰۹ \times ۱۰^{-۳۱}$	$۵/۴۸۶ \times ۱۰^{-۴}$
پوزیترون	p^+	$+۱$	$۹/۱۰۹ \times ۱۰^{-۳۱}$	$۵/۴۸۶ \times ۱۰^{-۴}$
پروتون	e^+	$+۱$	$۱/۶۷۳ \times ۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۷۲۷۷
نوترون	n	۰	$۱/۶۷۴ \times ۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۸۶۶۵
اتم هیدروژن	^۱_۱H	$+۱$	$۱/۶۷۳ \times ۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۷۸۲۵
ذره آلفا	α	$+۲$	$۶/۶۴۴ \times ۱۰^{-۲۷}$	۴/۰۰۲۶۰۳

با مراجعه به جدول مذکور مشخص می‌شود که جرم یک پروتون یا نوترون تقریبا مساوی ۱amu است؛ بنابراین جرم هسته مرکزی تقریبا برابر جرم اتمی آن می‌باشد. تعداد نوترون‌های هر هسته را می‌توان

[۱] Nucleus
[۲] Atomic Mass Unit

از تفریق جرم اتمی و عدد اتمی آن بدست آورد:

$$n = A_m - Z_e \qquad (۱.۶)$$

هنگامی که اتم‌هایی دارای تعداد پروتون‌های مساوی باشند، ولی تعداد نوترون‌های آن‌ها با هم متفاوت باشند، همه آن‌ها از نظر شیمیایی دارای خواص مشترکی هستند؛ زیرا همه آن‌ها دارای یک پوسته الکترونی برابر هستند. چنین عناصری را ایزوتوپ [۱] می‌گویند. به عبارت دیگر، ایزوتوپ‌ها دارای عدد اتمی برابر ولی جرم اتمی متفاوت هستند. به عنوان مثال می‌توان به سه نوع اتم هیدروژن اشاره نمود: هیدروژن ${}^{۱}_{۱}H$ ، دوتریم ${}^{۲}_{۱}H$ ، تریتیوم ${}^{۳}_{۱}H$ ، که هیدروژن، فاقد نوترون، دوتریوم دارای یک نوترون و تریتیوم دارای دو نوترون است. هیدروژن، تشکیل آب سبک یا معمولی ($H_۲O$) را می‌دهد؛ ولی دوتریوم، آب سنگین ($D_۲O$) و تریتیوم آب خیلی سنگین ($T_۲O$) را تشکیل می‌دهد.

غالب عناصر از جمله اورانیوم، ایزوتوپ دارند. عنصر اورانیوم، دارای چهار ایزوتوپ است که فقط دو ایزوتوپ آن، به علت داشتن نیمه عمر نسبتا بالا، در طبیعت و در سنگ معدن یافت می‌شوند. این دو ایزوتوپ، اورانیوم ۲۳۵ (^{۲۳۵}U) و اورانیوم ۲۳۸ (^{۲۳۸}U) هستند که در هر دو، تعداد ۹۲ پروتون وجود دارد ولی اولی، ۱۴۳ و دومی ۱۴۶ نوترون دارد. اختلاف این دو، وجود فقط ۳ نوترون اضافی در ایزوتوپ سنگین است. البته از نظر خواص شیمیایی، این دو ایزوتوپ کاملا یکسان هستند و برای جداسازی آن‌ها از یکدیرگ، حتما باید از خواص فیزیکی آن‌ها (یعنی اختلاف جرم ایزوتوپ‌ها) استفاده کرد. ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵، شکست‌پذیر است که از این خاصیت در نیروگاه‌های اتمی استفاده می‌شود و حرارت ایجاد شده در اثر این شکست را تبدیل به انرژی الکتریکی می‌نمایند.

[۱] Isotope

مراجع

[۱] هوشمند، رحمت‌الله، *تولید برق در نیروگاه‌ها*، ویرایش دوم-چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، سال ۱۳۹۱.

[2] P.k.Nag, *Power Plant Engineering,* Teta McGraw-Hill, 3rd ed, 2008.

[3] M..M.El-Wakil, *PowerPlant Technology,* McGraw-Hill, 2nd ed, 1988.