کدام یك از نیروگاههای هسته‌ای را انتخاب کنیم

نوشتهٔ :

حمید رفیع‌زاده

دانشیار انستیتو مهندسی مکانیک

پلی‌تکنیک تهران

چکیده

باتکنولوژی‌عصر حاضر و اطلاعاتی که از اصول تبدیل انرژی وجود دارد ، انرژی هسته‌ای تنهامنبع انرژی میباشد که میتواند احتیاجات آینده دنیا را برآورده کند. دراین مقاله انواع راکتورها وسوخت‌های که در راکتورهای قدرت به‌کاربرده میشود بررسی شده‌اند. درحال حاضر انتخاب نوع نیروگاه مسأله‌نسبتاً ساده‌ای است ولی انتخاب قدرت نیروگاه ، ایمنی راکتورقدرت ، و مدیریت سوختها و صنایع هسته‌ای از مسائل پیچیده صنعت هسته‌ای میباشند.

۱ ـ مقدمه

پیش‌بینی‌احتیاج روز افزون‌انرژی‌برای سالهای آینده موجب مطالعات زیادی درباره مسأله کمبود انرژی از جنبه‌های‌مختلف‌شده‌است. منابع موجودانرژی تجارتی شامل سوخت‌های فسیلی ، انرژی هسته‌ای، انرژی خورشیدی ، جذر ومد دریا وژئوترم است.

سوختهای نفتی فعلاً دارای دوکاربرد مهم ، یکی انرژی حاصل از احتراق و دیگری ماده اولیه مواد شیمیائی میباشد. درحال حاضر سیاست داخلی اغلب کشورهای تولیدکننده سوختهای نفتی طوری‌بنا شده که‌استفاده ازنفت بصورت ماده‌خام موادشیمیائی در درجهٔ اول‌اهمیت قرارگرفته است. انرژی‌خورشیدی به جز در موارد استثنائی استفاده اقتصادی ندارد چون نحوه دریافت انرژی خورشید درسطح زمین،تغییرات روز و شب ، وتغییرات جوی عواملی هستند که استفاده از انرژی خورشید را با وجود رایگان بودن منبع

انرژی غیرقابل اعتماد ودر نتیجه از لحاظ اقتصادی غیرممکن میکند. انرژی جذر ومد دریا یا منابع ژئوترم نیز تاحد زیادی بستگی به‌امکانات محلی داشته ومانند انرژی خورشیدی از عوامل جوی متأثر میشوند. از اینرو درحال حاضر تنها نوع انرژی که امکان استفاده اقتصادی آن مورد توجه قرار گرفته انرژی هسته‌ای میباشد.

انرژی هسته‌ای دارای خصوصیاتی است که نظیر آن درصنایع دیگری که توسعه پیدا کرده‌اند به چشم نمیخورد. این خصوصیات مربوط به تولید مواد رادیواکتیو در اثر واکنش‌های هسته‌ای است که‌امری اجتناب ناپذیر درتولید انرژی مفید هسته‌ای میباشد.

مسائلی که از نقطه نظرایمنی راکتورهای هسته‌ای قدرت مورد بحث قرارگرفته (۱) به طور کلی مربوط به مخاطراتی میباشد که درحال حاظر در استفاده از انرژی هسته‌ای برای جبران کمبود انرژی مجاز دانسته شده است. مسائل ایمنی راکتورهای قدرت را به دودسته میتوان طبقه‌بندی کرد.

دسته اول مسائل‌فنی راکتورها است که شامل دوقسمت (الف) ـ حوادث قسمت مرکزی‌راکتور که باعث آزاد شدن مقادیر قابل توجه‌ای از مواد رادیواکتیو میشود و (ب) ـ مشکل انبارکردن مواد رادیواکتیو زائد که درعمل معمولی یک راکتور بوجود میآید میباشد.

دسته‌دوم مسائل که‌درچند سال اخیر توجهٔ زیادی به آن شده موضوع حفاظت سوختهای هسته‌ای میباشد. با درنظرگرفتن اینکه چند کیلوگرم از اورانیوم - ۲۳۵ یاپلوتونیوم - ۲۳۰ موجود درنیروگاه به سادگی میتواند تبدیل به‌بمب اتمی شود، ازنقطه نظر استفاده تروریستی توسط گروههای افراطی، مدیریت غلط نیروگاه یا صنایع مربوطه میتواند جرو خطرناکترین موارد مربوط به استفاده از انرژی هسته‌ای باشد.

درعمل، هرنیروگاهی که تولید انرژی مفید میکند همیشه تأثیر مستقیم و نامطلوبی با تولیدمواد زائد یا انرژی حرارتی غیرقابل مصرف درمحیط زیست داشته است. اینگونه تغییرات محیطی جزو عوامل غیرقابل اجتناب در استفاده از یک نیروگاه بوده و درنتیجه این سئوال مطرح میشود که تا چه حد و تاچه زمانی میتوان‌تغییرات‌محیطی نیروگاه‌را مجاز دانست. درحالتی که تعداد نیروگاهها محدود و قدرت نیروگاه درسطح پائینی قرار داشته باشد محیط به طور طبیعی وخود کار میتواند اثرات وجود عوامل تغییر دهنده را تحمل کرده و باآن بسازد. ولی‌مسلماً وباوجودتعدادزیاد نیروگاههائی که با قدرت چند هزارمگاوات‌حرارتی مشغول عمل هستند، در مطالعه اقتصادی انتخاب نیروگاه تأثیرات محیطی آینده نزدیک و آینده دوو را نیز باید درنظرداشت.

درقسمت دوم این مقاله منابع انرژی هسته‌ای مطالعه شده و درقسمت سوم راکتورهای قدرت که از انرژی هسته‌ای تولید الکتریسیته میکنندمعرفی میشوند. قسمت‌چهارم حاوی مطالبی راجع به‌سوختهای هسته‌ای راکتور قدرت میباشد و درقسمت‌پنجم مسائل ایمنی راکتورهای هسته بحث میشود. قسمت ششم درباره آینده نگری امکانات استفاده از نیروگاههای هسته‌ای در ایران میباشد.

۲ ـ انرژی هسته‌ای

دو روش کاملا متفاوت «شکافت هسته‌ای» و «پیوند هسته‌ای» میتواند تولید انرژی هسته‌ای بنماید. درشکافت هسته‌ای، یک هسته سنگین براثر اصابت یک نوترون به دونیم تقسیم میشود که همراه با انرژی آزاد شده تعداد دیگری نوترون نیزدراین عمل بوجود میآید. نوترونهای جدید در نوبت خود میتوانند تولید شکافت هسته‌ای در هسته‌های سنگین دیگری را نموده و در نتیجه عمل شکافت هسته‌ای را در یک سیستم متشکل از اتمهای سنگین پایدارنماید.

درعمل پیوندهسته‌ای یاجوش هسته درصورتیکه دو هسته سبک به اندازه کافی انرژی داشته باشند میتوانند باهم ترکیب شده وهسته سنگین تری را همراه با آزادکردن انرژی بوجود بیاورند. خورشیددرحال حاضر با ترکیب هسته اتمهای هیدرژن تولید انرژی مفیدی میکند که منبع اصلی انرژی برای زندگی بشردر کره زمین میباشد. درعمل پیوند هسته‌ای، هسته‌های ترکیب شونده باید دارای انرژی جنبشی باشند که درنتیجه به‌جز در درجه حرارتهای خیلی زیاد، مانند آنچه که درقسمت داخلی خورشید وجود دارد، درشرایط دیگری پیوند هسته‌ای غیرممکن است.

بنابراین درپیوند هسته‌ای برای بوجود آوردن برخوردهای نزدیک دوهسته باید ذرات راکوچک انتخاب کرد ویا اینکه انرژی جنبشی آنها را زیاد نمود. استفاده از ذرات کوچکتر از پروتون درحال حاضر فقط جنبه تئوری داشته و تنها راه عملی موفقیت پیوند هسته‌ای در حرارت دادن مخلوطی ازهیدرژن سنگین و تریتیوم تشخیص داده شده است. درجه حرارتی که برای عمل ترکیب لازم میباشد درحدود [۹]. درجه است که دراین درجه حرارت تمام الکترونها از هسته جدا شده وگازی مرکب از الکترونها وهسته‌های آزاد بوجود میآید که به نام «پلاسما» تعریف وشناخته میشود.

درشرایط موجود در سطح زمین سعی زیادی درمحدود کردن پلاسما توسط میدانهای مغناطیسی میشود چون بخاطر درجه حرارت زیاد پلاسما، امکان قراردادن آن در یک ظرف معمولی وجود ندارد. با اینکه پیشرفتهای قابل ملاحظه‌ای در پیوند هسته‌ای منبع سوخت هیدرژن سنگین میباشد که به مقدارزیاد

در آب دریا موجود است. دراین روش مواد رادیواکتیو زائد به مقدار خیلی ناچیز بوجود میآید ودرصورت اقتصادی بودن تا سالیان‌دراز انرژی مورد نیاز بشر را تأمین خواهد کرد. بطورکلی درمورد بهره برداری از تکنولوژی راکتورهای پیوند پس ازسال ۲۰۰۰ میتوان خوش بین بود (۲).

از اتمهائی که درطبیعت وجود دارند ایزوتوپ اورانیوم - ۲۳۵ قابل شکافت توسط نوترونهای حرارتی بوده و درنتیجه به عنوان سوخت در اغلب راکتورهای هسته‌ای‌قابل‌استفاده میباشد. این‌ایزوتوپ به مقدار ۰٫۷۱ درصد در اورانیوم طبیعی وجود دارد و از اینرو باید آنرا جزو مواد کمیاب طبقه‌بندی کرد. از زمان حال‌تازمانی که‌راکتورهای‌پیوندبه مرحله استفاده اقتصادی‌برسند فقط راکتورهای شکافت‌هسته‌ای قادر به پرکردن کمبود انرژی خواهند بود چون تکنولوژی راکتورهای شکافت هسته‌ای تقریباً ثابت شده و قابل اعتماد است. درهرراکتور هسته‌ای شکافت، در اثرشکافتن هسته‌های سنگین مانند اورانیوم‌تولید مقدار قابل توجهی‌هسته‌های ناپایدار رادیواکتیو میشود. این هسته‌های جدید رادیواکتیو فعلا جزومواد زائد و خطرناکی هستند که برای نگهداری آن وجلوگیری از آلودگی محیط زیست اقدامات اساسی باید به عمل بیاید.

اضافه برراديواكتيويته‌حاصله از شکافت‌هسته‌ای، چون نوترون قابل جذب توسط تمام‌هسته‌های موجود در راکتور از سبک تاسنگین میباشد، هسته‌های پایدار مواد ساختمانی راکتور براثر جذب نوترون تبدیل به مواد رادیواکتیو خطرناك خواهند شد. از اینرو با آگاهی از خواص نوترونی مواد باید طوری‌آن مواد را انتخاب‌نمود که‌خطر جذب‌نوترونی را به می‌نیمم برساند. از آنچه که بحث شد باید نتیجه گرفت که قسمت اصلی مواد رادیواکتیو در خود سوخت قرار دارد و ازاینرو روپوش میله‌های سوخت باید ازساده‌ای انتخاب گردد که علاوه برانتقال حرارت از سوخت به سیال سرد کننده از انتقال هرنوع ماده رادیواکتیو به خارج از میله سوخت نیزجلوگیری کند (۳).

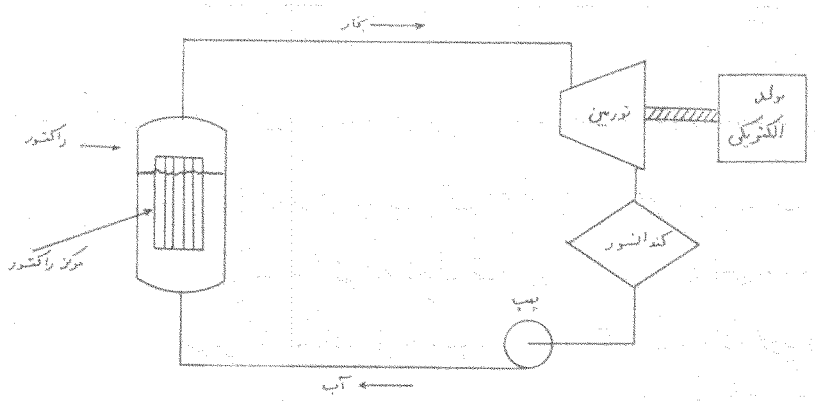
۳ - راکتورهای قدرت

راکتور هسته‌ای، به طورخیلی ساده، مجموعه‌ای از سوخت و ماده سرد کننده میباشد که درآن عمل‌شکافت بطور مداوم صورت گرفته و انرژی تولید شده توسط سیال سرد کننده و به خارج‌از راکتورمنتقل میشود. براثرشکافت یک هسته سنگین بطور متوسط ۲٫۵ نوترون جدید بوجود میآید که برای پیوستگی‌عمل شکافت حداقل یکی از این‌نوترونهای جدید باید تولید شکافت دیگری را بنماید. به عبارت دیگر از ۲٫۵

نوترون جدید میتوان تا ۰٫۵ نوترون را بر اثر جذب درمواد غیرسوختی ویا براثرفرار از راکتور از دست داد بدون اینکه لطمه‌ای به کار راکتور وارد آید.

راکتور زمانی در حالت تولید انرژی دائمی و ثابت میباشد که درازای هرنوترون که تولیدشکافت هسته‌ای می‌نماید نوترون دیگری بوجود بیاید که آن نیز به نوبهٔ خود تولید شکافت هسته‌ای میکند. درصورتیکه‌نسبت‌تعداد این دونسل از نوترونهای‌راکتور مساوی یک باشد زنجیرشکافتهای هسته‌ای‌پایدار ولی درصورتیکه این نسبت کوچکتر از یک باشد راکتور از کار خواهد افتاد. درصورتیکه نسبت ذکرشده بزرگتر از یک باشد تعداد نوترونها و در نتیجه تعداد شکافتها و مقدار انرژی حاصله به سرعت زیاد شده و عملا تولیدسیستمی میشود که درحالت بخصوصی آنرا به اسم بمب اتمی میشناسیم. مقدار شکافت‌های هسته‌ای راکتور توسط «میله های کنترل» که از موادی باقدرت جذب نوترونی خیلی زیاد انتخاب شده‌اند کنترل میشود. با زیاد یا کم کردن مقدار این مواد جذب کننده نوترون در راکتور، باوارد یا خارج کردن میله های کنترل در مرکز راکتور، میتوان تعداد کل نوترونها و در نتیجه تعداد نوترونهای شرکت کننده درشکافت هسته‌ای راکنترل کرده و راکتور را درسطح قدرت دلخواه قرارداد.

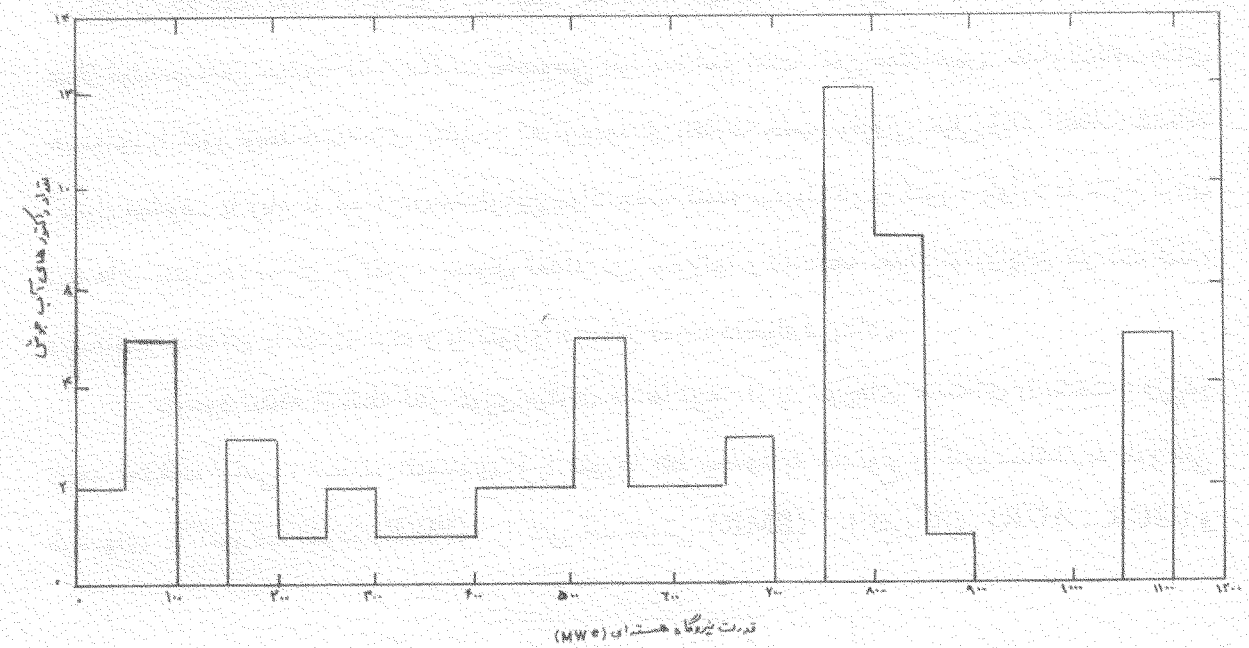
باوجود اینکه از نقطه نظر تئوری میتوان صدها نوع از راکتورهای هسته‌ای را ساخت، ولی‌در نتیجه تحقیقات اساسی، استفاده اقتصادی از راکتورها فقط محدود به چندنوع راکتور میباشد. به طورکلی طرحهای راکتور آب فشرده (PWR)، راکتور آب جوش (BMR)، راکتورگازی (GCR , AGR) و



(شکل ۱) ـ نیروگاه هسته‌ای باراکتور آب جوش

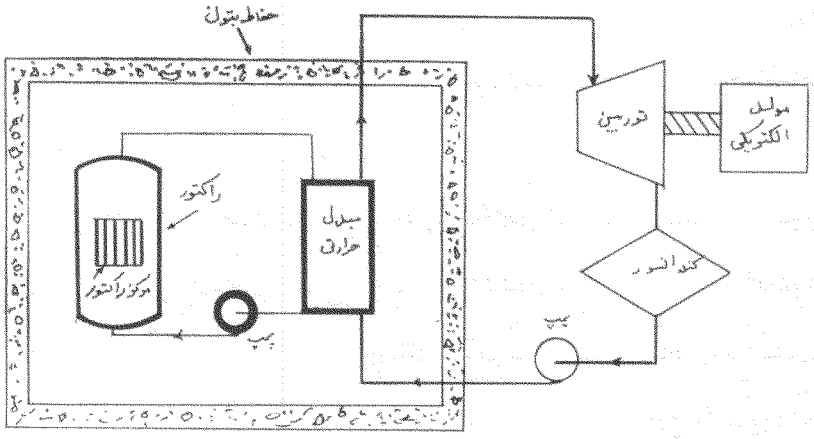
راکتور سریع مولد (FBR) راکتورهای مورد استفاده عصر حاضر میباشند ساده‌ترین این راکتورها که در (شکل ـ ۱) نشان داده شده راکتور آب جوش میباشد. دراین راکتور حرارت حاصله از شکافت هسته‌ای‌در میله های سوخت، که از اورانیوم غنی شده با روپوش مخصوصی ساخته شده، به سیال سردکننده که آب معمولی میباشد منتقل و آب را بخار میکند. در (شکل ـ ۲) تعداد راکتورهای آب جوش ساخته شده یا در

دست ساختمان به صورت تابعی از قدرت الکتریکی نیروگاههای مربوطه نشان داده شده است(٤). دراین شکل سه منطقه قدرت کمتر از ٤٠٠ تا ٩٠٠ مگاوات و در حدود ١٠٠٠ مگاوات الکتریکی کاملامشخص میباشد. اگرچه تعداد راکتورهای آب جوش با قدرت در حدود ١٠٠٠ مگا وات الکتریکی کم است ولی تعداد راکتورهای ٤٠٠ تا ٩٠٠ مگاوات قابل توجه میباشد. در راکتور آب جوش عواملی که از آزادشدن رادیواکتیویته سوخت به محیط جلوگیری میکند عبارتند از روپوش میله های سوخت ، آب سرد کننده راکتور و حفاظ بتونی اطراف راکتور.

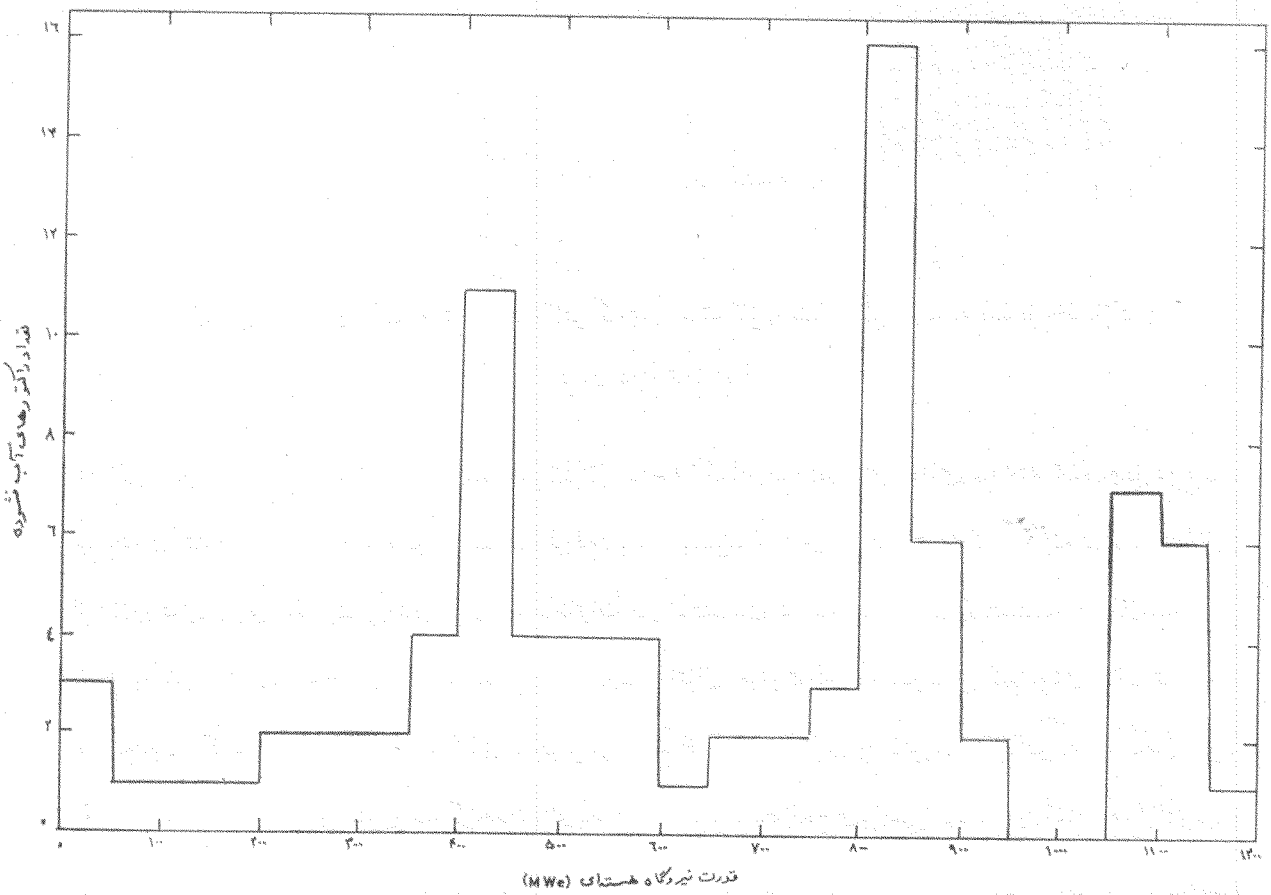


(شکل ٢) ـ گسترش تعداد راکتورهای قدرت از نوع آب جوش بصورت تابعی از قدرت راکتور

در (شکل ـ ٣) خصوصیات ساختمانی راکتور آب فشرده که دارای دوحلقه آب سرد کننده میباشد به صورت ساده نشان داده شده است. حلقه اول که تحت فشار زیاد (درحدود ٢٠٠٠ psi) میباشد عمل کردن راکتور را انجام میدهد وسپس با استفاده از یک مبدل حرارتی گرما به حلقه دوم منتقل میشود که در فشار پائین تر (در حدود ٦٠٠ psi) تولید بخار برای چرخاندن توربین و مولد الکتریکی میکند. دراین راکتور به خاطر فشار زیادمخارج ساختمان مربوط به راکتور زیاد بوده و درضمن خوردگی و زنگ زدگی نیز زیادتر از حد معمول میباشد. درهردونوع راکتورهای آب جوش و آب فشرده بخار بوجود آمده درمقایسه با نیروگاههای معمولی دارای درجه حرارت وفشار پائین میباشد که درنتیجه راندمان حرارتی نیروگاه نیز کمتر از راندمان حرارتی نیروگاههای معمولی است. در (شکل ـ ٤) تعداد نیروگاههائی که از راکتورآب



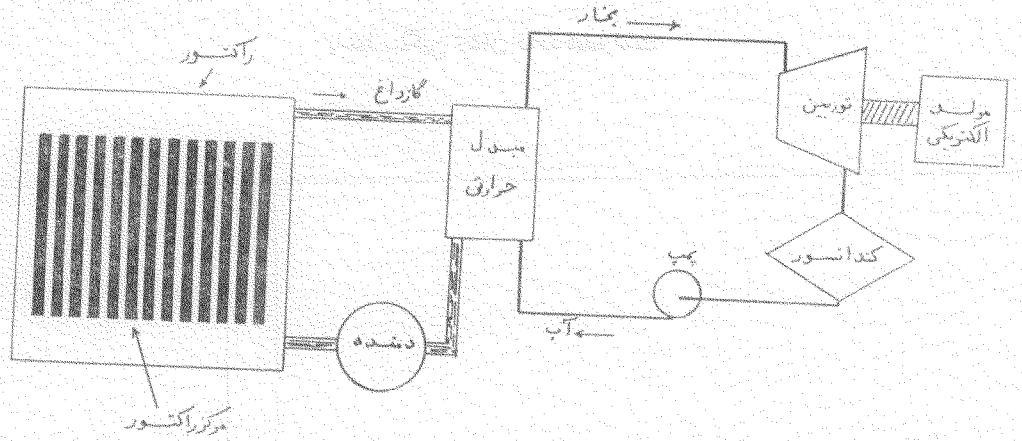
(شکل۳) — نیروگاه هسته‌ای باراکتور آب فشرده. حلقه اول آب با خط نازك و حلقه دوم باخط سنگین نشان داده شده است



(شکل ٤) — گسترش تعداد راکتورهای قدرت از نوع آب فشرده بصورت تابعی ازقدرت راکتور

فشرده استفاده میکنند ویا تا سال ۱۹۷۰ استفاده خواهند کرد به صورت تابعی از قدرت نیروگاه نشان داده شده است(٤) .دراین شکل اهمیت طرح راکتورهای آب‌فشرده کاملاً مشخص بوده و تعداد آنهادرقدرتهای ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ مگاوات الکتریکی چشمگیر است.

نوع دیگر راکتورهای هسته‌ای ، که تقریباً مختص انگلستان است ، راکتورگازی میباشد. راکتورهای گازی براساس اولین طرحهای عملی که برای ساختمان یک راکتور با استفاده از اورانیوم‌طبیعی پیشنهاد شده‌اند. در (شکل - ٥) ساختمان‌راکتورگازی بطور ساده نشان داده شده است. سیال سرد کننده گاز CO_2 میباشد که در داخل کانالهای گرافیت جریان دارد. از امتیازات این راکتورها امکان استفاده از



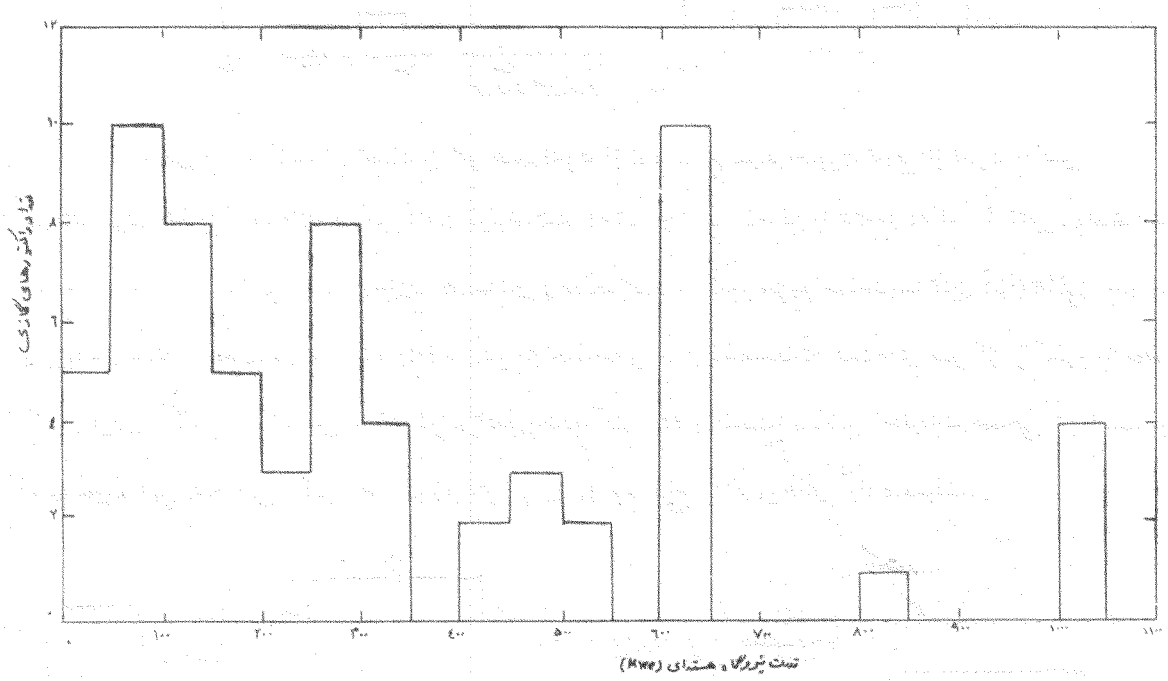
(شکل ٥) — نیروگاه هسته‌ای باراکتورگازی. حلقه گاز با خط سنگین و حلقه آب با خط نازك نشان داده شده است

اورانیوم طبیعی برای سوخت میباشد. در (شکل - ٦) تعداد راکتورهای گازی ساخته شده ویا در دست ساختمان که تا سال ۱۹۷۰ قابل استفاده خواهند بود بصورت تابعی از قدرت راکتور داده شده است(٤). راکتورهای گازی باقدرت زیادتر از ٦۰۰ مگاوات در انگلستان در دست ساختمان هستند. درحال‌حاضراین نوع راکتور به علت حجم بزرگ ، خصوصیات‌ضعیف انتقال حرارت گاز ، وهمینطور کم بودن دانسیته قدرت (درحدود یک کیلووات قدرت درازای هرلیتر از حجم قسمت مرکزی راکتور) مورد توجه نیستند. نوع HTGR از راکتورهای گازی که طرحهای اولیه آن در دست مطالعه و بررسی میباشد با استفاده ازاورانیوم تقریباً صد درصد غنی شده برای‌سوخت ، گازهلیوم برای سیال سرد کننده دارای امکانات بهتری در مقایسه با سایر راکتورهای گازی میباشد.

اغلب راکتورهای عصر حاضر از اورانیوم - ۲۳۵ که ایزوتوپ کمیابی در اورانیوم طبیعی است

برای شکافت هسته‌ای استفاده میکنند. درصورت ادامه استفاده از اورانیوم - ۲۳۵ به همین طریق و با رشد احتیاجات الکتریسیته دنیا در میزان فعلی ، قبل از آینکه راکتور پیوند به مرحله استفاده اقتصادی برسد سوخت هسته‌ای راکتورهای شکافت به اتمام خواهد رسید. در اغلب پیش بینی‌ها زمان ماکزیمم استفاده از اورانیوم - ۲۳۵ تا سالهای ۱۳۷۰ - ۱۳۶۰ تخمین زده شده است.

برای اینکه از منابع سوخت هسته‌ای بصورت باصرفه تری استفاده شود ، طرح و ساختمان راکتورهای

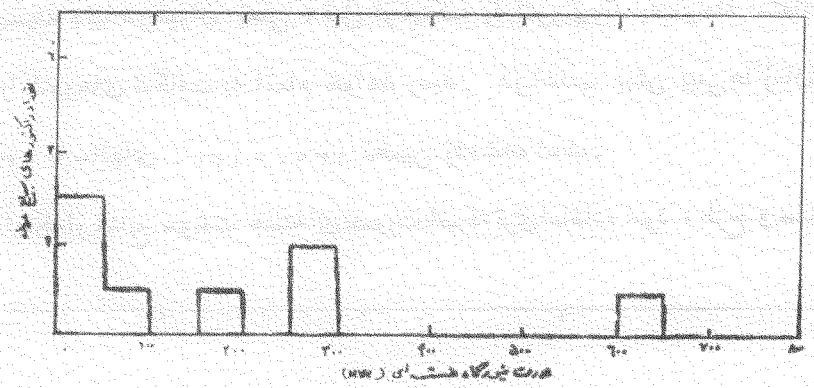


(شکل ۶) — گسترش تعداد راکتورهای قدرت از نوع گازی بصورت تابعی از قدرت راکتور

سریع مولد در دست مطالعه و بررسی است. همانطورکه (شکل ۷) نشان میدهد تعدادی از راکتورهای قدرت سریع مولد ، که در حال حاضر فقط آزمایشی هستند ، ساخته شده است و انتظار میرود که راکتورهای سریع مولد در ۲۰ سال آینده بتوانند جانشین راکتورهای حرارتی عصر حاضر بشوند. در راکتور سریع مولد اورانیوم طبیعی که اورانیوم - ۲۳۵ آن مصرف شده در اطراف قسمت مرکزی راکتور قرارداده میشود. دراین روپوش ، ایزوتوپ اورانیوم - ۲۳۷ با جذب نوترونهائی که از قسمت مرکزی فرار کرده‌اند تولید اورانیوم - ۲۳۹ میکند که در مدت زمان کوتاهی تبدیل به پلوتونیوم - ۲۳۹ میشود. پلوتونیوم - ۲۳۹ ایزوتوپی از پلوتونیوم است که همانند اورانیوم - ۲۳۵ برای سوخت هسته‌ای مصرف میشود.

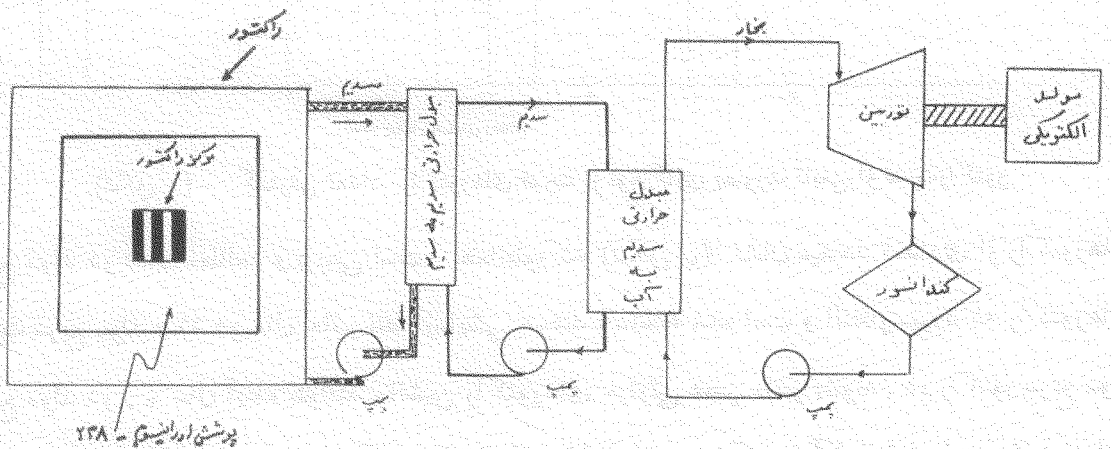
در هرراکتور سریع مولد درازای هرده هسته اورانیوم - ۲۳۵ یا پلوتونیوم - ۲۳۹ که در مرکز راکتور مصرف میشود در حدود ۱٤ اتم پلوتونیوم - ۲۳۹ در روپوش اورانیومی اطراف مرکز راکتور تولید

میشود. درنتیجه راکتور سریع قادر است‌له تنها سوخت مورد نیاز خود را بوجود بیاورد بلکه سوخت‌اضافی



(شکل۷)— گسترش تعداد راکتورهای قدرت از نوع سریع مولد بصورت تابعی از قدرت راکتور

جهت‌مصرف در راکتورهای دیگر را نیز تولید کند. از اینرو است که‌این راکتور، به‌نام راکتور مولدشناخته شده است. مشکل اساسی راکتورهای هسته‌ای و بخصوص راکتور سریع مولددرساختن آلیاژهائی ازسوخت و روپوش میله سوخت میباشد که بتواند درجه حرارت زیاد و تشعشعات هسته‌ای مرکز راکتور را تحمل کند. برای آگاهی از خواص مواد درشرایط رادیواکتیویته وتشعشع سنگین تحقیقات وسیعی در دست‌اجرا است چون این شناسائی حائز اهمیت زیادی برای بهبود طرح راکتورهای آینده میباشد.



(شکل ۸) —نیروگاه هسته‌ای باراکتور سریع مولد دارای دوحلقه سرد کننده سدیم ویک حلقه سیال‌عامل‌آب

٤ ـ سوخت هسته‌ای

در راکتور قدرت فرآیندهای شکافت هسته‌ای اغلب جذب کننده شدید نوترونی بوده و وجوداین مواد زائد ، از نقطه نظر اقتصاد نوترونی راکتور و مصرف‌مقدار ایده آل سوخت قبل از تعویض میله‌سوخت بسیار مضر میباشد. از اینرو سوخت هسته‌ای راکتور پس از مدت معینی باید از راکتور خارج گردیده و

پس از جدا کردن باقیماندهسوخت ، مواد رادیواکتیو حاصل از شکافت را به دور ریخت. در راکتورقدرت معمولاً روش جا بجا کردن میلههای سوخت در مرکز راکتور و بالاخره خارج کردن میلههای سوخت از راکتور به ترتیبی میباشد که تعویض کامل سوخت راکتور در مدت تقریباً سه سال صورت میگیرد.

به علت سطح سنگین رادیواکتیویته در فرآیندهای شکافت هستهای ، انرژی حرارتی قابل توجهای از مواد رادیواکتیو آزاد میشود که به عنوان مثال در زمان خاموش کردن یک راکتور با قدرت ۱۰۰۰ مگا وات الکتریکی ، حرارت مواد رادیو اکتیو بالغ بر ۳۰۰ مگاوات حرارتی میباشد. بنابراین سوختی که از راکتور خارج میشود دارای درجه حرارت زیادی بوده و برای سرد شدن ابتدا آنرا برای مدتی در آبقرار میدهند. پس از انتقال حرارت از میله سوختبه آب ، همراه با از بین رفتن مواد رادیواکتیو که دارای نیمعمر کوتاهی میباشند ، میتوان سوخت هستهای را در ظروف مخصوص به کارخانه پروسس شیمیائی سوخت منتقل نمود. ظروف حمل سوخت طوری ساخته شدهاند که حتی صدمات خیلی شدید را تحمل کرده و از آزاد شدن مواد رادیواکتیو به خارج از ظرف جلوگیری میکند.

پس از ورود سوخت مصرف شده به کارخانه پروسس ، در وهله اول تمام قسمتهای فلزی همراه سوخت مانند روپوش میله سوخت به صورت مکانیکی ازسوخت جدا میشود تا بیهوده برای جدا کردن این فلزات احتیاج بهعمل شیمیائی نباشد. سپس سوخت در موادشیمیائی حل شده و پلوتونیوم و اورانیوم از سایر فرآیندهای شکافت هستهای جدا میشوند. فرایندهای شکافت هستهای به صورت مایع جمع آوری شده وپس از مدت تقریباً ۵ سال کهسطح رادیواکتیویته مواد زائد سوخت پائین افتاده است این مواد از مایع به جامد تبدیل شده و بهصورت دائمی در نقطهٔ مناسبی انبار و نگهداری میشود تااز آزاد شدن آن بهمحیط زیست جلوگیری به عمل آید.

درحال حاضر سوختهای هستهای شامل ایزوتوپهای شکافتپذیر اورانیوم - ۲۳۳ ، اورانیوم - ۲۳۵ و پلوتونیوم - ۲۳۹میباشد. ازاین سوختهافقطاورانیوم - ۲۳۵ وآنهم به مقدار ۷ر. درصداورانیوم طبیعی در طبیعت یافت میشود و دوایزوتوپ دیگر از موادی که قابل بارور شدن میباشند تهیه میشود. در راکتورهائی کهاز اورانیوم - ۲۳۵ و اورانیوم - ۲۳۸ برای سوخت استفاده میکنند ، سوخت تازه براثرجذب نوترون توسط اورانیوم - ۲۳۸ و تبدیل آن درمدت زمان کوتاهی به ایزوتوپ شکافتپذیر پلوتونیوم - ۲۳۹ به وجودمیآید. همچنین با درنظرگرفتن اینکهتوریوم به اندازه کافی درطبیعت وجود دارد میتوان ایزوتوپ توریوم - ۲۳۲ را با جذبنوترون تبدیل به اورانیوم - ۲۳۳ کرد کهبرای سوخت هستهای مورد استفادهدارد.

۵ ـ ایمنی راکتورهای قدرت

درنیروگاههای هسته‌ای نه تنها امکان یک حادثه هسته‌ای که منجربه آزاد شدن مقادیر زیادی مواد رادیواکتیو میشود وجود دارد بلکه موضوع انبارکردن یا دور ریختن مواد زائد که در عمل معمولی نیروگاه به وجود میآید نیز از مسایل پیچیده و فنی مورد بررسی متخصصین و مهندسین هسته‌ای میباشد. که دراثرشکافت هسته‌ای داغ شده و حرارت را به سیالی که در اطراف آن جریان دارد منتقل میکند. این سیال که در مرحله نهائی آب میباشد ، تبدیل به بخار در درجه حرارت و فشار زیاد شده و باعث چرخاندن توربین و تولید الکتریسیته میشود.

در راکتور آب جوش که‌ساده‌ترین نوع راکتور قدرت است آب مستقیماً از اطراف میله های‌سوخت عبور کرده و به‌جوش میآید. در راکتور آب فشرده ، به خاطرفشار زیاد سیستم ، آب بصورت مایع از اطراف میله های اورانیوم عبور کرده و بدون جوش گرما را توسط مبدل حرارتی به سیال دیگری درفشار کمترمنتقل میکند. راکتور آب جوش یا راکتور آب فشرده پس از یک سال کار در قدرت . . . ، مگاوات الکتریکی بیش از یک تن مواد رادیواکتیو تولیدخواهد کرد که‌در حدود ۲درصد این‌موادبه‌صورت گاز میباشد. برای مشخص کردن قدرت‌تخریبی این‌مواد رادیواکتیو فقط باید گفت که این مقدار معادل چندهزار برابررادیو- اکتیو حاصل از بمب اتمی که درهیروشیما منفجر شد میباشد.

عواملی که ممکن است باعث آزاد شدن مواد رادیواکتیو در محیط زیست گردد شامل‌عیوب ساختمانی مختلف راکتور ، اشتباه اپراتور و حتی با تمام محاسبات ایمنی ، یک زلزله نسبتاً شدید غیرقابل انتظار میباشد. درنیروگاهی که از راکتور آب جوش یاراکتور آب فشرده استفاده میکند امکان ترک خوردن وشکافتن لوله آب یابخار نیز وجوددارد. دریک‌حادثه درصورت از دست‌دادن آب سرد کننده مرکزراکتور، حتی با خاموش کردن راکتور توسط میله های کنترل ، حرارت ، حرارت زیادی که مواد رادیواکتیو تولید باحتمال قوی باعث ذوب قسمت مرکزی راکتور خواهد شد. به خاطر این موضوع اغلب راکتورهای آب فشرده یا آب جوش‌دارای « سیستم سرد کننده اضطراری» میباشند که متأسفانه اثر بخشی آن در مرحله‌عمل تاکنون به ثبوت نرسیده است.

مواد رادیواکتیو که درعمل عادی‌نیروگاه به وجودمیآیدبایددر نقطه مناسبی انبار شود. درآینده با تکمیل‌صنعت‌جداسازی‌ایزوتوپها ، این مواد رادیواکتیو دارای کاربردهای خواهند بود. ازاینروامکانات واقتصاد انبارکردن مواد رادیواکتیو را باید همراه با امکانات دور ریختن این مواد در نظر گرفت. ازجمله پیشنهادات برای دوریختن ، فرستادن مواد زائد به طرف خورشید بااستفاده از راکت‌های فضائی است که

دربرخورد باخورشید بخار خواهد شد. درحال حاضر استفاده از معادن نمک جزو برنامه‌های موقت نگهداری مواد رادیواکتیو با این انتظار که معادن نمک تا چندهزار سال آینده از نقطه نظر زمین شناسی پایدارخواهند بود میباشد.

درصنایع هسته‌ای اضافه براستفاده ازسوخت در راکتور هسته‌ای ، پرسس شیمیائی سوخت‌مصرف شده جهت ساختن میله‌های جدید سوخت باعث میشود که در مراحل مختلف صنعتی ، سوخت هسته‌ای در فرمهای مختلفی وجود داشته باشد. درصورت عدم دقت مدیریت صنایع هسته‌ای ، سوخت‌های هسته‌ای میتوانند بصورت بمب هسته‌ای کوچک یابمب آلوده کننده رادیواکتیو مورد استفاده خرابکارانه گروههای افراطی یا کشورهائی که علاقمندبه مختل‌ساختن‌سیستم کشورهای دیگرهستند قرارگیرد. ازاینرودر کشوری که قصد استفاده از صنایع ونیروگاههای هسته‌ای را دارد موضوع ایمنی سوخت‌های هسته‌ای بایددردرجه اول قرارگیرد چه درصورت مدیریت غلط ، ازکارانداختن تمام سیستم صنعتی و اجتماعی کشور با استفاده‌از سوختهای هسته‌ای توسط افراد خرابکار به سادگی عملی است. باید اشاره کرد که نحوه ساختن بمب اتمی حتی در فیزیک‌دبیرستان‌تدریس میشود واطلاعات فنی لازم برای ساختن وسائل هسته‌ای درهر کتابخانه‌ای در دسترس فردعلاقمند میباشد.

۶ ـ آینده‌نگری نیروگاههای هسته‌ای در ایران

ازآنچه که گفته شد واضح است که به وجود آوردن صنایع هسته‌ای در ایران امری اجتناب ناپذیر بوده و در آینده نزدیک با استفاده‌از نیروگاههای هسته‌ای مسلماً کمک قابل ملاحظه‌ای به‌پیشرفت صنعتی ایران خواهدشد. از اینروهدف، یعنی استفاده از انرژی‌هسته‌ای معین بوده و دراین قسمت فقط انتخاب‌یکی از راههائی که منتهی به هدف خواهد شد مورد بحث میباشد. موضوع روش انتخاب نیروگاههای هسته‌ای قبلاً بحث شده (۵) و درحال حاضر نیز انتخاب نیروگاههائی با قدرت کم مناسب به نظرمیرسد. عملاتنوع زیادی در انتخاب‌نوع نیروگاه وجود ندارد و باحتمال قوی یکی از دوراکتور آب فشرده یا آب‌جوش اولین راکتورنیروگاه هسته‌ای ایران خواهد بود.

درقسمت ۲ انواع راکتورهای هسته‌ای معرفی گردید و اشاره شد که راکتورهای آب فشرده ، آب جوش وگازی تنها راکتورهای تجارتی عصر حاضرمیباشند. راکتورهای گازی ازنوع AGR درحال حاضر جزو برنامه‌های کنارگذاشته شده طبقه بندی میشوند. ساختمان چهار راکتورگازی ، که در (شکل - ۶) هریک با قدرت ۱۰۰۰ مگاوات الکتریکی نشان داده شده است ، درسال ۱۹۶۶ درانگلستان شروع شد.

با وجوداینکه‌ساختمان این راکتورها هنوز به پایان نرسیده معذالک انگلستان برنامه ساختمانی نوع راکتور های خود را به SGHWR تغییر داده است(۶). راکتور SGHWR ترکیبی از راکتورهای ساخت‌آمریکا و کانادا میباشد باین معنی که ازسوخت راکتورهای آمریکا و آب سنگین کانادا استفاده میکند. از اینروبه جرات میتوان گفت که راکتورهای گازی از نوع AGR به آخر راه رسیده‌اند. با درنظرگرفتن اینکه راکتور HTGR ساخت آمریکا یا راکتور سریع مولد فرانسه درمرحله آزمایش میباشند و ارزش تجارتی ندارند، تنها انتخاب در چند سال آینده محدود به راکتورهای آب سبک با طرح آمریکا یا راکتورهای آب سنگین باطرح کانادا میباشد.

راکتورهای آب سبک ساخت آمریکا نیز دور از مشکلات مخصوص نیست(۷). باید درنظرداشت که تجربه مهندسی نیروگاه هسته‌ای ازنیروگاههای معمولی به دست آمده که بخار حاصله از جوشاندن آب توسط احتراق ذغال سنگ، نفت یا گاز باعث چرخاندن توربین و مولد الکتریکی میشود. با دانش جدیدی که در ۲۰سال گذشته در موردشکافت‌هسته‌ای پدید آمد اینطور به نظر رسید که میتوان ازسوخت‌هسته‌ای نیز برای جوشاندن و بخارکردن آب استفاده کرد. این نتیجه گیری با فراوانی و ارزان بودن سوخت‌هسته‌ای کاملا منطقی و عملی بود. اولین راکتورهای ساخته شده با قدرت در حدود ۱۰۰ مگاوات الکتریکی موفق بودند و باعث شد که دومین نسل همین راکتورها با قدرتی تقریبا ده برابر قدرت نسل اولیه یعنی در حدود ۱۰۰۰ مگاوات الکتریکی ساخته شود. این عمل، متأسفانه، از نقطه‌نظر اصولی مهندسی حساب شده‌منطقی نبود چه‌بزرگتر ساختن راکتورها در تکنولوژی قدرت کم مساوی با به کارگرفتن تکنولوژی صحیح درقدرت زیاد نیست. از اینرومشکلات فنی زیادی درعمل نیروگاههای پرقدرت هسته‌ای مشاهده شده که اغلب باعث استفاده نامرتب و حتی خاموشی نیروگاهها بوده است.

از جمله این مشکلات، تکنولوژی ساختن میله‌های سوخت میباشد. کنترل کیفیت میله سوخت عمل پیچیده‌ای است و تعداد قابل توجه‌ای از نیروگاههای هسته‌ای به خاطر اجبار در تعویض میله‌های معیوب سوخت مجبور به تحمل خاموشی طولانی نیروگاه شده‌اند. ساختن لوله و شیر، مناسب با شرایط نیروگاههای هسته‌ای نیزمتناسب با دانستنی‌های قدم در تکنولوژی اولیه نیروگاههای هسته‌ای نبوده و برای اولین‌بار تحقیقات اساسی در مورد این وسائل ظاهرا ساده آغاز شده است. به عنوان مثال درنیروگاه « ویرجینیاالکتریک » مهندسین طوح، باتجربه قبلی خود درنیروگاههای معمولی، مقدار فشاریک‌شیربخار را کمترازمقدار حقیقی‌محاسبه کردند که درنتیجه خراب شدن آن دونفرازکارکنان‌نیروگاه درفواره‌ای ازبخار داغ قرارگرفتن و جان‌سپردند.

باتوجه کامل به این‌موضوع که مشکلات ذکر شده برای ممالکی که خود بنیانگذار این‌صنعت میباشند پیش آمده است و راه حل قطعی نیز برای این مسائل فعلا وجود ندارد ، اینطور به‌نظر میرسد که بهترین روش برای‌آغاز استفاده از نیروگاههای‌هسته‌ای در ایران درساختمان و بهره‌برداری ازنیروگاههائی با قدرت ۲۰۰ تا ۵۰۰ مگاوات الکتریکی میباشد که تکنولوژی آن تا حدود زیادی متناسب باتکنولوژی‌جا افتاده و سنتی عصر حاضر میباشد. باتوجه باینکه درحال‌حاضر نیروگاههای هسته‌ای پرقدرت ممالک‌صنعتی با مشکلات فنی دست به‌گریبان میباشند ،انتخاب یکی ازاین نیروگاهها به عنوان نیروگاه هسته‌ای‌ایران احتمالا با مشکلات فنی مشابه‌ای روبرو خواهد شد که ممکن است رفع آن نه تنها خارج از حدودامکانات صنعتی ایران بلکه حتی خارج از حدود امکانات فنی دنیا باشد.مشکلات فنی یک راکتور پرقدرت دروهله اول باعث راکه ماندن پیشرفت صنایع هسته‌ای ایران و در وهله دوم باعث عدم تولید الکتریسیته که تا حدزیادی‌مورد احتیاج صنایع دیگر میباشد خواهد شد. درصورتیکه‌برای‌استفاده از انرژی الکتریکی نیروگاه هسته‌ای برنامه ریزی صنعتی شده‌باشد تمام این برنامه‌ها تا تعمیر راکتورکه در بعضی موارد ممکن‌است حتی چند سال طول بکشد غیر قابل اجرا خواهد بود.

منابع

1 – D. F. Ford H. W. Kendal, An Assessment of the Emergency Core Cooling Systems (Friends of Earth Inc., 1974)

2 – D. J. Rose and M. Clark, Plasmas and Controlled Fusion (MIT Press, 1965)

3 – M. M. El – Wakil, Nuclear Heat Transport (International Textbook Co., 1971)

4 – Power and Research Reactors in Member states, IAEA, Vienna, 1972

۵ – حمید رفیع‌زاده ، ایران به نیروگاههای هسته‌ای احتیاج دارد ولی . . . . ، نشریه فنی صفحه ۱۷۲ ، شماره ۲۹ ، ۱۳۵۳ و دانشمند ، صفحه ٤ شماره ۲ سال ۱۲ ، ۱۳۵۳

6 – The Wall street journal, Britain Selects Domestic Reactor Design, July 11, 1974

7 – The Wall Street Journal, Atomic Lemons, May 3, 1973.