بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

کنترل سطح آب در مولد بخار یک نیروگاه هسته‌ای با روش فازی

احمد حسینی

استاد راهنما

دکتر محمد حدادظریف

استاد مشاور

دکتر محمدمهدی فاتح

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم

به **پدرم** و **مادرم**،

آنها که در دشوارترین لحظات زندگی یاورم بودند.

تشکر و قدردانی

با سپاس از عنایات خداوند که بار دیگر به لطف بی‌کرانش توانستم گامی هر چند کوچک در ادامه راه زندگی‌ام بردارم که بی‌تردید اگر لطفش نبود، سختی‌های راه ادامه آن را بس دشوار می‌نمود. با سپاس از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر محمد حدادظریف و جناب آقای دکتر محمدمهدی فاتح که با راهنمایی‌های ارزشمند خود نقش بسزایی در به ثمر رسیدن این پروژه داشته‌اند. با سپاس از اساتید بزرگواری که در طول دوران تحصیل افتخار حضور در کلاس‌های درس ایشان را داشته‌ام. همچنین از آقای دکتر علی اکبرزاده و آقای دکتر حسین قلی‌زاده به دلیل تقبل استاد ممتحنی این پایان‌نامه نهایت تشکر و تقدیر را می‌کنم.

از پدر و مادر عزیزم و خواهر و برادرانم که شرایط ادامه تحصیل مرا فراهم نموده و همواره مشوقم بودند، بی‌نهایت سپاس‌گذارم.

چکیده

یکی از اجزاء کلیدی نیروگاه‌های هسته‌ای مولد بخار است که نقش رابط بین خنک‌کننده مدار اولیّه راکتور هسته‌ای و سیال کاری را ایفا می‌کند. عملکرد این جزء از نیروگاه به صورت مستقیم بر راکتور هسته‌ای و توربین تأثیرگذار است. به طوریکه اگر مولد بخار نتواند بخار کاملا خشکی را تولید نماید، ذرات آب موجود در بخار باعث ضربه زدن به پره‌های توربین شده و بعد از مدتی باعث خرابی توربین می‌شود. همچنین اگر مولد بخار نتواند به خوبی حرارت تولید شده توسط راکتور هسته‌ای را برداشت نماید، خاموش‌سازی راکتور را به دنبال خواهد داشت. با توجه به این موضوع، بسیار مهم است که بتوانیم سطح آب مولد بخار را در یک محدوده معین نگه داریم زیرا افزایش بیش از حد سطح آب در مولد بخار باعث وارد شدن بخار مرطوب به توربین می‌شود. و ذرات آب موجب از بین بردن پره‌های توربین می‌شوند. کاهش سطح آب باعث کاهش میزان حرارت برداشت شده از راکتور و خاموش شدن آن می‌شود. کنترل سطح آب، مولدهای بخار با توجه به ویژگی‌های، غیرخطی، نامینیمم فاز، پیچیده و متغیر با زمان بودن آنها، به خصوص در توان‌های پایین باعث مشکل شدن آن گردیده است. هدف اصلی در این پروژه، دستیابی به پاسخ گذرای بهتر مولد بخار و کاهش میزان فراجهش و فروجهش آن، در حضور اغتشاش فلو بخار خروجی، خصوصا در قدرت‌های پایین می‌باشد. برای دستیابی به این هدف به طراحی کنترل‌کننده‌های کلاسیک و فازی پرداخته و عملکرد آنها مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: نیروگاه هسته‌ای، مولد بخار، کنترل سطح آب، کنترل‌کننده‌های کلاسیک و فازی

فهرست مطالب

فصل اول. ۱

۱-۱ مقدمه. ۲

۱-۲ تاریخچه کارهای پیشین ۳

۱-۳ ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: آشنایی با نیروگاه‌های هسته‌ای ، مولدهای بخار ۶

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ عناصر طبیعی ۷

۲-۳ غنی‌سازی اورانیم ۸

۲-۴ شکاف هسته‌ای ۹

۲-۵ بررسی نیروگاه‌های هسته‌ای ۱۰

۲-۵-۱ اجزاء نیروگاه ۱۲

۲-۶ مولد بخار ۱۳

۲-۶-۱ طبقه بندی انواع مولدهای بخار ۱۴

۲-۶-۲ مولدهای بخار افقی ۱۵

۲-۶-۳ طرز کار مولدهای بخار ۱۶

۲-۶-۳-۱ بررسی الگوی جریان در مولدهای بخار WWER- 440 ..... ۱۶

۲-۶-۳-۲ بررسی الگوی جریان در مولدهای بخار عمودی ۱۶

۲-۷ بررسی نقش مولدهای بخار در گذره‌های عملیاتی..... ۱۹

۲-۸ نتیجه‌گیری..... ۲۳

فصل سوم: طرّاحی کنترل‌کننده کلاسیک برای مولدهای بخار..... ۲۴

۳-۱ مقدمه..... ۲۵

۳-۲ مدل ریاضی مولدهای بخار..... ۲۵

۳-۲-۱ بررسی مدل مولد بخار..... ۲۹

۳-۲-۱-۱ مدل سازی زیرسیستم اول..... ۳۰

۳-۲-۱-۲ موازنه جرم و انرژی کلی برای زیرسیستم اول..... ۳۰

۳-۲-۱-۳ موازنه جرم و انرژی در لوله‌های بالابرنده..... ۳۲

۳-۲-۱-۴ جریان جرم در گردش طبیعی..... ۳۴

۳-۲-۱-۵ توزیع بخار در استوانه..... ۳۴

۳-۲-۱-۶ شرایط اولیه برای زیرسیستم اول..... ۳۷

۳-۲-۱-۷ مدل‌سازی زیرسیستم دوم..... ۳۷

۳-۲-۱-۸ زیرسیستم دوم در حالت تعادل..... ۳۹

۳-۲-۱-۹ مدل سازی زیر سیستم سوم و چهارم و پنجم..... ۳۹

۳-۳ مشکلات کنترل مولد بخار..... ۳۹

۳-۳-۱ ناپایدار بودن سیستم حلقه باز..... ۴۰

۳-۳-۲ بررسی پدیده‌های ترموهیدرولیکی انبساط و انقباض در مولدهای بخار..... ۴۲

۳-۴ کنترل‌کننده‌های کلاسیک PID..... ۴۳

۳-۴-۱ طرّاحی کنترل‌کننده کلاسیک PI برای مولد بخار ۴۵
۳-۴-۲ طرّاحی کنترل‌کننده برای قدرت‌های بالاتر ۴۶
۳-۵ ارتباط سیستم کنترل سطح آب در مولدهای بخار و تنظیم قدرت در نیروگاه ۵۱
۳-۶ نتیجه‌گیری ۵۲

فصل چهارم: طرّاحی کنترل‌کننده فازی مولد بخار ۵۳
۴-۱ مقدمه ۵۴
۴-۲ نگاهی به سیستم‌های فازی ۵۵
۴-۳ ساختار سیستم‌های فازی ۵۶
۴-۳-۱ سیستم های فازی تاکاگی سوگنو و کانگ (TSK) ۵۸
۴-۳-۲ سیستم های فازی با فازی ساز و غیرفازی ساز ۵۸
۴-۳-۲-۱ پایگاه قواعد فازی ۵۸
۴-۳-۲-۲ موتور استنتاج فازی ۵۹
۴-۳-۲-۳ فازی سازها ۶۱
۴-۳-۲-۴ غیرفازی سازها ۶۲
۴-۴ طرّاحی کنترل‌کننده فازی برای مولد بخار ۶۴
۴-۵ شبیه سازی کنترل‌کننده فازی مولد بخار در محیط سیمولینک ۶۷
۴-۶ مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌های کلاسیک و فازی ۶۸
۴-۶-۱ عملکرد کنترل‌کننده فازی در سطح قدرت ۵ درصد ۶۹
۴-۶-۲ عملکرد کنترل‌کننده فازی در سطح قدرت ۱۵درصد ۷۰

۴-۶-۳ عملکرد کنترل‌کننده فازی در سطوح قدرت بالاتر ۷۱

۴-۶-۴ اعمال اغتشاش به مولد بخار به صورت تناوبی ۷۳

۴-۷ بررسی پایدار بودن کنترل‌کننده در برابر تغییر در پارامترهای مدل ۷۴

۴-۸ نتیجه‌گیری ۷۶

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۷۷

۵-۱ نتیجه‌گیری ۷۸

۵-۲ پیشنهادها ۷۸

ضمیمه

ضمیمه الف- بخشی از بلوک‌های طراحی شده در simulink ۸۰

مراجع ۸۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ مشخصات اصلی مولد بخار افقی نیروگاه WWER-1000 ..... ۲۰

جدول ۳-۱ مقادیر پارامترهای مولد بخار در قدرت‌های مختلف ۲۷

جدول ۳-۲ مقدار ضرایب جملات تناسبی انتگرالی کنترل‌کننده PI، در سطوح قدرت مختلف ۴۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ شمای کلی یک نیروگاه هسته‌ای ۱۱

شکل ۲-۲ نمای برش یافته یک مولد بخار افقی ۱۵

شکل ۲-۳ الگوی جریان در یک مولد بخار WWER- 440 ..... ۱۶

شکل ۲-۴ شمای یک مولد بخار عمودی ۱۷

شکل ۲-۵ شمای کلی یک مولد بخار ۲۱

شکل ۳-۱ اجزاء موثر بر دینامیک مولد بخار ۳۰

شکل ۳-۲ تبخیر آب درلوله بالابرنده ۳۲

شکل ۳-۳ مخلوط دو فازی و جدایش مایع و بخار در استوانه ۳۵

شکل ۳-۴ مافوق گرم‌کن‌ها و شیر کنترل بخار خروجی ۳۸

شکل ۳-۵ مکان هندسی ریشه ها برای تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی ۴۱

شکل ۳-۶ دیاگرام بودی تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی ۴۱

شکل ۳-۷ پاسخ مولد بخار به دبی آب تغذیه ورودی (چپ) و دبی بخار خروجی (راست) ۴۳

شکل ۳-۸ ساختار یک سیستم حلقه بسته ۴۴

شکل ۳-۹ بلوک دیاگرام مولد بخار ۴۵

شکل ۳-۱۰ ساختار حلقه کنترلی برای مولد بخار ۴۵
شکل ۳-۱۱ پاسخ پله کنترل‌کننده PI طرّاحی شده در قدرت های ۵ و۱۵ درصد ۴۷
شکل ۳-۱۲ آب تغذیه اعمالی به مولد بخار در سطح قدرت ۵ و۱۵درصد ۴۷
شکل ۳-۱۳ پاسخ پله کنترل‌کننده PI طرّاحی شده در قدرت‌های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰درصد ۴۸
شکل ۳-۱۴ سیگنال کنترلی کنترل‌کننده کلاسیک PI در قدرت‌های ۳۰ و ۵۰ و۱۰۰درصد ۴۹
شکل ۳-۱۵ آب تغذیه اعمالی به مولد بخار در سطح قدرت ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد ۴۹
شکل ۳-۱۶ سیگنال خطا ۵۰

شکل ۴-۱ بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار در Simulink ۶۷
شکل ۴-۲ پاسخ پله کنترل کننده فازی و PI در سطح قدرت ۵ درصد ۶۹
شکل ۴-۳ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۵ درصد ۷۰
شکل ۴-۴ پاسخ پله کنترل‌کننده فازی و PI در سطح قدرت ۱۵ درصد ۷۰
شکل ۴-۵ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۱۵ درصد ۷۱
شکل ۴-۶ پاسخ پله کنترل‌کننده فازی در سطوح قدرت ۳۰ ،۵۰ ، ۱۰۰ درصد ۷۱
شکل ۴-۷ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطوح قدرت ۳۰ ،۵۰ ، ۱۰۰ درصد ۷۲
شکل ۴-۸ سیگنال خطا ۷۳
شکل ۴-۹ پاسخ پله کنترل‌کننده فازی در برابر اغتشاش تناوبی ۷۴
شکل ۴-۱۰ سیگنال کنترلی اعمال شده به مولد بخار ۷۴
شکل ۴-۱۱ پاسخ پله کنترل‌کننده فازی در برابر تغییر پارامتر ۷۵
شکل ۴-۱۲ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۵ درصد ۷۵
شکل ۴-۱۳ خطا خروجی در سطح قدرت ۵ درصد ۷۶

شکل‌های پیوست

شکل الف- ۱- بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار در سیمولینک..... ۸۰

شکل الف- ۲- طراحی کنترل‌کننده فازی مولد بخار..... ۸۰

شکل الف- ۳- طراحی کنترل‌کننده PI مولد بخار..... ۸۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

انرژی الکتریکی از روش‌های مختلفی از قبیل پیل‌های الکتریکی، نیروگاه‌ها[1] قابل حصول است. نیروگاه‌ها نقش بسیار زیادی در تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز برای انسان داشته و حجم وسیعی از انرژی الکتریکی را تولید می‌کنند. انواع نیروگاه‌هایی که در سطح جهان به امر تولید برق اشتغال دارند عبارتند از: نیروگاه‌های بخار، آبی، گازی، سیکل ترکیبی، اتمی، خورشیدی، بادی، جذر و مدی دریا، دیزلی و... به طوریکه از نام این نیروگاه‌ها برمی‌آید هر یک ازآنها برای تولید برق، فن‌آوری ویژه‌ای دارند. هرکدام از این نیروگاه‌ها از سوخت‌های مختلفی برای تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند.

به عنوان مثال در نیروگاه‌های فسیلی از سوخت فسیلی[2] برای تولید انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود و یا در نیروگاه‌های هسته‌ای[3] از انرژی حاصل از شکافت هسته برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. سوخت فسیلی یکی از مهمترین سوخت‌های موجود در جهان بوده که دارای منابع محدود است. کشورهایی که این نوع سوخت را نداشته و دستیابی به آن برای آنها دارای هزینه بالایی است، از انرژیهایی از قبیل انرژی آب، باد، هسته‌ای و ... برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. از جمله این‌کشورها می‌توان به ژاپن، فرانسه و کانادا اشاره کرد. این کشورها قسمت اعظمی از انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از طریق نیروگاه‌های هسته‌ای تأمین می‌کنند، در کشور فرانسه حدود ۸۰ درصد انرژی الکتریکی از انرژی هسته‌ای تأمین می‌گردد[۱]. بنابراین نیروگاه‌های هسته‌ای نیز در نوع خود از اهمیت خاصی برخوردار هستند. در این نوع نیروگاه‌ها انرژی اولیه لازم بوسیله یک راکتور هسته‌ای تأمین می‌گردد. خاموش و روشن کردن مجدد نیروگاه‌های هسته‌ای هزینه زیادی در بردارد. به همین خاطر هر چه تعداد خاموش کردن این

[1] - power plants
[2] - Fossili Fuel
[3] - Nuclear power plant

نیروگاه‌ها کمتر باشد از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود. از دید کنترلی وجود برخی پیچیدگی-ها در مولد بخار[1]، کنترل سطح آب را دشوار می‌سازد. این پیچیدگی‌ها عبارتند از:

- غیر مینیمم فاز[2] بودن مولد بخار، ناشی از پدیدهٔ انبساط و انقباض.
- بروز دینامیک‌های مختلف با توجه به تغییرات سطح توان کاری مولد بخار.
- غیرخطی و پیچیده بودن مدل مولد بخار و برخی از اجزای آن مانند شیرهای اصلی و کنارگذر آب تغذیه [۲].

اولین مسأله‌ای که در کنترل یک سیستم مطرح می شود داشتن مدل دقیقی از سیستم تحت کنترل است. از آنجا که انتظار داریم کنترل‌کننده پیشنهاد شده برای یک سیستم، روی سیستم واقعی بطور مطلوبی عمل کند باید مدلی که در شبیه سازی‌ها برای مولد بخار در نظر می‌گیریم تا حد ممکن به سیستم واقعی نزدیک باشد. برای اینکه بتوانیم مدل واقعی‌تری از یک مولد بخار داشته باشیم، باید پارامترهای مدل در نظر گرفته شده در هر لحظه تعیین گردند. در مقالات مختلف مدل-های متفاوتی برای مولد بخار ارائه شده است. ولی اکثر این مدل‌ها برای مولد بخار، در توان‌های خاصی بدست آمده است و تمام نقاط کاری آنها را پوشش نمی‌دهد. در این پژوهش رفتار دینامیکی مولد بخار افقی، که یک سیستم دینامیکی پیچیده غیرخطی بوده و ضرایب معادلات دینامیکی آن تابع نقطه کار هستند، در دامنه گسترده ای از قدرت کنترل می‌شود.

۱-۲ تاریخچه کارهای انجام شده

روش‌های بسیاری برای کنترل سطح آب در مولد های بخار پیشنهاد شده است[۳]. در سال ۱۹۸۰ اروینگ یک مدل خطی با پارامترهای متغیر، برای توصیف دینامیک‌های مولد بخار در همه سطوح قدرت، پیشنهاد داده است. سپس او یک مدل PID تطبیقی پیشنهاد داد. فلایچی، در سال ۱۹۸۸ یک

[1] - Steam generator
[2] - Nonminimom Phase

کنترل‌کننده فیدبک خروجی گزارش داد. چو در سال ۱۹۸۹، یک کنترل کننده نوع PI ، همراه یک رویت‌گر جهت تخمین مقدار سطح آب بکار برده است. نا در سال ۱۹۹۵ یک کنترل کننده سطح آب وابسته به تخمین خطاهای فلو بخار و آب تغذیه پیشنهاد داده است. چو و نو [۴]، در سال ۱۹۹۷ یک تنظیم کنندهٔ بهره فازی مقاوم[1] را برای کنترل سطح آب مولد های بخار بکار برده‌اند. بهره‌های H_∞ ، در آن طوری طرّاحی شده اند که به ازای آنها، اثرات ناشی از اغتشاشات دبی بخار خروجی بر سطح آب مولد بخار به کمترین مقدار خود برسد. کوتاره [۵]، در سال ۲۰۰۰، کنترل کنندهٔ مبتنی بر پیشگوئی مدل[2] را برای کنترل سطح آب مولد بخار هسته‌ای بکار می‌برد. این نوع کنترل کننده که در کنترل پروسه‌های صنعتی بکار می‌رود، وجود محدودیت‌ها در سیگنال کنترلی اعمالی و سیگنال خروجی را مورد توجه قرار داده و سعی می کند با در نظر گرفتن عملکرد سیستم کنترلی در آینده، سیگنال‌های فعلی را برای رسیدن به یک هدف کنترلی مطلوب و بهینه[3] محاسبه و اعمال کند. نا در سال ۲۰۰۳ یک کنترل‌کنندهٔ تطبیقی پیشگوی[4]، برای کنترل سطح آب در مولد بخار ارائه داده است روش کنترل پیشگوی، سعی در حل یک مسأله بهینه سازی در زمان فعلی بر حسب پله‌های زمانی آتی دارد. همچنین از یک الگوریتم تخمین تکراری پارامتر[5]، برای تخمین مدل مولد بخار در هر لحظه استفاده می‌کند[۶]، منهاج و الیاسی در سال ۲۰۰۷ یک مدل فازی - تطبیقی[6] بکار برده‌اند [۷]، در این روش از کنترل پیشگوی در کنار تئوری فازی برای طرّاحی یک کنترل کننده مناسب استفاده شده است. کنترل کننده دارای سه قسمت است. (۱) یک مدل فازی TSK برای تخمین رفتار[7] آینده مولد بخار، (۲) از یک الگوریتم بازگشتی[8] برای تخمین پارامترهای مدل، (۳) یک کنترل کننده پیشگوی مدل برای بدست آوردن ورودی های بهینه استفاده شده است. در آخرین روش ارائه

[1] - Robust fuzzy logic gain scheduler
[2] - Model predictive controller
[3] - Optimal
[4] - Adaptive predictive controller
[5] - Recursive parameter estimation algorithm
[6] - Adaptive fuzzy model
[7] - Estimation behavior
[8] - Recursive algorithm

شده توسّط زانگ فنگ در سال ۲۰۱۰ یک کنترل کننده فازی لغزشی[1] بکار برده است [۸]، در این روش از خصوصیت مقاوم بودن ترکیب کنترل‌کننده ساختار متغیر با منطق فازی استفاده شده است، سیستم کنترلی بعلت مقاوم بودن خاصیت ساختار و کنترل فازی میزان نوسان ساختار متغییر را کاهش داده است و در برابر تغییرات بارگذاری و اغتشاش خارجی مقاوم است. علارغم وجود بسیاری از کنترل‌کننده‌های پیشرفته برای مولد بخار، اپراتورها هنوز دارای مشکلاتی ویژه در سطوح پایین قدرت هستند. بنابراین وجود یک کنترل خوب با یک کارکرد بالا، به جای کنترل‌کننده‌های دستی نیاز است[۹].

۱-۳ ساختار پایان نامه

پایان نامه مشمل بر پنج فصل است. در فصل اول مقدمه‌ای درباره موضوع تحقیق، و تاریخچه‌ای از کارهای انجام شده بررسی شده است. در فصل دوم نگاهی درباره نیروگاه‌های هسته‌ای و چگونگی شکافت هسته[2] و کارهایی که در این زمینه انجام شده است، خواهیم داشت، در فصل سوم، پس از معرفی مشکلات کنترلی مولدهای بخار و توضیح آنها، با مدلی از مولد بخار که برای طرّاحی کنترل کننده، بکار می‌رود، آشنا می‌شویم، همچنین به طرّاحی کنترل کننده‌های کلاسیک برای مولد بخار پرداخته می‌شود. در فصل چهارم به معرفی کنترل‌کننده‌های فازی پرداخته، ساختار کنترل‌کننده بسیار ساده بوده و کمترین قانون در قسمت قواعد فازی آن بکار رفته است و از آنها برای کنترل مولد بخار استفاده شده است. و عملکرد این کنترل‌کننده را در برابر کنترل‌کننده کلاسیک PI بررسی خواهیم کرد. در ادامه در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان شده است.

[1] - Sliding fuzzy controller
[2] - Nuclear fission

فصل دوم

آشنایی با نیروگاه‌های هسته‌ای و مولدهای بخار

۲-۱ مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین شکل‌های انرژی که در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، انرژی برق است. در حال حاضر انواع نیروگاه‌هایی که در کشور ایران در دست بهره‌برداری قرار دارند. عبارتند از: نیروگاه-های آبی، گازی، دیزلی، بادی، خورشیدی، سیکل ترکیبی و... نوع اتمی آن نیز با همت و تلاش متخصصان کشورمان شروع به کارکرده است. استفاده از انرژیهای خدادادی موجود در طبیعت، همیشه مورد نظر بوده است. مطالعات گوناگونی برای تغییر شکل انرژی، به طوری که به کارگیری آن ساده باشد، صورت گرفته است. حاصل این کوشش، انرژی الکتریکی است که از تبدیل سایر انرژی‌ها به دست می‌آید.

۲-۲ عناصر طبیعی

برحسب نظریه اتمی عنصر عبارت است از یک جسم خالص ساده که با روش‌های شیمیایی نمی‌توان آن را تفکیک کرد. از ترکیب عناصر با یکدیگر اجسام مرکب[1] به وجود می آیند. تعداد عناصر شناخته شده در طبیعت حدود ۹۲ عنصر است. هیدروژن اولین و ساده ترین عنصر و پس از آن هلیم، کربن، ازت، اکسیژن و ... بالاخره آخرین عنصر طبیعی به شماره ۹۲، عنصر اورانیوم است. بشر توانسته است به طور مصنوعی و به کمک واکنش های هسته‌ای در راکتورهای اتمی[2] و یا به کمک شتاب دهنده‌های قوی بیش از ۲۰ عنصر دیگر بسازد که تمام آن‌ها ناپایدارند و عمر کوتاه دارند و به سرعت با انتشار پرتوهایی تخریب می‌شوند. اتم‌های یک عنصر از اجتماع ذرات بنیادی به نام پرتون، نوترون و الکترون تشکیل یافته‌اند. اتم هیدروژن یک پروتون دارد و در خانه شماره یک جدول و اتم هلیم در خانه شماره دو، اتم سدیم در خانه شماره یازده و... اتم اورانیوم در خانه شماره ۹۲ قرار دارد. یعنی دارای ۹۲ پروتون است.

[1]- Coposite materials
[2] - Atomic reactors

۲-۳ غنی سازی[1] اورانیم :

سنگ معدن اورانیوم موجود در طبیعت از دو ایزوتوپ ۲۳۵ به مقدار ۰/۷ درصد و اورانیوم ۲۳۸ به مقدار ۹۹/۳ درصد تشکیل شده است. سنگ معدن را ابتدا در اسید حل کرده و بعد از تخلیص فلز، اورانیوم را به صورت ترکیب با اتم فلئور (F) و به صورت مولکول اورانیوم هگزا فلوراید UF6 تبدیل می‌کنند که به حالت گازی است. سرعت متوسط مولکول‌های گازی با جرم مولکولی گاز نسبت عکس دارد، این پدیده را گراهان در سال ۱۸۶۴ کشف کرد. از این پدیده که به نام دیفوزیون گازی مشهور است برای غنی سازی اورانیوم استفاده می‌کنند. در عمل اورانیوم هگزا فلوراید طبیعی گازی شکل را از ستون‌هایی که جدار آنها از اجسام متخلخل[2] (خلل و فرج دار) درست شده است عبور می‌دهند. منافذ موجود در جسم متخلخل باید قدری بیشتر از شعاع اتمی یعنی درحدود ۲/۵ آنگستروم (۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۲۵ متر) باشد. ضریب جداسازی متناسب با اختلاف جرم مولکول‌ها است. روش غنی‌سازی اورانیوم تقریباً مطابق همین اصولی است که در اینجا گفته شد.

با وجود این می‌توان به خوبی حدس زد که پرخرج‌ترین مرحله تهیه سوخت اتمی همین مرحله غنی سازی ایزوتوپ‌ها است زیرا از هر هزاران کیلو سنگ معدن اورانیوم ۱۴۰ کیلوگرم اورانیوم طبیعی به دست می‌آید که فقط یک کیلوگرم اورانیوم ۲۳۵ خالص در آن وجود دارد. برای تهیه و تغلیظ[3] اورانیوم تا حد ۵ درصد حداقل ۲۰۰۰ برج از اجسام خلل و فرجدار با ابعاد نسبتاً بزرگ و پی‌درپی لازم است تا نسبت ایزوتوپ‌ها از برجی به برج دیگر به مقدار ۰/۰۱ درصد تغییر پیدا کند. در نهایت موقعی که نسبت اورانیوم ۲۳۵ به اورانیوم ۲۳۸ به ۵ درصد رسید باید برای تخلیص کامل از سانتریفوژهای بسیار قوی استفاده نمود. برای ساختن نیروگاه اتمی، اورانیوم طبیعی و یا اورانیوم غنی شده بین ۱تا ۵ درصد کافی است. ولی برای تهیه بمب اتمی حداقل ۵ تا ۶ کیلوگرم اورانیوم ۲۳۵ صددرصد خالص نیاز است. یکی از قوانین جهانی این است که انرژی نه تولیدپذیر است و نه از بین رفتنی، اما به شکل-

[1] - Freight
[2] - Porosity materials
[3] - Condensation