بسم الله الرحمن الرحیم

۱۲۹۵۷۴

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای

گرایش چرخهٔ سوخت هسته‌ای

عنوان پایان‌نامه

بررسی فرایند جذب رادیونوکلئیدهای سزیم ۱۳۷ و توریم ۲۳۲ بر روی زئولیت اصلاح شدهٔ کلینوپتیلولایت و بهینه‌سازی آن با استفاده از روش آرایه‌های متعامد (تاگوچی)

اساتید راهنما

دکتر حسین فقیهیان

دکتر علیرضا خانچی

اساتید مشاور

علیرضا اسدی

مستانه کبوترآهنگی

تهیه کننده

مجتبی تتری

تابستان ۸۸

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

مرکز اطلاعات مدارک علمی ایران
تسجیل مدارک

۱۲۹۵۷۴

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی هسته‌ای

تصویب نامه

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای-گرایش چرخۀ سوخت هسته‌ای با عنوان:

بررسی فرایند جذب رادیونوکلئیدهای سزیم ۱۳۷ و توریم ۲۳۲ بر روی زئولیت اصلاح شدۀ کلینوپتیلولایت و بهینه‌سازی آن با استفاده از روش آرایه‌های متعامد (تاگوچی)

در تاریخ ....پایان نامه آقای مجتبی تتری توسط کمیته تخصصی داوران مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

استاد راهنما اول	نام ونام خانوادگی	امضاء
استاد راهنما دوم	نام ونام خانوادگی	امضاء
استاد مشاور اول	نام ونام خانوادگی	امضاء
استاد مشاور دوم	نام ونام خانوادگی	امضاء
استاد داور (داخلی)	نام ونام خانوادگی	امضاء
استاد داور (خارجی)	نام ونام خانوادگی	امضاء
نماینده تحصیلات تکمیلی	نام ونام خانوادگی	امضاء

تشکر و قدردانی:

کمال تشکر و قدردانی خود را از تمامی اساتید ارجمند دانشگاه شهید بهشتی و سازمان انرژی اتمی، مسئولین و همکاران محترم در بخشهای مختلف آزمایشگاهی

پژوهشکدهٔ چرخه سوخت هسته‌ای و شرکت پسمانداری صنایع هسته‌ای و همه عزیزانی که اینجانب را در انجام

مراحل مختلف این پروژهٔ تحقیقاتی

یاری نمودند، ابراز

می‌نمایم.

تشکر و قدردانی

ویژهٔ خود را تقدیم به استاد بزرگ علم و اخلاق،

دوست مهربان و صمیمی جناب آقای دکتر علیرضا خانچی می‌نمایم؛

بی شک اجرای این طرح تحقیقاتی جز با حمایتهای علمی و معنوی ایشان میسر نمی‌گردید.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه متعلق به دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد.

تقدیم به:

محضر مبارک امام عصر، حضرت حجت بن الحسن العسکری (عج)

روح و یاد پاک پدر شهیدم

خانوادهٔ مهربانم

همسر صبورم

و یگانه ستارهٔ زیبای زندگیمان فاطمه

فهرست:

فصل اول - مقدمه و مفاهیم..۱

۱-۱- اهمیت و جایگاه تکنولوژی هسته‌ای..۲

۱-۲- مفاهیم و تعاریف...۴

۱-۳- یکاها و کمیتها...۶

۱-۴- شکافت القائی هسته‌ای...۷

۱-۵- محصولات شکافت...۹

۱-۶- چرخه سوخت هسته‌ای..۱۰

۱-۷- پسمانداری هسته‌ای...۱۲

۱-۷-۱- انواع پسمان..۱۴

۱-۷-۲- چرخه های اصلی تولید کنندهٔ پسمان..۱۴

۱-۸- اهمیت مواد رادیواکتیو..۱۸

فصل دوم - زئولیتها، خواص و کاربردها...۱۹

۲-۱- زئولیت چیست؟...۲۰

۲-۲- انواع زئولیتها.. ۲۲

۲-۳- ویژگیها و موارد استفادهٔ زئولیتها... ۲۳

۲-۳-۱- جاذبهای جدید غربالی.. ۲۵

۲-۳-۲- استفاده از زئولیتها در ذخیره‌سازی گازها... ۲۶

۲-۳-۳- زئولیتها به عنوان حامل مواد شیمیایی واکنش دهنده و فعال............................... ۲۶

۲-۳-۴- دامپروری... ۲۷

۲-۳-۵- کاتالیزور.. ۲۷

۲-۳-۶- جذب و دفع آب.. ۲۷

۲-۳-۷- غنی‌سازی ایزوتوپی.. ۲۸

۲-۳-۸- کاربردهای مصرفی زئولیتها.. ۲۸

۲-۳-۹- کاربرد زئولیتها در تکنولوژی هسته‌ای.. ۲۹

۲-۴- پایداری زئولیتها.. ۳۱

۲-۵- زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت.. ۳۲

۲-۵-۱- خواص فیزیکوشیمیایی خانواده هیولاندیت.. ۳۲

۲-۵-۲- محل و منشأ پیدایش کلینوپتیلولایت..........۳۴

۲-۵-۳- برخی از کاربردهای کلینوپتیلولایت..........۳۴

۲-۶- اندرکنش بین زئولیت و اصلاح کنندههای سطح..........۳۶

۲-۶-۱- سورفاکتانت..........۳۷

۲-۶-۲- جذب یونهای مختلف روی زئولیت اصلاح شده با سورفاکتانت..........۳۸

فصل سوم - بررسی جذب رادیونوکلئید سزیم-۱۳۷ و بهینه‌سازی فرایند مربوطه.....۴۱

۳-۱- مقدمه..........۴۲

۳-۱-۱- پیدایش..........۴۲

۳-۱-۲- ایزوتوپهای سزیم..........۴۳

۳-۱-۳- اثرات سزیم بر روی سلامت..........۴۳

۳-۱-۴- کاربردها..........۴۵

۳-۲- روش و مراحل ساخت جاذب اصلاح شده..........۴۶

۳-۲-۱- جاذب طبیعی..........۴۶

۳-۲-۲- ساخت نمونه‌های تک‌کاتیونه..........۴۷

۳-۲-۳- محاسبه ظرفیت تبادل یونی..........۴۸

۳-۲-۴- اصلاح سطح..۵۱

۳-۲-۵- نتایج و بحث..۵۲

۳-۳- بهینه سازی فرایند جذب سزیم به روش تاگوچی..۵۷

۳-۳-۱- برنامه ریزی..۵۸

۳-۳-۲- طراحی..۵۸

۳-۳-۳- اجرا..۵۹

۳-۳-۴- آنالیز و تجزیه تحلیل نتایج..۶۱

۳-۳-۵- تثبیت نتایج..۶۸

فصل چهارم - بررسی جذب توریم و بهینه‌سازی فرایند مربوطه......................۷۰

۴-۱- مقدمه..۷۱

۴-۱-۱- کاربردهای توریم..۷۱

۴-۱-۲- نقش و اهمیت توریم در تکنولوژی هسته‌ای..۷۴

۴-۱-۳- چرخهٔ سوخت هسته‌ای بر مبنای توریم..۷۵

۴-۲- اجرای مدل تاگوچی برای بررسی جذب و تاثیر پارامترهای کلیدی بر فرایند جداسازی توریم..۷۸

۴-۲-۱- برنامه ریزی..۷۸

۴-۲-۲- طراحی..۷۹

۴-۲-۳- اجرا...۸۰

۴-۲-۴- آنالیز و تجزیه تحلیل نتایج...۸۱

۴-۲-۵- تثبیت نتایج...۸۸

نتیجه گیری کلی و پیشنهادات..۹۰

مقالهٔ ارائه شده از این تحقیق...۹۲

مراجع ۹۵

چکیده:

توریم- ۲۳۲ و سزیم - ۱۳۷ از جمله رادیونوکلئیدهای بسیار مهم در صنایع هسته‌ای هستند که عموماً نقش کلیدی و تاثیرگذاری را در مراحل طراحی و اجرایی این نوع از پروژه‌های صنعتی ایفا می‌کنند. توریم بعنوان عنصری با قابلیتهای ذاتی فراوان برای جایگزینی بجای سوختهای اورانیومی و سزیم بعنوان یکی از اصلی‌ترین و پرتوزاترین رادیونوکلئیدهای حاصل از شکافت هسته‌ای، لزوم خالص‌سازی و جداسازی خود را از محلولهای هسته‌ای توجیه می‌کنند. اگرچه امروزه روشهای مختلفی برای این امر وجود دارد، همواره جستجوی راههای جدید و ارزان مانند استفاده از جاذبهای طبیعی مد نظر کارشناسان امر بوده است. اگرچه زئولیتها دارای سطح ویژهٔ بالا و نیز ظرفیت تبادلی بالایی هستند، بخاطر ضعف مفرط در انتخاب‌پذیری نسبت به کاتیونهای خاصی مانند سزیم و استرانسیم، کاربرد چندان عمده‌ای پیدا نکرده‌اند. اما امروزه با روشهای خاصی از جمله اصلاح سطح آنها با ترکیبات خاص آلی می‌توان شرایط جذب انتخابی کاتیونهای مد نظر را برای آنها فراهم نمود. هدف از این کار تحقیقاتی بررسی جذب انتخابی رادیونوکلئید سزیم ۱۳۷ و توریم ۲۳۲ توسط زئولیت اصلاح شدهٔ کلینوپتیلولایت و سپس بهینه سازی فرایند مربوطه می‌باشد.

برای این کار جاذب طبیعی کلینوپتیلولایت که از منطقه سمنان تهیه شده بود، بعد از خالص‌سازی اولیه، جهت اصلاح سطح در تماس با محلول حاوی سورفاکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید قرار گرفت. سپس محلول‌های شبیه سازی شده حاوی یونهای سزیم و توریم در غلظتهای معین و شرایط آزمایشگاهی تعریف شده با این جاذب در تماس قرار گرفتند تا میزان جذب صورت گرفته در اثر این تماس معین شود. از طرفی جهت بهینه‌سازی این فرایندها با انتخاب فاکتورهای تاثیرگذاری مانند دما، زمان تماس، غلظت یون هدف، میزان بارگذاری سورفاکتانت بر روی جاذب و نیز pH سیستم، از روش آماری آرایه‌های متعامد (تاگوچی) استفاده گردید.

نتایج حاصله از آزمایشات انجام شده نشان داد که اولاً جاذب طراحی شده توانایی بالایی در جذب کاتیونهای هدف دارد و لذا با تغییرات اندک در شرایط فاکتورها می‌توان به جذب تقریباً کاملی دست یافت؛ از طرفی با جایگذاری نتایج حاصله در نرم‌افزار آماری (Mini Tab) نرخ تاثیرگذاری فاکتورهای تعیین شده بر فرایند جذب هر کدام از کاتیونها و همچنین شرایط بهینه برای انجام این فرایندها بدست آمد.

واژگان کلیدی: سزیم، توریم، زئولیت، کلینوپتیلولایت، بهینه سازی، تاگوچی

فصل اول

مقدمه و مفاهیم

۱-۱- اهمیت و جایگاه تکنولوژی هسته‌ای

بشریت برای چندین هزار سال با کمترین اثرگذاری بر روی کره زمین زندگی می‌کرده‌است؛ حتی پنج قرن پیش در زمان وقوع رنسانس در اروپا، جهان هنوز جمعیت بسیار کمی داشت. از آن زمان تا کنون جمعیت جهان بر اثر انقلابهای پیش آمده در زمینه بهداشت و پزشکی، کشاورزی و صنعت رشد فزاینده‌ای پیدا کرده و در حدود ۱۵ برابر شده‌است. از این شش میلیارد جمعیت امروزی جهان چندین میلیون آن در سطح بسیار بالایی از استانداردها زندگی می‌کنند؛ اما خوب است بدانید از این جمعیت شش میلیاردی، یک سوم آنها به برق دسترسی ندارند و یک سوم دیگر نیز دسترسی محدودی به آن دارند. جالب‌تر اینکه طی پنجاه سال آینده و زمانی که جمعیت جهان به بیش از ۹ میلیارد نفر برسد، انرژی مصرفی جهان دو برابر خواهد شد. این بدان معناست که در پنجاه سال آینده جمعیت جهان، بیش از مجموع انرژی که در کل طول تاریخ تاکنون مصرف شده است را مصرف خواهدکرد. (۱)

امروزه بیشتر انرژی که برای تولید برق، کار کارخانه‌ها، راه‌اندازی وسایل نقلیه و گرم کردن منازل مصرف می‌شود، از سوزاندن سوختهای فسیلی شامل زغال، نفت و گاز طبیعی تامین می‌شود و ضایعات حاصل از آنها بطور مستقیم در هوا پراکنده می‌شوند که بخش اعظم آن به شکل گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن است. برای مدت هزاران سال، عدم تغییر تراکم این گازهای گلخانه‌ای، محیط زیست معقولی را ایجاد کرده بود که تمدن بشری توانست در آن رشد یابد. اما در قرن بیست و یکم فعالیت انسان موجب گردید مقدار این گازهای مفید به دو برابر افزایش یابد که این تغییر تراکم در دورانهای زمین شناسی، بسیار ناگهانی و کم سابقه بوده است. بعقیده دانشمندان علم هواشناسی، گازهای گلخانه‌ای تولید شده بوسیله انسان موجب شده‌است که گرم‌ترین ده سالهٔ کل تاریخ در سالهای اخیر رخ دهد؛ که این امر در قرن آینده می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. افزایش سطح آب دریاها، دمای شدید هوا، بروز طوفانهای سهمگین، خشکسالی‌های ویرانگر و شیوع بیماری‌های خطرناک و همه‌گیر که همه از آثار و نتایج تغییرات ترکیبات جو است، قابلیت اسکان بشر را در بسیاری از مناطق از بین خواهد برد. اما با این همه، بشریت نمی‌تواند به عقب برگردد و جهان در حال رشد به مقادیر متنابهی از انرژی نیاز دارد.

اگرچه برآورده کردن این نیازها مستلزم تأمین انرژی از تمام منابع ممکن آن است ولی ترکیب انرژی مصرفی جهان باید به دور از استفاده عنان گسیخته از سوختهای فسیلی توسعه یابد تا در عین تأمین منابع انرژی، محیط زیست و منابع غیرقابل جایگزین را برای نسلهای آینده حفظ کرده باشیم. اما حفظ محیط زیست که در این مورد با تثبیت تراکم گازهای گل‌خانه‌ای میسر خواهد شد، مستلزم کاهش پنجاه درصدی انتشار این گازها

توسط کشورهای بزرگ صنعتی است!! این در حالی است که چالش مذکور با توجه به نیاز کشورهای فقیرتر به بالا بردن سطوح زندگی روز به روز عظیم‌تر خواهد شد؛ چرا که حتی اگر کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه هم از بحث ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های انرژی پاک استقبال کنند، جمعیت بسیار زیاد کشورهای فقیر، بزودی بیش از جهان صنعتی حاضر، گازهای گلخانه‌ای را در فضا منتشر می‌کنند. بنابراین کشورهای صنعتی باید بیش از پنجاه درصد گفته شده و در حدود هفتاد و پنج درصد از میزان انتشارات خود را کاهش دهند تا بتوان سرعت فزایندهٔ ورود کشورهای فقیرتر را با تثبیت گازهای گلخانه‌ای هماهنگ کرد.اما این اجبار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نباید به معنی الزام در کاهش فعالیتهای صنعتی تعبیر شود چرا که نه معقول است و نه قابل پذیرش؛ لکن مستلزم معرفی گسترده فناوری‌هایی در زمینه انرژی است که در عین صرفه اقتصادی و صنعتی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای آن کم باشد.

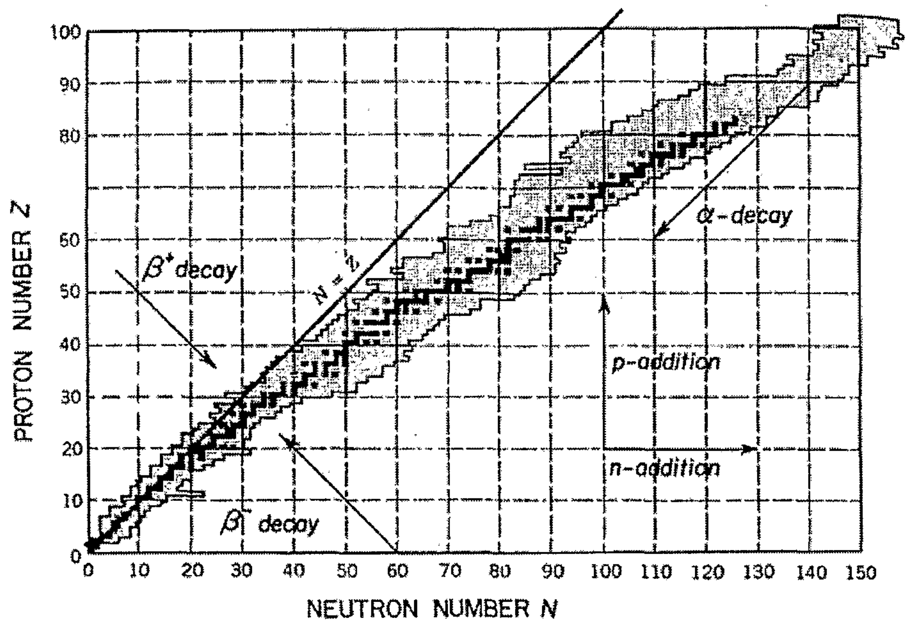
امروزه تولید انرژی پاک از منابع جدید جایگزین شونده مانند خورشید، باد، توده‌های زیستی و نیروی ناشی از حرارت مرکزی زمین، از منابع مطرح استحصال انرژی می‌باشند. اما متأسفانه ظرفیت جمعی این فناوری‌ها برای تولید برق در دههای آینده بسیار محدود است چرا که پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد حتی با بیست سال حمایت تحقیقاتی و یارانه‌ای، باز این منابع جایگزین شونده تنها می‌توانند کمتر از سه درصد از برق جهان را تامین کنند. در این میان انرژی قابل حصول از داخلی‌ترین بخشهای ذرات طبیعی که به انرژی هسته‌ای معروف است می‌تواند مانند انرژی خورشیدی، باد و آب بدون تولید دی‌اکسیدکربن یا انتشار سایر گازهای گلخانه‌ای، برق تولید کند.

استفاده از انرژی هسته‌ای از چهل سال پیش آغاز شد و امروزه حدود ۴۴۰ نیروگاه با توان هسته‌ای در ۳۱ کشور جهان برق تولید می‌کنند که توان تولیدی این نیروگاهها برابر کل انرژی تولیدی در ۴۰ سال پیش توسط تمام منابع انرژی است. در این میان کشور فرانسه با ۶۰ میلیون جمعیت بیش از ۷۵ درصد از نیروی برق خود را از انرژی هسته‌ای تامین می‌کند و بزرگترین صادر کننده اصلی برق است و در مقابل کشور ۶۰ میلیونی ایتالیا که تولید انرژی هسته‌ای ندارد، بزرگترین وارد کننده برق است. (۱)

بعد از آشنایی مقدماتی با لزوم بکارگیری تکنولوژی هسته‌ای، بجاست برای درک بهتر موارد مطرح شده در بخشهای بعدی، مروری مختصر بر چند تعریف اولیه و بنیادی در زمینه این تکنولوژی داشته باشیم.

۱-۲- مفاهیم و تعاریف

رادیواکتیویته : بسیاری از ایزوتوپهای موجود در طبیعت و یا ساختهٔ دست بشر دارای خاصیت رادیواکتیویته می‌باشند که عبارت است از تلاشی خود به خودی هسته در اثر عبور از یک حالت گذار که موجب نشر ذرات یا تشعشع الکترومغناطیس می‌گردد. این پدیده در مواد معدنی داخل زمین، در الیاف گیاهان، در بافتهای حیوانات، در هوا و آب رخ می‌دهد.



نمودار ۱-۱ : وضعیت هسته‌های مختلف عناصر

همانطور که ملاحظه می‌شود تعداد نوترونها و پروتونهای مربوط به ۳۲۰۰ هسته شناخته شده در نمودار ۱-۱ نشان داده شده‌است. ۲۶۶ هسته پایدار بصورت مربع‌های سیاه و هسته‌های رادیواکتیو بصورت هاشور مشخص شده‌اند. هسته‌های پایدار دارای تعداد تقریبی نوترون و پروتون مساوی هستند با این وجود با افزایش جرم هسته، لازم است برای تولید یک هستهٔ پایدار، تعداد نوترونها بیشتر از پروتونها گردد. علت این امر آن است که با سنگین‌تر شدن هسته‌ها، نیروی دافعه الکترومغناطیسی با برد بلند تلاش بر متلاشی نمودن شدید هسته دارند؛ اگرچه نیروی جاذبهٔ هسته بین پروتونها وجود دارد، نوترونهای زیادتری جهت تأمین نیروی جاذبه هسته‌ای بیشتر، به منظور پیوند دادن کلیهٔ نوکلئون‌ها با یکدیگر لازم است. ولی با توجه به اینکه نیروی هسته دارای برد کوتاهی است، در نهایت هنگامی که Z از ۸۳ تجاوز می‌کند، نوترونهای اضافی، نیروی هسته‌ای

اضافی کافی برای تولید یک هسته پایدار را تأمین نمی‌کنند و لذا کلیه اتمهای با $Z > ۸۳$ رادیواکتیو هستند. این خاصیت (رادیواکتیویته) در ایزوتوپهای مختلف به دو گونه طبیعی و مصنوعی مطرح می‌شود.

رادیوایزوتوپ : ایزوتوپهایی که چه بصورت طبیعی و چه بصورت مصنوعی دارای تلاشی و فروپاشی می‌شوند را رادیوایزوتوپ می‌نامند.در حالت طبیعی هسته‌هایی که عموما جزء هسته‌های سنگین هستند به علت عدم توازن و تعادل در هسته، دچار فروپاشی می‌شوند و در حالت فروپاشی مصنوعی، صدها رادیوایزوتوپ مصنوعی توسط بمباران هسته‌ها با ذرات باردار یا نوترونها بدست آمده‌اند. عمده‌ترین ویژگی‌هایی که در بحث رادیوایزوتوپها مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از : نوع فروپاشی، پرتوزایی، نیمه عمر و واحدهای مورد استفاده برای این موارد، که در زیر اختصاراً به آنها پرداخته می‌شود.

نوع فروپاشی: سه نوع از متداولترین انواع فروپاشی‌ها عبارتند از آلفا، بتا و گاما. فروپاشی‌های دیگری که به میزان کمتری اتفاق می‌افتند عبارتند از شکافت خودبه خودی، نشر پروتون و نوترون تأخیری ،پخش ذره مرکب و فروپاشی دوگانه β.

پرتوزایی: آهنگ فروپاشی را پرتوزایی می‌گویند و عبارت است از تعداد هسته‌هایی که در واحد زمان واپاشی می‌کنند. تعداد هسته‌های پرتوزا نسبت به زمان طبق معادله زیر کاهش می‌یابند:

$$N = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

که در آن N_0 تعداد هسته‌های اولیه پرتوزا، N تعداد هسته‌های پرتوزا پس از زمان t و نیز $t_{1/2}$ و λ به ترتیب نیمه عمر و ثابت فروپاشی می‌باشند.

نیمه عمر: عبارت است از زمان لازم برای آنکه نصف اتمهای رادیواکتیو موجود در نمونه، فروپاشی کنند. همچنین رابطه بین نیمه عمر و ثابت فروپاشی به صورت زیر است:

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

انرژی هسته‌ای: انرژی آزاد شده ناشی از تغییر و تحولات هسته اتم که این انرژی از دو طریق آزاد می‌شود: شکافت (Fission) و گداخت یا همجوشی (Fussion).

در شکافت، هسته عناصر سنگین همچون اورانیوم و پلوتونیوم می‌توانند به هسته‌های سبکتر تبدیل شوند. در این تحول هستهٔ اتم سنگین شکافته می‌شوند و هسته‌های کوچکتری بوجود می‌آیند، بطوریکه مجموع جرم هسته‌های کوچکتر از جرم هستهٔ اولیه کمتر می‌باشد. در فرایند گداخت نیز در شرایط مناسب، هسته‌های کوچکتر می‌توانند به هم چسبیده و هستهٔ اتم بزرگتری را ایجاد کنند. در این حالت نیز مجموع جرم هسته‌های اولیه بیشتر است از جرم هسته‌ای که تولید می‌شود. در هر دو مورد شکافت و گداخت مقدار نسبتاً زیادی انرژی در حین تبدیل هسته‌ها آزاد می‌شود که بر اساس رابطه معروف نسبیت انیشتین متناسب با اختلاف جرم بین هسته‌های اولیه و محصول می‌باشد.

$$E=mc^2$$

در این فرایندها اگرچه انرژی بسیار زیادی آزاد می‌شود، تغییر جرم بسیار بسیار کوچکی رخ می‌دهد. به عنوان مثال اگر هسته‌های موجود در یک گرم اورانیوم را بطور کامل شکافت دهیم مقدار ۲۱۰۰۰ kwh انرژی آزاد می‌شود که معادل با سوختن ۵ تن نفت است. این انرژی توسط تابشهای هسته‌ای و همچنین انرژی موجود در ذرات حاصل از شکافت شامل پاره‌های شکافت و نوترونها منتقل می‌شود.

۱-۳- یکاها و کمیت‌ها

پرتوزایی: یکای قدیم پرتوزایی، کوری (Curi) است که با Ci نشان داده می‌شودکه برابر با $۳/۷\times۱۰^{۱۰}$ واپاشی در ثانیه می‌باشد. واحد جدید براي پرتوزایی، بکرل است که با Bq نشان داده می‌شود و عبارت است از تعداد فروپاشی در ثانیه. بنابراین:

$$(۳/۷\times۱۰^{۱۰})\ \mathrm{Bq}=\mathrm{Ci}$$

انرژی: واحد انرژی در فیزیک هسته‌ای، الکترون ولت (ev) است که معادل انرژی کسب شده توسط ذره‌ای با بار الکتریکی واحد است که در میدان یک ولتی بدون مقاومت حرکت می‌کند.

پرتو دهی و آهنگ پرتودهی: پرتودهی کمیتی است که برای سنجش میزان فوتونهای پرتو X و γ در هوا بکار برده می‌شود. یکای قدیم آن رونتگن[1] (R) و یکای جدید آن کولن بر کیلوگرم (C/Kg) می‌باشد. یک (C/Kg) عبارت است از مقدار تابش ایکس و گاما که بتواند در شرایطی متعارفی یک کولن بار

---

1 - Roentgen

الکتریکی هم علامت در یک کیلوگرم هوا تولید نماید. یک رونتگن مقداری از تابشهای فوق است که $۲/۵۸ \times ۱۰^{-۴}$ کولن بار ایجاد کند.آهنگ پرتودهی معرف میزان پرتودهی در یک ثانیه است.

کرما[1] : کمیتی است که مجموع انرژی جنبشی اولیه را برای ذرات باردار تولید شده (در اولین برخورد از پرتوهای غیر مستقیم یونساز در واحد جرم ماده) بیان می‌کند. یکای قدیم آن راد[2] و یکای جدید آن گری[3] است.

دز جذب شده : کمیتی است که انرژی جذب شده از کلیه پرتوها را در واحد جرم هر ماده اندازه‌گیری می‌کند. یکاهای آن همانند یکاهای کرما، یعنی گری و راد است.

دز معادل: این کمیت اثرات بیولوژیکی ناشی از جذب انواع پرتوها را در بافتهای بدن بیان می‌کند و برابر است با حاصلضرب متوسط دز جذب شده از پرتو R در بافت بدن، در ضریبی بنام ضریب توزین پرتو.

یکای دوز معادل در دستگاه بین المللی یکاها، سیورت[4] (Sv) است. یک سیورت عبارت است از انرژی معادل یک ژول ناشی از پرتوی خاص که به یک کیلوگرم از بافت منتقل می‌شود. یکای قدیم آن نیز رم (Rem) است. هر رم معادل ۰/۰۱ سیورت است.

دز مؤثر: این کمیت علاوه بر اینکه نقش پرتوهای مختلف را در بروز اثرات بیولوژیکی منظور می‌کند، نقش پرتوگیری بافتهای مختلف بدن را نیز در نظر می‌گیرد. دز مؤثر برابر است با مجموع حاصلضرب دزهای معادل در ضریبی بنام ضریب توزین بافت. یکاهای آن نیز سیورت و رم است.

۱-۴- شکافت القائی هسته‌ای

پس از کشف نوترون توسط چادویک در سال ۱۹۳۲، تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ تولید نوکلئیدهای جدید با استفاده از بمباران نوترونی آغاز شد و موفقیتهای چشمگیری نیز حاصل گردید. از عمده‌ترین تلاشهایی که انجام گرفت تهیهٔ عناصر فرا اورانیوم[5] بود که در آن سنگین‌ترین عنصر موجود در طبیعت یعنی اورانیوم، با نوترونهای آرام بمباران می‌شدند. در حالی که انتظار می‌رفت جذب یک نوترون توسط اورانیوم منجر به

---

1 - Kinetic Energy Released in Matter (KERMA)
2 - Rad
3 - Gray
4 - Sievert
5 - Trans Uranium

ایزوتوپی با نوترون غنی‌تر شود که آن ایزوتوپ پس از فروپاشی به شیوه نگاترون به ایزوتوپی با عدد اتمی ۹۳ تبدیل شود ، در تجزیه‌های شیمیایی اورانیوم‌های بمباران شده عنصری با خاصیتهای شیمیایی لانتانیوم (Z= ۵۷) و در مطالعاتی دیگر عنصری بسیار مشابه با باریم (Z= ۵۶) دیده شد. چنین مشاهداتی توسط هان[1] و استاسمن[2] آنها را به کشف شکافت هسته‌ای رهنمون ساخت و به همین دلیل جایزه نوبل در سال ۱۹۴۴ به هان اختصاص یافت.از آن پس تئوری‌های مختلفی در این زمینه ارائه شد که غالباً بر تغییر شکل هستهٔ برانگیخته به دنبال جذب نوترون به نقطه‌ای که بر نیروی انرژی سطح فایق آید، اشاره کرده‌اند.

در شکافت القایی هسته، در اثر برخورد نوترونها با هسته‌های مشخص، آن هسته‌ها به اجزای کوچکتری شکافته و علاوه بر محصولات حاصل از این شکافته شدن، تعدادی نوترون و مقدار زیادی انرژی تولید می‌شود. بعنوان مثال در شکافت القایی $^{۲۳۵}\mathrm{U}$ توسط نوترونهای حرارتی (نوترونهایی با انرژی در حدود ۰/۰۲۵ Mev) ، برخی از مسیرهای شکافت بصورات زیر است :

$$
{}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow
\begin{array}{l}
{}^{131}_{53}I + {}^{102}_{39}Y + 3n \\[2ex]
{}^{99}_{42}Mo + {}^{135}_{50}Sn + 2n \\[2ex]
{}^{144}_{56}Ba + {}^{90}_{36}Kr + 2n \\[2ex]
{}^{133}_{54}Xe + {}^{101}_{38}Sr + 2n \\[2ex]
{}^{137}_{55}Cs + {}^{97}_{37}Rb + 2n
\end{array}
$$

اگرچه انرژی حاصل از شکافت برای اولین بار در ساخت بمب اتمی استفاده شد، اما تعداد زیادی کاربردهای صلح‌آمیز بویژه در تولید انرژی الکتریکی و تهیهٔ تعداد زیادی از رادیوایزوتوپها، جزء موارد استفاده از فرایند شکافت هسته‌ای می‌باشند.

شکافت عمدتاً در اثر رقابت بین نیروی هسته‌ای و کولونی که در هسته‌ها وجود دارد ناشی می‌شود. انرژی بستگی هسته‌ای تقریباً متناسب با A افزایش می‌یابد در حالی که نیروی دافعه کولونی پروتونها متناسب با توان

---

[1] - Hann

[2] - strassman