

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره یازده، بهمن ماه ۹۸

نسل جدید راکتورهای هسته ای، ADS

جواد کریمی^{۱*}

javadkarimi235@yahoo.com

محمد مهدی فیروزآبادی^۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۱۸

چکیده

زمینه و هدف: امروزه راکتورهای هسته ای به عنوان یکی از منابع اصلی تولید انرژی در دنیا به طور قابل توجهی در حال توسعه می باشد. از معایب اصلی راکتورهای هسته ای تولید زباله های هسته ای بوده که این زباله ها به دلیل نیمه عمر و مسمومیت پرتوی بالا دارای اثرات مخرب محیط زیستی هستند. در این تحقیق نسل جدیدی از راکتور های هسته ای با عنوان ADS معرفی می شود که در آن از زباله های هسته ای به عنوان سوخت استفاده می شود.

مواد و روش ها: با بررسی راکتور های هسته ای ADS، مفهوم ADS و بخش های اصلی تشکیل دهنده این نوع از راکتور و نیز نحوه عمل کرد آن بیان می شود.

یافته ها: این نسل جدید از راکتورهای هسته ای (ADS) دارای این قابلیت بوده که زباله های هسته ای شامل عناصر فرا اورانیومی و پاره های شکافت هسته ای را به عناصری کم خطر و با نیمه عمر و مسمومیت پرتوی پایین تبدیل نماید. هم چنین مزیت مهم آن نسبت به سایر راکتور های هسته ای یعنی ایمن بودن آن بیان می شود.

بحث و نتیجه گیری: با توجه به اهمیت توسعه راکتور های هسته ای به عنوان یک منبع اصلی تولید انرژی، باید در مسیر توسعه فناوری صلح آمیز هسته ای در کشور از روش هایی استفاده شود تا میزان بازدهی آن حداکثر و در عین حال اثرات مخرب محیط زیستی آن به حداقل برسد. استفاده از نسل جدید راکتور های هسته ای (ADS) یکی از این روش ها است.

واژه های کلیدی: راکتور ADS، قلب زیر بحرانی، هدف تلاشی، تبدیل

۱- دانشجوی دکتری فیزیک هسته ای، دانشگاه جامع امام حسین(ع) (مسئول مکاتبات)

۲- دانشیار گروه فیزیک دانشگاه بیرجند

The new generation of nuclear reactors, ADS

Javad Karimi^{1*}

javadkarimi235@yahoo.com

Mohammad Mehdi Firooz Abadi²

Admission Date: April 13, 2016

Date Received: October 10, 2015

Abstract

Background and Objective: Today, nuclear reactors as a major source of energy in the world, is developing considerably. The main disadvantage of nuclear reactors is producing nuclear waste. This waste is due to the half-life and high environmental impact is radiation poisoning. In this study a new generation of nuclear reactors as ADS introduced where the nuclear waste is used as fuel.

Method: Examining ADS nuclear reactors, the concept of ADS and the main components of this type of reactor and how it works are described.

Findings: This new generation of nuclear reactors (ADS) has the ability to convert nuclear waste, including meta-uranium elements and fragments of nuclear fission, into low-risk elements with low half-life and low beam toxicity. Its important advantage over other nuclear reactors is that it is safe.

Discussion and Conclusions: Given the importance of developing nuclear reactors as a major source of energy production, methods should be used to develop peaceful nuclear technology in the country to maximize its efficiency while minimizing its destructive environmental effects. . The use of a new generation of nuclear reactors (ADS) is one such method.

Key words: ADS Reactor, Subcritical Core, Spallation Target, Transmutation

1- PhD Student, Nuclear Physics, Imam Hossein Comprehensive University*(Corresponding Authours).

2- Associate Professor, Department of Physics, University of Birjand

مقدمه

های تحقیقاتی بزرگی در دنیا در حال تحقیق و بررسی روی این نمونه ها به منظور ساخت راکتورهای ADS در مقیاس بزرگ و صنعتی هستند (۳). راکتور ADS نسل جدیدی از راکتورهای هسته‌ای است که در آن ADS از عبارت Accelerator Driven subcritical System گرفته شده است (۴) و به معنی سیستم های زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده است. این راکتور ها با نام راکتورهای هیبریدی نیز شناخته می شوند، زیرا با استفاده از زباله های هسته ای حاصل از سایر راکتورها در ساختار میله های سوخت علاوه بر تولید انرژی، این قابلیت را دارند که این زباله‌ها را به عنصری کم خطر و با مسمومیت پرتوی و نیمه عمر پایین تبدیل نمایند (۲). همان طور که بیان شد از ویژگی های مهم این نوع از راکتورهای هسته ای، زیر بحرانی بودن آن ها است.

مفهوم زیر بحرانی بودن

در راکتورهای هسته ای پارامتری تحت عنوان ضریب تکثیر مؤثر (K_{eff}) به صورت زیر تعریف می شود:

نسبت تعداد نوترون های تولید شده در هر مرحله (i) از فرآیند شکافت به تعداد نوترون های تولید شده در مرحله ($i-1$) از فرآیند شکافت (۵).

$$K_{eff} = \frac{\text{تعداد نوترون های تولید شده در مرحله } (i) \text{ از فرآیند شکافت}}{\text{تعداد نوترون های تولید شده در مرحله } (i-1) \text{ از فرآیند شکافت}}$$

ضریب تکثیر مؤثر

در واقع این پارامتر تغییرات جمعیت نوترون ها را با گذشت زمان و پیشرفت بر هم کنش های مختلف نوترون در قلب یک راکتور هسته‌ای نشان می دهد. نوترون های موجود در قلب یک راکتور هسته ای با برهم کنش های مختلفی مواجه می شوند. بعنوان نمونه، شکل (۱) طرحی از فرآیند شکافت اورانیوم ۲۳۵ را به عنوان یک هسته شکافت پذیر در قلب یک راکتور هسته ای نشان می دهد. طبق این شکل در اولین گام یک نوترون توسط اورانیوم ۲۳۵ گیر اندازی شده و هسته مرکب تشکیل می شود. این هسته مرکب شکافته شده و در اثر این فرآیند انرژی،

امروزه یکی از نگرانی های اصلی بشر درباره راکتورهای هسته ای، مسأله‌ی زباله های حاصل از آن ها بوده که به طور چشم گیری در حال افزایش است. این زباله‌ها دارای مسمومیت پرتوی بسیار بالایی بوده و برای انسان و سایر موجودات خطرناک اند. هم چنین بعضی از عناصر موجود در این زباله‌ها دارای نیمه عمرهای بسیار طولانی از مرتبه صد هزار سال و بالاتر هستند (۱). لذا اگر این زباله ها را بدون هیچ گونه تغییری مسقیماً دفن کنیم، مسلماً آثار زیان بار آن ها برای سال های طولانی متوجه انسان و محیط زندگی او خواهد بود. بنابراین لازم است که پیش از دفن، با اعمال تغییراتی در ساختار این عناصر آن ها را به عنصری کم خطرتر و با نیمه عمر پایین تبدیل نماییم. برای رفع این مشکل راه کارهایی پیشنهاد شده است که یکی از این راه کارها استفاده از نسل جدید راکتورهای هسته ای با عنوان ADS، به منظور تبدیل این زباله ها می باشد (۲) که به طور قابل توجهی مورد استقبال کشورهای مختلف قرار گرفته است. در حال حاضر طراحی، ساخت و توسعه این نوع از راکتور ها بطور گسترده در بعضی از کشورها در حال انجام است. در این تحقیق به معرفی این نسل جدید از راکتورهای هسته ای پرداخته می شود و بخش های مختلف آن، نحوه عملکرد، کاربرد ها و مزیت مهم آن نسبت به راکتورهای امروزی یعنی ایمن بودن آن تشریح می شود.

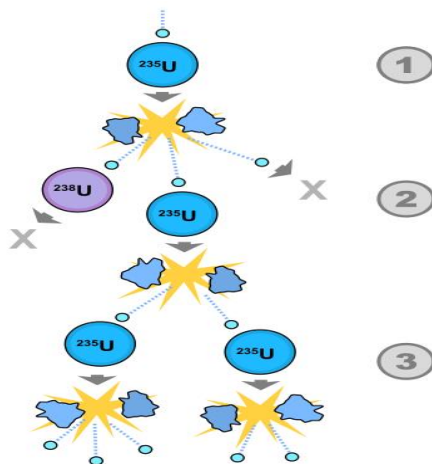
روش بررسی

مفهوم ADS

از لحاظ تاریخی، اولین بار مفهوم راکتورهای هسته ای ADS در حدود ۵۰ سال قبل مطرح شده است (۳)، اما در آن زمان به دلیل کمبود امکانات از جمله شتاب دهنده هایی با انرژی بالا (شتاب دهنده از بخش های اصلی یک راکتور هسته ای ADS است) به طور جدی دنبال نشده است. اما این مفهوم در سال های بعد توسط دانشمندانی چون Bowman, Furukawa و Rubbia دوباره پیگیری و احیاء شد و در حال حاضر نمونه های تحقیقاتی آن در کشورهای مختلف ساخته شده است و تیم

فرآیند شکافت مجدد در قلب راکتور رخ می دهد و موجب افزایش جمعیت نوترون ها در قلب راکتور می شود. بنابراین وقوع چنین فرآیند هایی برای نوترون های تولید شده در هر مرحله از فرآیند های زنجیره ای شکافت در قلب راکتور، می تواند جمعیت نوترون ها را تحت تاثیر قرار دهد (کاهش، افزایش و یا عدم تغییر در جمعیت نوترون ها).

پرتوهای گاما، پاره های شکافت و تعدادی نوترون تولید می شوند. این امکان وجود دارد که برای نوترون های تولید شده در شکافت اورانیوم ۲۳۵ فرآیند های گیر اندازی در عناصر موجود در قلب راکتور شامل گیر اندازی در اورانیوم ۲۳۸، گیراندازی توسط عناصر غیر سوختی مثل میله های کنترل، گیر اندازی در اورانیوم ۲۳۵ و نیز نشت به خارج از قلب راکتور اتفاق بیفتد که در فرآیند گیر اندازی توسط اورانیوم ۲۳۵، با احتمال زیاد



شکل ۱- نحوه تکثیر نوترون در قلب یک راکتور هسته ای

Figure 1. neutron multiplication in the core of a nuclear reactor

راديو اکتیو و وقوع فاجعه انسانی و محیط زیستی شد، بطوری که مردم این مناطق با گذشت چندین سال هنوز هم از عوارض و بیماری های ناشی از این فاجعه رنج می برند (۶).

ب) حالت بحرانی ($K_{eff} = 1$): در این حالت مقدار ضریب تکثیر موثر برابر یک و یا تقریباً برابر یک بوده، یعنی با گذشت زمان و پیشرفت برهم کنش های مختلف نوترون در قلب راکتور جمعیت نوترون ها تقریباً ثابت است. اکثر راکتورهای امروزی در وضعیت بحرانی عمل می کنند.

ج) حالت زیر بحرانی ($K_{eff} < 1$): در این حالت، مقدار ضریب تکثیر موثر کوچک تر از یک بوده، یعنی با گذشت زمان و پیشرفت بر هم کنش های نوترون در قلب راکتور جمعیت نوترون ها نسبت به حالت اولیه کاهش می یابد و در نهایت راکتور خاموش می شود.

راکتورهای ADS نیز به صورت زیر بحرانی ($K_{eff} < 1$) عمل می کنند (۷)؛ یعنی با گذشت زمان جمعیت نوترون ها در قلب

با توجه به بر هم کنش های مختلف نوترون و میزان مصرف عناصر شکافای موجود در قلب یک راکتور هسته ای، برای ضریب تکثیر مؤثر سه حالت متفاوت را در نظر می گیریم (۵):

الف) حالت فوق بحرانی ($K_{eff} > 1$): در این حالت مقدار ضریب تکثیر موثر بزرگتر از یک بوده و بدین معناست که با گذشت زمان و پیشرفت بر هم کنش های مختلف نوترون در قلب راکتور، جمعیت نوترون ها نسبت به حالت اولیه بیش تر می شود. در واقع در چنین وضعیتی با یک فرآیند انفجاری روبه رو هستیم. این وضعیت در بمب های هسته ای اتفاق می افتد. راکتور های معمولی نیز که به صورت بحرانی ($K_{eff} = 1$) عمل می کنند ممکن است با چنین وضعیتی مواجه شوند. مثل حادثه نیروگاه هسته ای چرنوبیل در کشور اوکراین که در آوریل سال ۱۹۸۶ اتفاق افتاد و به این علت که متصدیان راکتور برای انجام آزمایشی، سیستم ایمنی راکتور را غیر فعال کرده بودند (خارج کردن کند کننده های نوترون از قلب) راکتور به حالت فوق بحرانی و انفجاری رسیده و ایجاد انفجار موجب پخش مواد

الف) شتاب دهنده

ب) هدف تلاشی

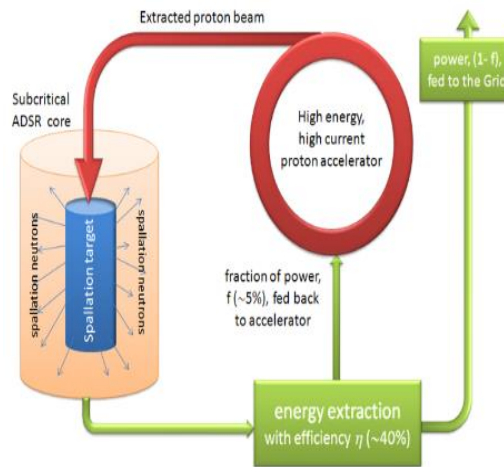
ج) قلب زیر بحرانی

شکل (۲) طرحی کلی از یک راکتور هسته ای ADS را نشان می دهد که در آن سه بخش اصلی یعنی شتاب دهنده، هدف تلاشی و قلب زیر بحرانی نمایش داده شده است.

راکتور کاهش می یابد. بنابراین برای جلوگیری از کاهش جمعیت نوترون ها و حفظ راکتور در وضعیت بحرانی باید قلب راکتور به وسیله یک چشمه نوترون خارجی تغذیه شود و این چشمه نوترون به وسیله فرآیند متلاشی شدن هدف واقع در مرکز قلب زیر بحرانی راکتور ایجاد می شود(۷).

بخش های اصلی یک راکتور هسته ای ADS

به طور کلی یک راکتور هسته ای ADS از دید فیزیکی شامل سه بخش مهم است که عبارتند از(۸):



شکل ۲- سه بخش اصلی یک راکتور هسته ای ADS

Figure 2. The three main components of a nuclear reactor ADS

ب) هدف تلاشی

یکی دیگر از بخش های اصلی یک راکتور ADS، هدف تلاشی بوده که در مرکز قلب زیر بحرانی قرار دارد(۱۰). در یک راکتور ADS پس از این که ذرات باردار توسط شتاب دهنده، شتاب داده شدند، به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می شوند و در آن جا در اثر برخورد ذرات باردار پرنرژی (از مرتبه چند GeV) با هدف، فرآیند تلاشی رخ می دهد (شکل (۳)). در اثر این برخورد نوعی برهم کنش هسته ای موسوم به آبشار درون هسته ای اتفاق می افتد و به ازای هر ذره باردار شتاب دار فرودی (مثلاً پروتون) تعدادی نوترون، پروتون، پایون و سایر ذرات در فرآیند تلاشی ایجاد می شوند که تعداد ذرات تولید شده به ویژه نوترون ها با افزایش انرژی ذره باردار شتاب دار فرودی افزایش می یابند. از طرفی این تعداد به نوع

الف) شتاب دهنده

یکی از بخش های اصلی یک راکتور ADS، شتاب دهنده است و یکی از مشکلات پیش روی، به منظور توسعه این نوع از راکتورها، ساخت شتاب دهنده است، زیرا ساخت آن از لحاظ فنی مشکل و نیازمند به کارگیری تکنولوژی های روز دنیا است. شتاب دهنده ها به اشکال مختلف از جمله شتاب دهنده های خطی، سیکلوترون ها، سینکروترون ها و ... ساخته می شوند. در یک راکتور ADS از شتاب دهنده برای شتاب دادن و در نتیجه ایجاد باریکه ای از ذرات باردار مانند پروتون (P) و دوترون (D) استفاده می شود. این ذرات تا انرژی های بالا از مرتبه چند GeV، شتاب داده می شوند و در یک مسیر خلاء (برای جلوگیری از اتلاف انرژی) به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می شوند(۹).

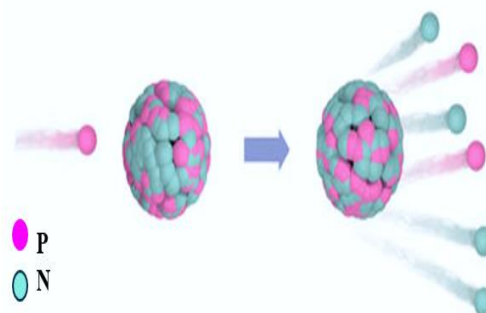
شوند. بنابراین باید از عنصری استفاده شود که مقدار پلونیوم و تشعشعات کم تری ایجاد نماید.

۴. عنصری انتخاب شود که در اثر برخورد پروتون‌های پر انرژی، کم تر دچار خوردگی شود تا در بازه‌های زمانی طولانی تر بتوان هدف تلاشی شده موجود در مرکز قلب زیر بحرانی را تعویض نمود.

در حال حاضر از تنگستن (W)، سرب-بیس‌موت (Pb-Bi) و سرب (Pb) به عنوان ماده هدف در فرآیند تلاشی استفاده می شود (۱۲).

شکل (۴) نمودار مربوط به شبیه سازی فرآیند تلاشی هدف سرب را نشان می دهد که این شبیه سازی با استفاده از کد محاسباتی هسته ای MCNPX انجام شده است (۱۳). در این شبیه سازی یک ساختار استوانه ای از جنس سرب بعنوان هدف در نظر گرفته شده است و برای پروتون‌هایی با انرژی‌های ۱۰۰۰، ۱۷۳۰ و ۷۴۰۰ مگا الکترون ولت (MeV) نمودار تعداد نوترون‌های تولیدی به ازای یک پروتون در فرآیند تلاشی (محور قائم) بر حسب شعاع هدف استوانه ای (محور افقی) رسم شده است. طبق این نمودار به طور کلی می توان گفت که با افزایش انرژی پروتون فرودی تعداد نوترون‌های تولیدی به ازای یک پروتون نیز در فرآیند تلاشی افزایش می یابد. بنابراین هرچه شتاب دهنده مورد استفاده در یک راکتور هسته ای ADS قوی تر باشد، مسلماً بازدهی راکتور نیز بیشتر خواهد بود. هم چنین تعداد نوترون‌های تولیدی در فرآیند تلاشی به شعاع ماده هدف استوانه ای (سرب) نیز بستگی دارد.

ماده‌ی مورد استفاده به عنوان هدف نیز بستگی دارند. برای - انتخاب هدف مناسب، تحقیقات گسترده‌ای در آزمایشگاه‌های بزرگ دنیا از جمله مرکز MEGAPIE در حال انجام است (۱۱).



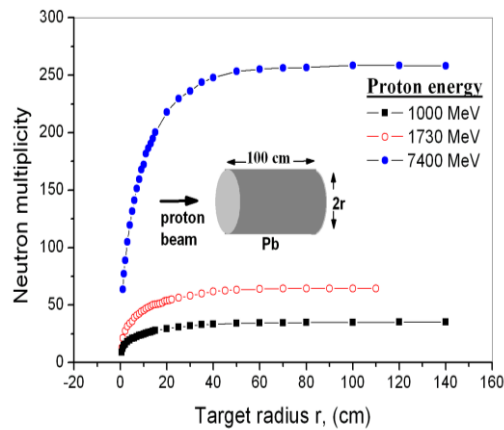
شکل ۳- فرآیند تلاشی هسته هدف در اثر برخورد با پروتون شتاب داده شده

Figure 3. The process of spallation target in collisions with proton accelerated

ماده ای که به عنوان هدف در فرآیند تلاشی استفاده می شود باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد از جمله اینکه (۱۰، ۱۱):

۱. عنصری با عدد اتمی (Z) بالا باشد زیرا به ازای یک پروتون با انرژی مشخص هر چه هدف تلاشی سنگین تر باشد، تعداد نوترون بیش تری تولید می شود.
۲. در اثر برخورد ذرات باردار با هدف تلاشی، به علت بالا بودن انرژی ذره پرتابه (در حد چند GeV)، دما در ماده‌ی هدف بسیار بالا بوده و هدف می تواند ذوب شود. بنابراین باید در انتخاب ماده هدف از عنصری استفاده شود که دارای نقطه‌ی ذوب بالایی باشد.

۳. در اثر برخورد پروتون‌های پر انرژی با هدف، یک فرآیند هسته‌ای رخ می دهد و در اثر این بر هم‌کنش ماده‌ی سمی پلونیوم (polonium) و نیز برخی پرتوهای خطرناک تولید می

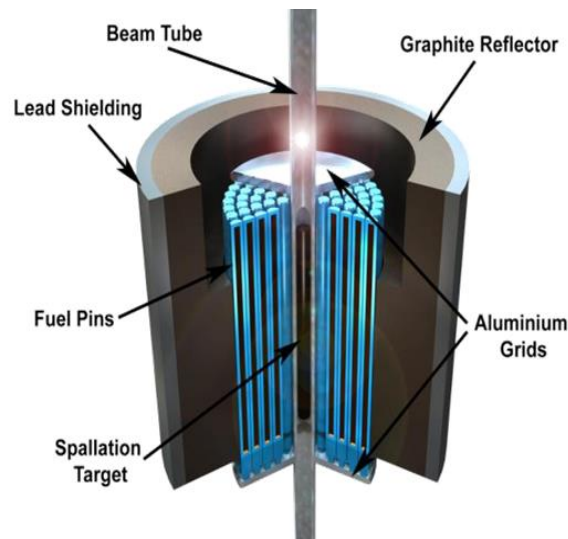


شکل ۴- نمودار تعداد نوترون های تولیدی به ازای یک پروتون فرودی با انرژی های ۱۰۰۰، ۱۷۳۰ و ۷۴۰۰ مگا الکترون ولت در فرایند تلاشی برای هدف سرب (۱۳)

Figure 4. Diagram number of neutrons produced per individual protons with energies of 1000, 1730 and 7400MeV in spallation process for lead target (13)

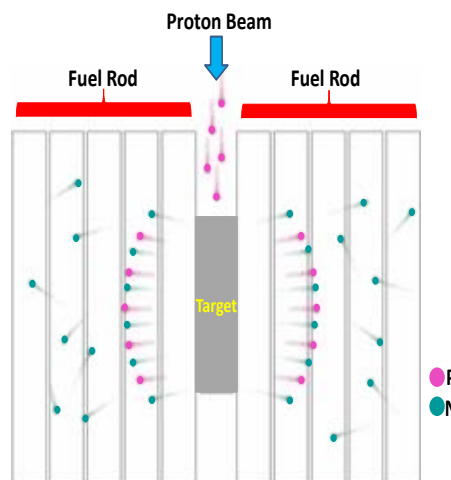
هدف، تعداد زیادی نوترون سریع تولید می شوند و این نوترون-های سریع در محیط خنک کننده و کند کننده (معمولا آب) پخش شده و به سمت میله های سوخت واقع در قلب زیر بحرانی حرکت می کنند (مطابق شکل (۶)).

ج) قلب زیر بحرانی: یکی از مهم ترین بخش های یک راکتور ADS، قلب زیر بحرانی آن است که مطابق شکل (۵) در اطراف هدف تلاشی قرار می گیرد (۱۴). در ساختار قلب زیر بحرانی میله های سوخت درون خنک کننده راکتور قرار دارند طوری که در میله های سوخت از زباله های هسته ای به منظور تبدیل آن ها استفاده می شود. در اثر وقوع فرآیند تلاشی در ماده



شکل ۵- ساختار قلب زیر بحرانی

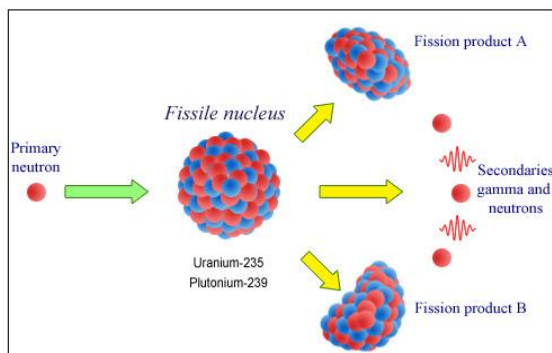
Figure 5. Structure of sub critical core



شکل ۶- فرآیند تلاشی و حرکت نوترون‌های سریع به سمت قلب زیر بحرانی

Figure 6. The process of spallation and Moving fast neutrons to the sub critical core

ازای هر شکافت انرژی، دو پاره شکافت، تعدادی نوترون آبی و تاخیری و پرتوهای گاما گسیل می شوند (مطابق شکل (۷)). برخی از پاره های شکافت با مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بالا عبارتند از: ^{99}Tc , ^{129}I , ^{93}Zr (۳)



شکل ۷- فرایند شکافت اورانیوم ۲۳۵

Figure 7. U-235 fission process

۲. عناصر فرا اورانیومی

عناصری با اعداد جرمی بالاتر از سنگین ترین عنصر طبیعی (اورانیوم) را به عنوان عناصر فرا اورانیومی می شناسیم. این عناصر در اثر گیراندازی های متوالی نوترون توسط اورانیوم در قلب یک راکتور هسته ای به وجود می آیند. بعضی از این عناصر دارای میزان مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بسیار بالا

زباله های هسته ای

امروزه به کارگیری مواد رادیو اکتیو در پزشکی، مراکز تحقیقاتی، نیروگاه های هسته ای و نیز بازیافت سوخت های مصرف شده، منجر به تولید پسماند های رادیو اکتیو می گردد. این پسماند ها حاوی رادیو نوکلئیدها با نیمه عمر بالا و متوسط هستند (۱۵).

پسماند های پرتوزا حاوی رادیو ایزوتوپ ها هستند و رادیو ایزوتوپ ها آرایشی از عناصرند که واپاشی می کنند و تابش یونی دارند و برای انسان و محیط زیست خطرناک می باشند. این ایزوتوپ ها انواع و سطوح مختلفی از تابش دارند که در یک بازه زمانی تابششان ادامه دارد. میزان پرتوایی پسمان های پرتوزا از مقادیر کم (در حد مقادیر پرتوایی طبیعی) تا مواد با پرتوایی بالا که در باز فرآوری سوخت مصرف شده حاصل می شوند تغییر می کند. در حال حاضر مهم ترین زباله های هسته ای موجود از راکتورهای هسته ای حاصل می شوند و عبارتند از:

۱. پاره های شکافت

در راکتور در اثر گیراندازی نوترون توسط عناصر شکافا مانند اورانیوم ۲۳۳، اورانیوم ۲۳۵ و پلوتونیوم ۲۳۹، هسته ای مرکب تشکیل شده و در نهایت این هسته مرکب شکافته می شود. به

^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm

بوده و آن‌ها را به عنوان زباله هسته ای می‌شناسیم. برخی از

در جدول ۱ نیمه عمر و میزان اکتیویته بعضی از ایزوتوپ‌ها بیان شده است.

این عناصر عبارتند از (۳):

جدول ۱- نیمه عمر و اکتیویته تعدادی از عناصر فرا اورانیومی و پاره های شکافت (۵)

Table 1. The half-life and activity of transuranic elements and fission fragment (5)

Isotope	Half time(Year)	Activity(Bq)
^{93}Zr	1.53×10^6	1.33×10^{15}
^{99}Tc	2.13×10^5	1.03×10^{16}
^{126}Sn	1.00×10^5	0.43×10^{15}
^{129}I	1.57×10^7	0.24×10^{14}
^{235}U	7.04×10^8	1.64×10^{13}
^{236}U	2.34×10^7	1.95×10^{14}
^{237}Np	2.14×10^6	0.21×10^{15}
^{238}Pu	8.77×10^1	1.94×10^{18}
^{239}Pu	2.41×10^4	0.26×10^{18}
^{241}Am	4.42×10^2	0.52×10^{18}
^{243}Am	7.38×10^3	1.51×10^{18}
^{245}Cm	8.53×10^3	0.35×10^{15}

اتلاف انرژی ذرات باردار شتاب دار، این ذرات در یک مسیر خلاء به سمت هدف هدایت می‌شوند. در اثر برخورد ذرات باردار پر انرژی (مثل پروتون‌ها) با هدف، فرآیند تلاشی اتفاق می‌افتد و به ازای هر پروتون تعدادی نوترون تولید می‌شود که تعداد و انرژی نوترون‌های تولید شده به نوع و انرژی ذره باردار شتاب دار و نیز نوع هدف تلاشی بستگی دارد. نوترون‌های تولید شده به سمت قلب زیر بحرانی که در اطراف هدف تلاشی قرار دارد حرکت می‌کنند. در ساختار قلب زیر بحرانی میله‌های سوخت قرار دارند، طوری که عناصر مورد استفاده در ساختار میله‌های سوخت عبارتند از (۵):

۱. عناصر غیر شکافای اورانیوم ^{238}U و توریوم ^{232}Th :

این عناصر در راکتورهای حرارتی به دلیل پایین بودن سرعت نوترون‌ها کارایی ندارند، اما در راکتورهای هسته ای ADS به دلیل وجود چشمه خارجی تولید نوترون‌های سریع، قابلیت تبدیل به عناصر شکافا را دارند.

۲. استفاده از زباله‌های هسته ای از نوع عناصر فرا اورانیومی با هدف تبدیل و تولید انرژی از آن‌ها.

در حال حاضر یکی از بزرگ‌ترین مشکلات راکتورهای هسته ای امروزی، مشکل پسمانداری زباله‌های حاصل از آن‌ها است. این زباله‌ها معمولاً بسیار خطرناک و سمی بوده و اگر آن‌ها را مستقیماً و بدون هیچ تغییری در ساختار آن‌ها دفن کنیم، مسلماً به دلیل نیمه عمرهای طولانی و تابش دهی زیاد، خطرات زیادی برای انسان و محیط زیست خواهند داشت. یکی از راه‌کارهای ممکن، تبدیل این زباله‌ها پیش از دفن آن‌ها است.

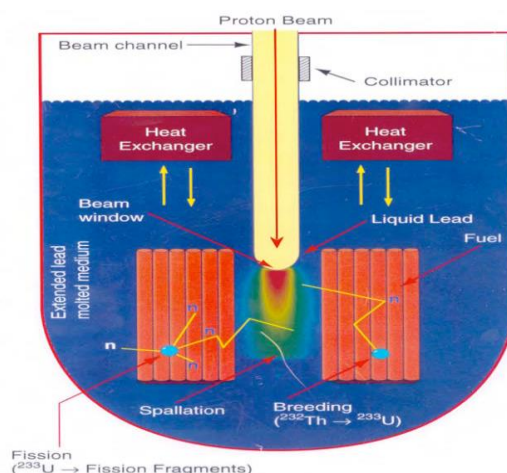
نحوه‌ی عمل کرد یک راکتور هسته ای ADS به طور مختصر

همان‌طور که بیان شد یک راکتور هسته ای ADS از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱. شتاب دهنده ۲. هدف تلاشی ۳. قلب زیر بحرانی

در راکتور ADS ابتدا ذره‌ی باردار، توسط شتاب دهنده تا انرژی‌های بالا (از مرتبه GeV) شتاب داده می‌شود. سپس این باریکه از ذرات باردار شتاب دار، به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می‌شود (برای جلوگیری از

۴. به کارگیری عناصر شکافتا هم چون اورانیوم ۲۳۵ در ساختار میله های سوخت به منظور راه اندازی قلب راکتور در ابتدای شروع فعالیت آن. شکل (۸) طرحی از قلب یک راکتور هسته ای ADS را نشان می دهد که در آن وقوع فرآیند تلاشی و حرکت نوترون های سریع تولید شده به سمت قلب زیر بحرانی نمایش داده شده است. در این راکتور از سرب مذاب به عنوان خنک کننده استفاده شده است.

۳. به کارگیری زباله های هسته ای از نوع پاره های شکافت به منظور تبدیل این عناصر به عناصری با نیمه عمر پایین در میله های سوختی که بیش ترین فاصله را از مرکز قلب راکتور دارند. در واقع سطح مقطع گیراندازی نوترون های با انرژی پایین توسط پاره ای شکافت زیاد بوده و از طرفی با افزایش فاصله از مرکز قلب راکتور، انرژی نوترون ها ی موجود در قلب نیز به تدریج کاهش می یابد. بنابراین بهترین محل برای قرارگیری و تبدیل پاره های شکافت نقاطی است که بیش ترین فاصله را از مرکز قلب راکتور دارند.



شکل ۸- قلب راکتور هسته ای ADS

Figure 8. ADS nuclear reactor core

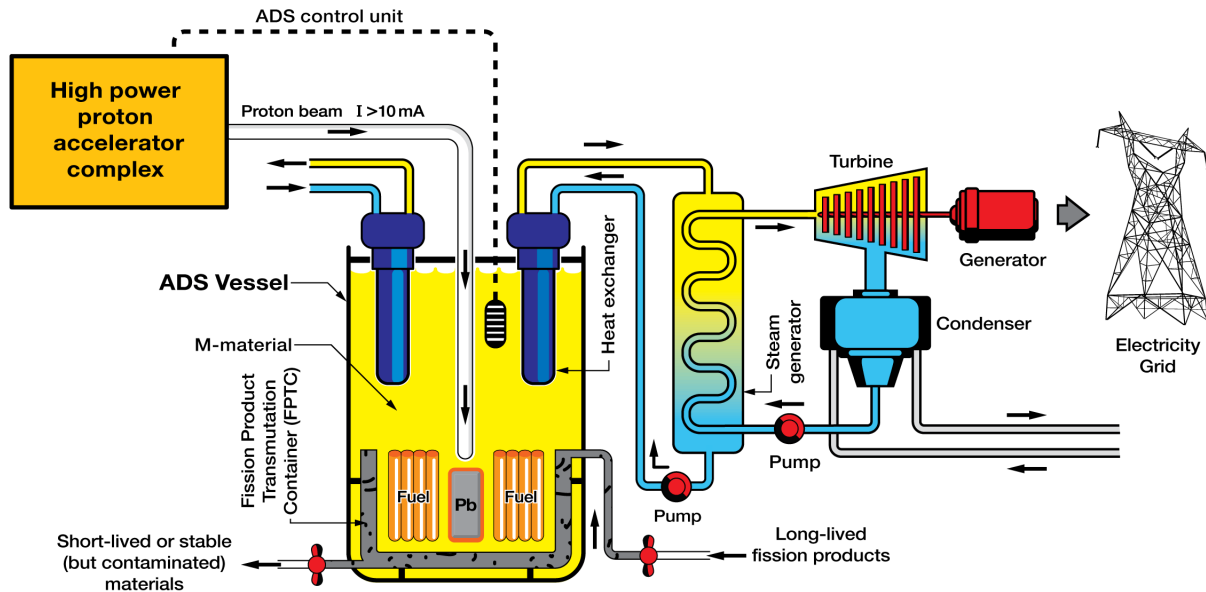
انرژی تولید می شود. این انرژی به خنک کننده منتقل شده و باعث افزایش دمای آن می شود. در نهایت در اثر چرخش خنک کننده (آب) بین داخل و خارج قلب راکتور و بخار شدن آن، توربین ها به چرخش در آمده و انرژی الکتریسیته تولید می شود (مطابق شکل (۹)).

نتایج

کاربرد های اصلی راکتور هسته ای ADS

الف) تولید الکتریسیته

در این راکتور نیز مانند همه ی راکتورهای هسته ای دیگر، در اثر گیراندازی نوترون در مواد شکافتا و وقوع فرآیند شکافت،



شکل ۹- طرح یک نیروگاه هسته ای ADS (۱۳)

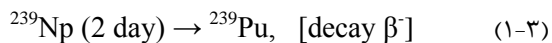
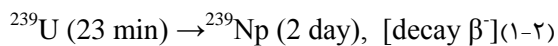
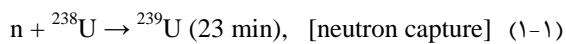
Figure 9. The design of a ADS nuclear power plant (13)

ب) تبدیل زباله های هسته ای

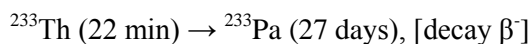
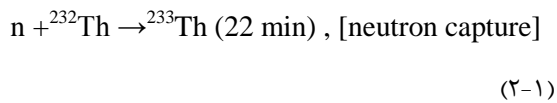
همان طور که بیان شد نگرانی از زباله های هسته ای حاصل از نیروگاه ها به دلیل مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بالا مشکلی بزرگ است که علاوه بر آثار محیط زیستی، دفن آن ها نیز نیازمند صرف هزینه های زیادی است. از ویژگی های مهم راکتورهای ADS، تبدیل زباله های هسته ای به عناصری کم خطرتر و با نیمه عمر کوتاه می باشد که با توسعه این نوع راکتورها از اثرات سوء این زباله ها روی محیط زیست و نیز هزینه های حاصل از پسمانداری آن ها کاسته می شود.

فرآیند های تولید پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳ در قلب راکتور هسته ای ADS (۱۶):

فرآیند تولید پلوتونیوم ۲۳۹



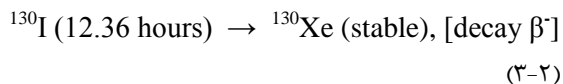
فرآیند تولید اورانیوم ۲۳۳



در راکتور هسته ای ADS، به دلیل وجود چشمه ی نوترون سریع خارجی حاصل از فرآیند تلاشی، می توان از عناصر غیر شکافتی اورانیوم ۲۳۸ و تورنیوم ۲۳۲ که در راکتورهای حرارتی کارایی ندارند، به عنوان سوخت استفاده نمود. در واقع این عناصر با گیراندازی نوترون و واپاشی β^- مطابق فرآیند های زیر به ترتیب به پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می شوند که عناصری شکافت هستند، یعنی عناصری که با گیراندازی نوترون حرارتی قابلیت شکافت دارند (نوترون با انرژی ۰,۰۲۵ eV را

ج) استفاده از عناصر غیر شکافتی به عنوان سوخت

در راکتور هسته ای ADS، به دلیل وجود چشمه ی نوترون سریع خارجی حاصل از فرآیند تلاشی، می توان از عناصر غیر شکافتی اورانیوم ۲۳۸ و تورنیوم ۲۳۲ که در راکتورهای حرارتی کارایی ندارند، به عنوان سوخت استفاده نمود. در واقع این عناصر با گیراندازی نوترون و واپاشی β^- مطابق فرآیند های زیر به ترتیب به پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می شوند که عناصری شکافت هستند، یعنی عناصری که با گیراندازی نوترون حرارتی قابلیت شکافت دارند (نوترون با انرژی ۰,۰۲۵ eV را



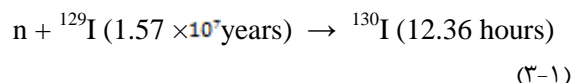
چگونگی وقوع فرآیند تبدیل زباله های هسته ای در یک

راکتور ADS

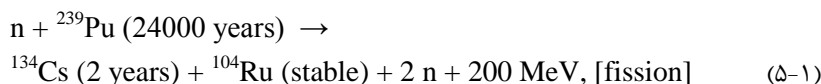
از اهداف اصلی طراحی و ساخت راکتور های هسته ای ADS، تبدیل زباله های هسته ای می باشد. در این جا منظور از تبدیل، یک فرآیند هسته ای است که در طی آن می توان یک عنصر که آن را به عنوان زباله هسته ای می شناسیم و به دلیل نیمه عمر طولانی و مسمومیت پرتوی بالا برای انسان، سایر موجودات و محیط زندگی آنها خطرناک است، را به عنصری با نیمه عمر کوتاه و کم خطر تبدیل کنیم (۱۷). همان طور که بیان شد مهم ترین زباله های هسته ای توسط راکتورهای هسته ای امروزی ایجاد می شوند و دو دسته اند:

دسته اول: پاره های شکافت که این عناصر در قلب یک راکتور هسته ای ADS در فرآیند تبدیل، با گیراندازی نوترون و واپاشی های بتا و گاما به عنصری کم خطر و با نیمه عمر کوتاه تبدیل می شوند. به عنوان مثال مطابق فرآیندهای زیر (۱۸):

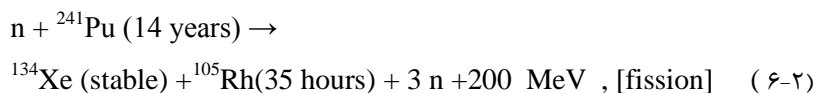
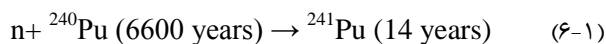
ید ۱۲۹:



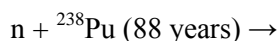
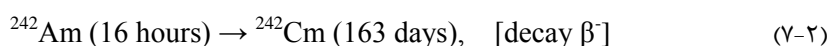
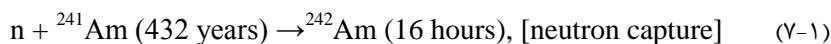
پلوتونیوم ۲۳۹:



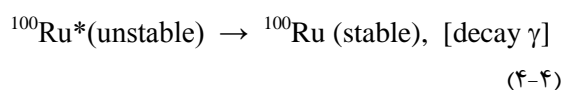
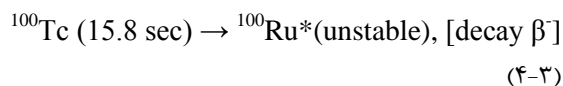
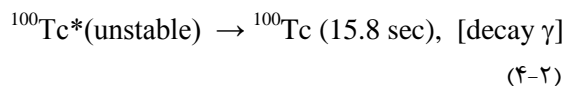
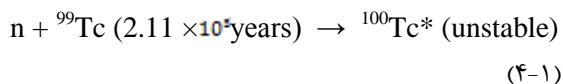
پلوتونیوم ۲۴۰:



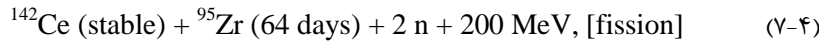
امریسیوم ۲۴۱ (Americium):



تکنیتیوم ۹۹ (Technetium 99):

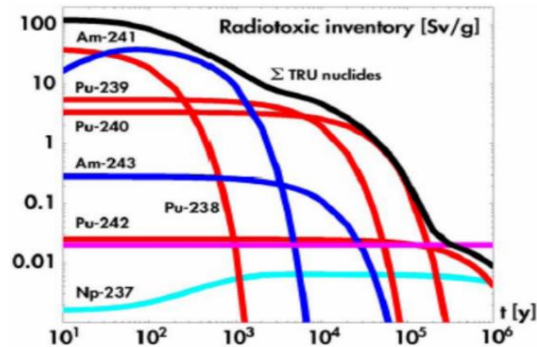


دسته دوم: عناصر فرا اورانیومی که این عناصر در قلب راکتور ADS با گیراندازی نوترون، مستقیماً شکافته شده و یا در مرحله اول به عنصری شکافت پذیر تبدیل شده و در نهایت شکافته می شوند و علاوه بر تولید انرژی، از آن ها عنصری با نیمه عمر کوتاه و مسمومیت پرتوی پایین به وجود می آید. از سویی بعضی از این عناصر با گیراندازی نوترون و گسیل پرتوهای آلفا و بتا به عنصری با نیمه عمر کوتاه تبدیل می شوند. به عنوان مثال مشابه فرآیند های زیر (۱۹):



است. طبق این نمودار به طور طبیعی با گذشت زمان، میزان تابش دهی این عناصر کاهش می یابد و نیز مشاهده می شود که بعضی از این عناصر دارای نیمه عمرهای طولانی از مرتبه 10^5 سال و بالاتر هستند (۵).

در شکل (۱۰) نمودار میزان مسمومیت پرتوی برخی از زباله-های هسته ای (عناصر فرا اورانیومی) بر حسب نیمه عمر آن ها نمایش داده شده است که در آن محور افقی نیمه عمر بر حسب سال و محور قائم میزان مسمومیت بر حسب (سیورت/گرم)



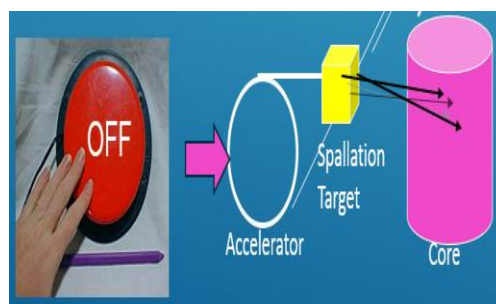
شکل ۱۰- نمودار میزان مسمومیت برخی از زباله های هسته ای (عناصر فرا اورانیومی) بر حسب نیمه عمر

Figure 10. Diagram toxicity of nuclear waste (transuranic elements) in terms of half-life

مزیت مهم یک راکتور هسته ای ADS

فعالیت راکتور در صورت بروز حادثه می توان با خاموش نمودن شتاب دهنده، فرآیند تلاشی را متوقف نمود که این به منزله غیر فعال شدن چشمه نوترون خارجی است و با این کار راکتور در حالت زیر بحرانی (حالت اولیه در غیاب چشمه نوترون خارجی) قرار می گیرد و وقوع حادثه و انفجار عملاً غیر ممکن خواهد شد (شکل ۱۱).

مهم ترین مزیت یک راکتور هسته ای ADS نسبت به سایر راکتورهای هسته ای موجود در دنیا، ایمن بودن آن است. با توجه به این که این نوع از راکتورها در غیاب چشمه نوترون خارجی به صورت زیر بحرانی عمل می کنند و در آن ها برای پایداری واکنش های زنجیره ای شکافت در قلب راکتور از چشمه خارجی تولید نوترون استفاده می شود، بنابراین در حین



شکل ۱۱- طراحی از ایمن بودن راکتور هسته ای ADS

Figure 11. The design of safe nuclear reactors ADS

بحث و نتیجه گیری

حایز اهمیت است. لذا بهتر است در مسیر توسعه این فناوری در کشور، از روش هایی استفاده شود که میزان بهره وری از این

با توجه به مزایای استفاده از فناوری صلح آمیز هسته ای در ابعاد وسیع، توسعه این فناوری برای کشورمان بسیار مهم و

- Cycles, A Comparative Study. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic and Co-operation Development, ISBN:92-64.
5. Degweker ,S . , Ghosh ,B . , Bajpai ,A . , Paranjape ,S . , 2007. The physics of accelerator driven sub-critical reactors. *Pramana* , Vol.68(2) ,pp.161-171.
 6. Dubrova ,YE . ,Nesterov , VN . , Krouchinsky ,NG . , Ostapenko ,VA . , Neumann ,R . , Neil ,DL . ,Jeffreys , AJ. , 1996. Human minisatellite mutation rate after the Chernobyl accident.
 7. Hall ,DE . , 2009. Modeling and validation of dosimetry measurement assumptions within the Armed Forces Radiobiology Research Institute TRIGA Mark F reactor and associated exposure facilities using Monte Carlo techniques.
 8. Hashemi-Nezhad ,R . , Haywood ,S . , Stepanek ,P . , Lavers ,MP . , Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy Review.
 9. Herrera-Martinez ,A . , 2004. Transmutation of nuclear waste in accelerator-driven systems: University of Cambridge.
 10. Kadi ,Y. , Revol ,J . ,2001. Design of an accelerator-driven system for the destruction of nuclear waste ,pp. 3-7.
 11. Kiselev ,G. , 1996. Current status of scientific activity in Russia on high level radioactive waste transmutation and use of weapon grade and power plutonium in subcritical systems driven by proton accelerator. *Nuclear engineering and design* , Vol.165(4) ,pp.245-258.
 12. Monti ,S. , 2000. Preliminary Neutronic Analyses of the Triga-ADS Demonstration Facility.
- فناوری را به حداکثر و اثرات سوء استفاده از آن را به حداقل برساند. یکی از روش های مفید در این مسیر، استفاده از نسل جدید راکتور های هسته ای، ADS است تا به وسیله آن بتوان علاوه بر تولید انرژی، زباله های هسته ای را به عناصر کم خطرتر و با نیمه عمر کوتاه تبدیل نمود که علاوه بر آثار زیست محیطی بسیار خوب از لحاظ اقتصادی نیز با صرفه بوده و هزینه های حاصل از نگه داری این زباله ها را کاهش می دهد. در راکتور های هسته ای ADS، به دلیل زیر بحرانی بودن آن ها احتمال وقوع سوانح هسته و در نتیجه وقوع فجایع محیط زیستی ناشی از آن بسیار پایین است. هم چنین در این نوع از راکتورها می توان از عناصر طبیعی اورانیوم ۲۳۸ و توریوم ۲۳۲ به عنوان سوخت استفاده نمود که نسبت به اورانیوم ۲۳۵ تهیه-ی آن ها آسان تر و فراوانی شان نیز بسیار بیش تر است. لذا امیدواریم در کشور ما نیز فعالیت های تحقیقاتی در زمینه ی ساخت این نسل جدید از راکتور های هسته ای آغاز گردد و ما نیز در کنار سایر کشور های دنیا به تکنولوژی ساخت چنین سیستم هایی دست یابیم و از مزایای آن ها بهره مند شویم.

Reference

1. Barros ,GP. , Pereira ,C. , Veloso ,MA. ,Costa ,AL. ,Reis ,PA. , 2010. Neutron production evaluation from a ADS target utilizing the MCNPX 2.6. 0 code. *Brazilian Journal of Physics* , Vol. 40(2) ,pp. 414-418.
2. Bowman ,CD. , 1998. Accelerator-driven systems for nuclear waste transmutation. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* , Vol. 48(2) ,pp.505-556.
3. Changizi ,S. , 2012. Neutronic Analysis of the Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA) with a Monte Carlo Code SERPENT.
4. Committee ,NNS. , 2002. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactor (FR) in Advanced Nuclear

17. Seltborg ,P. , 2005. Source efficiency and high-energy neutronics in accelerator-driven systems.
18. Sobolev ,V. , Uyttenhove ,W. , Thetford , R. , Maschek , W. , 2011. Prognosis and comparison of performances of composite CERCER and CERMET fuels dedicated to transmutation of TRU in an EFIT ADS. *Journal of Nuclear Materials* , Vol.414(2) ,pp.257-264.
19. Woddi Venkat Krishna ,T. , 2006. Reactor accelerator coupling experiments: a feasibility study: Texas A&M University.
13. Nifenecker ,H. , David ,S. , Loiseaux ,J. , Meplan ,O. , 2001. Basics of accelerator driven subcritical reactors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* , Vol. 463(3) ,pp.428-467.
14. Nifenecker ,H. , Meplan ,O. , David ,S. , 2003. Accelerator driven subcritical reactors: CRC Press.
15. Rodriguez ,C. , Baxter ,A. , McEachern ,D. , Fikani ,M. , Venneri ,F. , 2003. Deep-Burn: making nuclear waste transmutation practical. *Nuclear Engineering and Design* , Vol.222(2) ,pp.299-317.
16. Rubbia ,C. , 2009. Sub-critical Thorium reactors. CERN, Geneva, Switzerland.