

## شتابدهنده پروتونی آمیخته با راکتور زیر بحرانی

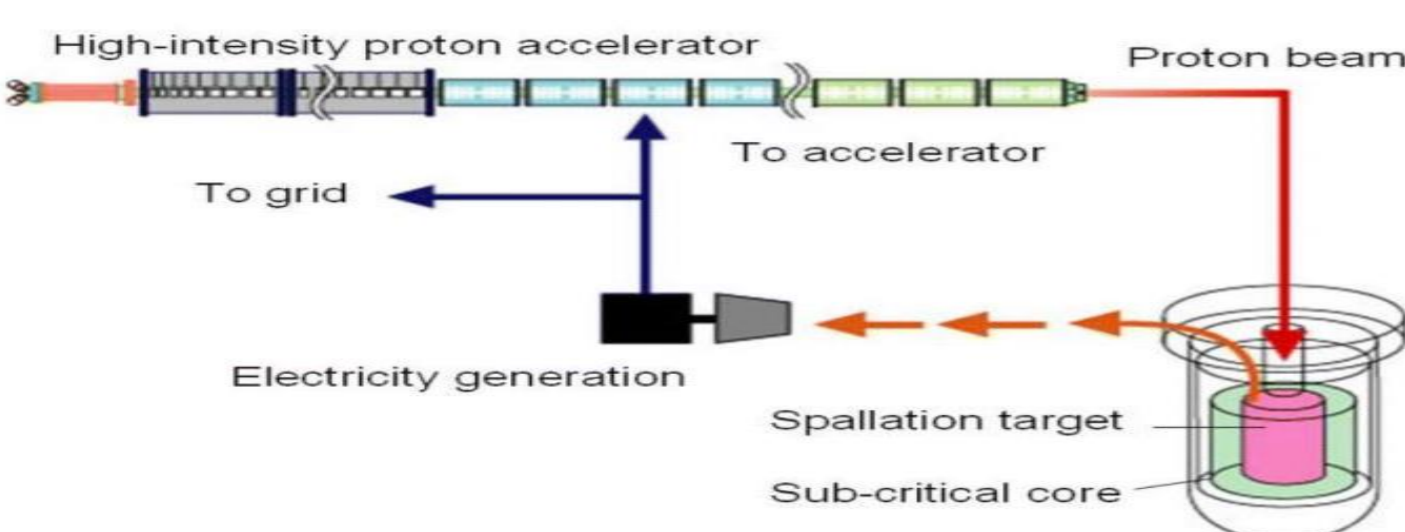
فهیمة حبیبی

دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

EMAIL: f\_habibi@birjand.ac.ir.

### سوخت راکتور با قلب زیر بحرانی در یک سیستم ADS

یک راکتور زیر بحرانی که توسط شتابگر کنترل می‌شود و همواره در حالت ایمنی قرار دارد یکی از مزیت‌های اصلی سیستم‌های ADS است. همچنین یکی دیگر از مزیت‌های آنها این است که سوخت‌هایی را می‌پذیرند که در راکتورهای دیگر قابل قبول نیستند، مانند آکتینیدهای کوچک، سوخت‌هایی با محتوای Pu بالا، و حتی قطعات ناشی از شکافت با عمر طولانی (مانند  $^{99}\text{Tc}$  و  $^{129}\text{I}$ ). به همین دلیل این سیستم‌ها به عنوان مبدل‌هایی برای کاهش نیم عمر ضایعات هسته‌ای باقی مانده از شکافت نیز معرفی می‌شوند. در واقع در این سیستم‌ها به دلیل در دسترس بودن یک طیف گسترده‌ای از انرژی نوترونها این امکان را برای محصولات شکافت که پرتودهی بالایی دارند ایجاد می‌کند تا با جذب نوترون در انرژی که سطح مقطع شکار آنها دارای رزونانس است (برای  $\text{Tc}$  انرژی حدود ۶٫۵ الکترون ولت) به حالت پایدار تبدیل شوند. از طرف دیگر انرژی تولید شده در این فرآیندها نیز قابل توجه است. شکافت ۲۸۰ کیلوگرم از چنین سوختی تولید  $2\text{ TWh}$  انرژی الکتریکی خواهد کرد. خلاصه‌ای از یک سیستم ADS در شکل ۲ آمده است. ظرفیت سیستم‌های ADS برای تبدیل ایمن و کارآمد آکتینیدهای مینور با عمر طولانی در سطح جهانی تایید شده است. این نوع راکتورها سالهاست که مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته‌اند و پروژه‌های متعددی برای آنها تعریف شده است. با این وجود، به نظر می‌رسد که احساس فوریتی وجود ندارد. منصفانه است که بگوییم که امروزه در فهرست پروژه‌های مختلف تنها پروژه C-ADS چین و پروژه MYRRHA اروپا فعال است و انتظار می‌رود هر دو در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۳ عملیاتی شوند [۳].



شکل ۲: طرح واژه‌ای از یک سیستم ADS

### بحث و نتیجه‌گیری

راکتورهای هسته‌ای از نوع ADS به دلیل داشتن هزینه پایین و تولید انرژی با حداقل آلودگی و پرتودهی شایسته توجه بیشتر می‌باشد.

### مراجع

- [1] F. Bouly, J.L. Biarrotte and C. Joly, LINAC'10, Tsukuba, September 2010, MOP082 (2011) 24.
- [2] J.L. Biarrotte, A.C. Mueller, H. Klein, P. Pierini and D. Vandeplassche, LINAC'10, Tsukuba, TUP020 (2011) 440.
- [3] D. De Bruyn, et al., Int. Workshop on Technology and Components of Accelerator Driven Systems, Karlsruhe, OECD-NEA (2011) 47.

### چکیده

راکتورهایی با قلب زیر بحرانی آمیخته با یک شتابدهنده موسوم به ADS به طور گسترده به عنوان دستگاه‌هایی برای تبدیل زباله‌های هسته‌ای و همچنین به عنوان طرح‌های مفید برای تولید انرژی در نظر گرفته می‌شوند. هدف این مقاله ارائه یک نمای کلی از الزامات شتابدهنده ADS است.

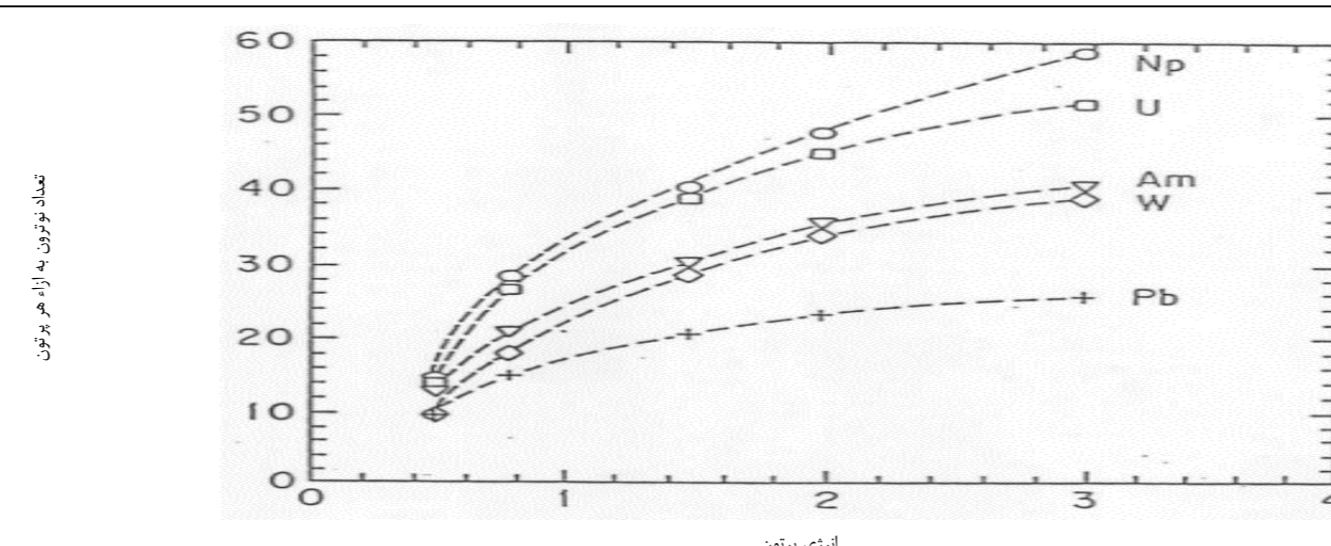
### مقدمه

در میان کاربردهای مختلف شتابدهنده‌های ذرات، تولید نوترون به وسیله‌ی برخورد پرتون شتابدار با هسته سنگین به خوبی شناخته شده است. چنین واکنشی به انرژی پروتون بالاتر از چند صد مگا الکترون ولت نیاز دارد. با این حال با انرژی پرتون در محدوده‌ی ۱ تا ۲ گیگا الکترون ولت، بهترین بازده حاصل می‌شود و ۲۰ تا ۳۰ نوترون به ازاء هر پرتون ورودی به دست می‌آید. از طرف دیگر، تحت شرایط خاص یک جمعیت نوترونی می‌تواند از طریق یک فرآیند شکافت تکثیر شود، چیزی که اساس کار یک راکتور هسته‌ای است. در مورد یک راکتور بحرانی، تعادلی بین افزایش ناشی از تکثیر و مصرف نوترون وجود دارد که منجر به یک حالت پایدار با جمعیت نوترونی غیر صفر می‌شود. چنین حالت پایداری ممکن است در یک مجموعه زیر بحرانی نیز به دست آید، به شرطی که یک منبع خارجی تولید نوترون وجود داشته باشد. در این حالت مجموعه زیر بحرانی جمعیت نوترون منبع را با ضریب  $\frac{1}{1-k_{eff}}$  تکثیر می‌کند. در اینجا  $k_{eff} < 1$  فاکتور تکثیر موثر می‌باشد. جمعیت نوترونی کل (یعنی سطح قدرت راکتور) در این مدل‌ها به وسیله‌ی شدت منبع خارجی کنترل می‌شود. توجه به چنین سیستم‌های زیر بحرانی آمیخته با شتابگر مرهون تلاش روبیا و همکارانش [۴] می‌باشد. در این مقاله سعی می‌کنیم به مزیت‌ها و سازوکار این نوع راکتورهای زیر بحرانی بپردازیم.

### جنبه‌های فیزیکی شتابدهنده در سیستم ADS

فرآیند اصلی سیستم‌های شتابدهنده، تبدیل هسته‌ای است. این فرآیند اولین بار توسط رادرفورد در سال ۱۹۱۹ نشان داده شد که با استفاده از ذرات  $\alpha$  پرانرژی  $^{14}\text{N}$  را به  $^{17}\text{O}$  تبدیل کرد. کوری و ژولیوف اولین رادیواکتیویته مصنوعی را در سال ۱۹۳۳ با استفاده از ذرات  $\alpha$  از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو طبیعی برای تبدیل بور و آلومینیوم به

آلومینیوم به نیتروژن و اکسیژن رادیواکتیو تولید کردند. تا زمانی که تنها ذرات باردار موجود، ذرات  $\alpha$  ناشی از رادیواکتیویته طبیعی بودند، امکان گسترش این نوع تغییر شکل به عناصر سنگین‌تر وجود نداشت، زیرا دافعه کولن در اطراف هسته‌های سنگین آنقدر بزرگ هستند که اجازه ورود چنین ذراتی به هسته اتم را نمی‌دهند. اختراع سیکلوترون توسط لارنس در سال ۱۹۳۹ این مانع را از بین برد و امکانات کاملاً جدیدی را فراهم کرد. هنگامی که با فرآیند تلاشی (تجزیه‌ی یک هسته بمباران شده به چند قسمت) همراه می‌شود، می‌توان از شتابدهنده‌های توان بالا برای تولید تعداد زیادی نوترون استفاده کرد، بنابراین یک روش جایگزین برای استفاده از راکتورهای انرژی هسته‌ای برای این منظور، فراهم می‌شود. فرآیند تلاشی امکانات جدید هیجان‌انگیزی را برای تولید شارهای نوترونی شدید برای اهداف مختلف ارائه می‌دهد. یکی از کاربردهای این نوع شتابدهنده‌ها در یک سیستم ترکیبی با یک راکتور زیر بحرانی موسوم به ADS است. در این سیستم شتابدهنده هدف را با پروتون‌های پرانرژی بمباران می‌کند و یک منبع نوترونی بسیار شدید از طریق فرآیند تلاشی تولید می‌شود. این نوترون‌ها سپس می‌توانند در هسته زیر بحرانی که هدف تلاشی را احاطه کرده است، تکثیر شوند. لازم به ذکر است که واکنش‌های هسته‌ای مختلفی قادر به تولید نوترون هستند. با این حال، استفاده از پروتون‌ها به عنوان پرتابه، هزینه انرژی نوترون‌های تولید شده را به حداقل می‌رساند. برای برخی از مواد هدف، نوترون‌های تلاشی کم انرژی می‌توانند تولید نوترون را از طریق واکنش‌های کم انرژی افزایش دهند. برای هسته‌های سنگین‌تر (مانند تنگستن و سرب)، انرژی بالا شکافت می‌تواند با تبخیر رقابت کند. برخی از اهداف تلاشی مانند توریم و اورانیوم ضعیف شده را نیز می‌توان بیشتر توسط نوترون‌های کم انرژی ( $< 1$  مگا ولت) شکافت کرد [۱]. از اینرو، فرآیندهای تلاشی با تولید نوترون‌های زیاد و انرژی کم در اولویت یک سیستم ADS می‌باشند. در شکل (۱) تعداد نوترون‌های تولید شده از تلاشی برای چند ماده هدف و به ازاء انرژی پرتون فرودی نشان داده شده است. علاوه بر بازده بالای تولید نوترون، خصوصیات دیگری مانند داشتن زباله‌های کم خطر ناشی از فرآیند تلاشی و توزیع گرمایی مناسب در پنجره هدف و پرتابه باید در انتخاب هدف تلاشی مورد توجه قرار گیرد. امروزه اعتقاد بر این است که سرب مذاب یا یوتکتیک سرب-بیس‌موت (LBE) بهترین انتخاب برای برآورده کردن بیشتر این الزامات است. با این حال، یک مشکل مهم با LBE، تولید پلونیوم رادیواکتیو است در حالی که سرب تولید پلونیوم بسیار کمی دارد، اما دمای عملیاتی بالاتری نیاز دارد [۲].



شکل ۱: نمودار نوترون تولید شده از برخورد پرتون‌های با انرژی‌های مختلف