



راکتورهای هیبرید همجوشی-شکافت: مروری بر اصول فیزیک، طراحی مهندسی و چالش‌های مواد

علی معروفی^۱

چکیده:

راکتورهای هیبرید همجوشی-شکافت (FFHR) به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین مفاهیم در مسیر توسعه نسل آینده سیستم‌های انرژی هسته‌ای مطرح هستند. در این ساختار، نوترون‌های پرنرزی (۱/۱۴ مگاالکترون‌ولت) حاصل از واکنش همجوشی دوتریوم-تری‌تیوم، علاوه بر تولید تری‌تیوم، واکنش‌های شکافت را در بلنک‌های زیربحرانی شامل اورانیوم-۲۳۸ و توریم-۲۳۲ تحریک می‌کنند. این رویکرد هم‌افزایانه منجر به افزایش بهره‌وری نوترونی، تولید سوخت شکافت‌پذیر درجا و کاهش پسماندهای هسته‌ای بلندعمر می‌شود. در این مقاله، اصول فیزیکی، معماری سیستم، روش‌های مدل‌سازی و چالش‌های مهندسی شامل ناپایداری‌های پلاسما، تخریب مواد تحت تابش شدید نوترونی (بیش از ۵۰ dpa) و محدودیت‌های چرخه تری‌تیوم بررسی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو نشان می‌دهد که طراحی‌های بهینه بلنک مبتنی بر توریم می‌توانند به ضریب تکثیر مؤثر حدود ۰/۹۵ و نسبت تولید تری‌تیوم بیش از ۱/۱ دست یابند. تحقق عملی این فناوری نیازمند پیشرفت در کنترل پایداری پلاسما، توسعه مواد مقاوم در برابر تشعشع و بهینه‌سازی یکپارچه سیستم است.

کلیدواژه‌ها: همجوشی-شکافت، راکتور هیبریدی، نوترون سریع، بلنک توریم، چرخه سوخت هسته‌ای، MCNP.

^۱ دانشجوی کارشناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

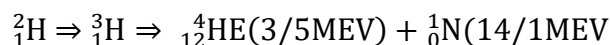
مقدمه

علیرغم سرمایه‌گذاری‌های گسترده طی پنج دهه اخیر، دستیابی به یک راکتور همجوشی با بهره انرژی پایدار ($Q > 1$) همچنان یکی از دشوارترین چالش‌های علمی و مهندسی عصر حاضر محسوب می‌شود. از سوی دیگر، راکتورهای شکافت هسته‌ای اگرچه از منظر فناوری به بلوغ قابل‌قبولی رسیده‌اند، اما با مسائل بنیادی نظیر تولید پسماندهای رادیواکتیو با نیمه‌عمر طولانی، محدودیت منابع اورانیوم قابل استخراج و نگرانی‌های ایمنی ناشی از بحرانی بودن هسته مواجه هستند. در چنین فضایی، مفهوم راکتورهای هیبرید همجوشی-شکافت به‌عنوان یک راهکار میانی مطرح شده است. ایده اصلی، بهره‌گیری از نوترون‌های پرنرزی تولیدشده در واکنش‌های همجوشی برای تحریک شکافت در مواد بارور مانند اورانیوم- ^{238}U و توریم- ^{232}Th است. این رویکرد ضمن افزایش چشمگیر بهره‌وری انرژی با (ضریب افزایش انرژی M در محدوده ۵ تا ۲۰) امکان تبدیل ایزوتوپ‌های شکافت‌ناپذیر به مواد شکافت‌پذیر و در نتیجه گسترش چشمگیر منابع سوخت هسته‌ای را فراهم می‌آورد. افزون بر اینقابلیت سوزاندن پسماندهای هسته‌ای بلندعمر، یکی دیگر از مزایای کلیدی این فناوری است.

۲- اصول فیزیکی و نوترونیک

۲-۱ واکنش همجوشی و تولید نوترون

مهم‌ترین واکنش همجوشی مورد استفاده در راکتورهای هیبریدی، واکنش بین دوتریوم و تریتیوم است. این واکنش به دلیل سطح مقطع بالا در دماهای نسبتاً پایین‌تر (حدود ۱۰ تا ۲۰ کیلوالکترون‌ولت) و تولید نوترون‌هایی با انرژی ۱۴/۱ مگاالکترون‌ولت، گزینه نخست برای کاربردهای عملی محسوب می‌شود:



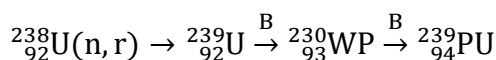
در این واکنش، ۱۷/۶ مگاالکترون‌ولت انرژی آزاد می‌شود که از این مقدار، ۳/۵ مگاالکترون‌ولت به‌صورت انرژی جنبشی به هسته هلیوم-۴ (ذره آلفا) و ۱۴/۱ مگاالکترون‌ولت به‌صورت انرژی جنبشی به نوترون داده می‌شود. این نوترون‌های پرنرزی، نقشی دوگانه ایفا می‌کنند: نخست، حفظ چرخه سوخت از طریق تولید تریتیوم در واکنش با لیتیم، و دوم، تحریک واکنش‌های شکافت در لایه‌های بارور اطراف هسته. عملکرد پلاسما با ضریب افزایش انرژی همجوشی Q مشخص می‌شود که نسبت توان همجوشی به توان ورودی برای گرمایش پلاسما است. در یک راکتور هیبریدی، به دلیل حضور شکافت، نیاز به Q بالا کاهش می‌یابد و سیستم حتی با Q در محدوده ۱ تا ۳ نیز اقتصادی خواهد بود.



۲-۲ شکافت القایی و تبدیل سوخت

نوترون‌های ۱۴/۱ مگاالکترون‌ولتی انرژی کافی برای القای شکافت در ایزوتوپ‌های بارور دارند. مهم‌ترین زنجیره‌های تبدیل سوخت عبارت‌اند از:

چرخه اورانیوم:



چرخه توریم:



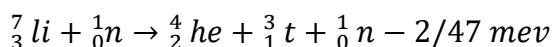
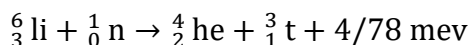
پارامتر کلیدی در تحلیل نوترونی، ضریب تکثیر مؤثر k_{eff} است که در سیستم‌های هیبریدی همواره کمتر از واحد در نظر گرفته می‌شود معمولاً ($k_{\text{eff}} < 0.95$) این شرط زیر بحرانی، مزیت ایمنی مهمی محسوب می‌شود، زیرا در صورت اختلال در منبع نوترونی همجوشی، واکنش‌های شکافت به سرعت متوقف می‌شوند. ضریب افزایش انرژی شکافت M به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$M = \frac{p_{\text{fission}}}{p_{\text{fusion}}}$$

که در طراحی‌های بهینه می‌تواند به مقادیر ۵ تا ۲۰ برسد.

۲-۳ تولید تریتیوم

یکی از الزامات اساسی در راکتورهای مبتنی بر چرخه دوتریوم-تریتیوم، تولید تریتیوم در خود راکتور است. واکنش‌های تولید تریتیوم با جذب نوترون توسط لیتیم صورت می‌پذیرد:



نسبت تولید تریتیوم (Tritium Breeding Ratio - TBR) باید همواره بیش از ۱/۰۵ باشد تا چرخه سوخت پایدار بماند. دستیابی به این نسبت، نیازمند طراحی بهینه لایه‌های تولید تریتیوم و استفاده از ضرب‌کننده‌های نوترونی مانند بریلیوم یا سرب است.

3- معماری سیستم

یک راکتور هیبریدی شامل چهار بخش اصلی است:

۱- هسته همجوشی: شامل توکامک یا استلراتور که وظیفه تولید نوترون را بر عهده دارد. توکامک رایج‌ترین طراحی بر اساس میدان مغناطیسی حلقوی است، در حالی که استلراتور با حذف نیاز به جریان پلاسمایی، پایداری ذاتی بیشتری ارائه می‌دهد.

۲- بلنکت شکافت: مهم‌ترین بخش از منظر تولید انرژی که شامل لایه‌های زیر است: دیواره اول (تحمل شار حرارتی < 1 مگاوات بر مترمربع از جنس تنگستن یا بریلیوم)، منطقه سوخت (شامل مواد بارور به شکل میله‌های سوخت یا نمک‌های مایع)، منطقه تولید تریتیوم (شامل لیتیم به شکل مذاب سرب-لیتیم یا سرامیک‌های Li_4SiO_4 و سپر محافظ (از فولاد بوردار برای محافظت در برابر تابش).

۳- سیستم انتقال حرارت: شامل مبردهایی مانند گاز هلیوم، فلزات مایع (سدیم، آلیاژ سرب-لیتیم) و آب تحت فشار. آلیاژ سرب-لیتیم به دلیل ترکیب خواص نوترونی مطلوب و ظرفیت حرارتی بالا، محبوب‌ترین گزینه است. جداسازی فیزیکی منبع نوترون از ناحیه شکافت، یکی از مزایای مهم ایمنی محسوب می‌شود.

۴- سیستم کنترل و ایمنی: شامل سیستم‌های تشخیص نشت، خنک‌کاری اضطراری و کنترل پلاσμα که برای مدیریت حوادث احتمالی و حفظ عملکرد پایدار سیستم ضروری هستند.

۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

۴-۱ معادله انتقال نوترون

پایه ریاضی تحلیل نوترونی، معادله انتقال نوترون بولتزمن است که به دلیل پیچیدگی هندسه راکتورهای هیبریدی و وجود منابع خارجی نوترون، نیازمند روش‌های عددی پیشرفته است. این معادله، شار نوترونی را بر اساس برهم‌کنش‌های جذب، پراکندگی و شکافت توصیف می‌کند.

۴-۲ شبیه‌سازی مونت‌کارلو

روش مونت‌کارلو با کدهای MCNP6 و SERPENT کاربرد گسترده‌ای در تحلیل نوترونی دارد. در این روش، با شبیه‌سازی مسیر حرکت تعداد زیادی نوترون به صورت تصادفی، می‌توان به تخمین دقیقی از شار نوترونی، دز جذب، تولید تریتیوم و توان



شکافت دست یافت. نتایج شبیه‌سازی‌های اخیر نشان می‌دهد که طراحی‌های بهینه بلنکت مبتنی بر توریم می‌توانند به ضریب تکثیر مؤثر حدود ۰/۹۵ و نسبت تولید تریتیوم بیش از ۱/۱ دست یابند.

۳-۴- کوپل پلاسما-نوترونیک

مدل‌های MHD پلاسما در کنار کدهای نوترونی، امکان شبیه‌سازی یکپارچه سیستم را فراهم می‌آورند. تغییرات در شرایط پلاسما (دما، چگالی، ناخالصی‌ها) به‌طور مستقیم بر تولید نوترون و در نتیجه بر عملکرد بلنکت تأثیر می‌گذارد. این رویکرد یکپارچه برای تحلیل دقیق عملکرد سیستم ضروری است.

۵- چالش‌های مهندسی و مواد

۱-۵- چالش‌های فیزیک پلاسما

ناپایداری‌های مغناطیسی نظیر ELMS (مدهای لبه محصورشده) و وقفه‌های ناگهانی پلاسما (Disruptions) از مهم‌ترین موانع دستیابی به عملکرد پایدار هستند. این پدیده‌ها می‌توانند به تخریب دیواره و بلنکت منجر شوند. همچنین ورود ناخالصی‌های ناشی از تبخیر بلنکت به پلاسما می‌تواند به خنک‌شدن پلاسما و کاهش تولید نوترون منجر شود.

۲-۵- چالش‌های مواد و تخریب ناشی از تابش

شار نوترونی بالا سبب ایجاد آسیب‌های ساختاری قابل توجهی می‌شود:

جابجایی اتمی (dpa): برخورد نوترون‌های سریع با اتم‌های شبکه بلوری، موجب جابجایی اتم‌ها می‌شود. در طراحی‌های فعلی، دز تجمعی می‌تواند به بیش از ۵۰ dpa برسد. فولادهای معمولی مانند EUROFER-97 تنها برای حدود ۳۰ dpa طراحی شده‌اند.

تولید گاز: واکنش‌های (n, α) و (n, p) منجر به تولید هلیوم و هیدروژن می‌شوند که با تجمع در مرزخانه‌ها، به تردشدگی و کاهش مقاومت مکانیکی منجر می‌گردند.

آسیب‌های حرارتی: چرخه‌های حرارتی مکرر و گرادیان‌های دمایی شدید، سبب ایجاد تنش‌های پسماند و خستگی حرارتی می‌شوند.

مواد کاندید شامل فولادهای فریتی-مارتنزیتی با فعال‌سازی کاهش‌یافته (RAFM) مقاوم تا ~ 300 dpa، فولادهای تقویت‌شده با اکسید پراکنده (ODS) و کامپوزیت‌های سیلیکون‌کاربید (SiC) هستند که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند.

۳-۵- چالش‌های چرخه تریتیوم

با توجه به نیمه‌عمر 12.3 ساله تریتیوم و فعالیت‌های بالای آن (حدود 0.3 وات بر گرم)، نگهداری، حمل‌ونقل و فرآوری این ایزوتوپ با چالش‌های جدی مواجه است. در یک راکتور هیبریدی با توان چند گیگاوات، حدود 100 تا 200 کیلوگرم تریتیوم در چرخه وجود دارد که نشتی حتی $1/0\%$ آن می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشد. همچنین، استخراج تریتیوم از بلنکت با خلوص بالا و بازده مناسب، نیازمند توسعه روش‌های پیشرفته غشایی و کروماتوگرافی است.

6- نتیجه‌گیری

راکتورهای هیبرید همجوشی-شکافت به‌عنوان یک فناوری انتقالی با پتانسیل بالا در مسیر توسعه سیستم‌های انرژی هسته‌ای نسل آینده مطرح هستند. این مفهوم می‌تواند افزون بر افزایش چشمگیر بهره‌وری انرژی، نقش مهمی در بهینه‌سازی چرخه سوخت، کاهش پسماندهای هسته‌ای بلندعمر و گسترش منابع سوخت ایفا کند. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهد که اصول فیزیکی و نوترونیک تأیید می‌کند استفاده از نوترون‌های $14/1$ مگاالکترون‌ولتی حاصل از واکنش D-T برای تحریک بلنکت زیربحرانی می‌تواند نیاز به Q بالا را کاهش داده و بهره‌وری سوخت را افزایش دهد. چرخه توریم مزایای قابل توجهی در زمینه منابع و کاهش خطرات اشاعه دارد. با این حال، چالش‌های اصلی در حوزه پلاسما-مواد (مدیریت وقفه‌ها و شارهای حرارتی) و مواد ساختاری (تحمل بیش از 50 dpa) متمرکز هستند. تحقق عملی راکتورهای هیبریدی نیازمند پیشرفت در سه حوزه کلیدی است: کنترل پایداری پلاسما در رژیم‌های محصورسازی پیشرفته، توسعه مواد ساختاری با مقاومت بالا در برابر تابش (تحمل بیش از 50 dpa) و حفظ خواص در دماهای بالا (تا 650 درجه سانتی‌گراد)، و بهینه‌سازی یکپارچه طراحی بلنکت با رویکرد چندمنظوره (تولید تریتیوم، تولید انرژی و مدیریت پسماند). با وجود چالش‌های فراوان، راکتورهای هیبریدی یکی از امیدوارکننده‌ترین مسیرها برای دستیابی به کاربرد عملی انرژی همجوشی در افق چند دهه آینده محسوب می‌شوند. سرمایه‌گذاری هدفمند در پژوهش‌های بنیادی و همکاری‌های بین‌المللی می‌تواند زمینه‌ساز عبور از مرحله اثبات مفهوم به نمونه‌های تجاری این فناوری نوظهور گردد.



منابع :

[1][System Studies on the Fusion-Fission Hybrid Systems and Its Fuel Cycle \(Applied Sciences, 2020\)](#)

[2][Recent Progress in Fusion-Fission Hybrid Reactor Design Studies](#)

[3][Fusion–fission hybrids revisited \(Nature Physics, ۲۰۰۹\)](#)

[4][A Review of Fusion-Fission \(Hybrid\) Concepts \(۱۹۷۳\)](#)