

انتخاب زاینده و سوخت بارور مطلوب در یک راکتور هیبریدی با بلانکتی از نوع HCPB

محمد رضا اسکندری*، یاسین، گودرزی

دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده

در این مقاله با استفاده از کد MCNPX عملکرد نوترونی بلانکت HCPB متعلق به یک راکتور هیبریدی ICF مورد بررسی قرار گرفته است تا علاوه بر میزان بهینه‌ی غنای ایزوتوپ لیتیم ۶ در ماده‌ی زاینده، پارامترهای اساسی چون میزان تولید تریتم و سوخت شکاف، میزان نشت نوترونی و ضریب تکثیر انرژی راکتور بدست آید. در نهایت براساس نوع کاربری، دو پیکربندی مطلوب پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: راکتور هیبریدی- کد مونت کارلو- زایش تریتم- زایش سوخت شکاف

مقدمه

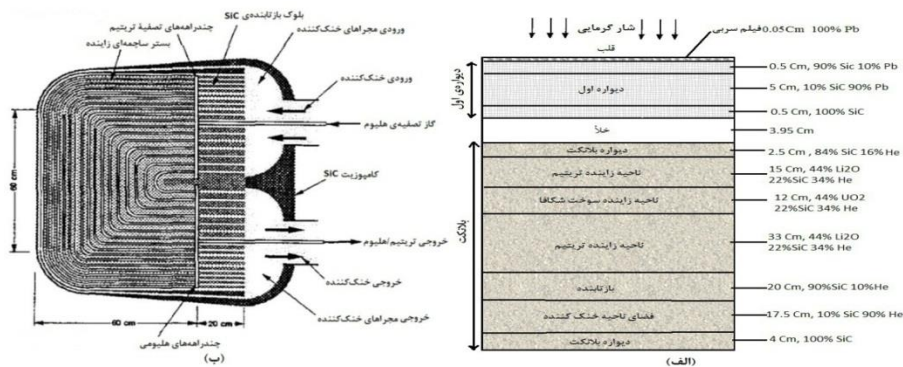
راکتورهای هیبریدی راکتورهایی با قلب همجوشی و بلانکتی زیربحرانی هستند که از آنها علاوه بر تولید انرژی، جهت تولید تریتم به عنوان سوخت همجوشی در راکتورهای همجوشی مبتنی بر سوخت دوتریم-تریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزون بر آن راکتورهای هیبریدی می‌توانند ۳۰ برابر یک راکتور زاینده‌ی سریع، سوخت شکاف تولید کند [۱]. تولید تریتم در راکتورهای هیبریدی از طریق واکنش گیراندازی (n,α) در لیتیم صورت می‌گیرد.



باتوجه به این نکته و در نظر گرفتن کندشدن نوترونها هنگام عبور از دیواره‌ی راکتور و مواد ساختاری، دستیابی به نرخ خودکفای تولید تریتم علاوه بر انتخاب نوع مواد بکار رفته در راکتور به انتخاب غنای بهینه‌ی لیتیم ۶ در ماده‌ی زاینده نیز بستگی دارد. نرخ خودکفای زایش تریتم در بسیاری از منابع ۱٫۰۵ در نظر گرفته شده است [۲]. استفاده از مواد بارور حاوی اورانیوم و توریوم علاوه بر کمک به تکثیر نوترونی و افزایش نرخ زایش تریتم منجر به تولید سوخت شکاف از طریق واکنش (n,γ) نیز می‌شود. در این مقاله به بررسی پارامترهای نوترونی از قبیل میزان غنای بهینه‌ی ایزوتوپ ۶-Li در ماده‌ی زاینده‌ی تریتم و نرخ زایش تریتم (TBR) در آن، نرخ زایش سوخت، میزان نشت نوترونی و ضریب تکثیر انرژی یک راکتور هیبریدی همجوشی به طریق محصور شدگی لختی (ICF) و بلانکت آن خواهیم پرداخت تا در نهایت از بین مواد معرفی شده، بهترین زاینده و ماده‌ی بارور انتخاب شود. محاسبات نوترونی با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX نسخه‌ی ۲٫۶ و کتابخانه‌ی داده‌های هسته‌ای TENDL۲۰۱۱ انجام شده است.

معرفی کلی راکتور شبیه‌سازی شده

راکتوری که در این پژوهش مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است، یک راکتور همجوشی به روش فشردگی لختی ۱۰۰۰ مگاواتی است که دارای شکل کلی استوانه‌ای با نسبت هندسی ۱/۵ و دو نیمکره در بالا و پایین آن است. شعاع و ارتفاع بدنه‌ی داخلی راکتور با به ترتیب برابر با ۴/۵ و ۱۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. هلیوم نیز با فشار ۱۵ اتمسفر به عنوان خنک‌کننده‌ی گازی در نظر گرفته شده است. از کامپوزیت SiC/SiC بدلیل خواص خوب کندکنندگی و بازتابندگی نوترون، بازدهی گرمایی بالا، مقاومت بالا در برابر گرما و خوردگی و دارا بودن کمترین فعالسازی القایی در اثر بمباران نوترون‌های 14MeV ناشی از انفجار قرص، به عنوان ماده‌ی ساختاری استفاده شده است [۳]، قرص سوخت راکتور دارای پیکربندی دوجداره و پارامتر ρR برابر $1/35\text{ g/cm}^2$ در نظر گرفته شده است و توان ناشی از انرژی نوترون‌ها ۱۸۱۸ مگاوات می باشد [۴]. در طراحی دیواره‌ی اول، از طرح دیواره‌ی مرطوب به همراه محافظ فیلم سرب مایع استفاده شده است [۵]. بلانکت راکتور از نوع بلانکت برپایه‌ی بستر ساچمه‌های زاینده‌ی جامد با گاز خنک کننده و تهویه‌ی هلیومی است که به اختصار HCPB^1 خوانده می‌شود، شکل (۲).



شکل ۱- الف) ضخامت و درصد حجمی مواد تشکیل دهنده‌ی بلانکت (ب) مقطع عرضی یک ماژول بلانکت

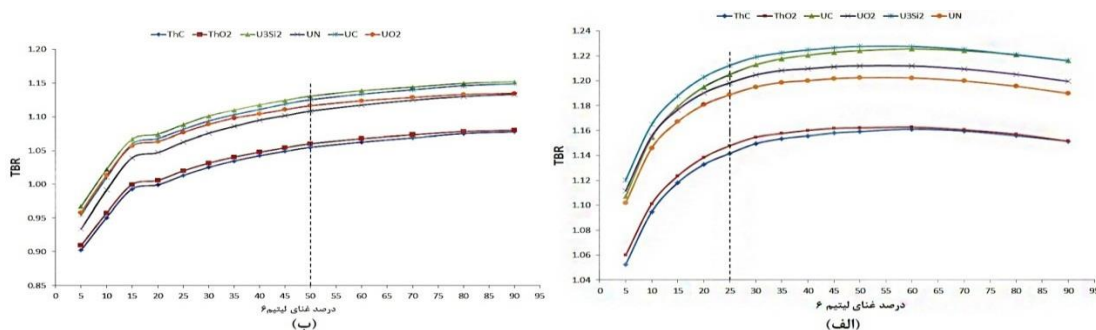
کل ناحیه‌ی زاینده‌ی تریتم از ساختاری لایه‌ای-ساندویچی برخوردار است که با افزایش فاصله از قلب راکتور، ضخامت ماده‌ی زاینده نیز افزایش می‌یابد. از دو نوع ساچمه‌ی سرامیکی زاینده Li_2O و Li_4SiO_4 که دارای بیشترین چگالی لیتیم در بین سرامیک‌های زاینده و خواص خوب مکانیکی و حرارتی می‌باشند، به عنوان مواد کاندیدای زاینده‌ی تریتم استفاده شده است. ضریب به هم پکیدگی ساچمه‌های Li_2O ، Li_4SiO_4 به ترتیب ۸۰ و ۶۴/۵ درصد می‌باشد که در محاسبه‌ی چگالی نسبی آنها مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. ناحیه‌ی زاینده‌ی سوخت شکافا تنها در پوشش استوانه‌ی بلانکت قرار داده می‌شود. ناحیه‌ی مذکور از شبکه‌ای شش گوشه با طول گام $1/2$ تشکیل شده است که میله‌های سوخت با طول $4/5$ متر و قطر داخلی و خارجی $1/1$ و $1/12$ Cm، غلاف سوخت (SiC) و خنک کننده‌ی He آن را پر کرده‌اند. گیراندازی تابشی نوترون در تورنیوم ^{232}Th و اورانیوم ^{238}U به ترتیب منجر به تولید سوخت‌های شکافای اورانیوم ^{233}U و پلوتونیوم ^{239}Pu می‌شود. لذا ماده‌ی که به عنوان کاندیدای

¹ . Helium Cooled Pebble Based

زاینده‌ی سوخت شکافا در نظر گرفته شده اند عبارتند از UO_2 ، ThC ، U_3Si_4 و U_3Si_4 که علاوه بر خواص مکانیکی و حرارتی خوب، دارای چگالی سوخت بالا و خواص بازتابندگی نوترونی خوب هستند.

نتایج

در این پژوهش با تغییر میزان غنای ایزوتوپ $Li-6$ در ماده‌ی زاینده و بررسی تغییرات پارامترهای نوترونی به کاوش غنای بهینه‌ی ایزوتوپ $Li-6$ می‌پردازیم. کمترین میزان غنای $Li-6$ در نظر گرفته شده ۰.۵٪ اتمی و گامهای افزایش غنا نیز ۵ درصد می باشد. در شکل‌های ۲ تا ۵ نمودار تغییرات پارامترهای مورد مطالعه بر حسب غنای $Li-6$ از جمله زایش تریتم و سوخت شکافا نشان داده شده است.

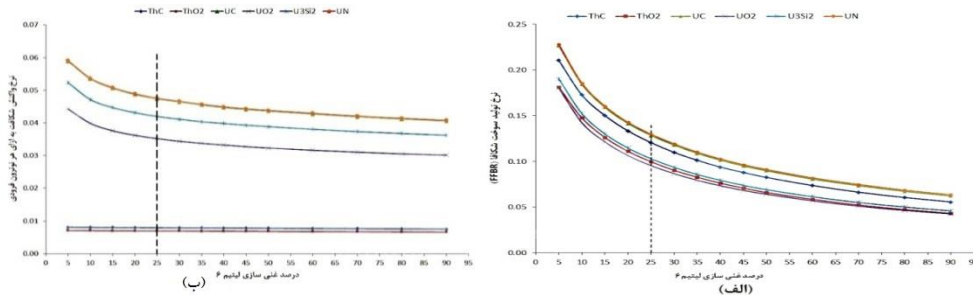


شکل ۲- نمودار نرخ زایش تریتم در حضور هر سوخت بارور برای الف) زاینده Li_2O ب) زاینده Li_4SiO_4

دیده می شود که در هر دو سرامیک زاینده، نرخ زایش تریتم روند مشابهی را برای تمام سوخت‌های بارور نشان می‌دهد. افزایش غنای $Li-6$ منجر به گیراندازی نوترونی بیشتر در $Li-6$ و گیراندازی کمتر در $Li-7$ می‌شود که ناشی از افزایش چگالی ذره ای $Li-6$ و کاهش چگالی ذره‌های $Li-7$ و همچنین کاهش طیف نوترونهای سریع در اثر افزایش برخورد‌های غیرکشسان نوترونهای سریع با $Li-6$ است. لذا انتظار داریم رفتار TBR ناشی از رقابت واکنش‌های T_6 و T_7 باشد. در مورد Li_2O تا غنای ۶۰ درصد نمودارها روندی صعودی دارند و از ۶۰ درصد به بعد TBR کاهش می‌یابد. همچنین افزایش TBR از غنای ۲۵ درصد تا ۶۰ درصد بسیار کم است، بطوریکه بیشترین میزان تغییرات TBR حدود ۱٫۷ درصد بیشینه است. ضمن آنکه بیشترین میزان TBR یعنی ۱٫۲۱۱ در سوخت U_3Si_4 رخ می‌دهد. در مورد زاینده‌ی Li_4SiO_4 اگرچه نمودار TBR روند صعودی خود را حفظ می‌کند، اما تغییرات TBR از غنای ۵۰ درصد به بالا بسیار کم و حدود ۲٫۳ درصد است. شکل (۲). نرخ خودکفای تریتم برای سوخت‌های اورانیومی در غنای ۲۵ درصد و برای سوخت‌های توریومی در غنای بیش از ۵۰ درصد رخ می‌دهد. در شکل‌های (۳) تا (۵) تغییرات نرخ واکنش شکافت، نرخ زایش سوخت شکافا بر واحد سانتیمترمکعب و میزان نشت نوترونی بر واحد سانتیمتر مربع و ضریب تکثیر انرژی راکتور آمده است. مطابق این نمودارها، باز هم تغییرات اندک تمام پارامترها از غنای ۲۵ درصد به بعد در زاینده‌ی Li_2O و Li_4SiO_4 در درصد در زاینده‌ی Li_4SiO_4 در حضور تمامی سوخت‌های بارور باز هم مشاهده می‌شود. به این ترتیب غنای

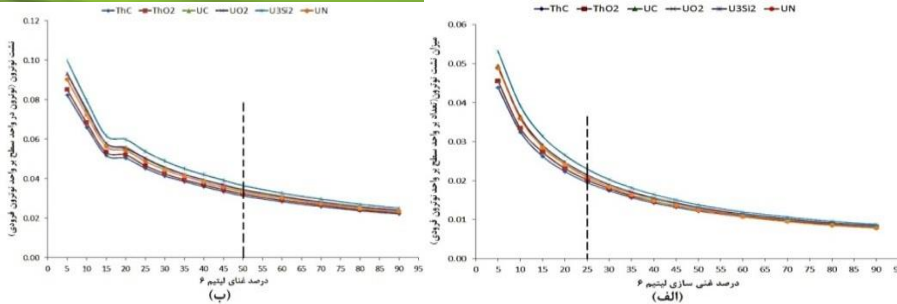


بهینه‌ی ایزوتوپ $Li-6$ برای زاینده‌ی Li_2O برابر ۲۵ درصد اتمی و برای زاینده‌ی Li_4SiO_4 حدود ۵۰ درصد اتمی خواهد بود.



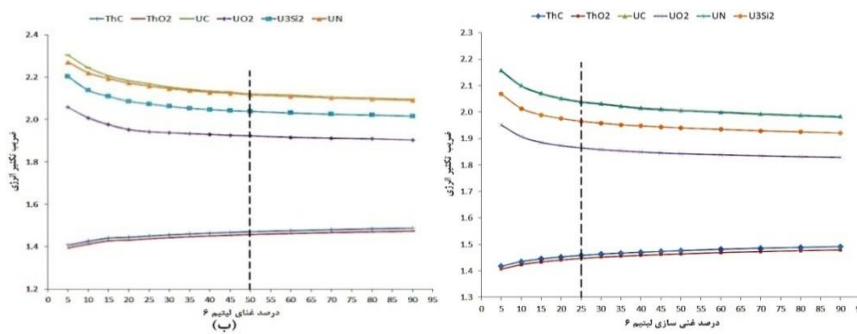
شکل ۳- نمودار (الف) زایش سوخت شکافا (ب) نرخ شکافت در حضور هر سوخت بارور برای زاینده Li_2O

در شکل (۳) تغییرات نرخ زایش سوخت شکافا و میزان شکافت بر واحد حجم بلانکت در حضور زاینده‌ی Li_2O آمده است. نمودارها در صورت حضور سرامیک Li_4SiO_4 بسیار مشابه هستند و تنها اندکی به سمت بالا شیف‌ت پیدا می‌کنند. با افزایش غنای $Li-6$ و افزایش جذب نوترون در لیتیم، نرخ تولید سوخت شکافا و همچنین میزان شکافت در تمامی انواع سوخت بارور، کاهش می‌یابد. سطح مقطع شکافت اورانیوم بسیار بیشتر از توریوم است که منجر به جدایی کامل نمودار نرخ شکافت متعلق به آنها خواهد شد. مشخصاً کاهش میزان گیراندازی تابشی در تمامی سوختها بسیار چشمگیرتر از کاهش میزان شکافت در آنها است که منجر به کاهش ممتد پارامتر Γ (نسبت گیراندازی به شکافت) با افزایش غنای $Li-6$ شده و خود باعث کاهش بازدهی راکتور در تولید سوخت می‌گردد. علاوه بر آن با توجه به برابری تقریبی سطح مقطع گیراندازی تابشی توریوم و اورانیوم (بجز در ناحیه‌ی حرارتی) نرخ گیراندازی تقریباً مستقل از نوع سوخت بارور بوده و بیشتر تابع نوع سرامیک زاینده و چگالی ذره‌ای اتمهای بارور در هر سوخت است. به این ترتیب بیشترین میزان نرخ شکافت و گیراندازی در سرامیک Li_4SiO_4 و سوختهای UC و UN حاصل می‌شود. با افزایش غنای $Li-6$ و افزایش جذب نوترونی انتظار می‌رود که میزان نشت نوترونی از راکتور کاهش یابد که این امر در شکل (۴) مشهود است. نشت نوترونی سوختهای بارور متفاوت بسیار نزدیک به هم بوده و جالب توجه است که کمترین نشت در زاینده‌ی Li_2O و سوخت‌های توریومی حاصل می‌شود.



شکل ۴- نمودار نشت نوترونی راکتور برای الف) زاینده Li_2O ب) زاینده Li_2SiO_4

ضریب تکثیر انرژی راکتور (M) به صورت نسبت انرژی جذب شده در بلانکت به متوسط انرژی نوترونهای فرودی بر آن تعریف می شود که عوامل اصلی تعیین کننده آن میزان شکافت، میزان واکنش T_6 و میزان واکنش TV هستند. دو عامل اول بویژه میزان شکافت، نقشی مثبت و عامل سوم نقشی منفی در افزایش ضریب تکثیر انرژی راکتور دارند. در مورد سوختهای اورانیومی میزان شکافت بالاتر از سوختهای توریومی بوده و عاملی غالب در ضریب تکثیر انرژی راکتور به حساب می آید، درحالیکه در سوختهای توریومی T_6 و TV عامل غالب در رفتار ضریب تکثیر انرژی هستند، شکل (۵).



شکل ۵- نمودار تغییرات ضریب تکثیر انرژی راکتور برای الف) زاینده Li_2O ب) زاینده Li_2SiO_4

به این ترتیب با افزایش میزان غنای ${}^6\text{Li}$ در مادهی زاینده ضریب تکثیر انرژی در سوختهای اورانیومی کاهش و در سوختهای توریومی افزایش می یابد. بیشترین ضریب تکثیر انرژی در زاینده Li_2SiO_4 و بکارگیری سوختهای UC و UN حاصل می شود. در این حالت ضریب تکثیر انرژی راکتور در غنای ۲۵٪، ۲/۱۷ است. قابل ذکر است که نرخ زایش تریتم و ضریب تکثیر انرژی راکتور همجوشی خالص مشابه با زایندهی اکسید لیتیم، ۱/۲ و ۱/۱۴ است [۷]. بمنظور صحت سنجی، مقایسه ای با نتایج مقاله ی Yapici [۸] که به روش حل عددی معادله ی ترابرد نوترون توسط کد XSDRNPM و استفاده از زاینده ی Li_2O حاصل شده است انجام شد که بیانگر توافق بسیار خوب بین آنهاست، جدول (۱).



جدول ۱- صحت سنجی نتایج

ماده زاینده	سوخت بارور	MCNPX v.2.6								
		T6	T7	TBR	شکافت	FFBR	Γ	M	نشت	
Li ₂ O (25%)	ThC	1.062	0.080	1.142	0.00794	0.120	15.169	1.459	0.01948	
	ThO ₂	1.068	0.080	1.148	0.00694	0.099	14.317	1.447	0.02019	
	U ₃ Si ₂	1.131	0.080	1.211	0.04197	0.103	2.448	1.965	0.2297	
	UC	1.125	0.080	1.205	0.04737	0.128	2.707	2.040	0.2137	
	UN	1.109	0.079	1.189	0.04754	0.130	2.727	2.037	0.2088	
	UO ₂	1.118	0.080	1.198	0.03520	0.095	2.706	1.865	0.2154	
	XSDRNPM [8]									
			T6	T7	TBR	شکافت	FFBR	Γ	M	نشت
		ThC	1.141	0.061	1.202	0.00844	0.140	16.588	1.492	0.02250
		ThO ₂	1.144	0.060	1.204	0.00720	0.125	17.361	1.480	0.02180
	U ₃ Si ₂	1.211	0.060	1.271	0.04250	0.130	3.059	2.003	0.02560	
	UC	1.204	0.060	1.264	0.04863	0.160	3.290	2.088	0.02350	
	UN	1.185	0.059	1.244	0.04966	0.169	3.403	2.097	0.02350	
	UO ₂	1.202	0.060	1.262	0.03532	0.119	3.369	1.899	0.2350	

نتیجه گیری

با توجه به آنچه گفته شد و در نظر گرفتن هزینه‌ی غنی سازی می توان غنای ۲۵ درصد را در زاینده Li₂O و غنای ۵۰ درصد را در زاینده Li_۴SiO_۴ به عنوان غنای بهینه ۶-Li در نظر گرفت. در این غنا نه تنها قادر به تولید بیش از ۹۸ درصد بیشینه‌ی تریتم قابل حصول در راکتور هستیم بلکه سایر پارامترها نیز در میزان مطلوبی قرار دارند. اگر میزان TBR مهم باشد، سرامیک Li₂O در غنای ۲۵ درصدی ۶-Li و سوخت UC به عنوان گزینه‌های مناسب ماده‌ی زاینده و سوخت بارور در نظر گرفته می‌شوند (نرخ زایش تریتم ۱/۲۰۵، ضریب تکثیر انرژی ۲/۰۴ و میزان تولید سوخت شکافا ۱۲۸/۰ است). اما اگر ضریب تکثیر انرژی بالاتر (۲/۱۷)، میزان تولید سوخت شکافای بالاتر و خواص فیزیکی حرارتی عالی مد نظر باشد، سرامیک Li_۴SiO_۴ با غنای ۲۵ درصدی ۶-Li و سوخت بارور UC پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [۱] E.Teller, Fusion Magnetic Confinement, Vol. ۱, part B. Academic Press, (۱۹۸۱)
- [۲] L. El-Guebaly, TBR Requirement, ARIES-TNS Metting, San Diego, (۲۰۰۷).
- [۳] M.E. Sawan, et al., Damage production and accumulation in SiC structure in ICF and MCF, Nuclear Materials, vol ۴۱۷, p ۴۴۵-۴۵۰, (۲۰۱۱)
- [۴] B. Badgar and et al., Preliminary Concetual Design of SIRIUS, A Symmetric Illumination, Direct Drive Laser Fusion Reactor, Wisconsin university report, UWFD-۵۶۸, (۱۹۸۴)
- [۵] G. McCracken, P.Stott, Fusion: The energy of the universe, Elsevier Academic Press, (۲۰۰۵)
- [۶] A. Abdou-Sena and et al., Effective conductivity of lithium pebble beds, Fusion Science and Technology, vol ۴۷, p ۱۰۹۴-۱۱۰۰, (۲۰۰۵)
- [۷] Waganer L.M. et al., Inertial fusion energy reactor design studies: Prometheus-L & Prometheus-H, McDonnell Douglas Company Rep., MDC ۹۲E۰۰۰/DOE/ER-۵۴۱۰۱(۱۹۹۲)
- [۸] H. Yapici and et al., Neutronic performance of Prometheus reactor, Annals of nuclear energy, vol. ۲۹, p ۱۸۷۱-۱۸۸۹, (۲۰۰۲)