

## بررسی محدودیت‌های تحلیل نوترونی بر طراحی و عملکرد پوشش‌های زاینده HCCR توکامک‌های دمو

راحله زادفتح‌اله صیقلانی<sup>۱\*</sup>، محمود صداقتی‌زاده<sup>۱</sup>، حسین صادقی<sup>۲</sup>

۱. فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۴۴۱۶-۱۵۴۱۸، تهران- ایران  
۲. مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران- ایران

### چکیده

بهبودسازی پوشش زاینده توکامک‌های دمو به منظور فراهم نمودن همزمان شرایط خودنگهدار در تولید تریتمیم و بازده بالا در تولید انرژی، ضروری است. در این بررسی تحلیل نوترونیکی پوشش زاینده HCCR با استفاده از کد مونت کارلو تراپرد سه‌بعدی MCNPX.2.6.0 و کتابخانه ENDF انجام شده است. در زاینده‌های سرامیکی پوشش‌های زاینده، افزایش درصد غنای لیتیم در ضخامت اشباع، سهم  ${}^6\text{Li}$  را در تولید تریتمیم کاهش می‌دهد. بنابراین در زاینده‌های سرامیکی درصد غنای لیتیم را ۳۰٪ تا ۶۰٪ در نظر می‌گیرند. نتایج محاسبات نوترونی در هندسه مورد بررسی که از زاینده سرامیکی  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  استفاده می‌کند، نشان می‌دهند که استفاده از لیتیم با درصد غنای حدود ۵۰٪ منجر به نتایجی می‌شود که شرط تولید خودنگهدار تریتمیم و تکثیر انرژی برقرار است. در این مطالعه پارامترهای نوترونیکی پوشش زاینده HCCR از قبیل شار و طیف نوترون، نسبت زایش تریتمیم، انباشت انرژی و ضریب تکثیر انرژی محاسبه و اثر غنای  ${}^6\text{Li}$  بر این پارامترها بررسی گردیده است.

**کلیدواژه‌ها:** توکامک‌های دمو، پوشش زاینده، محاسبات نوترونیکی، نسبت زایش تریتمیم، انباشت انرژی.

## Neutronic constrains impact on the design and performance of HCCR breeding blankets for DEMO tokamaks

R. Zadfathollah Seighalani<sup>1\*</sup>, M. Sedaghatizade<sup>1</sup>, H. Sadeghi<sup>2</sup>

1. Department of Physics, K. N. Toosi University of Technology, P.O.BOX: 15418-49611, Tehran, Iran.  
2. Department of Physics and Energy Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O.BOX: 15875-4413, Tehran, Iran.

### Abstract

It is necessary to optimize the breeding blanket of DEMO tokamaks to provide both self-sustaining conditions in the tritium production and high efficiency in energy production. This study is devoted to the neutronic analysis of HCCR breeding blanket using the 3D Monte Carlo code MCNPX.2.6.0 and the ENDF library. In ceramic breeders at the saturated thickness, increasing the enrichment of Li reduces the share of  ${}^6\text{Li}$  in tritium production. Therefore, solid breeders typically use lower enriched Li from 30 to 60%. The results of neutronic computation in the studied geometry with  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramic breeder show that the enrichment of about 50% for Li leads to the results that the condition of self-sustaining tritium production and energy multiplication are established. In this paper, neutronic analysis is performed by measuring neutron flux and spectrum, Tritium Breeding Ratio, energy deposition, Energy Multiplication Factor, and the effect of  ${}^6\text{Li}$  percentage on these parameters.

**Keywords:** DEMOnstration Tokamak, Breeding Blanket, Neutronic Analysis, TBR, Energy Deposition

\* Email: zadfathollah@email.kntu.ac.ir

## ۱. مقدمه

برای تأمین نیاز روزافزون بشر به انرژی و کاهش مشکلات عدیده زیست‌محیطی، ضروری است که از ترکیب منابع انرژی و به اصطلاح از سبب انرژی استفاده شود. لازمه توسعه‌یافتگی و رشد پایدار یک کشور، تلاش در جهت تنوع‌بخشی در استفاده از منابع انرژی موجود است. در آینده نزدیک، گداخت هسته‌ای می‌تواند، در کنار سایر منابع انرژی، به‌عنوان منبع انرژی تمام‌ناشدنی، ایمن و پاک در نظر گرفته شود. مناسب‌ترین روش محصورسازی گداخت هسته‌ای، محصورسازی به‌روش مغناطیسی، MCF<sup>۱</sup>، است. تلاش جامعه جهانی در پروژه بین‌المللی ITER<sup>۲</sup> شاهدی بر این مدعا است. طراحی مفهومی راکتورهای گداخت نمایشی دمو<sup>۳</sup>، پل ارتباطی بین ITER و نیروگاه‌های گداخت آینده است [۱].

یکی از اجزای اصلی راکتورهای گداخت، پوشش زاینده<sup>۴</sup> تریتم احاطه‌کننده پلاسماست که در ساخت آن از ترکیبات شامل Li به‌منظور تولید تریتم و Pb یا Be به‌عنوان تکثیرکننده نوترون استفاده می‌شود [۲]. پوشش‌های زاینده دارای سه نقش کلیدی تولید خودنگهدار تریتم موردنیاز واکنش گداخت، برداشت گرمای تولیدشده به‌منظور تولید الکتریسیته و ممانعت از خروج نوترون‌ها و آسیب رساندن به اجزای بیرونی راکتور هستند [۳]. رویکرد کنونی در ساخت این جز از توکامک، استفاده از چندین ماژول<sup>۵</sup> است [۴]. در حال حاضر انواع مختلفی از پوشش‌های زاینده در حال بررسی و مطالعه است [۵] از جمله: HCLL [۳]، WCLL [۶]، HCPB [۷]، DCLL [۸].

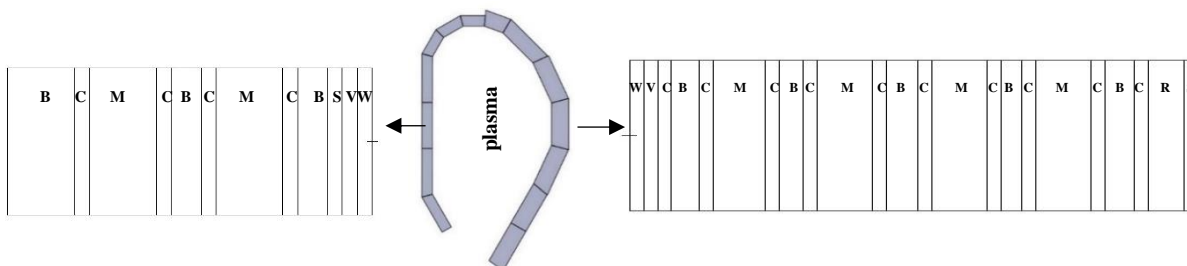
به‌منظور فراهم نمودن همزمان شرایط خودنگهدار در تولید تریتم و بازده بالا در تولید انرژی، بهینه‌سازی در انتخاب مؤلفه‌ها (زاینده‌های تریتم، تکثیرکننده‌های نوترون، خنک‌کننده‌ها و مواد ساختاری) و ساختار هندسی پوشش زاینده ضروری است. تعیین ضخامت مناسب پوشش زاینده برای تولید تریتم و همچنین ایجاد سپر محافظتی به‌منظور جلوگیری از نشت نوترون‌ها و آسیب رساندن به اجزای بیرونی توکامک، ضروری است [۹]. همچنین نقش نوترون‌ها در پوشش‌های زاینده موجب گردیده که تحلیل نوترونیکی [۱۰] پوشش‌های زاینده در کنار تحلیل مکانیکی و گرمایی [۱۱] این بخش از راکتورهای گداخت مورد توجه قرار گیرد.

در این بررسی، پارامترهای نوترونیکی پوشش‌های زاینده HCCR<sup>۶</sup> از قبیل نرخ زایش تریتم (TBR<sup>۷</sup>)، انباشت انرژی و ضریب تکثیر انرژی (EMF<sup>۸</sup>) محاسبه و تأثیر درصد غنای <sup>۶</sup>Li بر روی آنها بررسی شده است [۱۲]. برای انجام محاسبات نوترونی، از کد مونت‌کارلو تراپد سه‌بعدی MCNPX.2.6.0 [۱۳]، و کتابخانه ENDF استفاده شده است.

## ۲. محاسبات نوترونیکی

### ۱۰۲ مدل شبیه‌سازی شده

پوشش زاینده HCCR ساخت کشور کره است که در توکامک دمو K-DEMO مورد استفاده قرار خواهد گرفت. مدل شبیه‌سازی شده ماژول میانی پوشش داخلی و خارجی<sup>۹</sup> در شکل ۱ مشاهده می‌شود. ضخامت لایه‌های مختلف ماژول میانی پوشش‌های داخلی و خارجی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. مدل شبیه‌سازی شده ماژول میانی پوشش زاینده HCCR با استفاده از کد MCNPX

B: زاینده تریتم، M: تکثیرکننده نوترون، C: خنک‌کننده، W: تنگستن، V: وانادیم، S: ماده ساختاری، R: بازتابنده نوترون

<sup>1</sup> Magnetic Confinement Fusion  
<sup>2</sup> International Nuclear Fusion Research  
<sup>3</sup> DEMOnstration tokamaks  
<sup>4</sup> Breeding Blankets: BB  
<sup>5</sup> Multi Module Segmentation: MMS  
<sup>6</sup> Helium Coolant Ceramic Reflector  
<sup>7</sup> Tritium Breeding Ratio  
<sup>8</sup> Energy Multiplication Factor  
<sup>9</sup> Inboard (IB) and Outboard (OB) blanket

جدول ۱. ضخامت لایه‌های مختلف ماژول میانی پوشش زاینده داخلی و خارجی [۱۲]

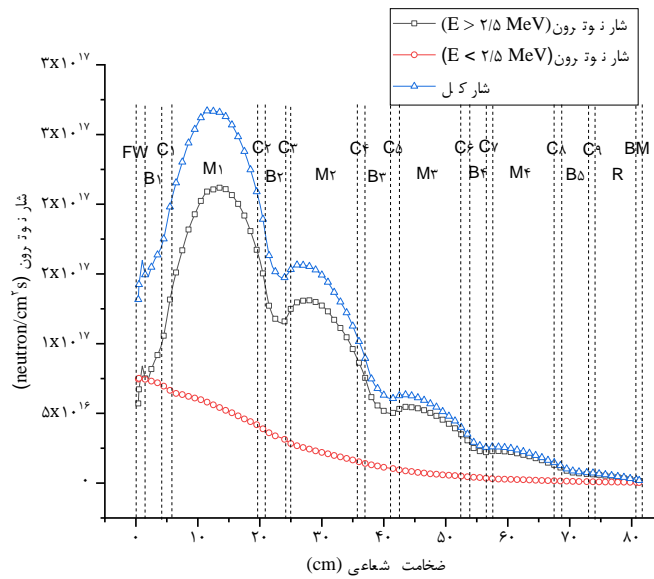
ضخامت (cm)		چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ناحیه شعاعی
پوشش خارجی	پوشش داخلی		
۰/۴	۰/۴	۱۹/۳	تنگستن (W)
۰/۱	۰/۱	۶/۰۰	وانادیم (V)
۱/۰	۰/۵	۵/۹۲	دیواره اول <sup>۱</sup> (FW)
۳/۰	۴/۰	۱/۹۴	اولین زاینده تریتم
۱/۰	۱/۰	۵/۱۰	خنک کننده
۱۴/۰	۱۶/۰	۱/۱۷	اولین تکثیرکننده نوترون
۱/۰	۱/۰	۵/۱۰	صفحه خنک کننده
۳/۵	۴/۰	۱/۹۴	دومین زاینده تریتم
۱/۰	۱/۰	۵/۱۰	خنک کننده
۱۱/۰	۱۱/۰	۱/۱۷	دومین تکثیرکننده نوترون
۱/۰	۱/۰	۵/۱۰	خنک کننده
۴/۵	۹/۰	۱/۹۴	سومین زاینده تریتم
۱/۰		۵/۱۰	خنک کننده
۱۰/۰		۱/۱۷	سومین تکثیرکننده نوترون
۱/۰		۵/۱۰	خنک کننده
۳/۰		۱/۹۴	چهارمین زاینده تریتم
۱/۰		۵/۱۰	خنک کننده
۱۰/۰		۱/۱۷	چهارمین تکثیرکننده نوترون
۱/۰		۵/۱۰	خنک کننده
۴/۲۵		۹۴	پنجمین زاینده تریتم
۱/۰		۵/۱۰	خنک کننده
۷/۰		۱/۷۸	بازتابنده نوترون
۰/۴۵		۸/۰	اتصال دهنده انتهایی
۸۱/۲	۴۹		ضخامت کل

در این نوع پوشش دیواره اول از جنس تنگستن (W)، وانادیم (V)، و استیل SS316 به عنوان ماده ساختاری، زاینده تریتم از جنس  $Li_2O Ti$  و تکثیرکننده نوترون از جنس Be است. به منظور جلوگیری از نشت نوترون به قسمت‌های خارجی راکتور و کاهش آسیب‌های تابشی، در پوشش زاینده خارجی از گرافیت به عنوان بازتابنده نوترون استفاده شده است. در این مدل زاینده‌های تریتم و تکثیرکننده‌های نوترون با ضخامت‌های مختلف به طور یک در میان در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. توان هسته‌ای راکتور گداخت  $2200 MW$  متناظر با  $6/26 \times 10^{20} n/s$  است [۱۴].

## ۲.۲ محاسبه شار و طیف نوترون

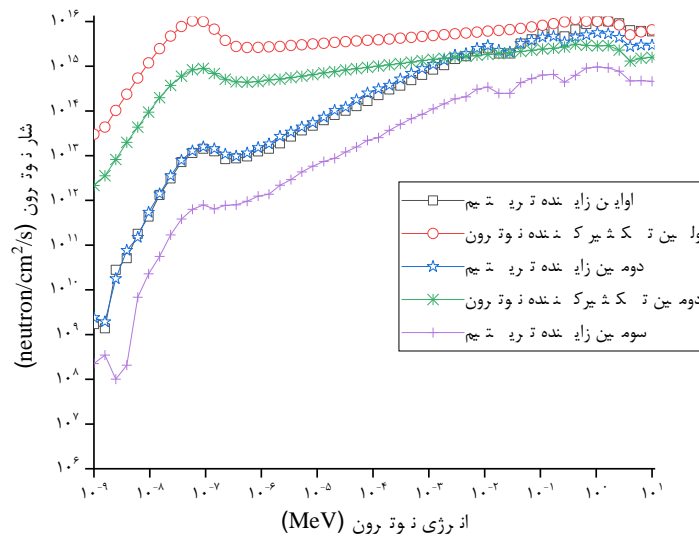
شار نوترون یکی از کمیت‌های اساسی در بررسی پاسخ هسته‌ای پوشش‌های زاینده است. سایر کمیت‌های نوترونیکی از قبیل TBR با ضرب شار در سطح مقطع واکنش محاسبه می‌گردند. توزیع شار نوترون‌ها در ماژول میانی پوشش زاینده خارجی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد شار نوترون در تکثیرکننده‌های نوترون به دلیل واکنش  ${}^9Be(n, \alpha){}^6He$  افزایش می‌یابد. از طرفی در زاینده‌های تریتم شار نوترون به دلیل واکنش  ${}^6Li(n, T)$  کاهش می‌یابد.

<sup>1</sup> First Wall



شکل ۲. توزیع شار نوترون در ماژول میانی پوشش زاینده خارجی

طیف انرژی نوترون‌ها در سلول‌های زاینده تریتمیم و تکثیرکننده نوترون ماژول میانی پوشش داخلی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، نوترون‌های با انرژی کمتر از ۱ MeV به دلیل واکنش تکثیر نوترون  ${}^9\text{Be}(n, \alpha){}^6\text{Li}$  افزایش می‌یابند. از آنجا که سطح مقطع واکنش  $(n, t)$  برای نوترون‌های کم‌انرژی از سطح مقطع این واکنش برای نوترون‌های پرانرژی بیشتر است، نوترون‌های کم‌انرژی در زایش تریتمیم مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۳. طیف نوترون در هر یک از سلول‌های ماژول میانی پوشش داخلی

### ۳.۲ نرخ زایش تریتمیم

یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین الزامات راکتورهای گداخت آزمایشی دمو، دستیابی به شرایط خودنگهدار تولید تریتمیم است. برای برقراری این شرط باید  $TBR > 1/0.5$  باشد. از جمله پارامترهای اثرگذار بر روی این کمیت می‌توان به درصد غنای  ${}^6\text{Li}$ ، عمق شعاعی ناحیه زاینده و نوع ماده به کاررفته به عنوان زاینده تریتمیم اشاره کرد [۱۵].

با افزایش ضخامت لایه زاینده، TBR افزایش می‌یابد تا در ضخامتی به نام ضخامت اشباع، TBR به مقدار بیشینه خود می‌رسد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در زاینده‌های سرامیکی در ضخامت اشباع، افزایش درصد غنای لیتیم موجب کاهش سهم  ${}^6\text{Li}$  در تولید تریتمیم می‌شود.

بنابراین چنانچه در زاینده‌های نوعی جامد تریتیم در ضخامت اشباع، درصد غنای  ${}^6\text{Li}$  پایین و در حدود ۳۰٪ تا ۶۰٪ باشد، نتایج مطلوب به‌دست خواهد آمد. مقادیر TBR محاسبه شده برای مدل نوترونیکی شکل ۱ به‌ازای درصد غنای  ${}^6\text{Li}$  از ۲۰٪ تا ۹۰٪ در جدول ۲ آورده شده است [۱۶].

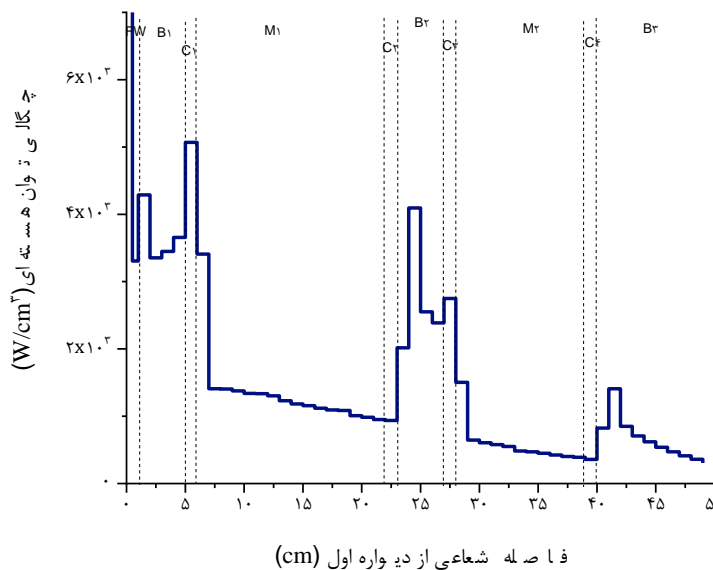
جدول ۲. مقادیر TBR محاسبه‌شده به‌ازای مقادیر مختلف درصد غنای لیتیم

درصد غنای ${}^6\text{Li}$	۲۰٪	۳۰٪	۴۰٪	۵۰٪	۶۰٪	۷۰٪	۸۰٪	۹۰٪
TBR	۰/۹۵	۰/۹۳	۱/۰۵	۱/۰۸	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۱۵	۱/۱۶

نتایج بررسی نشان می‌دهند که با درصد غنای حدود ۵۰٪ مقدار TBR در حدود مقداری است که شرط خودنگهدار تولید تریتیم را برقرار می‌کند. با توجه به هزینه بالای غنی‌سازی لیتیم، می‌توان با صرف هزینه کمتر نتایج مطلوب را به‌دست آورد.

#### ۴.۲ محاسبه انباشت انرژی

به‌منظور محاسبه انباشت انرژی ناشی از اندرکنش نوترون‌ها و هسته‌های اتمی از خروجی تالی کرما کد MCNPX استفاده شده است. میزان انباشت انرژی در هر لایه به نوع لایه‌ای بستگی دارد که ذرات و فوتون‌ها از آن عبور می‌کنند. بیشترین مقادیر مشاهده شده در شکل مربوط به انباشت انرژی در صفحه‌های خنک‌کننده است یعنی جایی که نوترون‌ها نرخ بالای برخوردی کُشان را با هسته‌های کوچک دارند که به معنی انباشت انرژی بیشتر است. در لایه‌های زاینده هم مقداری با ارتفاع کمتر مشاهده می‌شود. در لایه‌های استیل کمینه انباشت انرژی مشاهده می‌شود دلیل این امر آن است که برخوردهای کُشان نوترون در آلیاژ با هسته‌های بزرگ انجام می‌شود و بنابراین انباشت انرژی کمتر است. چگالی توان هسته‌ای در ماژول میانی پوشش داخلی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. چگالی توان هسته‌ای بر حسب ضخامت شعاعی ماژول میانی بلنکت داخلی

ضریب تکثیر انرژی واکنش گداخت عبارت است از نسبت کل انرژی انباشته شده به انرژی نوترون‌های ناشی از واکنش گداخت که عددی بین ۱/۱ تا ۱/۳ است. ضریب تکثیر انرژی برای هندسه مورد بررسی ۱/۱ می‌باشد. برای بررسی اثر غنای  ${}^6\text{Li}$  بر روی انباشت انرژی، درصد غنای لایه‌های زاینده، از ۲۰٪ تا ۹۰٪ تغییر داده شد و مجموع انباشت انرژی و ضریب تکثیر انرژی در ماژول میانی پوشش داخلی و خارجی محاسبه گردید. نتایج این بررسی در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. مجموع انباشت انرژی در ماژول میانی پوشش داخلی و خارجی به‌ازای مقادیر مختلف درصد غنای  ${}^6\text{Li}$

درصد غنای ${}^6\text{Li}$	٪۹۰	٪۸۰	٪۷۰	٪۶۰	٪۵۰	٪۴۰	٪۳۰	٪۲۰
انباشت انرژی (MeV)	۱۵/۱	۱۵/۰	۱۴/۹	۱۴/۹	۱۴/۸	۱۴/۷	۱۴/۴	۱۴/۵
ضریب تکثیر انرژی	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۰	۱/۰	۱/۰

با افزایش درصد غنای  ${}^6\text{Li}$ ، به‌دلیل افزایش نرخ واکنش  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  که واکنشی گرم‌زاست، انباشت انرژی هم افزایش می‌یابد. بر طبق داده‌های به‌دست آمده، با درصد غنای ۵۰٪ و صرف هزینه پایین‌تر می‌توان به نتایجی مشابه حالت ۹۰٪ غنا در انباشت انرژی و ضریب تکثیر انرژی دست یافت.

### ۳. نتیجه‌گیری

در این بررسی تحلیل نوترونیکی پوشش زاینده HCCR انجام گرفته است. پارامترهای نوترونیکی مورد بررسی شار و طیف نوترون، TBR، انباشت انرژی و ضریب تکثیر انرژی هستند. از عوامل تأثیرگذار بر این پارامترها درصد غنای  ${}^6\text{Li}$  است. واکنش  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  واکنشی گرم‌زاست و نوترون‌های درگیر در این واکنش نوترون‌های گرمایی هستند. در حالی که واکنش  ${}^7\text{Li}(n,n'\alpha)\text{T}$  واکنشی گرم‌گیر است. از این رو  ${}^6\text{Li}$  در تولید تریتم سهم بیشتری نسبت به  ${}^7\text{Li}$  دارد. اما بررسی‌ها نشان داده‌اند که در زاینده‌های سرامیکی، در ضخامت اشباع سهم  ${}^6\text{Li}$  در TBR با افزایش درصد غنا کاهش می‌یابد. چنانچه در زاینده‌های نوعی جامد تریتم در ضخامت اشباع درصد غنای  ${}^6\text{Li}$  پایین و در حدود ۳۰٪ تا ۶۰٪ باشد، نتایج مطلوب به‌دست خواهد آمد. در هندسه نوترونی پیشنهاد شده، می‌توان با کاهش غنای  ${}^6\text{Li}$  از ۹۰٪ به ۵۰٪ نتایج مشابهی در محاسبه TBR، انباشت انرژی و ضریب تکثیر انرژی به‌دست آورد. از آنجا که غنی‌سازی لیتیم هزینه گزافی دارد، می‌توان با صرف هزینه کمتر در ساخت پوشش‌های زاینده HCCR به نتایج قابل قبولی دست یافت.

### ۴. منابع

- [1] J. Wesson and D. J. Campbell, *Tokamaks*, vol. 149. Oxford university press, 2011.
- [2] T. Tanabe, *Tritium: Fuel of fusion reactors*. Springer, 2017.
- [3] J. Aubert *et al.*, "Status of the EU DEMO HCLL breeding blanket design development," *Fusion Eng. Des.*, vol. 136, no. February 2019, pp. 1428–1432, 2018, doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.04.133.
- [4] R. Mozzillo *et al.*, "Rationale and method for design of DEMO WCLL breeding blanket poloidal segmentation," *Fusion Eng. Des.*, vol. 124, pp. 664–668, 2017, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.039.
- [5] U. Fischer *et al.*, "Neutronic performance issues of the breeding blanket options for the European DEMO fusion power plant," *Fusion Eng. Des.*, vol. 109–111, pp. 1458–1463, 2016, doi: 10.1016/j.fusengdes.2015.11.051.
- [6] E. Martelli *et al.*, "Advancements in DEMO WCLL breeding blanket design and integration," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 27–52, 2018, doi: 10.1002/er.
- [7] P. Pereslavtsev, U. Fischer, F. Hernandez, and L. Lu, "Neutronic analyses for the optimization of the advanced HCPB breeder blanket design for DEMO," *Fusion Eng. Des.*, vol. 124, no. 633053, pp. 910–914, 2017, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.028.
- [8] I. Palermo, G. Veredas, J. M. G. J. Sanz, and A. Ibarra, "Neutronic design studies of a conceptual DCLL fusion reactor for a DEMO and a commercial power plant," vol. 016001, doi: 10.1088/0029-5515/56/1/016001.
- [9] B. G. Hong, "Impact of neutronic constraints on the design and performance of a tokamak DEMO reactor," *Fusion Eng. Des.*, vol. 155, no. September 2019, p. 111567, 2020, doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111567.
- [10] Y. Wu, *Fusion neutronics*, vol. 271. Springer, 2017.
- [11] H. Sadeghi, R. Amrollahi, M. Zare, and S. Fazelpour, "Design and simulation of a blanket module with high efficiency cooling system of tokamak focused on DEMO reactor," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 323–327, 2020, doi: 10.1016/j.net.2019.07.019.
- [12] S. Cho *et al.*, "Neutronic assessment of HCCR breeding blanket for DEMO," *Fusion Eng. Des.*, 2019.
- [13] D. B. Pelowitz, "MCNPX USER'S MANUAL Version 2.7. 0-LA-CP-11-00438," *Los Alamos Natl. Lab.*, 2011.
- [14] S. Yun *et al.*, "Conceptual design and analysis of the HCCR breeder blanket for the K-DEMO," *Fusion Eng. Des.*, vol. 153, no. January, p. 111513, 2020, doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111513.
- [15] P. Pereslavtsev, C. Bachmann, and U. Fischer, "Neutronic analyses of design issues affecting the tritium breeding performance in different DEMO blanket concepts," *Fusion Eng. Des.*, vol. 109–111, pp. 1207–1211, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.FUSENGDES.2015.12.053.
- [16] Z. Shanliang, W. Yican, S. Zheng, and Y. Wu, "Neutronic comparison of tritium-breeding performance of candidate tritium-breeding materials," *Plasma Sci. Technol.*, vol. 5, no. 5, p. 1995, 2003, doi: 10.1088/1009-0630/5/5/011.