

بررسی قابلیت استفاده از هیدریدهای فلزی به عنوان کندکننده و حفاظ نوترون به کمک کد MCNPX

ایرج مرادی قراتلو^{۱*}، یاسر کاسه‌ساز^۲ و میرشهرام حسینی‌پناه^۲

^۱ پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، اصفهان، ایران.

^۲ پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

* اصفهان، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، کدپستی: ۸۱۴۶۵/۱۵۸۹

پست الکترونیکی: imoradi@iran.ir

چکیده

در این پژوهش، قابلیت احتمالی چند ترکیب هیدرید فلزی به عنوان حفاظ نوترون برای چشمه گداخت D-D با استفاده از کد محاسباتی MCNPX بررسی شده است. نتایج به دست آمده در سه مرحله برای یافتن مواد با شار نوترون‌های حرارتی، سریع و کل کمتر نسبت به مواد متداول مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده مزیت‌های نسبی هیدریدهای فلزی LaNi_5H_6 ، VH ، TiH_2 ، TaH ، $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ ، YH_2 و NbH و LaH_3 در کاهش انرژی نوترون‌های چشمه D-D می‌باشد، به طوری که استفاده از این ترکیبات هیدریدی، به عنوان بخشی از کندکننده یا حفاظ نوترونی، در کم کردن حجم تأسیسات هسته‌ای بسیار مؤثر خواهد بود.

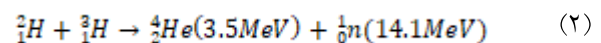
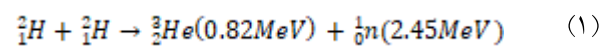
کلیدواژگان: هیدرید فلزی، حفاظ نوترونی، کند کننده نوترن، نوترون‌های گداخت، کد محاسباتی MCNPX.

۱. مقدمه

بیولوژیکی نسبتاً شدیدی دارند، حفاظت پرتویی، مهم‌ترین مشکل بر سر راه توسعه کاربردهای نوترونی گداخت است.

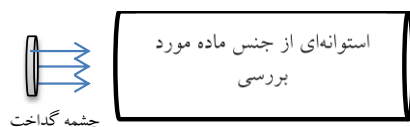
مواد مختلفی به منظور بهره‌گیری در جهت حفاظ نوترونی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این میان، با توجه به اینکه کیفیت حفاظت نوترونی به شدت به چگالی هیدروژن وابسته می‌باشد، مواد با غنای هیدروژنی بالا مانند آب سبک، شیشه پلکسی، پلی اتیلن، پارافین، PTFE و آب سبک بیشتر مورد توجه بوده‌اند. با این حال، از قابلیت‌های هیدریدهای فلزی تقریباً غفلت شده و مطالعات محدودی در زمینه کاربرد آنها در

واکنش‌های D-D و D-T (روابط ۱ و ۲)، از مهم‌ترین چشمه‌های نوترونی مبتنی بر واکنش‌های گداخت هسته‌ای می‌باشند:



این دو واکنش، در دستگاه‌های گداخت مختلفی مانند کانونی کردن پلازما [۱] و توکامک [۲] اتفاق می‌افتند، و کاربردهای بسیار زیادی دارند [۳-۶]. با توجه به اینکه نوترون‌های سریع تولید شده در این چشمه‌ها، اثرات

۵,۲۴	۳,۹۵۸	۹۰,۹۲	YH ₂	حفاظت پرتویی انجام شده است، که به عنوان مثال می‌توان به
۴,۳۷	۵,۱۲	۱۴۰,۹۲	LaH ₂	مطالعات انجام شده بر روی مواد هیدریدی مختلفی مانند
۶,۸۱	۵,۳۵	۱۴۱,۹۳	LaH ₃	بوروهیدرید زیرکونیوم و هیدرید زیرکونیوم به عنوان حفاظ
۵,۱۳	۶,۲۲۵	۴۳۸,۴۲	LaNi ₃ H ₆	نوترونی گداخت اشاره کرد [۸ و ۷].
۱۰,۵	۴,۶۲	۵۲,۹۶	VH ₂	در هیدریدهای فلزی (MHs)، که اتم‌های هیدروژن در
۷,۳۰	۰,۶۶	۲۱,۷۸	LiBH ₄	جایگاه‌های بین شبکه‌ای ساختار فلزی مستقر می‌شوند، قابلیت
۶,۸۴	۱,۰۷۴	۳۷,۸۳	NaBH ₄	ذخیره‌سازی هیدروژن با چگالی بالایی وجود دارد. به طوری
۸,۷۴	۰,۷۰۲	۳۸,۷	Be(BH ₄) ₂	که چگالی هیدروژنی برخی از این ترکیبات در دما و فشار
۵,۵۵	۰,۵۴۹	۷۱,۵۱	Al(BH ₄) ₃	متعارف، حتی از آب و هیدروژن مایع نیز بیشتر است، و با
۷,۲۳	۱,۱۳	۱۵۰,۵۹	Zr(BH ₄) ₄	توجه به اینکه عناصر با عدد اتمی بالا را نیز در ترکیبات خود
۸,۵۶	۲,۵۹	۲۹۱,۴۱	Th(BH ₄) ₄	دارند، بنابراین می‌توانند به طور مؤثری انرژی نوترون‌های
۵,۸۲	۰,۹۱۷	۳۷,۹۵	LiAlH ₄	سریع را کاهش داده و آنها را به نوترون حرارتی تبدیل کنند
۵,۷۱	۱,۲۸	۵۴	NaAlH ₄	[۹]. علاوه بر آن، پایداری حرارتی بالایی داشته و مقاومت
۱۳,۲	۱,۴۸	۵۳,۹۹	Mg(BH ₄) ₂	فوق‌العاده‌ای در برابر آسیب‌های تابش دارند [۱۰ و ۱۱]. از
۳,۴۵	۱,۲	۶۲,۸۴	NaBH ₃ CN	این رو به نظر می‌رسد از این ترکیبات می‌توان به عنوان بخشی
۶,۶۸	۱	۱۸,۰۲	H ₂ O	از حفاظ نوترونی در تجهیزات مختلف هسته‌ای استفاده کرد.
۲,۲۶	۱,۸۴۱	۹۸,۰۸	H ₂ SO ₄	



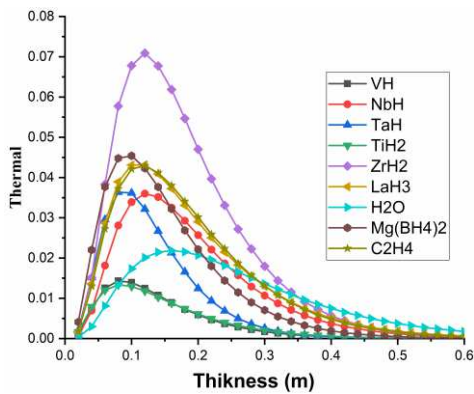
شکل ۱: هندسه شبیه‌سازی شده.

جدول ۱: مشخصات ترکیبات هیدرید فلزی مورد بررسی [۸ و ۱۲].

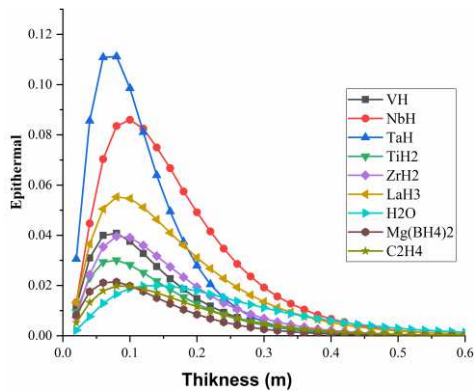
ترکیب هیدروژنی	وزن مولکولی (g)	چگالی (g/cm ³)	چگالی اتمی هیدروژن (10 ²² /cm ³)
LiH	۷,۹۵	۰,۷۷	۵,۸۳
NaH	۲۴	۱,۳۶	۳,۴۱
RbH	۸۶,۴۸	۲,۶	۱,۸۱
CsH	۱۳۳,۹۱	۳,۴	۱,۵۳
CaH ₂	۴۲,۰۹	۱,۹	۵,۴۴
SrH ₂	۸۹,۶۴	۳,۲۷	۴,۳۹
BaH ₂	۱۳۹,۳۴	۴,۱۶	۳,۵۹
MgH ₂	۲۶,۳۲	۱,۴۵	۶,۶۳
VH	۵۱,۹۵	۵,۴	۶,۲۶
NbH	۹۳,۹۱	۶,۶	۴,۲۳
TaH	۱۸۱,۹۶	۱۵,۱	۵,۰۰
TiH ₂	۴۹,۸۸	۳,۸	۹,۱۷
ZrH ₂	۹۳,۲۴	۵,۶۱	۷,۲۴

۲. روش کار

در تحقیق حاضر، قابلیت استفاده از ۲۸ ترکیب هیدرید فلزی به عنوان کندکننده و حفاظ نوترونی مورد مطالعه قرار گرفت، که مشخصات آنها در جدول (۱)، ارائه شده است. برای انجام شبیه‌سازی، یک چشمه گداخت D-T دیسک مانند به شعاع ۱۰ cm را که نوترون‌های حاصل از واکنش D-T با انرژی متوسط ۱۴ MeV را به صورت موازی گسیل می‌کند، در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن استوانه‌ای به شعاع ۲۰ cm از جنس ماده مورد نظر در مقابل این چشمه، سهم نوترون‌های حرارتی ($E < 0.5$ eV)، فوق حرارتی (0.5 eV $< E < 10$ keV).



شکل ۴: تعداد نوترون‌های حرارتی به ازای هر نوترون ورودی.



شکل ۵: تعداد نوترون‌های فوق حرارتی به ازای نوترون‌های سریع.

با توجه به شکل کلی نمودارها، مقایسه نتایج حاصل از ترکیبات هیدریدی با نتایج حاصل از آب و پلی اتیلن، در ضخامت ۳۰ cm انجام شد. در مرحله اول، مواد با شار نوترونی کل کمتر از آب سبک انتخاب شدند. این مواد به ترتیب از کمترین شار نوترونی عبارتند از: VH، TaH، NbH، C₂H₄، ZrH₂، TiH₂، LaNi₅H₆، Mg(BH₄)₂، LaH₃، LaH₂، CaH₂، MgH₂، YH₂، Th(BH₄)₄، LaH₃، NaBH₄ و H₂SO₄، Be(BH₄)₂.

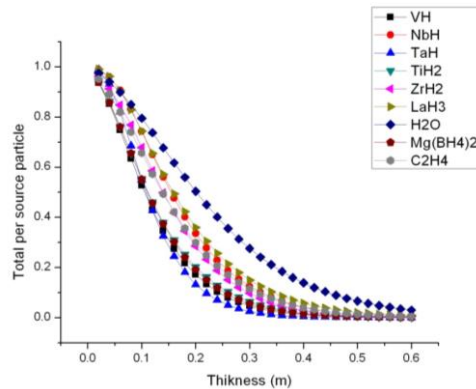
در مرحله بعد، از بین مواد انتخاب شده، مواد با شار نوترون حرارتی کمتر از آب انتخاب شد و از بین آنها، مواد با شار نوترونی سریع کمتر از آب به عنوان بهترین مواد حفظ در نظر گرفته شدند، که به ترتیب عبارتند از VH، LaNi₅H₆.

نوترون‌های سریع ($E > 10 \text{ keV}$) و کل نوترون‌های خروجی از این استوانه، به صورت جداگانه برای ضخامت‌های مختلف از ۲ تا ۶۰ سانتی متر محاسبه و ثبت شد (شکل ۱).

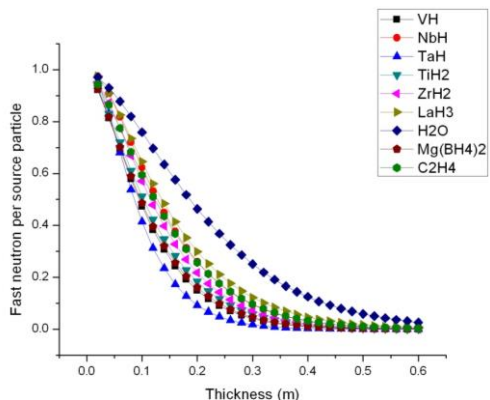
لازم به ذکر است، برای انجام مقایسه، ترکیبات هیدروژنی دیگری مانند پلی اتیلن، آب سبک، آب سنگین، اسید سولفوریک، شیشه پلکسی، پارافین و PTFE نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

با توجه به تعداد زیاد مواد مورد بررسی، امکان ارائه تمام نتایج حاصل از آنها به صورت نمودار در این مقاله وجود نداشت. از این رو در اینجا نتایج حاصل از چند ماده به عنوان نمونه در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است، ولی در بررسی نتایج، تمامی مواد مورد بررسی، در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۲: تعداد کل نوترون‌های خروجی به ازای هر نوترون ورودی.



شکل ۳: تعداد نوترون‌های سریع به ازای هر نوترون ورودی.

بیشترین بازدهی را در کاهش انرژی نوترون‌های سریع تا انرژی‌های حرارتی از خود نشان داده و در ضخامتی حدود ۴۰ سانتی‌متر، ۲۰ درصد از نوترون‌های ورودی را به نوترون‌های حرارتی تبدیل می‌کند. این مقدار حدوداً ۴ برابر بیشتر از آب و حدود ۲ برابر بیشتر از پلی‌اتیلن است.

شکل ۷ نیز مزیت هیدرید فلزات واسطه نسبت به آب و پلی‌اتیلن در کندسازی نوترون‌های سریع تا حدود انرژی‌های فوق حرارتی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال بازدهی ترکیب هیدریدی TaH، ۶ برابر بیشتر از پلی‌اتیلن یا آب است.

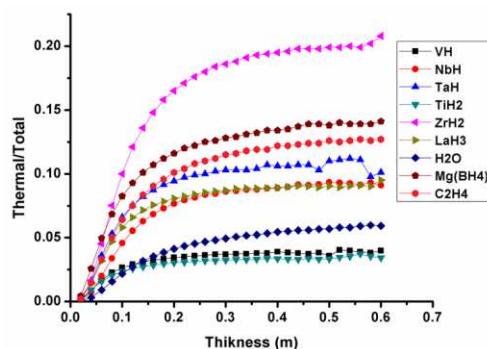
۴. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از هیدریدهای فلزی به عنوان بخشی از کندکننده یا حفاظ نوترونی به طور فوق‌العاده‌ای می‌تواند باعث کاهش حجم تأسیسات شود. این مسأله به ویژه در طراحی باریکه‌های نوترونی، چشمه‌های پالسی نوترون، راکتورهای شکافت، گداخت و راکتورهای کشتی‌ها و فضاپیماها و همچنین تجهیزات آنالیز نوترونی می‌تواند بسیار مؤثر باشد.

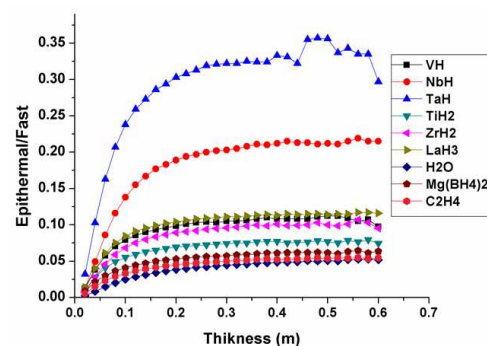
همچنین مشاهده شد که هیدرید فلزات واسطه در تبدیل نوترون‌های سریع به نوترون‌های فوق‌حرارتی، بازدهی بالاتری نسبت به آب و پلی‌اتیلن از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل استفاده از این ترکیبات در کاربردهایی مانند نوترون‌تراپی با بور (BNCT)، که در آن‌ها نسبت نوترون‌های فوق‌حرارتی به نوترون‌های سریع، باید تا حد امکان بالا باشد [۱۳]، مناسب‌تر از آب و پلی‌اتیلن بوده و به کوچک‌تر شدن تأسیسات کمک زیادی می‌کند.

LaH₃، NbH، YH₂، Mg(BH₄)₂، H₂SO₄، TaH، TiH₂، C₂H₄.

در ادامه به منظور ارزیابی قدرت کندکنندگی هیدریدهای فلزی و مقایسه آن با آب و پلی‌اتیلن، نسبت نوترون‌های حرارتی به کل نوترون‌های خروجی از استوانه و همچنین نسبت شار نوترون‌های فوق حرارتی به شار نوترون‌های سریع محاسبه شد که نمودار آنها برای برخی از مواد انتخابی به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) رسم شده است.



شکل ۶: نسبت نوترون‌های حرارتی به نوترون‌های کل.



شکل ۷: نسبت نوترون‌های فوق حرارتی به نوترون‌های سریع.

شکل ۶ نشان می‌دهد که در کندسازی نوترون، اکثر هیدریدهای فلزی مورد بررسی، از بازدهی خیلی بهتری نسبت به آب برخوردار هستند. در این میان، هیدرید زیرکونیوم

۷. مراجع

- [1] L. Soto, New trends and future perspectives on plasma focus research, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 47 (2005) A361.
- [2] A. Costley, J. Hugill, P. Buxton, On the power and size of tokamak fusion pilot plants and reactors, *Nuclear Fusion* 55 (2015) 033001.
- [3] V. Gribkov, Current and perspective applications of dense plasma focus devices, *AIP Conference Proceedings*, AIP, (2008), 51-64.
- [4] V. Krauz, Progress in plasma focus research and applications, *Plasma physics and controlled fusion* 48 (2006) B221.
- [5] C. Moreno, M. Vénere, R. Barbuza, M. Del Fresno, R. Ramos, H. Bruzzone, F.P. González, A. Clausse, Industrial applications of plasma focus radiation, *Brazilian Journal of Physics* 32 (2002) 20-25.
- [6] P.R. Renne, K.B. Knight, S. Nomade, K.-N. Leung, T.-P. Lou, Application of deuterium–deuterium (D–D) fusion neutrons to $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, *Applied Radiation and Isotopes* 62 (2005) 25-32.
- [7] T. Hayashi, K. Tobita, Y. Nakamori, S. Orimo, Advanced neutron shielding material using zirconium borohydride and zirconium hydride, *Journal of Nuclear Materials* 386–388 (2009) 119-121.
- [8] T. Hayashi, K. Tobita, S. Nishio, K. Ikeda, Y. Nakamori, S. Orimo, Neutronics assessment of advanced shield materials using metal hydride and borohydride for fusion reactors, *Fusion Engineering and Design* 81 (2006) 1285-1290.
- [9] H. Fritzsche, J. Huot, D. Fruchart, *Neutron Scattering and Other Nuclear Techniques for Hydrogen in Materials*, Springer (2016).
- [10] D. Picton, D. Ross, A. Taylor, Optimisation studies for a moderator on a pulsed neutron source, *Journal of Physics D: Applied Physics* 15 (1982) 2369.
- [11] W.M. Mueller, J.P. Blackledge, G.G. Libowitz, *Metal Hydrides*, Academic Press (1968).
- [12] M.T. Simnad, *Metal Hydrides, Inorganic Reactions and Methods*, John Wiley & Sons, Inc. (2007), 369-378.
- [13] IAEA-TECDOC-1223, Current status of neutron capture therapy, (2001).

