

تحلیل و بررسی فرآیند کند شدن یون های دوتیریم 40MeV در لیتیوم مایع در سیستم IFMIF

محمد رضا اسکندری^{*}، سید علیرضا علوی

بخش فیزیک - دانشگاه شیراز

چکیده

با معرفی مختصر سیستم IFMIF (امکانات بین المللی جهت پرتو دهی مواد همجوشی)، عنوان سیستمی که نقش کلیدی در انتخاب و ارزیابی عناصر و مواد به کار رفته در راکتور همجوشی دارد، و با استفاده از کاد کامپیوتری SRIM 2006 به بررسی فرآیند کند شدن و کاهش انرژی، عمق نفوذ، مسیر حرکت، نوع و میزان تخریب ایجاد شده توسط یون های دوتیریمی که در این سیستم تا انرژی 40MeV شتاب گرفته و به سطح آزاد جت سیال لیتیوم مایع تابیده شده اند پرداخته ایم. به این ترتیب عمق نفوذ (برد) یون های دوتیریم در داخل هدف لیتیومی را در حدود 20 میلی متر و مسیر حرکت بصورت مخروطی شکل محاسبه شده است. همچنین نشان داده شده است که، بیشترین مقدار کاهش انرژی از طریق برخوردهای غیر کشسان یون های دوتیریم با الکترون های اتم لیتیوم بوده و این مقدار در حدود 99.98% محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: دوتیریم، لیتیوم مایع، کاهش انرژی، عمق نفوذ، مسیر حرکت، تخریب

مقدمه

همجوشی هسته ای، عنوان یک منبع منا سب با ضریب امنیت زیست محیطی بالا برای تولید انرژی (الکتریکی) در حدود تراوات (TW) از منابع نا محدود و فراوان مطرح است. از این رو برنامه ریزی ها و سرمایه گذاری های وسیعی در سطح بین المللی برای توسعه و گسترش این علم و تکنولوژی صورت گرفته است. از جمله میتوان ITER¹ را بعنوان یک راکتور همجوشی تحقیقاتی و با هدف امکان سنجی علمی و تکنولوژیکی، IFMIF² را بعنوان منبع نوترون های با انرژی و شار بالا و با هدف ارزیابی و تست عناصر و قطعات مورد استفاده در راکتورهای همجوشی و DEMO³ را بعنوان یک راکتور عملی با هدف تولید انرژی در آینده‌ی نزدیک، نام برد [۱و۲]. اساس کار سیستم IFMIF واکنش همجوشی هسته ای دوتیریم-لیتیوم است. بطوریکه این سیستم طوری

*eskandari@physics.susc.ac.ir

1- International Thermonuclear Experimental Reactor

2- International Fusion Material Irradiation Facility

3- Demonstration Reactor

طراحی شده است که ابزار شتاب دهنده E^4 آن، یون های دوتیریم را تا انرژی 40MeV شتاب داده و آن ها را در دو دسته یون با زاویه 10° درجه، به سطح مقطعی ($5\text{cm} \times 20\text{cm}$) از لیتیوم مایع و به چگالی (512kg/m^3) می تاباند. لیتیوم مایع بصورت یک جت سیال و با سرعت $s/20\text{m}$ در یک حلقه، که جزئی از ابزار هدف 0 در این سیستم می باشد در حرکت است [۳ و ۴] با برخورد یون های دوتیریم پر انرژی به هدف لیتیومی، واکنش های هسته ای متفاوتی رخ می دهد که محصول تعدادی از این واکنش ها اشعه ی گاما و نوترون های با شار و انرژی بسیار بالاست (نوترون هایی با شار $s \cdot 5.8 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ و انرژی میانگین 7MeV در دیواره ای اولیه ای این سیستم). از آن جایی که شار و انرژی میانگین نوترون ها در دیواره ای اولیه ای راکتورهای همجوشی ITER (به ترتیب در حدود $3.9 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot s$ و 3.6MeV) و DEMO (به ترتیب در حدود $13 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot s$ و 3.2MeV) می باشد، ابزار تست 0 در این سیستم، می تواند ابزار بسیار مناسبی برای ارزیابی و تست مواد و عناصر انتخاب شده برای راکتورهای همجوشی باشد [۵].

از آن جایی که دوتیریم های با انرژی زیاد 40MeV با احتمال زیاد، امکان واکنش با عناصری که باید توسط نوترون ها تست شوند را دارند، ضخامت جت سیال لیتیوم جاری در حلقه لیتیوم باید طوری طراحی شود که این ضخامت از برد یون های دوتیریم در داخل هدف لیتیومی بیشتر باشد، تا دوتیریم ها قبل از رسیدن به عناصر مورد بررسی کاملا متوقف شوند [۶]. لذا در این مقاله به بررسی و تحلیل روند کاهش انرژی، برد و تخریب ایجاد شده توسط یون های دوتیریم در داخل هدف لیتیوم می پردازیم.

روش کار

توان توقفی کل را بصورت نسبت کاهش انرژی یون به مسافت طی شده توسط آن در محیط هدف تعریف می کنیم، که با مجموع توان توقفی الکترونیکی و هسته ای برابر است.

$$S(E) = \frac{dE}{dx} \quad (1)$$

$$S(E) = S_n(E) + S_e(E) \quad (2)$$

در این رابطه $S_n(E)$ توان توقفی هسته ای (از دست دادن انرژی از طریق برخوردهای غیر کشسان با هسته های هدف) و $S_e(E)$ توان توقفی الکترونیکی است (از دست دادن انرژی از طریق برخوردهای غیر کشسان با الکترون های اتم هدف).

4- Accelerator Facility

5- Target Facility

6- Test Facility

یون های دوتیریم با انرژی اولیه E_0 و توان توقفی کل S ، پس از طی مسافت $R(E_0)$ (که برد نامیده می شود) تمامی انرژی خود را به اتم های لیتیوم داده و متوقف می شوند. فرمول برد را بصورت زیر داریم:

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} S^{-1} dE \quad (3)$$

کمیتی که غالبا اندازه گرفته می شود برد متوسط تصویر شده (R_ρ) می باشد که بصورت میانگین مسافت طی شده توسط یون در محیط هدف تعریف می شود. با استفاده از روابط و فرمول های نیمه تجربی زیگلر⁷ که به تفصیل در مرجع [۷] آمده است می توان توان توقفی و برد را محاسبه کرد.

با استفاده از کد کامپیوتری SRIM 2006 که بر اساس بر همکنش های کوانتم مکانیکی و آماری یون ها با محیط هدف، وهمچنین محاسبات شبیه سازی مونت کارلو و فرمول ها والگوریتم های ذکر شده، عمل می کند. توان توقفی هسته ای و الکتریکی، برد، مسیر حرکت و میزان تخریب ایجاد شده توسط یون های دوتیریم در داخل لیتیوم را محاسبه می کنیم [۸].

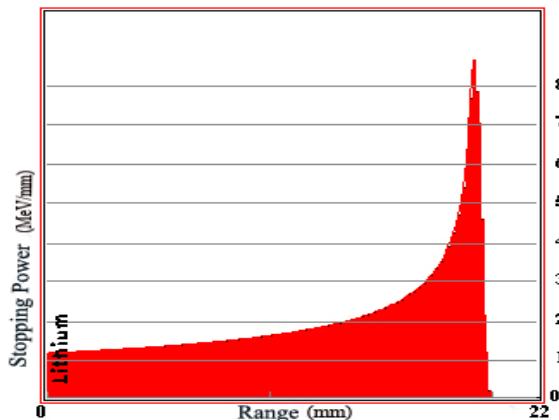
نتایج

برد، توان توقفی هسته ای، الکترونیکی و کل دو دسته یون دوتیریوم با انرژی 40MeV و جریان 125mA، تحت زاویه ۱۰ درجه به سطح مقطعی به ابعاد 5cm×20cm از جت سیال لیتیوم مایع با چگالی 512 kg/M3 تابیده شده است، با استفاده از کد کامپیوتری SRIM 2006 محاسبه و نتایج بدست آمده در جدول (۱) ارائه شده است.

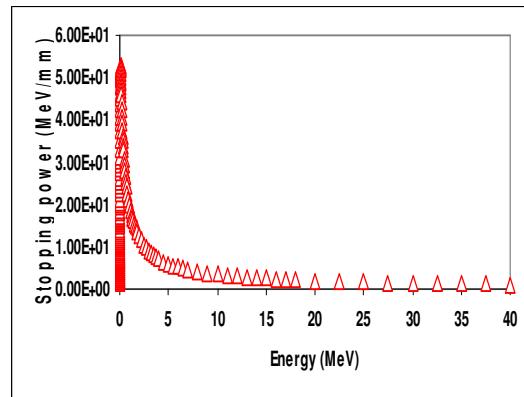
جدول ۱ - برد و توان توقفی بدست آمده از محاسبات کد SRIM

$E(\text{keV})$	$S_e (\frac{\text{MeV}}{\text{mm}})$	$S_n (\frac{\text{MeV}}{\text{mm}})$	$R_\rho (\text{mm})$
10×10^0	2.286×10^1	5.498×10^{-1}	5395×10^{-7}
80×10^0	5.263×10^1	1.086×10^{-1}	2.16×10^{-3}
100×10^0	5.219×10^1	9.035×10^{-2}	2.54×10^{-3}
1×10^3	1.979×10^1	1.256×10^{-2}	39.61×10^{-3}
5×10^3	6.022×10^0	3.003×10^{-3}	471.4×10^{-3}
10×10^3	3.493×10^0	1.607×10^{-3}	1.61×10^0
20×10^3	1.994×10^0	8.561×10^{-4}	5.56×10^0
40×10^3	1.127×10^0	4.543×10^{-4}	19.50×10^0

شکل(۱) تغییرات توان توقفی کل (یا به عبارت دیگر نرخ کاهش انرژی) را برای یون های دوتربیوم در داخل لیتیوم در مقابل انرژی این یون ها نشان می دهد و همانطور که دیده می شود نرخ کاهش انرژی ($\frac{\Delta E}{\Delta x}$) با افزایش انرژی نسبتاً خطی رشد کرده تا اینکه به یک حد بیشینه (حد بیشینه در این سیستم در انرژی 80 keV رخ می دهد) برسد و سپس بصورت ($\frac{1}{E}$) افت می کند. برای بررسی دقیقتر نرخ کاهش انرژی یون های دوتربیوم در داخل لیتیوم نمودار تغییرات آن در مقابل عمق نفوذ (برد) یون ها در شکل (۲) نشان داده شده است. برخلاف آن چه در شکل (۱) می بینیم با افزایش میزان نفوذ یون ها، توان توقفی افزایش یافته به یک حد بیشینه (حد بیشینه در این سیستم در عمق نفوذ 18.83 mm رخ می دهد) رسیده، سپس در نزدیکی نقطه‌ی توقف یون ها (به سرعت افت کرده و به مقدار صفر می رسد).

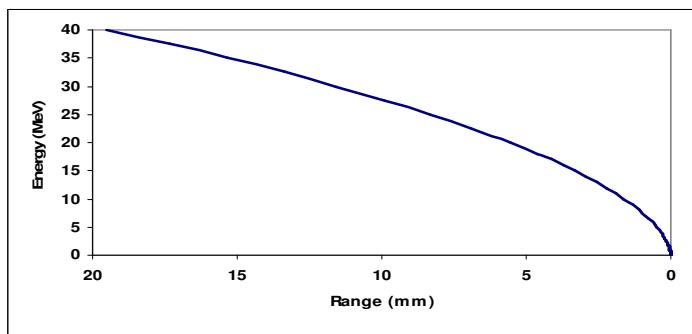


شکل ۲: نمودار نرخ کاهش انرژی یون های دوتربیوم در طول فاصله‌ی نفوذشان به داخل هدف لیتیوم



شکل ۱: نمودار تغییرات توان توقفی یون های دوتربیوم بر حسب انرژی آن ها

روند کند شدن و کاهش انرژی برای یون های دوتربیوم در طول فاصله‌ی نفوذشان به داخل هدف لیتیوم را می توان در شکل (۳) مشاهده کرد بطوریکه با نفوذ یون های پر انرژی (40 MeV) به داخل هدف فرآیند کند شدنشان آغاز شده و با نفوذ بیشتر، انرژی بیشتری را از دست می دهند و در نهایت در انتهای برد نفوذ (R=19.5mm) متوقف می شوند.



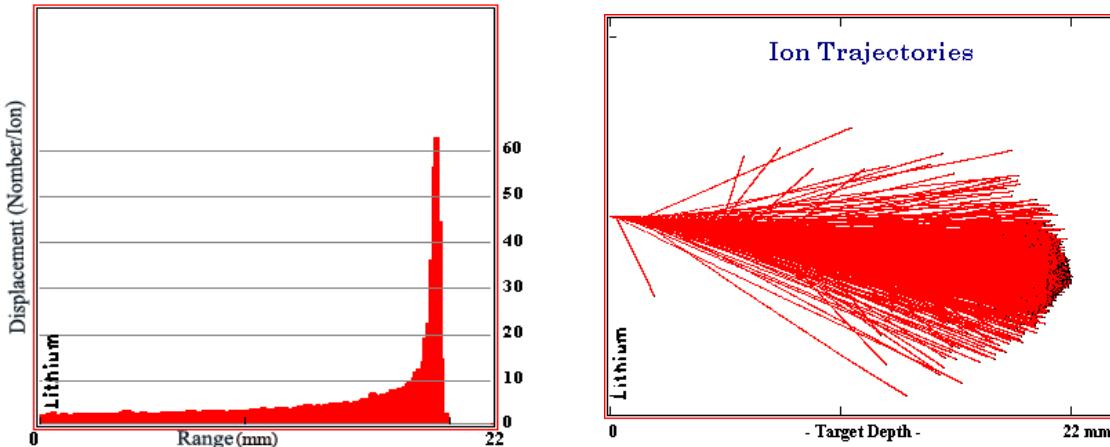
شکل ۳: نمودار روند کند شدن یون های دوتریم در طول فاصله ی نفوذ شان به داخل هدف لیتیوم

مسیر حرکت یک دسته از یون ها در داخل هدف لیتیوم نمای طولی (نمایش برشی از حرکت طولی یون ها در داخل محیط هدف) در شکل (۴) نشان داده شده است و همانطوری که مشاهده می شود یون های دوتریم پس از طی مسیری مخروطی شکل در انتهای برد خود و در قاعده ی مخروط متوقف می شوند(یون های دوتریم متوقف شده بصورت نقاط سیاه در شکل، مشخص شده اند).

هر یون دوتریم با برخورد به اتم های لیتیوم و با پیشروی در داخل آن، تقریبا ۹۹.۹۸٪ از انرژی خود را از طریق یونیزه کردن اتم های لیتیوم و کمتر از ۰.۰۲٪ را از طریق دادن انرژی به اتم های لیتیوم پس زده شده از دست می دهند. اتم های لیتیوم پس زده شده که در حدود ۸۰keV انرژی دارند باعث ایجاد تخریب در محیط می شود، بطوریکه با خارج شدن از شبکه مولکولی خود(به دلیل گرفتن انرژی آستانه ی لازم از یون های دوتریم) باعث ایجاد فضای خالی^۸ و جابجائی^۹ (به تعداد متوسط ۸۱ جابجائی بازای هر یون) در فضای شبکه می شوند(شکل ۵).

8- Vacancy

9- Displacement



شکل ۵: نمودار میزان تخریب ایجاد شده توسط یونها

شکل ۴: نمایش برشی طولی از مسیر حرکت یونها

بحث و نتیجه گیری

با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده برای توان توقفی الکترونیکی و هسته‌ای (جدول ۱) می‌بینیم که در انرژی‌های بالا (انرژی در حدود MeV و بیشتر از آن) توان توقفی غالب توان توقفی الکترونیکی است. بطوریکه میتوان از توان توقفی هسته‌ای صرفنظر کرد. همچنین با استفاده از این جدول و با وجود داشتن مقادیر برد و انرژی یون‌ها می‌توان به راحتی زمان توقف را نیز محاسبه کرد که از مرتبه‌ی نانو ثانیه (ns) خواهد بود.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌کنیم این منحنی (منحنی تغییرات S در مقابل R) از فرم کلی منحنی برآگ^{۱۰} و حد بیشینه‌ی آن از حد بیشینه‌ی برآگ^{۱۱} تبعیت می‌کند [۹ و ۱۰]. البته این نقطه‌ی بیشینه در عمق ۱۸.۸۳ میلی متری هدف لیتیومی واقع شده است. بنابراین تقریباً 2.5MeV انرژی در طول 0.3 میلی متر و یا 6.7MeV در فاصله 0.9 میلی متر تخلیه می‌شود. تخلیه این مقدار زیاد انرژی در فضای خیلی کوچک می‌تواند کاربردهای زیادی در پزشکی هسته‌ای و مخصوصاً برای درمان تومورها و غدد سرطانی واقع در ارگان‌های حساس بدن داشته باشد.

با مقایسه‌ی روند کند شدن و برد یون‌های دوتیریم در داخل هدف لیتیوم (شکل ۳) که با استفاده از کد کامپیوتری SRIM 2006 بدست آورده ایم با نتیجه‌ی بدست آمده از کد کامپیوتری MCNPX (که در مرجع [۵] آمده است) مشاهده می‌کنیم که این نتایج به خوبی با هم همخوانی دارند.

10- Bragg Curve

11- Bragg Peak

مراجع

- [1]- Moeslang, A. et al, "The IFMIF test facilities design", *Fusion Engineering and Design* 81, 863-871, (2006).
- [2]- Weston, Mc.Stacey, "Fusion Plasma Physics", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA. Weinheim, (2005), 512-513.
- [3]- Nakamura, H. et al, "Liquid lithium target under steady state ultra high heat load of 1 GW/m² range for International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)", *Fusion Engineering and Design* 65, 467-474, (2003).
- [4]- Nakamura, H. et al, "Status of activities on the lithium target in the key element technology phase in IFMIF", *Journal of Nuclear Materials* 307-311, 1675–1679, (2002).
- [5]- Shimakov, et al, "International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF): Neutron source term simulation and neutronic analyses of the high flux test module", *Forschungszentrum Karlsruhe GmbH*, Karlsruhe, (2002).
- [6]- Nakao, M. et al, "Measurements of deuteron-induced activation cross-sections for IFMIF Accelerator structural materials", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A I (III)* III-III, (2006).
- [7]- http://ie.lbl.gov/interact/abs_3C.pdf.
- [8]- Ziegler, J.F, SRIM 2006, Available from <<http://www.SRIM.org>>
- [9]- Glenn F.Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, Inc, New York, (1999), 32-34.
- [10]- Lilley J.S, "Nuclear Physics", John Wiley & Sons, Ltd, New York, (2004), 132-133.