

fabbasi@sbu.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۸/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۴/۶)

۴۰ bar

( )

(ERD)

ERD

:

تیتانیوم دو فلز جاذب قوی هیدروژن هستند و برای ساخت هدف‌های هسته‌ای استفاده می‌شوند. با توجه به این‌که چگالی تیتانیوم از زیرکونیوم کمتر است، برد ذرات باردار در هدف‌های تیتانیومی بیشتر می‌باشد. لذا، هدف‌های تیتانیومی نسبت به هدف‌های زیرکونیومی، در شتابدهنده‌های کم انرژی، بهره نوترونی بیشتری دارند. به همین دلیل معمولاً از تیتانیوم برای ساخت هدف استفاده می‌شود [۴]. فلزات تنگستن، طلا، مس، پلاتین و مولیبدنیوم دارای هدایت گرمایی بالایی هستند و برای ساخت زیرلایه مناسب می‌باشند. با بهره‌گیری از روش‌های لایه نشانی انباشت فیزیکی بخار<sup>۱</sup>

ساخت هدف‌های مناسب برای تولید نوترون، و به خصوص نوترون‌های تک انرژی، همواره مورد توجه بوده است. کاربرد این هدف‌ها در مطالعه واکنش‌های تولید نوترون و اندازه‌گیری طیف انرژی آن [۱]، کالیبراسیون آشکارسازها [۲]، نوترون تراپی و... می‌باشد. مطالعات گوناگونی روی دوتریوم و تریتیوم برای ساخت هدف‌های جامد جهت تولید نوترون تک انرژی از واکنش‌های  $d-d$  و  $d-t$  در شتابدهنده‌های کم انرژی (تقریباً ۱۵۰ کیلو الکترون ولت) صورت گرفته است [۳]. این هدف‌ها از یک لایه فلزی جاذب هیدروژن و یک زیرلایه با هدایت گرمایی بالا تشکیل شده‌اند. زیرکونیوم و

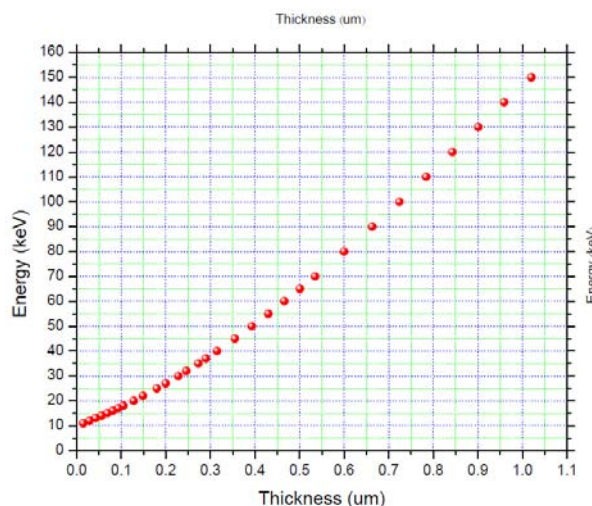
۱. Physical Vapor Deposition (PVD)

جدول ۱. برد دوترون در تیتانیوم با انرژی های مختلف.

انرژی دوترون (keV)	برد دوترون ( $\mu\text{m}$ )
۱۵۰	۱/۲۸۵
۱۴۰	۰/۹۵۹
۱۳۰	۰/۹۰۱
۱۱۰	۰/۷۸۴
۹۰	۰/۶۶۳

درصد و خریداری شده از شرکت مرک<sup>۵</sup> می‌باشد. زیرلایه هدف، از مس معمولی انتخاب شده است. به منظور انتخاب ضخامت لایه، دانستن برد دوترون در تیتانیوم اهمیت دارد. برای محاسبه برد دوترون در تیتانیوم، از نرم افزار SRIM<sup>۶</sup> استفاده شده است (البته به دلیل عدم قطعیت در مقدار  $dE/dx$  در انرژی‌های کمتر از ۱۰ کیلو الکترون ولت، برون یابی تا انرژی صفر غیرممکن است). شکل ۱ نمودار میزان کاهش انرژی دوترون را برحسب ضخامت تیتانیوم نشان می‌دهد. در جدول ۱ برد دوترون با انرژی‌های مختلف در تیتانیوم درج شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود با تغییر انرژی پرتابه دوترونی از ۹۰ تا ۱۵۰ کیلو الکترون ولت، طول توقف کامل دوترون‌ها در تیتانیوم از ۰/۶۶۳ تا ۱/۲۸۵ میکرومتر تغییر می‌کند. لذا ضخامت ۰/۵ تا ۲ میکرومتر (به ترتیب برابر با ۲۲۷ تا ۹۰۸ میکروگرم بر سانتی متر مربع) برای لایه تیتانیوم مناسب تشخیص داده شده است.

از آنجا که قطر باریکه‌های دوترونی بیشتر مولدهای نوترون، حداکثر برابر ۲۰ میلیمتر می‌باشد، مناسب است که قطر لایه تیتانیومی بیشتر از آن باشد تا در صورت انحراف جزئی مرکز باریکه از مرکز هدف، باریکه از محدوده تیتانیومی مجموعه هدف خارج نشود. بنابراین قطر لایه تیتانیوم به اندازه ۲۵ میلیمتر مناسب است. قطر زیرلایه نیز با توجه به ابعاد نگهدارنده هدف در نمونه‌هایی از مولد نوترون، برابر ۳۱/۵ میلیمتر می‌باشد. با توجه به امکانات در دسترس و ملاحظات اقتصادی،



شکل ۱. برد دوترون در تیتانیوم برحسب انرژی دوترون که توسط نرم افزار SRIM محاسبه شده است.

شامل کندوپاش<sup>۱</sup>، یونی<sup>۲</sup> و باریکه الکترونی<sup>۳</sup> می‌توان ضخامت مناسبی از لایه را بر روی زیرلایه قرار داد. روش لایه نشانی و در نتیجه جو محیطی که در آن لایه نشانی صورت می‌گیرد، بر عمر هدف تأثیرگذار است. اگر در محیط لایه نشانی، ناخالصی‌هایی نظیر اکسیژن و نیتروژن وجود داشته باشند، اتم‌های این گازها به همراه ذرات ماده لایه، بر روی زیرلایه قرار گرفته و بر خواص لایه نظیر چسبندگی، خلوص و قابلیت جذب هیدروژن، اثر می‌گذارند. اثر اکسیژن در حین لایه نشانی، توسط گانرسن<sup>۴</sup> و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. از آنجا که در فرآیند جذب هیدروژن توسط فلزات، اکسیژن رقیب هیدروژن محسوب می‌شود، وجود اکسیژن در تمام مراحل ساخت هدف، بر میزان جذب هیدروژن و در نتیجه بهره نوترونی هدف تأثیر می‌گذارد. بنابراین باید از روش‌هایی جهت لایه نشانی استفاده نمود که فلز در حین لایه نشانی، کمترین اکسیژن ممکن را جذب کند.

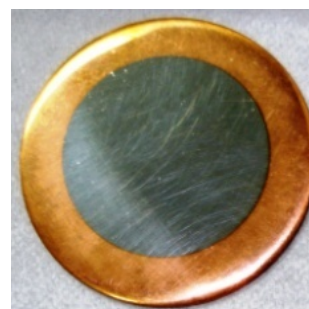
تیتانیوم به کار رفته در ساخت هدف، دارای خلوص ۹۸/۵

۱. Sputtering
۲. Ion plating
۳. Electron beam
۴. Gunnensen

۵. MERCK

۶. Stopping and Range of Ion in Matter

بیشتر است. بنابراین پیش بینی می‌شود نفوذ گاز در لایه‌های مختلف هدف ساخته شده به این روش کمتر باشد. شکل ۲، هدف ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. هدف ساخته شده.

با استفاده از روش آنالیز پس پراکندگی رادرفورد<sup>۱</sup>، و سپس شبیه سازی با نرم افزار SIMNRA<sup>۲</sup>، ضخامت لایه تیتانیومی هدف‌ها تعیین گردید که نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

روش آنالیز پس پراکندگی رادرفورد به این صورت است که نمونه توسط پرتویی از یون‌های سبک نظیر پروتون یا آلفا با شدت جریان ورودی ۱۰ تا ۳۰ نانوآمپر و با انرژی حدود ۲ MeV بمباران می‌شود. در اثر برخورد، پرتابه به صورت کشسان به عقب پراکنده می‌شود. هرچه اتم هدف کوچکتر و عمقی که برخورد در آن انجام می‌شود بیشتر باشد، انرژی ذره برگشتی کمتر است. چون پرتابه با توجه به توان توقف ماده، مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد در نتیجه انرژی برگشتی از سطح با انرژی برگشتی از ذراتی که در عمق هستند، متفاوت خواهد بود و در نهایت پهنای قله مربوطه زیاد می‌شود. با محاسبه پهنای و در نظر گرفتن قدرت جداکنندگی آشکارساز مقدار عمق تعیین می‌گردد. با این روش اندازه گیری عمق در حد میکرون امکان پذیر است و حساسیت آن برای عناصر سنگین بهتر است.

برای شبیه سازی با نرم افزار SIMNRA، ابتدا داده‌های خام حاصل از آزمایش RBS به عنوان ورودی به SIMNRA داده شد و طیف تجربی آن به دست آمد. سپس هر نمونه در نرم افزار به چند لایه با غلظت‌های مختلفی از عناصر موجود، به گونه‌ای تقسیم شد که طیف شبیه سازی شده تا حد ممکن بر طیف تجربی منطبق باشد.

شکل ۳ مربوط به هدف از نوع دسته اول (لایه نشانی یونی) است. در این شکل، لایه‌های تیتانیومی و مسی کاملاً قابل

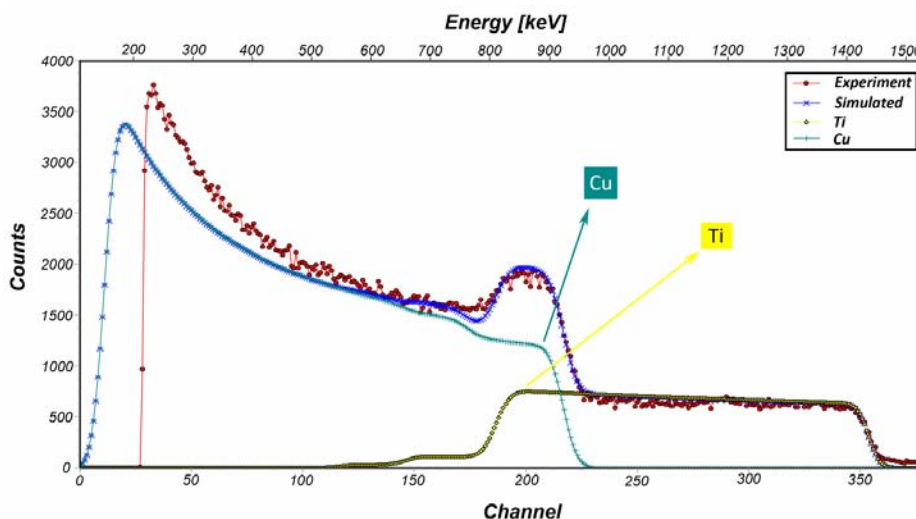
از دو روش لایه‌نشانی یونی و لایه نشانی کندوپاش برای نشان دادن تیتانیوم بر مس استفاده شده است.

دسته اول هدف‌ها به روش یونی، لایه نشانی شده‌اند. در این روش، ماده چشمه (در این تحقیق تیتانیوم) به روش گرمایی تبخیر می‌شود. اتم‌های بخار شده، در ناحیه پلاسمایی، یونیزه شده و توسط میدان الکتریکی به سمت زیرلایه شتاب می‌گیرند. مقدار فشار در اتاقک لایه نشانی در این روش، از مرتبه  $10^{-6}$  mbar بوده است.

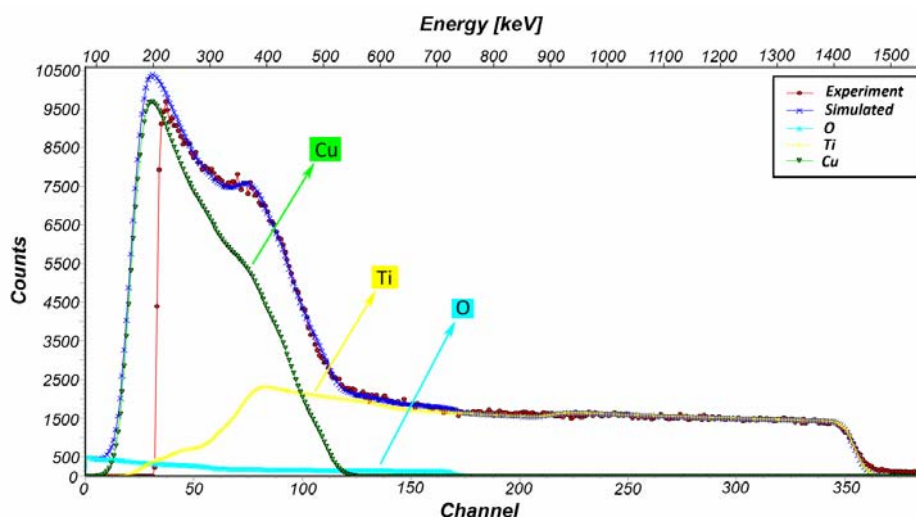
دسته دوم هدف‌ها به روش کندوپاش لایه نشانی شده‌اند. وقتی سطح جامد توسط ذرات پراثری نظیر یون‌های شتابدار بمباران شود اتم‌های سطح جامد به سمت عقب پراکنده می‌شوند. در این روش، سطح تیتانیوم توسط یون‌های شتابدار آرگون بمباران می‌شود. برخورد یون‌های آرگون به سطح تیتانیوم، سبب جدا شدن اتم‌های تیتانیوم می‌شود. در این فرآیند به دلیل نیاز به شار زیادی از ذراتی که سطح تیتانیوم را بمباران می‌کنند، از فشار کم ( $10^{-3}$  mbar) استفاده شده است. مولکول‌های این ذرات (معمولاً آرگون) و دیگر گازهای موجود در سیستم، مانند اکسیژن، در حین رشد فیلم، روی سطح آن قرار می‌گیرند. بنابراین خلوص لایه تیتانیومی هدف‌های دسته دوم کمتر از خلوص لایه تیتانیومی دسته اول است. علاوه بر این، به دلیل پراثری بودن اتم‌های تیتانیوم به هنگام لایه نشانی روی زیرلایه، فشرده‌گی لایه‌های Ti در مقایسه با دیگر روش‌های لایه نشانی

۱. Rutherford Back Scattering (RBS)

۲. Simulation of Nuclear Reaction Analysis (SIMNRA)



شکل ۳. طیف RBS هدفی که به روش یونی (هدف دسته اول) لایه نشانی شده است. محور افقی نشان دهنده انرژی (کانال) ذرات آلفای پس زده از نمونه برحسب کیلوالکترون ولت است. محور عمودی نشان دهنده تعداد ذرات برگشتی از نمونه می باشد.



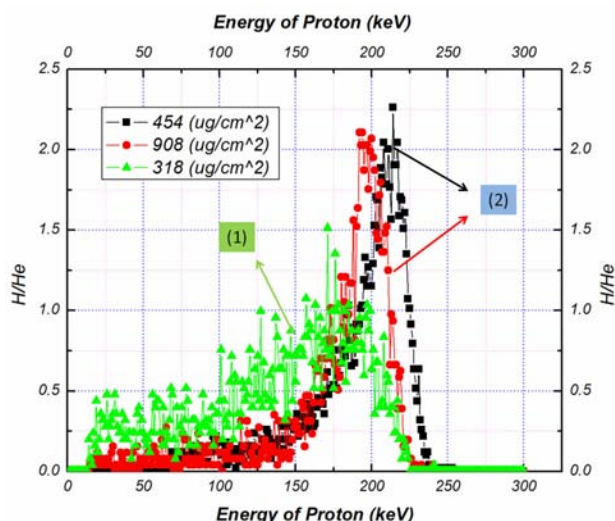
شکل ۴. طیف RBS هدفی که به روش کندوپاش (دسته دوم) لایه نشانی شده است. محور افقی نشان دهنده انرژی (کانال) ذرات آلفای پس زده از نمونه برحسب کیلوالکترون ولت است. محور عمودی نشان دهنده تعداد ذرات برگشتی از نمونه می باشد.

انباشت اولین لایه‌های تیتانیومی، روی سطح زیرلایه قرار می‌گیرند. ضخامت این هدف برابر  $2/014 \pm 0/001$  میکرومتر محاسبه شده است. در شکل ۳ و ۴ محورهای افقی پایین و بالا به ترتیب نشان دهنده کانال و انرژی ذره آلفای برگشتی از نمونه و محور عمودی نشان دهنده تعداد ذرات آلفای شمارش شده توسط آشکارساز می‌باشند.

همان‌طور که در هر دو شکل دیده می‌شود، لایه بینابینی از تیتانیوم در مس دیده می‌شود که باعث پدیدار شدن قله‌ای در

مشاهده‌اند. در این هدف، اثری از اکسیژن در فصل مشترک مس و تیتانیوم دیده نشده است. ضخامت لایه تیتانیومی در این هدف برابر  $1/143 \pm 0/001$  میکرومتر به دست آمده است.

در شکل ۴ که مربوط به هدف از نوع دسته دوم (کندوپاش) است، علاوه بر تیتانیوم و مس، اکسیژن هم ملاحظه می‌شود که وجود آن مربوط به نوع روش لایه نشانی است. در روش کندوپاش به دلیل وجود فشار کم، ناخالصی‌های گازی که در اتافک لایه نشانی وجود دارند، به خصوص اکسیژن، درحین



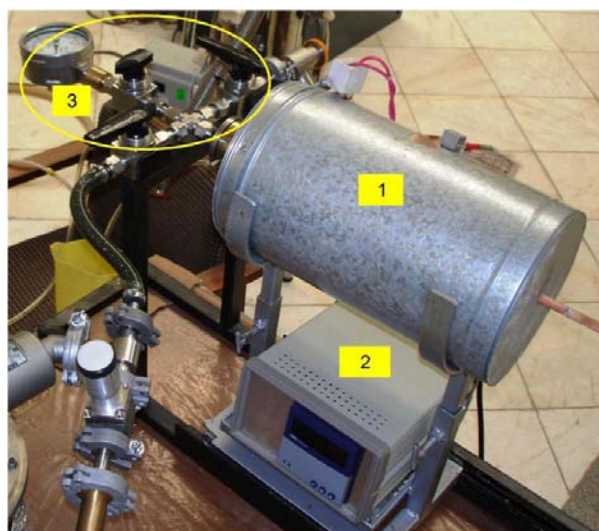
شکل ۶. طیف پروتون‌های پس زده (ERD) از (۱) هدف‌های دسته اول (نقاط مثلثی شکل)، و (۲) دسته دوم (نقاط مربعی و دایره‌ای شکل).

در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده و همزمان خلاء شده است. شکل (۵) محفظه تزریق گاز، کوره و کنترل کننده دمای کوره را نشان می‌دهد.

پس از انجام عملیات حرارتی، محفظه از داخل کوره بیرون آورده شده و تا دمای اتاق سرد گردیده است. سپس گاز هیدروژن با فشار ۴۰ bar به داخل محفظه تزریق شده و هدف‌ها به مدت یک روز در این حالت باقی مانده‌اند. آنالیز به روش آشکارسازی ذرات پس زده کشسان<sup>۱</sup> بر روی هدف‌ها انجام شده است. در این آنالیز، شناسایی ذرات سبک‌تر از پرتابه در ماتریس عناصر سنگین امکان پذیر می‌باشد [۶]. این روش به‌خصوص برای شناسایی ایزوتوپ‌های هیدروژن بسیار کارآمد است.

شکل‌های ۶ و ۷ نتایج حاصل از این آنالیز را برای هدف‌های با ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهند. در این شکل‌ها محور افقی نشان دهنده انرژی پروتون‌های پس زده از هدف و محور عمودی نشان دهنده تعداد این پروتون‌ها بر تعداد ذرات آلفای فرودی بر هدف است.

توزیع هیدروژن در هدف‌های دسته اول با شماره ۱ (نقاط مثلثی شکل) و در هدف‌های دسته دوم با شماره ۲ (نقاط مربعی



شکل ۵. (۱) کوره، (۲) کنترل کننده دمای کوره، و (۳) محفظه تزریق گاز.

این شکل‌ها شده است. در واقع درحین لایه نشانی لایه‌های اولیه، مقداری از تیتانیوم در مس نفوذ می‌کند.

هدف‌های تهیه شده به دو روش لایه نشانی مختلف، در شرایط یکسانی تحت عملیات حرارتی و سپس در معرض گاز هیدروژن قرار گرفته‌اند. اجرای عملیات حرارتی، برای فعالسازی هدف‌ها جهت جذب هیدروژن، ضروری است. همچنین با توجه به این که لایه نشانی به صورت اتم به اتم انجام می‌شود و ممکن است ساختارهای بلوری مختلفی در هنگام رشد لایه به وجود آیند، لذا برای ایجاد ساختار مکعب مرکز جسمی<sup>۱</sup> در تیتانیوم، لازم است عملیات حرارتی انجام شود. تیتانیوم در این ساختار قادر به جذب هیدروژن است و در صورت عدم ایجاد این ساختار، جذب گاز هیدروژن توسط تیتانیوم امکان پذیر نمی‌باشد. به این منظور، هدف‌ها داخل محفظه‌ای از جنس استیل قرار داده شدند و داخل محفظه تحت خلاء  $5/3 \times 10^{-2}$  میلی بار قرار گرفت. سپس این محفظه در داخل کوره الکتریکی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد، ۹۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد، ۴۵ دقیقه

۱. Elastic Recoil Detection (ERD)

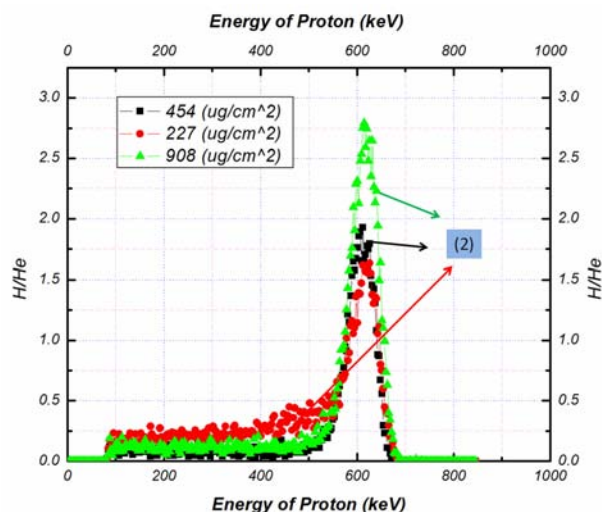
۱. Body Center Cubic (BCC)

دلیل پراثری بودن اتم‌های تیتانیوم به هنگام لایه نشانی روی زیرلایه، فشردگی لایه‌های Ti در این روش، در مقایسه با دیگر روش‌های لایه نشانی بیشتر است.

فشار در روش لایه نشانی یونی، از مرتبه  $10^{-6}$  mbar است. بنابراین ناخالصی‌های موجود در این روش بسیار کمتر از روش کندوپاش می‌باشند. تفاوت این دو روش، در شکل‌های ۳، ۴ و ۶ دیده می‌شود. چون در روش یونی، مانعی برای نفوذ هیدروژن به لایه‌های عمیق‌تر هدف وجود ندارد، توزیع اتم‌های هیدروژن در تمام عمق هدف صورت گرفته است.

با توجه به این که خواص شیمیایی ایزوتوپ‌های یک عنصر مشابه هستند، می‌توان رفتار هدف‌ها را در مقابل هیدروژن به گازهای دوتریوم و تریتیوم نیز تعمیم داد. بنابراین، نتایج به دست آمده برای هیدروژن، در مورد دوتریوم و تریتیوم نیز صادق است. مطالعه توزیع هیدروژن در هدف، هنگام بمباران هدف‌های دوتریومی با باریکه D، دارای اهمیت است. اگر هیدروژن فقط در سطح هدف توزیع شده باشد، هدف درحین بمباران (به خصوص در جریان‌های بالا) به سرعت از گاز خالی می‌شود. اما اگر توزیع هیدروژن در تمام عمق صورت گرفته باشد، لایه‌های سطحی هیدروژن، متحمل واکنش شده و اتم‌های هیدروژنی که در لایه‌های عمیق‌تر قرار دارند همانند مخزن ذخیره گاز عمل کرده و هنگام تهی شدن لایه‌های بالایی (به دلیل بمباران و انجام واکنش D-D) به سمت سطح نمونه حرکت کرده و هسته‌های هدف را برای واکنش D-D فراهم می‌کنند. به این ترتیب عمر هدف افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از روش لایه نشانی یونی برای ساخت هدف‌های دوتریومی پیشنهاد می‌شود.

از همکاری صمیمانه جناب آقایان دکتر لامعی، دکتر کاکویی و اعضای محترم پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کشاورزی، پزشکی و صنعتی هسته‌ای کرج، گروه پرتوهای یونی کمال تشکر را داریم.



شکل ۷. طیف پروتون‌های پس زده (ERD) از هدف‌های دسته دوم. پروتون‌ها فقط در لایه‌های سطحی هدف تجمع کرده‌اند و در عمق هدف‌ها مقدار قابل ملاحظه‌ای از پروتون‌ها دیده نمی‌شود.

و دایره‌ای شکل) در شکل ۶ نشان داده شده است. هیدروژن فقط در لایه‌های سطحی هدف‌های دسته دوم تجمع کرده و در عمق هدف‌ها مقدار قابل ملاحظه‌ای از هیدروژن دیده نمی‌شود. اما در هدف دسته اول، هیدروژن تا عمق نمونه نفوذ کرده است. شکل ۷، توزیع هیدروژن را فقط در هدف‌های دسته دوم نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که توزیع هیدروژن در تمام عمق هدف، یکنواخت نبوده و هیدروژن در لایه‌های سطحی هدف تجمع کرده است. در روش لایه نشانی کندوپاش، به دلیل فشردگی لایه‌های تیتانیومی و وجود اکسیژن در آنها، اتم‌های هیدروژن نمی‌توانند به درون لایه‌های هدف نفوذ کنند.

به دلیل این که فشار گاز در لایه نشانی به روش کندوپاش، کم و از مرتبه  $10^{-3}$  mbar است، ناخالصی‌های موجود در محیط لایه نشانی (مانند اکسیژن) به همراه تیتانیوم بر روی مس قرار می‌گیرند. وجود اکسیژن در هدف‌هایی که به این روش لایه نشانی شده‌اند در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که اکسیژن، مانع نفوذ هیدروژن به لایه‌های عمیق هدف شده است. به طوری که توزیع هیدروژن فقط در لایه‌های سطحی هدف صورت گرفته است. علاوه بر این، به

- (1997) 75.
4. J B Marion, J L Fowler, "Fast Neutron Physics" (1960).
5. E M Gunnensen, G James, *Nucl. Instru. Meth.*, **8** (1960) 173.
6. Zeev B. Alfassi, "Non-destructive Elemental Analysis" (2001).
1. F Abbasi, G R Etaati, H Afarideh, R Koochi-Fayegh, G R Aslani, *J. Phys. Res.* **3** (2) (2002) 100.
2. F Abbasi Davani, R Koochi Fayegh, H Afaride, G R Etaati, G R Aslani, *Radiation Measurement* **37** (2003) 237.
3. J Csikai, S Szegedi, L Olah, S M Ibrahim, A M El-Megrab, N I Molla, M M Rahman, R U Miah, F Habbani, I Shaddad, *Nucl. Instr. Meth. Phys. A* **397**