



Sci. and Tech. note

یادداشت علمی و فنی

طراحی هدف تبدیل‌کننده الکترونیهای پُرانرژی به پرتوهای ایکس

فرهود ضیایی\*، حسین آفریده  
مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرایند یزد، صندوق پستی: ۳۸۹-۸۹۱۷۵، یزد - ایران

واژه‌های کلیدی: هدف تبدیل‌کننده، الکترونیهای پُرانرژی، پرتوهای ایکس، کد کامپیوتری EGS4، اندازه‌گیری توزیع دُز، باریکه الکترون

## Design of High Energy Electron / X-Rays Conversion Target

F. Ziaie\*, H. Afarideh

Yazd Radiation Processing Center, P.O. Box: 89175-389, Yazd - Iran

**Abstract:** In this work the design of a target converting high energy electrons to bremsstrahlung x-ray is described. The system has been optimized for different energy of the accelerated electron beam, using the EGS4 Monte-Carlo computer code. For this purpose the thickness of the layers in the target, including the main converter, cooling and lower layer (for the energy spectrum tuning), suitable to the desired and practical conditions have been obtained. In order to evaluate the calculated results, measurements have been carried out for the same geometry using the x-ray converter target, for 2MeV, 5MeV and 10 MeV electron beam. It is shown that the calculated data are in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** conversion target, high energy electron, x-ray, EGS4 computer code, dose distribution measurement, electron beam



## ۱- مقدمه

در سالهای اخیر همزمان با راه اندازی و شروع به کار شتابدهنده الکترون، از نوع رودوترون<sup>(۱)</sup> در مرکز پرتو فرایند یزد، فرایند پرتو دهی به وسیله باریکه الکترون در ایران معرفی شده است. پرتوهای تابش ترمزی تولید شده در اثر توقف الکترونیهای پارانرژی، از سالها پیش به عنوان جایگزین مناسبی برای پرتوهای گامای حاصل از "کبالت-۶۰" پیشنهاد شده است [۱]. قابلیت نفوذ بسیار زیاد فوتونهای تولید شده در اثر فرایند تابش ترمزی به منظور پرتو دهی مواد چگال، توجه تعدادی از پژوهشگران را بخود جلب کرده است، جایی که پرتوهای الکترونی تنها در مورد مواد دارای ضخامت کم و چگالی پایین، قابل بهره برداری هستند. بیشینه انرژی پرتوهای ایکس تابش ترمزی، برابر انرژی بیشینه الکترونیهای فرودی است. این انرژی ممکن است با توجه به نوع کاربرد و تندی، دُز جذبی متوسطی حدود ۱۰۰ برابر بزرگتر از چشمه های پرتوگاما تولید نماید. بطور کلی از مزایای بکار بردن پرتوهای ایکس تابش ترمزی می توان به مواردی از جمله امکان پرتو دهی مواد چگال، امکان پرتو دهی مواد ضخیم، تندی دُز بالا، گسیل باریکه ناهمسانگرد (رو به جلو)، در مقایسه با گسیل همسانگرد پرتوهای گاما، امکان استفاده از آن در شتابدهنده های الکترون مورد نیاز به عنوان سیستم مکمل، در خاموش کردن چشمه به هنگام عدم نیاز اشاره کرد. در کلیه ابزارهای فرایند پرتو دهی، انرژی پرتو ها بگونه ای محدود می گردد که در محصولات تحت تابش، هیچگونه رادیوآکتیویته ای بوجود نیاید. بدین جهت تاکنون تحت استانداردهای بین المللی بیشینه انرژی فوتونها MeV ۵ و در مورد الکترونها MeV ۱۰ تعیین شده بود. اکنون به منظور توسعه صنعت استفاده از ماشینهای مولد پرتو ایکس در پرتو دهی مواد غذایی یک مجمع مشاوره بین المللی در وین

تشکیل شده است [۲]. در این مجمع متخصصین امور، اصلاحاتی را در مقررات بین المللی وضع شده توسط UNO<sup>(۲)</sup> در مورد استفاده از انرژی بیش از MeV ۵ برای تولید پرتوهای ایکس عرضه داشتند [۳].

## ۲- دستگاه پرتو دهی

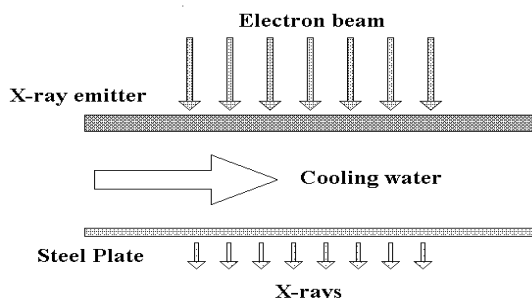
دستگاه پرتو دهی مورد استفاده در این پژوهش، یک شتابدهنده الکترون از نوع رودوترون مدل TT-200 است، که قادر به تولید باریکه جاروبشونده الکترون (بیشینه پهنای جاروب ۱۰۰cm با بسامد ۱۰۰Hz) با انرژیهای ۵ و ۱۰ مگا الکترون ولت و بیشینه توان ۸۰kW است. به منظور پرتو دهی مواد، این شتابدهنده به یک سیستم تسمه نقاله با سرعت متغیر مجهز شده است.

## ۳- ساختار اصلی هدفهای تبدیلکننده

ساختار کلی یک هدف تبدیلکننده برای تولید پرتوهای ایکس، عموماً از سه جزء اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: لایه تبدیلکننده یا گسیلنده پرتوهای ایکس، مجرای عبور آب خنککننده، لایه تحتانی فولادی (شکل ۱). برای طراحی دقیق شکل هندسی چنین دستگاهی آگاهی از شکل تغییرات توزیع دُز در مقطع باریکه الکترون در دو سوی جاروب باریکه، جهت حرکت تسمه نقاله و توزیع عمقی دُز در یک ماده مرجع به عنوان محصول تحت تابش و مفروضات اولیه در مورد باریکه ضروری است. بنابراین پیش از انجام عمل طراحی، آزمایشهایی تحت عنوان بررسی یکنواختی باریکه الکترون انجام شده است [۴].

## ۴- طراحی لایه تبدیلکننده

در طراحی لایه تبدیلکننده، نکته اصلی بیشینه سازی بازده تبدیل الکترونها به پرتوهای ایکس است بگونه ای که هیچ

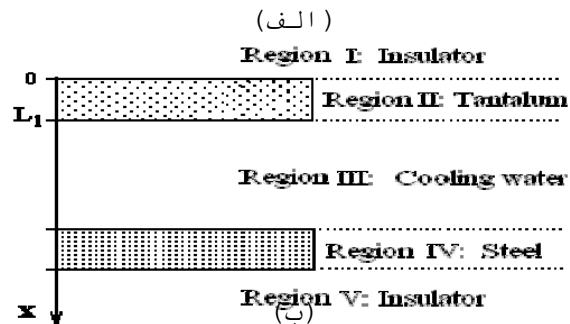
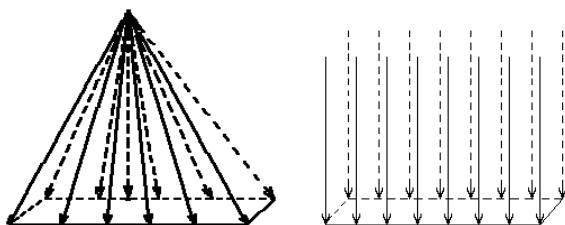




**۴-۱ شبیه‌سازی شکل باریکه الکترون**  
 در کلیه محاسبات انجام شده توسط پژوهشگران، باریکه الکترون به صورت عمود بر سطح شبیه‌سازی شده است (شکل ۲-الف). در این کار، علاوه بر حالت نامبرده، شکل واقعی باریکه الکترون، یعنی باریکه خروجی از دماغه جاروب (شکل ۲-ب) نیز شبیه‌سازی شده است. شکل ۳ توزیع دز محاسبه شده در جهت جاروب باریکه را برای الکترونها و پرتوهای ایکس در دو حالت نامبرده مورد مقایسه قرار می‌دهد. از روی این شکلها بوضوح اختلاف بین حالت واقعی یعنی فرود غیر عمودی و حالت فرضی فرود عمودی الکترونها ملاحظه می‌گردد. بنابراین برای انجام دادن کلیه محاسبات بعدی از این شبیه‌سازی استفاده شده است.

**۴-۲ شبیه‌سازی هندسه دستگاه پرتودهی و محاسبه توزیع دز جذبی**

دستگاه پرتودهی مورد نظر بر اساس ابعاد و نحوه قرارگیری فانقوم‌های تهیه شده بر روی تسمه نقله ویژه باریکه‌های الکترون و ایکس طراحی می‌شود. در این بخش، ابتدا فضای مورد نیاز جهت بررسی تراژد ذرات تعریف، سپس به حجمی واحد در سه جهت  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  تقسیم‌بندی می‌شود. شکل ۴ وضعیت فضای تراژد شامل کلیه عناصر و ترکیبات دربرگیرنده از جمله هوا را نسبت به دماغه جاروب الکترون نمایش می‌دهد. بمنظور بهینه‌سازی لایه تبدیل‌کننده، ضخامت لایه‌های آب و استیل ثابت در نظر گرفته شده‌اند و محاسبه بازده تبدیل یا کسر انرژی جذب شده در فانقوم با افزایش ضخامت لایه  $Ta$ ، شروع از مقدار صفر با گام‌های ثابت انجام پذیرفت. شکل ۵ تغییرات بازده تبدیل الکترونها با انرژی متفاوت به پرتوهای ایکس را در مقابل ضخامت‌های مختلف لایه تانتالیوم نشان می‌دهد.



**شکل ۱- نمایی از ساختار هدفی تبدیل‌کننده الکترون- ایکس و نمایش نواحی تشکیل دهنده آن.**  
 الکترونی از هدف عبور نکند. بازده تبدیل عبارت است از نسبت کسر انرژی پرتوهای ایکس جذب شده در محصول به کسر انرژی الکترونها جذب شده در آن در حالت عدم وجود هدف، تحت شرایط یکسان فیزیکی و هندسی. در این مورد عوامل مؤثر در بازده تبدیل یک هدف تبدیل‌کننده عبارتند از انرژی الکترونها فرودی و عدد اتمی عنصر تشکیل‌دهنده لایه تبدیل‌کننده [۵]. در انتخاب یک عنصر به عنوان لایه تبدیل‌کننده، وجود شرایط ویژه‌ای از جمله بازده تبدیل کافی، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر تنشهای حرارتی تولید شده در اثر تابش، مقاومت در برابر تنشهای مکانیکی وارد شده حاصل از فشار آب خنک‌کننده و توزیع‌پذیری ضروری است. از بین عناصر موجود در طبیعت عنصر تانتالیوم به دلیل خاصیت توزیع‌پذیری خوب، قیمت کمتر (نسبت به طلا) و مقاوم بودن در برابر تنشهای حرارتی و مکانیکی، بیشتر بکار می‌رود. در این کار پژوهشی، بنا به دلایل ذکر شده و به منظور استفاده از تانتالیوم در هدفهای در دسترس، که نتایج حاصل از آنها می‌بایست با نتایج محاسباتی مقایسه شوند، کلیه محاسبات با استفاده از کد محاسباتی EGS4 و طراحی برنامه کاربر بر روی عنصر تانتالیوم انجام گرفته است.

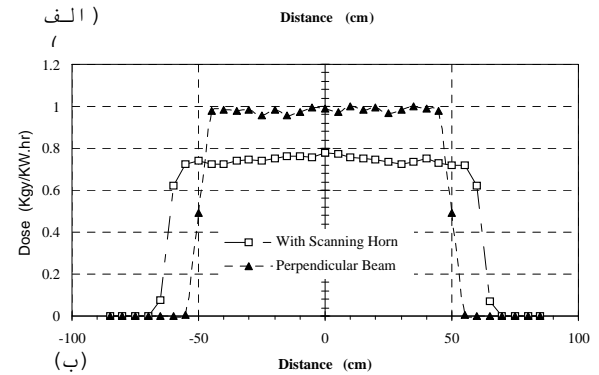
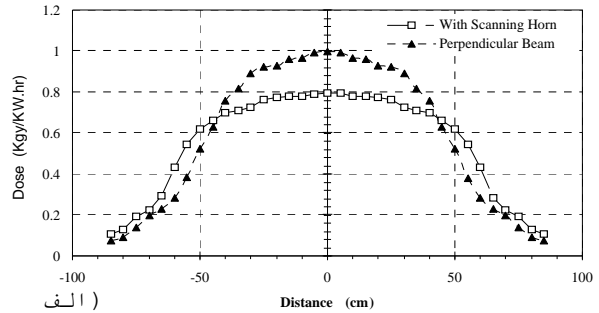


**شکل ۵-** نمودارهای تغییرات بازده تبدیل الکترون بر حسب ضخامت‌های مختلف لایه تبدیلکننده تانتالیوم

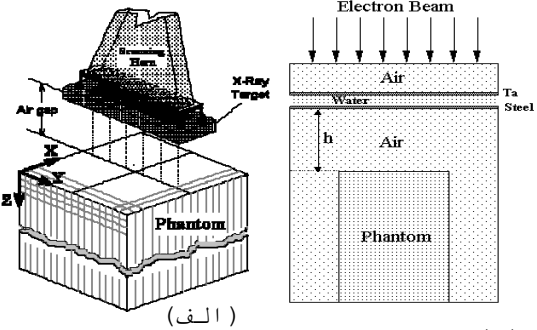
بطوری که مشاهده می‌شود، روند تغییرات نمودارها بطور کلی سه ناحیه را شامل می‌شود. در مورد الکترونی‌های با انرژی ۷/۵ و ۱۰ مگا الکترون ولت، افزایش ضخامت لایه تبدیلکننده تانتالیوم از مقدار صفر، ابتدا موجب کاهش بازده تبدیل می‌گردد. علت این کاهش کافی نبودن ضخامت کل هدف برای جذب کامل انرژی الکترونها و در نتیجه عبور آن از مجموعه هدف است. با افزایش ضخامت لایه تبدیلکننده، از اثر الکترونی‌های عبوری کاسته شده و از یک نقطه به بعد کل انرژی الکترون در هدف جذب می‌شود. سپس بازده تبدیل با افزایش ضخامت شروع به افزایش خواهد نمود. در این ناحیه در اثر برهم‌کنش‌های مکرر تابش ترمزی، پرتوهای ایکس تولید می‌گردد. هر چه ضخامت لایه تبدیلکننده افزایش می‌یابد الکترونی‌های ثانویه نیز در این محیط باقی مانده و پرتوهای ایکس بیشتری تولید می‌شود. از طرفی در این ناحیه پرتوهای ایکس تولید شده قادر به عبور بوده و کمتر در خود لایه جذب می‌گردند. این افزایش تا زمانی ادامه دارد که یک موازنه بین تولید و جذب پرتوهای ایکس حاصل شود. از نقطه ماکزیموم منحنی به بعد که ناحیه سوم را تشکیل می‌دهد افزایش لایه تبدیلکننده موجب خود جذب پرتوهای ایکس شده که از میزان بازده تبدیل خواهد کاست. لذا مرز بین ناحیه‌های دوم و سوم، ضخامت بهینه لایه تبدیلکننده را که دارای بازده تبدیل بیشینه است، تشکیل می‌دهد.

**۵- تنظیم طیف انرژی پرتوهای ایکس**  
کمیت دیگری که در شکل توزیع دُز جذبی در ماده نقش مؤثری دارد، طیف انرژی فوتون‌های گسیلی است.

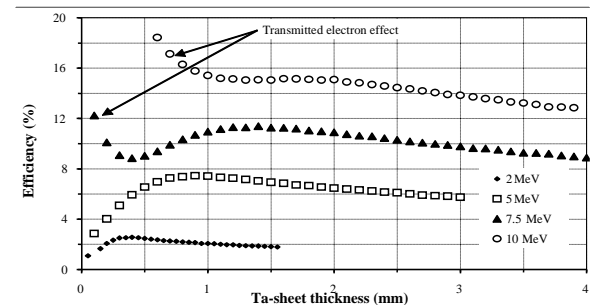
**شکل ۲-** شکلهای هندسی باریکه الکترونی‌های فرودی؛ الف) باریکه موازی، ب) به شکل سیستم دماغه جاروب الکترون



سوم، سورج در جبهی مناسبه سه راستای جاروب برای حالات باریکه تابنده عمودی و هدایت شده تحت سیستم جاروب الکترون. الف) برای پرتوهای ایکس ۱۰ MeV و ب) الکترون



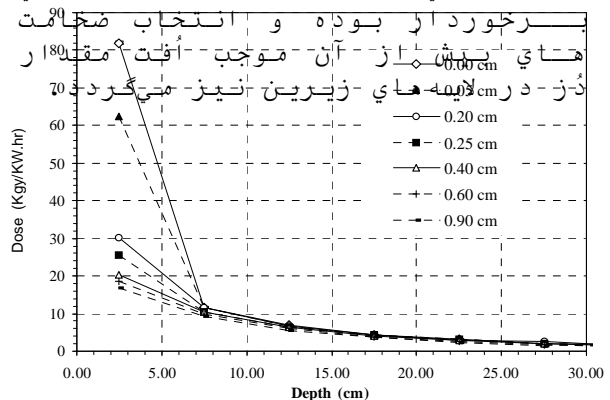
**شکل ۴-** نمایش فضای ترابرد در نظر گرفته شده برای انجام محاسبات؛ الف) نمای روبروی لایه‌های فضائی ترابرد؛ ب) طرح سه بعدی سیستم پرتوهدمی



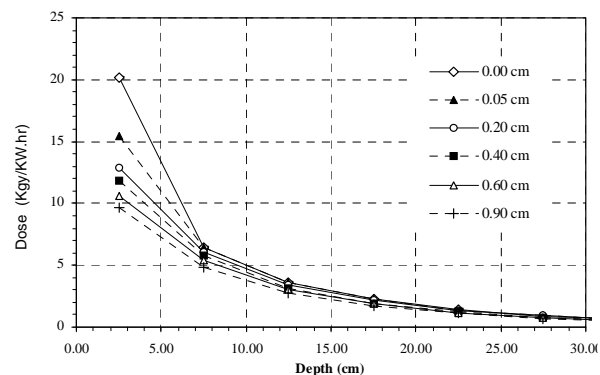


دلیل این امر تناسب عمق نفوذ متفاوت فوتونها با انرژی آنها است. بنابراین، با توجه به اهمیت کنترل نسبت یکنواختی دُز در جسم، طیف انرژی حاصل باید بگونه‌ای تنظیم شود که شکل منحنی دُز-عمق پرتوهای ایکس در محصول تا حد امکان دارای روند کاهشی کندی باشد. این مسأله با بهینه‌سازی ضخامت لایه تحتانی استیل قابل کنترل است.

برای ایجاد کاهش یکنواخت در منحنی دُز-عمق، برنامه کاربر برای ضخامت‌های مختلف لایه تحتانی استیل اجرا و در هر بار، تغییرات دُز-عمق محاسبه می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ توزیع‌های دُز-عمق را برای ضخامت‌های متفاوت لایه استیل در مورد انرژی‌های ۱۰ و ۵ مگا الکترون ولت نشان می‌دهند. بطوری‌که ملاحظه می‌شود، بدون حضور لایه مذکور، انرژی جذب شده در لایه اول فانتوم نسبت به لایه‌های زیرین به شدت بالاست و با افزایش ضخامت لایه استیل این مقدار افت کرده و یکنواختی بیشتری در توزیع دُز-عمق ایجاد می‌نماید، به طوری که در ضخامت‌های حدود ۰/۲-۰/۴ cm برای انرژی ۱۰ MeV و ۰/۲-۰/۴ MeV منحنی از یکنواختی قابل قبولی برخوردار بوده و انتخاب ضخامت‌های بیش از آن موجب افت مقدار دُز در لایه‌های زیرین نیز می‌گردد.



شکل ۶- منحنی‌های توزیع دُز-عمق پرتوهای ایکس ۱۰ MeV در ضخامت‌های متفاوت لایه استیل

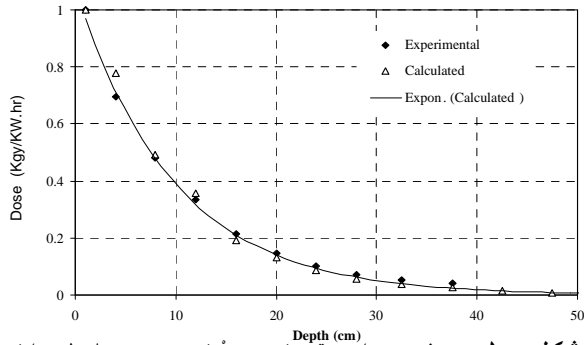


شکل ۷- منحنی‌های توزیع دُز-عمق پرتوهای ایکس ۵ MeV در ضخامت‌های متفاوت لایه استیل

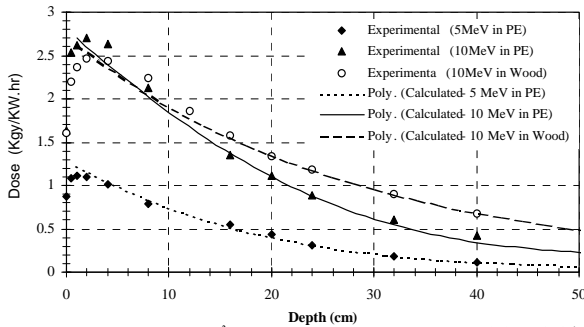
#### ۶- اندازه‌گیری توزیع دُز جذبی

برای اندازه‌گیری مقدار دُز جذبی در حجم مواد، فانتوم‌هایی از جنس آب، پلی اتیلن و چوب بکار رفته‌اند. اندازه‌گیری‌هایی مربوط به فانتوم آب تحت تابش الکترون‌های ۲ MeV انجام گرفتند [۶]. همچنین فانتوم‌های چوبی و پلی‌اتیلنی بکار رفته به صورت ورقه‌هایی با ابعاد ۴۵cm×۸۰cm به ضخامت‌های ۰/۵، ۱ و ۲ سانتی‌متر و به ترتیب دارای چگالی ۰/۵ و ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده‌اند. بکار بردن این گونه فانتوم‌ها، امکان تعبیه فیلم دُزیمترهای CTA را در لابلاهای این لایه‌ها ممکن می‌سازد. دُزیمترهای CTA به صورت متقاطع در عمق‌های متفاوت، در جهت‌های حرکت تسمه نقاله و جاروب الکترونی قرار گرفته و در نتیجه امکان اندازه‌گیری توزیع دُز به صورت سه بعدی را در حجم فانتوم فراهم می‌سازد. از طرف دیگر با رسم نمودار تغییرات دُز نسبت به عمق فانتوم در راستای محور مرکزی باریکه می‌توان به نمودار توزیع دُز-عمق دست یافت.

شکل‌های ۸ و ۹ منحنی‌های توزیع دُز-عمق محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای باریکه الکترون‌های ۵ و ۱۰ مگا الکترون ولت در فانتوم پلی‌اتیلن‌اند. همچنین منحنی‌های توزیع دُز-عمق محاسباتی و تجربی در مورد پرتوهای ایکس با این انرژی‌ها برای مقایسه، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل‌ها داده‌های محاسباتی به وسیله روش‌های آنالیز عددی با چند جمله‌ای‌های دارای درجه مناسب برازش داده شده است.



شکل ۱۰- نمودار توزیع دز-عمق حاصل از نتایج محاسباتی و تجربی در فانتوم آب تحت تابش پرتوهای ایکس ۲ MeV



شکل ۱۱- نمودار توزیع دز-عمق حاصل از نتایج محاسباتی و تجربی در فانتومهای پلی اتیلن و چوب تحت تابش پرتوهای ایکس ۱۰ MeV و ۵ MeV

آن را تا حد قابل قبولی پیش بینی نمود.

جدول ۱- نتایج عددی محاسبات انجام شده

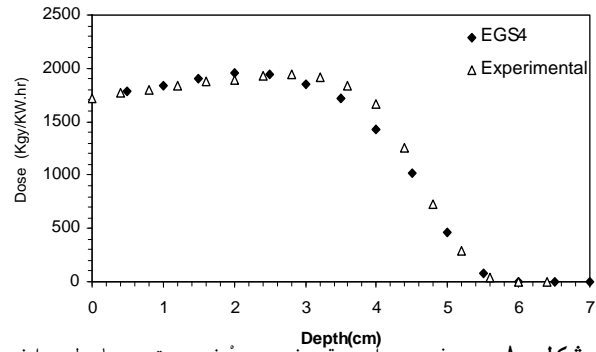
پارامترهای مورد محاسبه	۵ MeV	۱۰ MeV
ضخامت بهینه لایه تبدیلکننده	۱ mm	mm ۱/۷۵
ضخامت بهینه لایه استیل	۲ mm	۴ mm

### تشکر و قدردانی

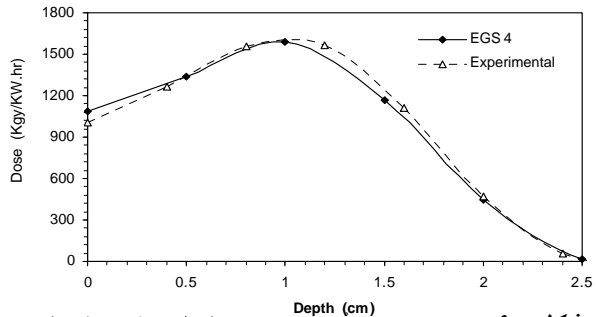
بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از همکاران محترم گروه دزیمتری و کارگردانی شتابدهنده مرکز یزد به ویژه آقایان مهندس تهامی و مهندس پورصالح اعلام می‌دارد.

### پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Rodotron
- ۲- UNO (FAO, WHO, IAEA) Regulation



شکل ۸- نمودار توزیع دز-عمق حاصل از نتایج محاسباتی و تجربی در فانتوم پلی اتیلن تحت تابش باریکه الکترونیهای 10 MeV



شکل ۹- منحنی دز-عمق حاصل از نتایج محاسباتی و تجربی در فانتوم پلی اتیلن تحت تابش باریکه الکترونیهای 5 MeV

### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از انجام محاسبات بروش مونت کارلو با بکارگیری کد EGS4، ضخامت لایه‌های بهینه هدف تبدیلکننده تعیین گردید. به منظور اطمینان یافتن و تأیید نتایج محاسباتی، توزیع دز در جهات مختلف بر سطح و درون مواد، اندازه‌گیری و با نتایج محاسباتی مقایسه، و توافق کامل در آنها مشاهده شد. پس از کسب اطمینان از صحت نتایج محاسباتی، مقادیر بهینه ضخامت لایه‌های هدف تبدیلکننده به شرح مندرج در جدول ۱ ارائه شده‌اند. بر این اساس با استفاده از برنامه کاربر تهیه شده می‌توان محاسبات نامبرده را برای انرژی‌های متفاوت پرتوهای الکترونی، همچنین با نظر گرفتن مواد مختلف به عنوان جاذب انجام داده و پیش از انجام اندازه‌گیری و صرف هزینه، نتایج



### References:

1. H.W. Koch and E.H. Eisenhower, National Research Council Publication 1273 (1958).
2. International consultant's Meeting on the Development of x-ray Machine for Food Irradiation, Viena, 16-18 (Oct 1995).
3. WHO Technical Report, No. **659**, Gneva (1981).
4. F. Ziaie, H. Afarideh, S. M. Hadji-Saeid, S. A. Durrani, "Investigation of beam uniformity in industrial electron accelerator," Radiation Measurement, Vol 34, No. **1-6**, 609-613 (2001).
5. WHO Technical Report, No. **659**, Gneva (1981).
6. F. Ziaie, H. Afarideh, S. M. Hadji-Saeid, S. A. Durrani, "Investigation of beam uniformity in industrial electron accelerator," Radiation Measurement, Vol 34, No. **1-6**, 609-613 (2001).
7. W. Migdal, Study on application of e/x conversion for radiation processing, NUKLEONIKA, Vol. 41, No. **3**, 57-63 (1996).
8. F. Ziaie, Z. Zimek, S. Bulka, H. Aferideh, S. M. Hadli-Saeid, "Calculated and measured dose distribution in electron and x-ray irradiated water phantom," Radiate. Chem. Phys., Vol. 63, No. **2**, 177-183 (2002).