

## بررسی میزان پس‌پراکندگی الکترون‌های مورد استفاده در رادیودرمانی

خباز، رحیم؛ کوهی، بهزاد

دانشگاه گلستان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

### چکیده

در رادیودرمانی دز الکترون‌های پس‌پراکنده شده به بافت باید در نظر گرفته شود. با توجه به اطلاعاتی که درباره پدیده پس‌پراکندگی الکترون موجود است، میزان پس‌پراکندگی بسته به جنس محیط متفاوت خواهد بود. با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو MCNPX2.6 توزیع‌های پس‌پراکندگی و مقادیر اشباع آن‌ها برای پرتوهای الکترونی با انرژی بین ۴ MeV تا ۲۵ MeV (انرژی‌های مورد استفاده در الکترون درمانی) از مواد مختلف مانند آلومینیوم، مس، سرب و پلی استایرن بدست آمد. داده‌های بدست آمده با استفاده از کد MCNPX2.6 نشان می‌دهد که احتمال پس‌پراکندگی الکترون به شدت وابسته به عدد اتمی موثر و انرژی الکترون است. احتمال پس‌پراکندگی برای انرژی‌های پایین کمتر به انرژی وابسته است و عمدتاً تابعی از عدد اتمی موثر ماده پراکننده است. مقادیر اشباع پس‌پراکندگی به صورت تابع خطی از عدد اتمی موثر ماده پراکننده برای تمام انرژی‌های مورد مطالعه توزیع شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: الکترون، پس‌پراکندگی، MCNPX2.6، عدد اتمی موثر، الکترون درمانی

## Investigation of the backscattering of electrons used in radiotherapy

R. Khabaz and B. Koohi

Department of Physics, Faculty of Sciences, Golestan University

### Abstract

In radiotherapy, the dose of electron backscattered to the tissue should be considered. According to the information available about the electron backscattering phenomenon, the backscattering rate will vary depending on the different environment. Using the MCNPX2.6 Mont Carlo code, the backscattering distribution and their saturation values for electron beams with energies between 4 MeV and 25 MeV (energies used in electron therapy) were obtained from various materials such as aluminum, copper, lead and polystyrene. The data obtained using MCNPX2.6 show that probability of electron backscattering is strongly dependent on the effective atomic number and energy of the electron. The probability of backscattering for low energies is less dependent on energy and is mainly a function of the effective atomic number of the backscatter material. The saturation values of the backscattering are distributed linear function of the effective atomic number of the backscatter material for all studied energies.

**Keywords:** Electron, Backscattering, MCNPX2.6, Effective atomic number, Radiotherapy

Email: r.khabaz@gu.ac.ir

## ۱. مقدمه

هنگامی که باریکه الکترونی از داخل ماده عبور می‌کند به دلیل برهم‌کنش نیروی کولنی میان الکترون‌های فرودی با الکترون‌های اتمی و هم هسته‌ی ماده، الکترون‌ها دچار پراکندگی متعدد می‌شوند و الکترون‌ها سرعت کافی برای جابجایی از مسیر اصلی‌شان را پیدا می‌کنند [۱]. در چنین شرایطی دو دسته الکترون خواهیم داشت: الف) الکترون‌های ثانویه و ب) الکترون‌های پس پراکنده شده. الکترون‌های ثانویه همان الکترون‌هایی هستند که در اثر برخورد الکترون‌های اولیه با ماده هدف از اتم جدا شده و در صورتی که بتوانند بر سطح پتانسیل غلبه کنند آن را ترک می‌کنند. اغلب الکترون‌های ثانویه در انرژی‌های پایین منتشر می‌شوند محتمل‌ترین انرژی در ناحیه ۱eV تا ۱۵ eV است. برخی الکترون‌های ثانویه انرژی برابر با انرژی الکترون‌های اولیه دارند [۲]. هنگامی که الکترونی از درون ماده‌ای می‌گذرد پراکندگی کشسان کولنی که در آن واکنش با هسته اتم‌های محیط رخ می‌دهد، باعث می‌شود که الکترون تغییر جهت دهد. با توجه به برهم‌کنش کولنی برای الکترون‌هایی که مرکز پراکندگی هسته هستند، نیرو بزرگتر و در نتیجه زاویه پراکندگی بزرگتر خواهد شد. پس از هر رویداد پراکندگی کولنی، الکترون به طور متوسط ۵ درجه پراکنده می‌شود؛ اما در موارد نادر الکترون می‌تواند تا ۱۸۰ درجه پراکنده شود. پراکندگی در زوایای بالا می‌تواند ناشی از چندین پراکندگی به سمت عقب باشد. الکترون‌های بازتاب شده به عنوان الکترون‌های پس پراکنده شده شناخته می‌شوند [۳،۴]. بسیاری از این واکنش‌های کولنی رویدادهای پراکندگی کشسان هستند، بنابراین الکترون‌های پس پراکنده شده همان انرژی الکترون‌های فرودی را حفظ می‌کنند. از آن جایی که نیروی کولنی که به الکترون اعمال می‌شود به طور مستقیم با بار هسته (وابسته به عدد اتمی عنصر) مرتبط است، بین توانایی یک ماده برای پراکندگی الکترون‌ها و عدد اتمی رابطه‌ای را انتظار داریم. میزان پراکندگی یک ماده به طور تقریبی با مربع عدد اتمی و معکوس انرژی جنبشی الکترون‌ها تعریف می‌شود  $\left(\approx \frac{Z^2}{E_k}\right)$ ؛ عبارتی پراکندگی برای اتم‌های سنگین‌تر نسبت به اتم‌های سبکتر بسیار بیشتر است و همچنین با افزایش انرژی الکترون توان پراکندگی افزایش می‌یابد [۵]. پس پراکندگی مسئله بسیار پیچیده‌ای است و از دیرباز تاکنون روش‌های مختلفی برای حل آن ارائه گردیده است. این مسئله به دو روش اصلی مونت کارلو و روش عددی حل می‌شود.

اورهات<sup>۱</sup> پدیده پس پراکندگی را برای الکترون‌های کم انرژی مورد بررسی قرارداد. فرض اورهات بر اساس یک تک برخورد کشسان بود که وابستگی ضریب پس پراکندگی به عدد اتمی ماده پراکننده را تایید نمود [۶]. در مطالعه دیگر کالف- ازرا<sup>۲</sup> اصلاحی از فرمول اورهات پیشنهاد کرد و در مواد با عدد اتمی پایین به توافق خوبی برای ضریب پس پراکندگی رسید [۷]. در بررسی دقیق و کامل‌تر دیگری آرچارد<sup>۳</sup> نقص مطالعات قبلی را که فقط تک پراکندگی کشسان را در نظر می‌گرفتند با مدل سازی در دو حالت تک برخورد کشسان و برخورد چندگانه (پخش شدگی) را برطرف کرد و یکی از اولین رابطه‌ها برای طیفی از الکترون‌ها برای مواد با عدد اتمی ۴ تا ۸۲ را به صورت  $\log(z + 1)$  ارائه نمود [۸].

کلونهاگن<sup>۴</sup>، هانت<sup>۵</sup> و بایلی<sup>۶</sup> از دیدگاه بالینی پدیده پس پراکندگی را مورد بررسی قرار دادند. بایلی مقدار ضریب پس پراکندگی را تابعی از انرژی الکترون و عدد اتمی موثر تعریف نمود [۹،۱۰]. کلونهاگن به طور گسترده‌ای مقادیر ضریب پس پراکندگی را از چندین ماده مختلف با ضخامت‌های متفاوت در محدوده انرژی ۳-۳۵ MeV گسیل شده از چندین شتابدهنده به طور کامل بررسی کرد. به لحاظ تجربی برای الکترون‌های فرودی عمودی، احتمال پس پراکندگی با ضخامت پس پراکنده افزایش می‌یابد تا زمانی که یک مقدار اشباع حاصل شود [۱۱،۱۲]. یکی از موفق‌ترین روابط که می‌تواند برای برازش کردن با داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گیرد رابطه زیر است:

$$b_m = b_{mo}(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

که  $b_m$  احتمال پس پراکندگی از الکترون‌های فرودی عمودی از یک محیط (پراکننده)،  $b_{mo}$  مقدار اشباع احتمال پس پراکننده است،  $\alpha$  ضریب انباشت است که وابسته به نوع ماده و انرژی الکترون است و  $t$  ضخامت چگالی محیط است. ضریب پس پراکندگی می‌تواند از طریق برازش توزیع احتمال پس پراکندگی به عنوان تابعی از ضخامت ماده به دست آید. علاوه بر این توابع پیچیده‌تری وجود دارند، که می‌توانند برای توصیف روند اشباع احتمال پس پراکندگی مورد استفاده قرار بگیرند. این روابط ممکن است منجر به برازش بهتری شوند

<sup>1</sup> Everhart

<sup>2</sup> Kalef- Ezra

<sup>3</sup> Archard

<sup>4</sup> Klevenhagen

<sup>5</sup> Hunt

<sup>6</sup> Bailly

اما آن‌ها پارامترهای اضافه‌تری را شامل می‌شوند. یکی از آن‌ها تابع بولتزمن<sup>۷</sup> سه پارامتری است که یک منحنی سیگموئید بین صفر و مقدار اشباع پراکننده ( $b_{m0}$ ) می‌باشد:

$$b_m = b_{m0} \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{t-t_0}{dt}}} \right) \quad (2)$$

$d_t$  و  $t_0$  نقطه مرکزی و ثابت زمانی منحنی‌های سیگموئید است که وابسته به نوع ماده و انرژی الکترون‌ها هستند و یکاهای مشابه دارند [۱۳].

الکترون درمانی یکی از شیوه‌های رایج در طراحی درمان می‌باشد [۱۴]. هنگام پرتو درمانی بیماران با پرتوهای الکترونی بدلیل برهمکنش الکترون با حفاظ گذاشته شده و همچنین با بدن بیمار تعدادی از الکترون‌ها پس‌پراکنده می‌شوند، از این رو دز الکترون‌های پس‌پراکنده شده به بافت نیز باید در نظر گرفته شود. در این پژوهش میزان پس‌پراکندگی الکترون در محیط‌های مختلف در بازه انرژی ۴ MeV تا ۲۵ MeV (انرژی‌های مورد استفاده در الکترون درمانی) برای مواد سرب (ماده مورد استفاده در حفاظ گذاری)، مس (ماده با عدد اتمی بالا)، آلومینیوم (ماده با عدد اتمی متوسط) و پلی‌استایرن (ماده نزدیک به بافت بدن) مطالعه شده است.

## ۲. روش کار

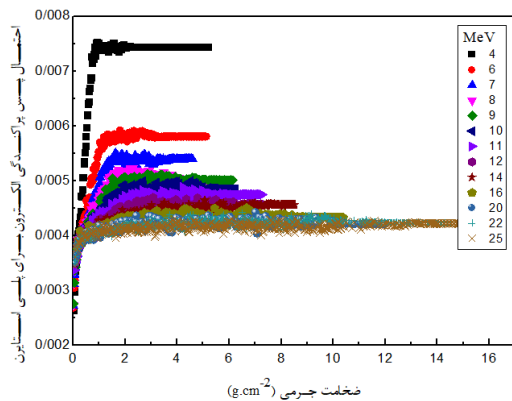
به منظور بررسی پس‌پراکندگی الکترون در محیط‌های مختلفی چون آلومینیوم، سرب، مس و پلی‌استایرن همچنین ارزیابی توزیع‌های پس‌پراکندگی، مقادیر اشباع آن‌ها، وابستگی پس‌پراکندگی به انرژی و عدد اتمی موثر مواد پراکننده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسط کد MCNPX2.6 بهره گرفته‌ایم.

ابتدا مکعبی با ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  cm حاوی خلاء شبیه‌سازی نمودیم و در هر مرحله ضخامت  $0.2$  cm از آن را از ماده مورد نظر پر کردیم تا ضخامت‌های مختلفی از آن را داشته باشیم. سپس یک چشمه سطحی الکترون با پرتوهای موازی در فاصله  $30$  cm هندسه قرار دادیم و با استفاده از کارت‌های  $F_n$  و  $C_n$  پس‌پراکندگی الکترون را برای مواد گوناگون در انرژی‌های ۴ MeV تا ۲۵ MeV بدست آوردیم. تا زمانی که به مقدار اشباع برای هر ماده برسیم، ضخامت مکعب را در هر مرحله افزایش دادیم. در نهایت پس از رسیدن به نقاط اشباع برای هر ماده در انرژی‌های فرودی مختلف، وابستگی توزیع پس‌پراکندگی به ضخامت و عدد اتمی موثر مواد پراکننده مورد بررسی قرار گرفت. با برازش داده‌های محاسبه شده از محاسبات مونت‌کارلو بوسیله روابط ۱ و ۲ پارامترهای مورد نظر را برای هر ماده در انرژی‌های مختلف بدست آوردیم. همچنین در این پژوهش طیف الکترون‌های پس‌پراکنده شده و شار سطحی الکترون‌ها را در ضخامت و انرژی‌های مختلف مطالعه نمودیم.

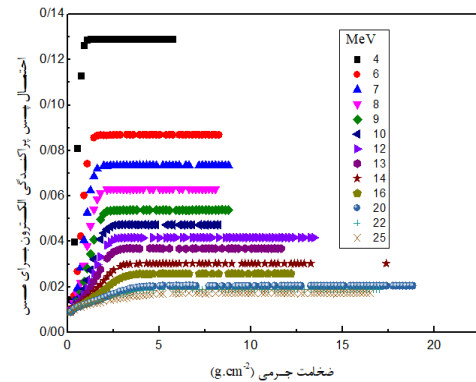
## ۳. نتایج

با استفاده از نتایج خروجی کد MCNPX2.6 برای مواد آلومینیوم، مس، سرب و پلی‌استایرن، طیف پس‌پراکندگی الکترون به‌عنوان تابعی از ضخامت مواد برای یک باریکه الکترونی تک انرژی در انرژی‌های ۴ MeV تا ۲۵ MeV رسم شد. به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۱ و ۲، طیف پس‌پراکندگی (تالی  $F_1$ ) بدست آمده برای مس (عدد اتمی بالاتر) با مقدار خطای  $0.1$  و پلی‌استایرن (عدد اتمی پایین‌تر) با مقدار خطای  $0.3$  نمایش داده شده است.

<sup>7</sup> Boltzman



شکل ۲. طیف پس‌پراکندگی الکترون برای پلی‌استایرن برای یک دسته پرتوی تک انرژی با انرژی‌های مختلف



شکل ۱. طیف پس‌پراکندگی الکترون برای مس برای یک دسته پرتوی تک انرژی با انرژی‌های مختلف

شکل ۱ و ۲ نشان می‌دهند که احتمال پس‌پراکندگی با افزایش عدد اتمی و با کاهش انرژی الکترون افزایش می‌یابد. همچنین برای یک ماده و انرژی معین احتمال پس‌پراکندگی تا زمانی که به مقدار اشباع برسد افزایش می‌یابد. مقادیر اشباع برای آلومینیوم در بازه انرژی ۴ MeV تا ۲۵ MeV بین ۰/۰۳۹۷۸ تا ۰/۰۰۸۵۴، برای مس بین ۰/۳۰۹۷ تا ۰/۰۱۶۹۸، برای سرب بین ۰/۳۲۳۰۴ تا ۰/۰۵۱۶۵ و برای پلی‌استایرن بین ۰/۰۰۷۴۶ تا ۰/۰۰۴۱۵ هستند.

مقادیر ضریب انباشت ( $\alpha$ ) حاصل از برازش نتایج محاسبات مونت کارلو براساس رابطه (۱) برای مواد مختلف در انرژی‌های گوناگون بدست آمد که در جدول ۱ فهرست شده‌اند. برای الکترون‌هایی با عدد اتمی بالا و انرژی‌های پایین برازش براساس رابطه (۱) ضریب همبستگی بهتری داشت. علاوه بر این در می‌یابیم که بر اساس برخی پیش‌بینی‌های نظری در مورد ناحیه انرژی‌های بالا، احتمال پس‌پراکندگی فقط وابسته به عدد اتمی موثر ( $Z_{eff}$ ) نیست، بلکه به انرژی الکترون وابسته است. در واقع نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو نشان می‌دهد که اگر طیف وسیعی از انرژی مورد بررسی قرار گیرد، احتمال اشباع پس‌پراکندگی وابستگی به انرژی الکترون (در انرژی‌های بالا) غالب می‌باشد.

جدول ۲. نتایج حاصل از برازش داده‌های بدست آمده از MCNPX2.6 با استفاده از رابطه (۱) برای مواد آلومینیوم، مس، سرب و پلی‌استایرن

$\sigma_{\alpha}$	$\alpha$ ( $cm^2.g^{-1}$ )	$\sigma_{b_{mo}}$	$b_{mo}$	انرژی الکترون (MeV)	مواد
۰/۱۲۹۳	۱/۸۴۴۵	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۳۹۷۸	۴	آلومینیوم
۰/۰۵۹۹۹	۱/۴۶۲۴۶	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۲۴۲	۶	
۰/۰۳۷۱۶	۱/۳۹۷۱۸	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۲۰۳	۷	
۰/۰۴۴۳۸۱	۱/۳۹۸۳۱	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۱۷۴۳	۸	
۰/۰۵۴۹۳	۱/۴۲۲۲۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱۵۳۴	۹	
۰/۰۶۵۴۸	۱/۵۱۲۸۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱۳۸۱	۱۰	
۰/۰۷۸۲۱	۱/۶۵۲۴۶	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۱۲۷۴	۱۱	
۰/۰۹۹۴۵	۲/۰۴۲۹	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۱۱۷۷	۱۲	
۰/۱۶۰۸۵	۲/۶۰۸۹۹	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۱۰۷۲	۱۴	
۰/۳۱۳۳۹	۴/۱۸۷۴۷	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۹۹۸	۱۶	
۰/۴۱۵۶۴۵	۵/۹۷۳۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۹۲	۲۰	
۰/۶۹۲۱۹	۹/۲۵۷۹۲	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۸۹	۲۲	
۰/۸۶۱۵۶	۱۱/۰۶۷۸۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۸۵۴	۲۵	
۰/۱۸۱۰۶	۱/۹۶۸۲۱	۰/۰۰۱۹۴	۰/۳۰۹۷۸	۴	

۰/۱۸۱۰۶	۱/۲۴۳۱۵	۰/۰۰۱۰۶	۰/۰۸۸۴۲	۶
۰/۰۷۲۱۹	۱/۰۸۸۸۴	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۷۴۸۱	۷
۰/۰۶۴۲۲	۰/۹۶۹۲۴	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۶۴۶۷	۸
۰/۰۵۳۸۵	۰/۸۸۳۹۳	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۵۵۱۴	۹
۰/۰۵۰۸۱	۰/۸۸۳۹۳	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۴۸۷۷	۱۰
۰/۰۳۲۷۳	۰/۸۰۳۱۴	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۴۲۲۹	۱۱
۰/۰۳۴۶۹	۰/۷۸۳۰۲	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۳۷۵۵	۱۲
۰/۰۲۷۸۴	۰/۷۵۷۸۳	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۳۰۶۸	۱۴
۰/۰۳۳۲۷	۰/۷۶۹۱	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۲۶۰۹	۱۶
۰/۰۴۰۷۴	۰/۹۰۶۱۷	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۲۵۴۸	۲۰
۰/۰۵۸۵۴	۱/۰۵۴۷۶	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۸۷۳	۲۲
۰/۰۸۵۰۱	۱/۲۷۷۰۵	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۶۹۸	۲۵

مس

برای

۰/۲۴۵۱۹	۲/۸۷۶۲۱	۰/۰۰۳۹۶	۰/۳۲۳۰۴	۴
۰/۱۲۸۷۸	۱/۷۹۲۲۴	۰/۰۰۲۶۳	۰/۲۴۶۹۹	۶
۰/۱۰۳۱۸	۱/۵۲۹۲	۰/۰۰۲۲۳	۰/۲۱۸۴۷	۷
۰/۱۰۷۴۱	۱/۳۱۱۵۵	۰/۰۰۳۱۸	۰/۱۹۷۰۱	۸
۰/۰۹۳۳	۱/۱۲۳۲۴	۰/۰۰۳۰۳	۰/۱۷۵۴۸	۹
۰/۰۸۴۷۹	۱/۰۰۷۸۲	۰/۰۰۳۰۴	۰/۱۵۷۵۹	۱۰
۰/۰۷۹۰۶	۰/۸۴۲۹۳	۰/۰۰۳۵۳	۰/۱۳۰۸۸	۱۱
۰/۰۸۱۴۴	۰/۸۴۳۷۳	۰/۰۰۳۷	۰/۱۳۰۷۴	۱۲
۰/۰۰۵۶۲۷	۰/۷۶۷۴۵	۰/۰۰۲۱۱	۰/۱۰۷۵	۱۴
۰/۰۲۴۵۱	۰/۶۷۹۵۳	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۶۷۳۳	۲۰
۰/۰۱۹۶۶	۰/۶۶۱۰۵	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۵۹۷۲	۲۲
۰/۰۱۷۰۴	۰/۶۵۷۳	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۵۱۶۵	۲۵

سرب

۰/۰۸۷۹۷	۳/۷۰۹۹۹	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۷۴۶	۴
۰/۱۷۳۹۶	۴/۳۹۸۸۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۵۷۵	۶
۰/۳۱۸۴۶	۵/۸۷۸۵۶	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۵۲۷	۷
۰/۵۷۱۶۱	۹/۳۴۱۴۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۴۹۴	۸
۰/۶۳۶۰۸	۱۰/۶۶۰۶۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۴۸۹	۹
۰/۴۷۰۴۳	۱۰/۸۹۳۵	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۴۷۵	۱۰
۰/۵۱۴۷	۱۱/۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۶۴	۱۱
۰/۷۰۹۰۸	۱۴/۲۴۸۹۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۴۷	۱۲
۰/۸۲۸۲۷	۱۵/۷۴۳۹	۰/۰۹۵۳۰۶	۰/۰۰۴۴۱	۱۴
۰/۶۸۳۶۲	۱۷/۴۶۳۱۲	۰/۰۵۴۹۲۹	۰/۰۰۴۳۱	۱۶
۰/۷۶۳۰۶	۲۰/۲۲۳۵	۰/۰۰۴۵۰۶	۰/۰۰۴۲	۲۰
۰/۷۷۶۰۱	۲۰/۷۹۵۳	۰/۰۰۴۰۳۵	۰/۰۰۴۲۱	۲۲
۰/۷۶۶۶۱	۲۳/۷۱۱۷۷	۰/۰۰۳۱۴۹	۰/۰۰۴۱۵	۲۵

پلی استایرن

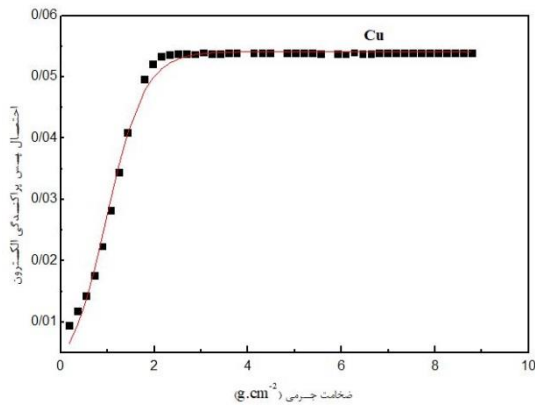
الکترون‌های با انرژی پایین و مواد با عدد اتمی بالا تابع بولتزمن سه پارامتری (رابطه ۲) برازش قابل قبول تری دارد. مقادیر  $t_0$  و  $d_t$  که از برازش رابطه (۲) بدست آمده‌اند در جدول ۲ فهرست شده‌اند.

جدول ۲. نتایج حاصل از برازش داده‌های بدست آمده از MCNPX2.6 با استفاده از رابطه (۲) برای مواد آلومینیوم، مس، سرب و پلی استایرن

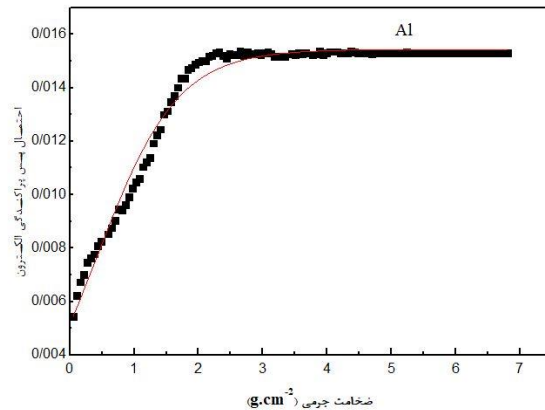
$\sigma_{d_t}$	$d_t$	$\sigma_{t_0}$	$t_0$	انرژی الکترون (MeV)	مواد
۰/۰۸۷۹۷	۰/۱۷۱۴۷	۰/۰۰۶۴	۰/۴۶۳۲۳	۴	
۰/۰۱۰۷۶	۰/۳۳۴۰۵	۰/۰۱۰۷۶	۰/۵۶۴۷۷	۶	
۰/۰۰۹۸۲	۰/۴۲۷۳۵	۰/۰۰۹۳۴	۰/۵۶۹۴۳	۷	
۰/۰۰۱۳۰۸	۰/۵۱۵۳۳	۰/۰۱۲۰۴	۰/۵۱۴۴۵	۸	
۰/۰۱۶۲۳	۰/۶۲۳۲۷	۰/۰۱۴۴۴	۰/۴۲۹۱۵	۹	
۰/۰۱۸۰۵	۰/۷۱۳۳۱	۰/۰۱۶۱۵	۰/۳۱۵۱۴	۱۰	



۰/۰۱۸۷۵	۰/۸۰۷۷۶	۰/۰۱۷۱۶	۰/۱۸۰۱۷	۱۱	آلومینیوم
۰/۰۱۸۸۹	۰/۸۹۷۸۴	۰/۰۱۸۲۲	۰/۰۱۰۵۶	۱۲	
۰/۰۲۶۳	۰/۹۷۲۶۴	۰/۰۲۸۷	۰/۳۲۸۴۱	۱۴	
۰/۰۲۸۸۵	۱/۱۱۲۶۱	۰/۰۳۴۸۸	۰/۵۶۶۸	۱۶	
۰/۰۴۱۹۷	۱/۲۵۲۹۴	۰/۰۵۹۰۳	۱/۰۰۰۸۲	۲۰	
۰/۰۵۶۸۴	۱/۲۴۷۶۲	۰/۰۸۹۱۴	۱/۲۵۵۸۲	۲۲	
۰/۶۸۶۱	۱/۱۲	۰/۱۱۳۵۹	۱/۲۶۲۴۴	۲۵	
۰/۰۰۱۴۲	۰/۱۳۲۲	۰/۰۰۱	۰/۴۶۳۷۴	۴	
۰/۰۰۴۳۷	۰/۲۲۶۴۴	۰/۰۴۴۹	۰/۷۰۹۲۵	۶	
۰/۰۰۶۴۱	۰/۲۷۵۴۷	۰/۰۰۶۸۸	۰/۸۱۳۰۷	۷	
۰/۰۰۹۸۴	۰/۰۳۳۸۲۵	۰/۰۱۰۳۵	۰/۸۹۷۳۲	۸	
۰/۰۱۲۹۸	۰/۴۰۲۶۴	۰/۰۱۱۳۱۸	۰/۹۸۴۵۳	۹	
۰/۰۱۷۱۸	۰/۴۷۱۸۷	۰/۰۱۷۳۵	۱/۰۳۱۲۳	۱۰	
۰/۰۱۶۲۸	۰/۵۵۵۲۵	۰/۰۱۵۷۸	۱/۰۶۸۶۵	۱۱	مس
۰/۰۲۱۷۴	۰/۶۲۸۱	۰/۰۲۰۵۵	۱/۰۶۴۸۲	۱۲	
۰/۰۲۳۷۹	۰/۷۹۹۵۶	۰/۰۲۱۰۵	۱/۰۲۰۵۲	۱۴	
۰/۰۲۹۴۶	۰/۹۶۷۲۳	۰/۰۲۵۷۶	۰/۹۰۷۹۳	۱۶	
۰/۰۲۰۹۱	۱/۲۲۷۰۹	۰/۰۲۹۴۶	۰/۴۷۸۰۶	۲۰	
۰/۰۲۹۳۶	۱/۳۳۳۶۷	۰/۰۲۸۶۱	۰/۲۲۲۰۷	۲۲	
۰/۰۲۹۳۶	۱/۵۳۳۹۱	۰/۰۲۸۴۵	۱/۲۶۲۴۴	۲۵	
۰/۰۰۰۲۳	۰/۱۱۶۴۶	۰/۰۰۰۶	۰/۳۱۱۵۴	۴	
۰/۰۰۲۱۶	۰/۱۷۱۰۳	۰/۰۰۲۲۸	۰/۴۹۸۷۷	۶	
۰/۰۰۱۶۶	۰/۲۰۲۴۶	۰/۰۰۷۷	۰/۵۸۵۸۴	۷	
۰/۰۰۲۰۹	۰/۲۳۴۵۵	۰/۰۰۲۲۲	۰/۶۶۵۱۵	۸	
۰/۰۰۱۴۹	۰/۲۶۷۳۵	۰/۰۰۱۵۵۸	۰/۷۵۲۱۲	۹	
۰/۰۰۱۴۷	۰/۳۰۲۳۱	۰/۰۰۱۴۹	۰/۸۲۵۱۹	۱۰	سرب
۰/۰۰۳۱۹	۰/۳۷۱۵	۰/۰۰۰۴۳	۰/۹۶۴۳۲	۱۱	
۰/۰۰۳۲۹	۰/۳۷۱۵۴	۰/۰۰۰۱۷	۰/۱۲۵۳۱	۱۲	
۰/۰۰۴۵۶	۰/۴۴۷۹۹	۰/۰۰۰۱۵	۱/۰۷۵۸۳	۱۴	
۰/۰۰۷۹۴	۰/۶۷۱۲۲	۰/۰۰۷۸	۱/۲۲۶۲۳	۲۰	
۰/۰۰۷۸۹	۰/۷۴۴۲۵	۰/۰۰۰۷	۱/۲۳۲۵۴	۲۲	
۰/۰۰۹۶۷	۰/۸۴۳۱۲	۰/۰۰۸۹۵	۱/۲۵۲۹۴	۲۵	
۰/۰۰۳۹۱	۰/۲۳۳۷۹	۰/۰۰۳۶۱	۰/۱۶۵۱۴	۴	
۰/۰۰۶۵۵	۰/۳۸۵۶۵	۰/۰۰۶۹۳	۰/۰۰۶۶۶	۶	
۰/۰۱۱۱۷	۰/۴۷۷۵۲	۰/۰۱۲۷۷	۰/۱۴۴۶۷	۷	
۰/۰۱۳۹۳	۰/۴۸۲۶۹	۰/۰۱۸	۰/۲۵۱۸۳	۸	
۰/۰۱۵۳۸	۰/۵۷۸۵	۰/۰۲۰۶۹	۰/۳۸۱۳۸	۹	
۰/۰۱۶۵۳	۰/۷۱۰۴۲	۰/۰۲۵۹۲	۰/۶۴۸۳۲	۱۰	
۰/۰۱۸۶۴	۰/۷۹۴۵۹	۰/۰۳۲۲۸	۰/۸۸۴۶۵	۱۱	پلی استایرن
۰/۰۲۶۷۲	۰/۸۳۰۲۱	۰/۰۰۰۸۹	۱/۱۰۸۵۹	۱۲	
۰/۰۵۱۲۳	۱/۳۵۶۵۹	۰/۰۱۰۰۲۹	۲/۰۹۶۶۳	۱۴	
۰/۰۳۲۵۹	۰/۸۷۵۰۸۵	۰/۰۷۴۰۷	۱/۴۰۶۲۵	۱۶	
۰/۰۳۸۸۲	۰/۷۵۰۸۵	۰/۰۹۵۷۴	۱/۴۰۹۷۶	۲۰	
۰/۰۶۷۲۹	۱/۱۷۰۷۶	۰/۱۷۷۴۴	۲/۴۹۴۴۷	۲۲	
۰/۰۴۹۸۴	۰/۶۶۳۰	۰/۱۳۸۸۱	۱/۴۳۳۸۶۶	۲۵	

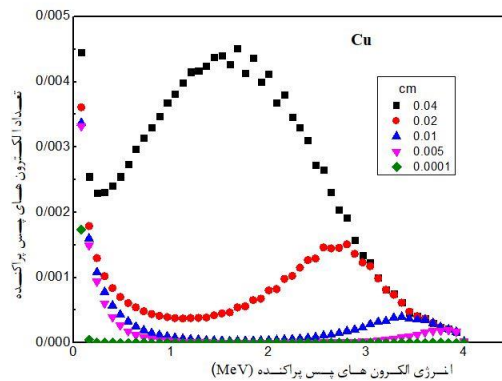


شکل ۴. برازش نتایج بدست آمده از کد MCNPX2.6 برای ماده مس در انرژی ۹ MeV



شکل ۳. برازش نتایج بدست آمده از کد MCNPX2.6 برای ماده آلومینیوم در انرژی ۹ MeV

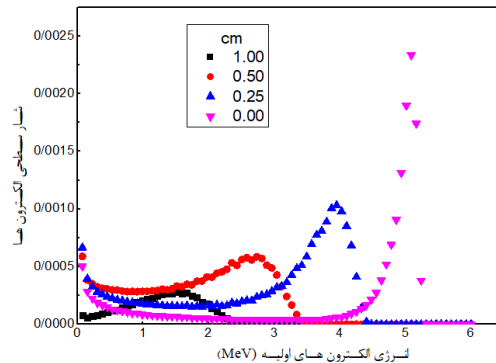
علاوه بر احتمال پس پراکندگی بعنوان تابعی از ضخامت پراکننده، بررسی اشکال طیف الکترون‌های پس پراکنده شده در ضخامت‌های متفاوت از پراکننده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. طیف نمونه الکترون‌های پس پراکنده شده در شکل ۵ برای الکترون‌های فرودی با انرژی ۴ MeV بر روی پراکننده مس بعنوان تابعی از ضخامت آن نشان داده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که برای مس نازک طیف پس پراکندگی الکترون دارای ۲ بیشینه محلی است؛ یکی در انرژی‌های بسیار پایین و دیگری در انرژی‌های نزدیک به پرتو فرودی. طیف کلی تحت تاثیر انرژی‌های بالای الکترون قرار دارد، طیف پس پراکندگی به شکلی می‌رسد که مستقل از افزایش بیشتر ضخامت ماده است. این شکل یک طیف اشباع را توصیف می‌کند که ویژگی‌هایی از یک ماده معین در یک انرژی خاص است.



شکل ۵. طیف انرژی الکترون پس پراکنده مس برای یک دسته پرتوی تک انرژی ۴ MeV

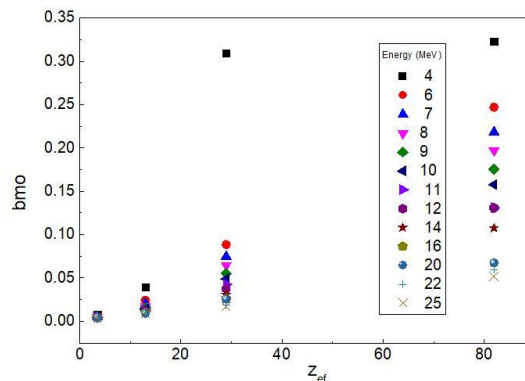
میرایی طیف انرژی الکترون فرودی در داخل پراکننده‌ها بطور کیفی تمایل دارند طیف‌های پس پراکندگی مستقل از ضخامت پراکننده باشند. نمونه‌ای از این میرایی طیف‌های الکترون فرودی (با استفاده از تالی F2) در ماده‌ی آلومینیوم در نمودار شکل ۶ برای یک الکترون تک انرژی ۶ MeV نشان داده شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که افزایش تعداد الکترون‌های پس پراکنده شده در انرژی‌های متوسط و پایین در این طیف اتفاق افتاده است. با افزایش ضخامت‌های پراکننده، در جایی که طیف فرودی میرا می‌شود اگر پراکننده نازک باشد، طیف فرودی در انرژی کمتری میرا شده است. و در نتیجه طیف پس پراکندگی تحت تاثیر انرژی‌های بالای الکترون‌هایی است که در زاویه‌های بزرگتر از ۹۰ درجه پراکنده شده‌اند. همانطور که پرتو فرودی با افزایش یافتن عمق پراکننده از بین می‌رود، غالباً الکترون‌ها با

انرژی پایین‌تر غالباً پس‌پراکنده می‌شوند. پس از رسیدن به مقدار اشباع پس‌پراکنندگی، هرگونه افزایش ضخامت باعث میرایی بیشتر طیف فرودی و افزایش تعداد الکترون‌های پس‌پراکنده گردد.



شکل ۶. میرایی در هدف آلومینیوم برای یک دسته پرتوی تک انرژی ۶ MeV

مقدار اشباع پس‌پراکنندگی از جدول ۱ به صورت تابعی از اعداد اتمی موثر در شکل ۷ رسم شده است. این شکل میزان وابستگی مقدار اشباع پس‌پراکنندگی (مقادیر خطا در جدول ۱) به اعداد اتمی موثر ( $Z_{eff}$ ) را بین ۴ تا ۸۲ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که مقادیر اشباع پس‌پراکنندگی نسبت به عدد اتمی موثر ( $Z_{eff}$ ) بصورت خطی توزیع می‌شوند.



شکل ۷. احتمال اشباع پس‌پراکنندگی الکترون برای مواد با عدد اتمی موثر بین ۴ تا ۸۲

#### ۴. نتیجه‌گیری

با استفاده از محاسبات MCNPX2.6 توزیع‌های پس‌پراکنندگی الکترون و مقادیر اشباع آن‌ها برای پرتوهای الکترون با انرژی‌های MeV ۴ تا ۲۵ و برای مواد مختلفی چون آلومینیوم، سرب، مس و پلی‌استایرن بدست آمد. داده‌های پس‌پراکنندگی به دست آمده بوسیله MCNPX2.6 نشان می‌دهد که احتمال پس‌پراکنندگی الکترون به ضخامت ماده، عدد اتمی موثر مواد پراکننده و انرژی الکترون بستگی دارد. احتمال پس‌پراکنندگی برای الکترون‌های کم انرژی کمتر وابسته به انرژی می‌باشد، و بیشتر تابعی از عدد اتمی موثر مواد پراکننده است.

یک تابع دو پارامتری ساده برای بدست آوردن برازش‌های قابل قبول برای هر ماده در انرژی‌های گوناگون و مواد مختلف انتخاب شد. هنگام در نظر گرفتن پرتوهای الکترونی کم انرژی و مواد با عدد اتمی پایین این رابطه برازش قابل قبول‌تری را داشت. تابع سه پارامتری بولتزمن منجر به برازش قابل قبول‌تری برای الکترون‌های با انرژی بالا و مواد با عدد اتمی موثر پایین گردید. میرایی طیف انرژی الکترون در درون پراکننده به گونه‌ای بود که طیف‌های پس‌پراکنندگی مستقل از ضخامت پراکننده بودند. همچنین نتایج نشان دادند (مخصوصاً برای اعداد با عدد اتمی موثر کم) مقادیر پس‌پراکنندگی بصورت خطی با عدد اتمی موثر پراکننده توزیع می‌شوند.



۵. مراجع

- [1] F. M. Khan, and J. P. Gibbons, *Khans the physics of radiation therapy*. (Lippincott Williams & Willkins, 2014)
- [2] S. R. Cherry, J. A. Sorenson, and M. E. Phelps, *Physics in nuclear medicine e-Book*, (Elsevier Health Sciences, 2012).
- [3] P. W. Bigelow, *Back scattered electrons*, (April 2012)
- [4] F. Krumeich, *Properties of electrons, their interactions with matter and applications in electron microscopy. Laboratory of Inorganic Chemistry, disponível em [http://www. microscopy. ethz. ch/downloads/Interactions. pdf](http://www.microscopy.ethz.ch/downloads/Interactions.pdf), consultado em, 3-08, (2011).*
- [5] K. Kanaya and S., Okayama, *Penetration and energy loss theory of electrons in solid target*, *Appl. Phys.*, Vol. 5, 4359 (1971)
- [6] T. E. Everhart., *Simple theory concerning the reflection of electrons from solids*, *Journal of Applied Physics* 31, 1483 (1960), doi: 10.1063/1.1735868.
- [7] J. M. Mack., Kalef -ezra, Y.S. Horowitz., *Nuclear Instruments and Methods* 195, 587-595 (1982).
- [8] G. D. Archard., *Back Scattering of Electrons*, *Journal of Applied Physics*, 32(8), 1055-1509 (1961).
- [9] Baily, A. Norman, *Electron backscattering*, *Med. Phys.*, *Med. Phys.* 7(5), 514-519 (1980).
- [10] M. A. Hunt, G. J. Kutcher, and A. Buffa, *Electron backscatter corrections for parallel-plate chambers*, *Medical physics*, 15(1), 96-103 (1988).
- [11] S. C. Klevenhagen, G. D. Lambert, and A. Arbabi, *Backscattering in Electron Beam Therapy for Energies between 3 and 35 MeV*. *Phys. Med. Biol.* 27(3), 363-373 (1982).
- [12] S. C. Klevenhagen, *Implication of Electron Backscattering for Electron Dosimetry*, *Phys Med. Biol.* 36(7), 1013-1018 (1991).
- [13] C. Frujinoiu, and R.R. Brey, *A Mont Carlo investigation of electron backscattering*, *Radiation protection dosimetry* 97.3, 223-226 (2001).
- [14] K. R. Hogstrom and P. R. Almond, *Review of electron beam therapy physics*, *Physics in Medicine & Biology*, 51(13), R455 (2006).