

## محاسبه و اندازه‌گیری اثر کاهش دز جذبی در لبه‌های محصول بر پارامترهای سیستم شتابدهنده

### الکترونی رودوترون مدل TT-200

غلامرضا رئیس‌علی<sup>۱</sup>، وحیدرضا بابائی<sup>۱\*</sup>، سعید حمیدی<sup>۲</sup> و محمودرضا تهامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک، مرکزی، ایران.

<sup>۳</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، یزد، ایران.

\*تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

پست الکترونیکی: V.Babayi@gmail.com

#### چکیده

در پرتوفاوری مواد با استفاده از الکترون‌های پر انرژی، کاهش تعداد الکترون‌های پراکنده شده در لبه‌های محصول، باعث کاهش محسوسی در مقدار دز دریافت شده در این نواحی می‌شود. این موضوع روی برخی پارامترهای سیستم از جمله مقدار یکنواختی دز، کارایی انرژی و آهنگ تولید جرمی که بر مبنای دز کمینه تعیین می‌شوند اثر می‌گذارد. در این تحقیق با استفاده از کد مونت کارلوی MCNP و اندازه‌گیری‌های تجربی با دزیمترهای CTA، در پرتوهای یک طرفه، توزیع سه بعدی دز جذبی ناشی از پرتوهای الکترونی با انرژی ۱۰ MeV در محصول نمونه از جنس سلولز بررسی شده و اثر کاهش دز در لبه‌های محصول مورد پرتودهی توسط شتابدهنده الکترونی رودوترون مدل TT-200، بر روی پارامترهای پرتودهی محاسبه و اندازه‌گیری شده است. نتایج محاسباتی و تجربی که توافق خوبی با هم دارند نشان می‌دهند کاهش دز در لبه‌های محصول باعث کاهش دز کمینه، افزایش نسبت یکنواختی دز و کاهش بیشینه کارایی انرژی از مقدار ۰/۷۰ به ۰/۴۸ (در عمق بهینه) در نتیجه کاهش آهنگ تولید جرمی به مقدار حدود ۳۰ درصد در پرتوفاوری الکترونی می‌شود.

**کلید واژگان:** پرتودهی الکترونی، نسبت یکنواختی دز، کارایی انرژی، آهنگ تولید جرمی، رودوترون، روش مونت کارلو.

#### ۱. مقدمه

باشند تا مسافتی را طی کنند و باعث یونش بیشتر در طول مسیر الکترون‌های اولیه شوند. الکترون‌های ثانویه باعث می‌شوند که دز جذب شده در یک مکان مورد نظر لزوماً ناشی از برهم‌کنش‌های الکترون‌های اولیه با ماده نباشد، بلکه دز جذب شده عمدتاً ناشی از الکترون‌های ثانویه‌ای باشد که از مناطق مجاور به منطقه مورد نظر رسیده‌اند [۳ و ۲]. از این رو محاسبه و اندازه‌گیری سه بعدی دز در محصول مورد پرتودهی

بر هم‌کنش الکترون‌های پر انرژی با الکترون‌های اتمی و مولکولی ماده هدف باعث کاهش انرژی الکترون‌ها می‌شود. برهم‌کنش الکترون‌های اولیه موجب یونش‌هایی می‌شود که الکترون‌های ثانویه را تولید می‌کند تا جایی که در نهایت همه انرژی جنبشی الکترون‌های اولیه جذب شود [۱]. این الکترون‌های ثانویه، ممکن است به اندازه کافی انرژی داشته

و بررسی اثر کاهش دز در لبه‌های محصول بر پارامترهای سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در مرجع [۴] توزیع سه بعدی دز ناشی از الکترون‌های  $10\text{MeV}$  در جهت حرکت نوار نقاله و در جهت جاروب باریکه برای دو نوع باریکه موازی و واگرا مقایسه شده است. همچنین دز جذبی محصول تحت پرتوهای الکترونی با جریان زیاد شتابدهنده و آهنگ دز بالا در مرجع [۵] محاسبه و اندازه‌گیری شده است. در مرجع [۶] روابط تجربی جهت تخمین نسبت یکنواختی دز<sup>۱</sup>، کارایی انرژی<sup>۲</sup> و آهنگ تولید<sup>۳</sup> سیستم در پرتوهای با پرتوهای ایکس ترمزی  $5\text{MeV}$  برای پرتوهای دوطرفه محصول آورده شده است.

در این مقاله توزیع یک بعدی و سه بعدی دز در محصول نمونه در پرتوهای یک‌طرفه با دو روش محاسباتی و تجربی به دست آمده است. در حالت یک بعدی تغییرات دز در محور مرکزی محصول و فقط در راستای عمق محصول مورد نظر می‌باشد و در لبه‌ها هیچ افت دزی در نظر گرفته نشده است. در حالت سه بعدی تغییرات دز جذبی در کل محصول بررسی شده و اثر کاهش دز در لبه‌های محصول بر روی نسبت یکنواختی دز، کارایی انرژی و آهنگ تولید جرمی در سیستم پرتوهای الکترونی رودوترون مدل TT-200 با انرژی  $10\text{MeV}$  و حداکثر توان  $80\text{KW}$  موجود در پژوهشگاه کاربرد پرتوها (مجمع یزد)، بررسی شده است.

رودوترون اولین شتابدهنده صنعتی است که قادر به تولید باریکه الکترونی با توان بالا و انرژی‌های بیشتر از  $5\text{MeV}$  می‌باشد. انرژی بالای باریکه خروجی به همراه توان بالای دستگاه می‌تواند آهنگ تولید سیستم را در پرتوهای مواد ضخیم بالا ببرد. در رودوترون الکترون‌ها پس از شلیک از تفنگ الکترونی با انرژی  $1\text{MeV}$  وارد محفظه تشدید شده و پس از ۱۰ بار عبور مکرر از این محفظه انرژی‌شان توسط سیستم رادیوفرکانسی (RF) به  $10\text{MeV}$  می‌رسد [۹-۷]. در این

تحقیق پرتوهای محصول با استفاده از شتابدهنده رودوترون مدل TT-200 با انرژی  $10\text{MeV}$  و حداکثر توان  $80\text{KW}$  که در پژوهشگاه کاربرد پرتوهای یزد موجود می‌باشد انجام شده است. پارامترهای پرتوهای مورد استفاده در این تحقیق در ادامه معرفی شده‌اند.

## ۱.۱. نسبت یکنواختی دز و کارایی انرژی در

### سیستم‌های پرتوهای الکترونی

بدلیل ثابت نبودن دز جذبی در عمق‌های مختلف ماده (نمودارهای دز - عمق)، ناحیه‌هایی در ماده وجود دارد که مقدار کمینه و بیشینه دز ( $D_{\max}, D_{\min}$ ) در آن نواحی مشاهده می‌شود، بنابراین اندازه‌گیری نسبت یکنواختی دز که به صورت نسبت  $\frac{D_{\max}}{D_{\min}}$  تعریف می‌شود، می‌تواند ملاکی جهت تعیین یکنواختی دز جذبی در ماده باشد. هر چه این نسبت به واحد نزدیک‌تر باشد تضمین کننده جذب انرژی به صورت یکنواخت‌تر در ماده است [۱].

پارامتر دیگری که از توزیع غیر یکنواخت انرژی نهشت شده در عمق‌های مختلف محصول به دست می‌آید و بیانگر مقدار انرژی تابش شده به سطح محصول است که به طور موثر در ماده جذب می‌شود [۱]، کارایی انرژی ( $\varepsilon$ ) است. این پارامتر به صورت نسبت حداقل انرژی جذب شده در جرم محصول ( $E_{\text{Product}}$ ) به انرژی فرودی تابش شده روی سطح محصول توسط دستگاه در مدت زمان پرتوهای ( $E_{\text{irradiator}}$ )، طبق رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{product}}}{E_{\text{irradiator}}} \quad (1)$$

پارامترهای رابطه (۱) در روابط (۲) و (۳) تعریف شده‌اند:

$$E_{\text{product}} = m_{\text{product}} \times D_{\min} \quad (2)$$

$$E_{\text{irradiator}} = IEt \times \frac{a}{w} \quad (3)$$

در رابطه (۲)،  $m_{\text{product}} = \rho abc$ ، جرم محصول ( $\rho$ ) چگالی و  $a, b, c$  طبق شکل ۱ ابعاد محصول است،  $D_{\min}$  مقدار دز کمینه دریافتی در عمق‌های مختلف محصول و در رابطه (۳)،  $I$  و  $E$  به ترتیب شدت جریان و انرژی دستگاه و  $t$  زمان

<sup>1</sup>Dose Uniformity Ratio

<sup>2</sup>Energy Utilization Efficiency

<sup>3</sup>Throughput Rate

دستگاه E(MeV) به دست می‌آید و ضریب  $\eta$  کارایی آهنگ تولید است که به عواملی از جمله کارایی انرژی (E)، ضریب اسکن ( $\frac{a}{w}$ ) جهت در نظر گرفتن تمامی پرتوهای خروجی از دهانه شتابدهنده و میزان تضعیف انرژی الکترون‌ها در پنجره خروجی شتابدهنده و هوا بستگی دارد [۱۱ و ۱۰]. برای الکترون‌های با انرژی بالا اتلاف انرژی در پنجره خروجی (از جنس تیتانیوم با ضخامت  $50 \mu\text{m}$  در سیستم رودوترون TT-200) و هوا ناچیز در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. با نزدیک شدن مقدار عرض محصول (a) به طول اسکن، ضریب اسکن به واحد نزدیک شده و آهنگ تولید افزایش می‌یابد.

## ۲. مواد و روشها

جهت بررسی توزیع دز ناشی از الکترون‌های پر انرژی تولید شده توسط شتابدهنده رودوترون بر روی محصول نمونه از جنس سلولز از دو روش محاسباتی و تجربی در این تحقیق استفاده شده است. روش محاسباتی با استفاده از کد مونت کارلوی MCNP و روش تجربی با استفاده از دزیمتری محصول با استفاده از دزیمترهای نواری CTA<sup>۴</sup> در محصول انجام شده است [۱۳].

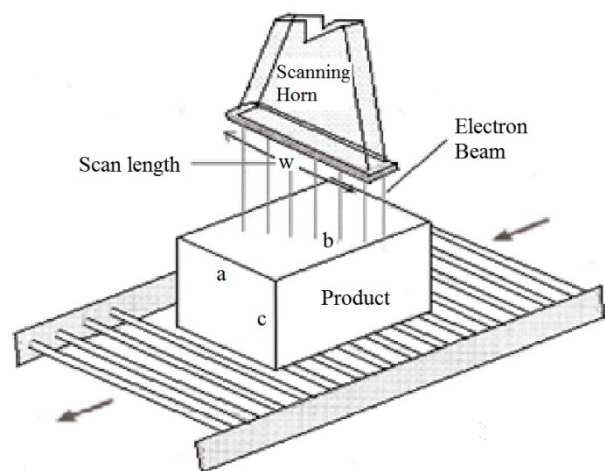
### ۱.۲. روش محاسباتی

در این بخش جهت بررسی تغییرات سه بعدی دز و نحوه کاهش دز در لبه‌های محصول به شبیه‌سازی محصول و چشمه‌ی واقعی با استفاده از کد MCNP پرداخته شده است [۱۴]. محصولی از جنس سلولز به صورت ورقه‌های نازک کاغذ با چگالی  $0.613 \text{g/cm}^3$  و ابعاد سطحی  $33 \times 33 \text{cm}$  و ارتفاع  $14 \text{cm}$  در نظر گرفته شده است. چشمه الکترونی به صورت صفحه‌ای با ابعاد  $50 \times 50 \text{cm}$  تعریف شده که پرتوهای الکترون با انرژی  $10 \text{MeV}$  بطور موازی پس از عبور از  $50 \mu\text{m}$  لایه تیتانیوم به عنوان پنجره خروجی باریکه و  $65 \text{cm}$  هوا (فاصله بین پنجره خروجی باریکه و سطح محصول) به سطح محصول می‌تابد. تمامی محصول به سلول‌های مکعبی با

پرتودهی محصول است که از تقسیم طول محصول در جهت حرکت نوار نقاله (b) به سرعت حرکت نوار نقاله (v) به دست می‌آید (شکل ۱). در رابطه (۳)،  $E_{irradiator}$  انرژی تابش شده روی سطح محصول است نه انرژی کل تابش‌هایی که به سطح نوار نقاله می‌رسد بنابراین عامل  $\frac{a}{w}$  که نشان دهنده نسبت الکترون‌های فرودی است که توسط محصول جاروب می‌شوند به رابطه (۳) اضافه می‌شود. در این رابطه همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است a عرض محصول و w طول اسکن است. با جایگذاری این روابط در رابطه (۱) کارایی انرژی به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) c(m) w(m) D_{\min} (kGy) v \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{I(mA) E(\text{MeV})} \quad (4)$$

از این رابطه در بخش نتایج جهت به دست آوردن کارایی انرژی استفاده شده است.



شکل (۱): پارامترهای باریکه الکترونی و محصول نمونه در حین عبور زیر باریکه الکترونی.

### ۲.۱. آهنگ تولید جرمی در سیستم‌های پرتودهی الکترونی

#### الکترونی

آهنگ تولید جرمی ( $\dot{m}$ ) در سیستم‌های پرتودهی توسط رابطه (۵) تعریف می‌شود [۵ و ۱۰]:

$$\dot{m} = \frac{\eta P(kw)}{D_{\min} (kGy)} = \frac{\eta I(mA) E(\text{MeV})}{D_{\min} (kGy)} \quad (5)$$

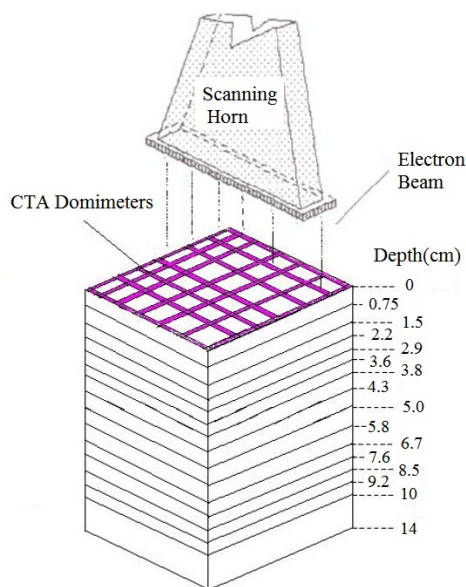
که در آن P (kw)، توان فرودی متوسط باریکه الکترونی است که از حاصلضرب جریان باریکه I(mA) در انرژی

<sup>4</sup>Cellulose Triacetate

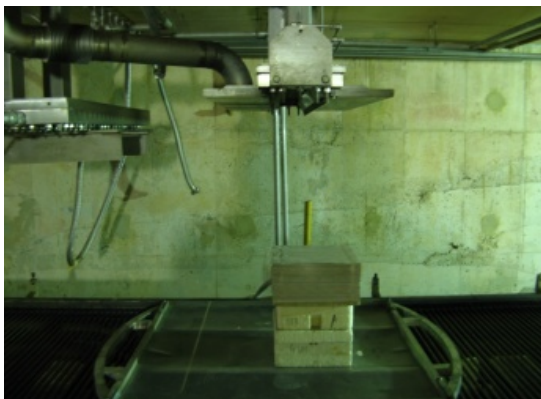
جدول (۱): مشخصات محصول و پارامترهای پرتودهی در اندازه‌گیری تجربی.

پارامتر	مقدار
چگالی محصول	$0.713 \text{ g/cm}^3$
ابعاد سطح محصول	$33 \times 33 \text{ cm}^2$
انرژی باریکه	$1.0 \text{ MeV}$
جریان باریکه	$3 \text{ mA}$
سرعت نوار نقاله	$3/41 \text{ cm/s}$
فاصله خروجی باریکه تا روی سطح محصول	$65 \text{ cm}$
طول اسکن روی سطح محصول	$1.05 \text{ cm}$
پهنای باریکه روی سطح محصول	$7/4 \text{ cm}$

شکل ۲ پیکربندی باریکه و محصول، ضخامت لایه‌های مختلف و نحوه قرار گرفتن فیلم دزیمترها در محصول را بطور شماتیک نشان می‌دهد. شکل ۳ محصول واقعی را در حین پرتودهی نشان می‌دهد.



شکل (۲): پیکر بندی لایه های کاغذ و محل دزیمترهای CTA در آن.



شکل (۳): محصول نمونه در حین پرتودهی.

حجم  $1 \text{ cm}^3$  تقسیم شده و انرژی جذب شده در هر سلول با استفاده از تالی F8\* محاسبه و با تقسیم کردن به جرم هر سلول دز جذبی به دست آمده است. دز جذبی در راستای محور مرکزی محصول که از لبه‌ها دور است به عنوان دز یک بعدی و دز جذبی در همه محصول حتی در لبه‌ها به عنوان دز سه بعدی در نظر گرفته شده است.

## ۲.۲. روش تجربی اندازه‌گیری دز

محصول نمونه از جنس سلولز، به صورت ورقه‌های نازک کاغذ با طول و عرض  $33 \text{ cm}$  و چگالی  $0.713 \text{ g/cm}^3$  است که به تعداد زیاد روی هم قرار گرفته‌اند تا به ضخامت مورد نظر یعنی  $14 \text{ cm}$  برسد. ابعاد محصول با توجه به استاندارد ISO/ASTM51649 انتخاب شده‌اند [۱۶ و ۱۵]. الکترون‌ها پس از عبور از لایه تیتانیوم نازک با زاویه کوچکی در راستای طول اسکن<sup>۵</sup> پهن شده به روی سطح محصول پخش می‌شوند. محصول نمونه بطور پیوسته و با سرعت ثابت از میان باریکه الکترونی خروجی از دستگاه عبور می‌کند. با توجه به زاویه دار بودن پرتوهای خروجی از دهانه شتابدهنده، طول محصول نسبت به طول اسکن کوچک در نظر گرفته شده است تا ضمن استفاده از قسمت مرکزی باریکه بتوان پرتوهای فرودی به محصول را تقریباً عمودی در نظر گرفت. قبل از شروع به کار پرتودهی ابتدا لازم است برخی پارامترهای سیستم پرتودهی از جمله انرژی دستگاه، طول اسکن و پهنای باریکه<sup>۶</sup> در روی سطح محصول کنترل شوند. این اندازه‌گیری‌ها در روز انجام آزمایش و با توجه به استانداردهای موجود انجام شد که به همراه برخی پارامترهای پرتودهی در جدول ۱ آمده است [۱۶ و ۱۵]. جهت به دست آوردن داده‌ها برای رسم منحنی دز-عمق و همچنین اندازه‌گیری دز در لبه‌های محصول تعداد زیادی دزیمتر CTA در عمق‌های مختلف محصول با توجه به استاندارد ISO/ASTM 51649 جایگذاری شده است [۱۵ و ۱۳].

<sup>۵</sup>Scan Length

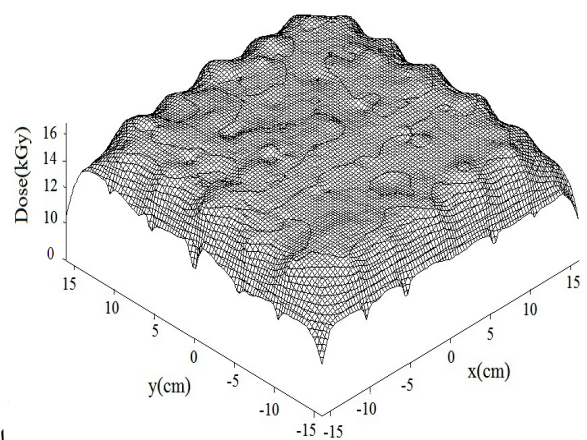
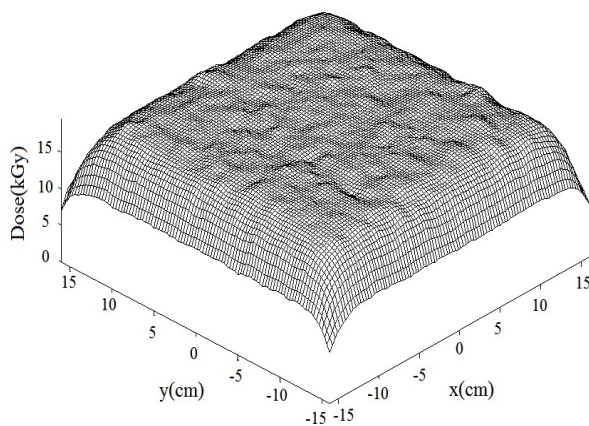
<sup>۶</sup>Beam Width

### ۳. نتایج

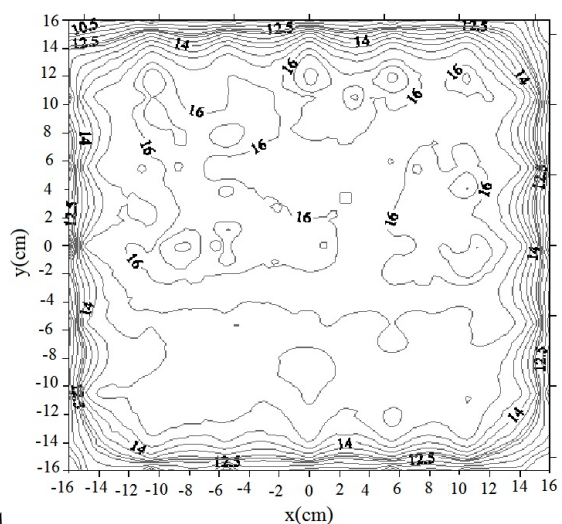
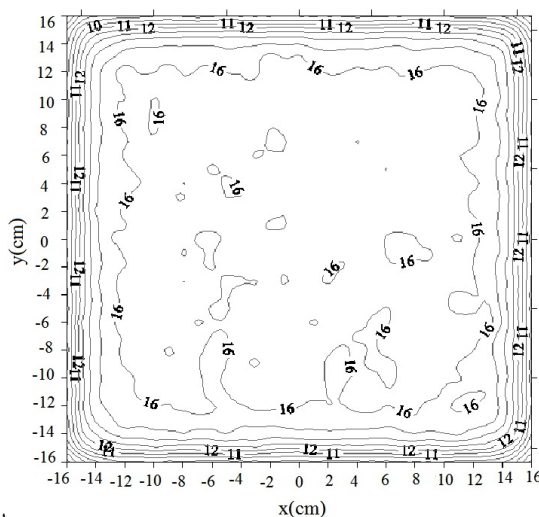
#### ۱.۳. تعیین سه بعدی دز در محصول نمونه

پس از استخراج داده‌های برنامه MCNP و دسته‌بندی آنها همچنین پس از پایان مرحله پرتودهی و جدا کردن فیلم دزیمترها از لایه‌های کاغذ، مقدار جذب ایجاد شده در هر فیلم توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل "GENESYS 5" تعیین شده و این داده‌ها با روش کالیبراسیون مناسب به دز جذبی تبدیل شده است [۱۷]. نمودار سه بعدی توزیع دز جذبی و

نمودار هم‌دز در عمق استاندارد  $3/8 \text{ g/cm}^2$  (عمق بهینه) از محصول برای نتایج تجربی و محاسباتی در شکل‌های ۴ و ۵ که توسط نرم افزار "surfer 7" رسم شده، آورده شده است. شکل ۴ به خوبی بیانگر کاهش دز جذبی در لبه‌های محصول که در مجاورت با هوا قرار دارند، می‌باشند. نزدیک بودن خطوط هم‌دز در لبه‌های محصول در شکل ۵ حاکی از شیب تند تغییرات در این نواحی است. این شکل‌ها به خوبی نشان‌دهنده نقاط بیشینه (مرکز) و کمینه (لبه‌ها) دز در محصول هستند.



شکل (۴): نمودار سه بعدی توزیع دز در عمق بهینه الف- حاصل از نتایج تجربی ب- حاصل از نتایج محاسباتی.

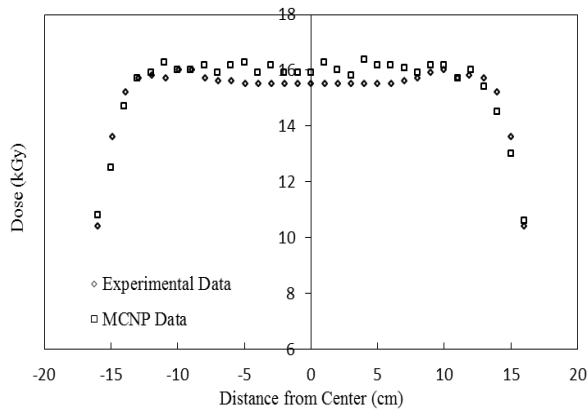


شکل (۵): نمودار هم‌دز در عمق بهینه. الف- حاصل از نتایج تجربی. ب- حاصل از نتایج محاسباتی.

نتایج تجربی آورده شده است. در این شکل، کاهش محسوس دز در لبه‌های محصول در همه عمق‌های کالا، مشخص است.

همچنین در شکل ۶ نمودار دز - عمق در نقاط رخداد بیشینه و کمینه دز در محصول یعنی در مرکز و لبه‌ها برای

در جدول ۲ مقادیر مختلف منحنی دز- عمق در مرکز محصول آورده شده و نتایج محاسباتی با تجربی مقایسه شده است.



شکل (۷): مقایسه نتایج محاسباتی و تجربی دز بر حسب فاصله از مرکز در عمق بهینه محصول.

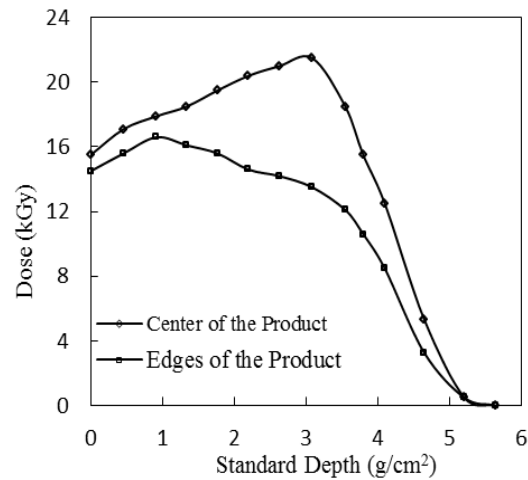
### ۲.۳. تعیین نسبت یکنواختی و کارایی انرژی

در جدول ۳ دز کمینه و بیشینه، نسبت یکنواختی دز و کارایی انرژی در حالت یک بعدی و سه بعدی در عمق‌های مختلف محصول آورده شده است.

با توجه به داده‌های جدول ۳ در شکل ۸ نمودار نسبت یکنواختی دز در عمق‌های مختلف محصول برای دو حالت یک و سه بعدی رسم شده است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مقدار نسبت یکنواختی در حالت یک بعدی از ۱/۰۰ در سطح محصول به ۱/۳۸ در عمق بهینه و در حالت سه بعدی از ۱/۰۰ به ۲/۰۰ در عمق بهینه به آرامی افزایش می‌یابد و از این عمق به بعد نسبت یکنواختی در هر دو مورد به سرعت زیاد می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت کاهش دز جذبی در لبه‌های محصول، باعث کاهش دز کمینه و افزایش نسبت یکنواختی دز در حالت یک بعدی نسبت به سه بعدی می‌شود.

کارایی انرژی در جدول ۳ با توجه به شکل ۶ و رابطه (۴) در دو حالت یک بعدی و سه بعدی محاسبه شده است. شکل ۹ نمودار کارایی انرژی در عمق‌های مختلف برای دو حالت یک و سه بعدی رسم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود در حالت یک بعدی ۷۰ درصد و در حالت سه بعدی ۴۸ درصد انرژی دستگاه تا عمق بهینه جذب می‌شود و از این عمق به بعد کارایی انرژی به شدت افت می‌کند.

با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان دریافت که بهترین ارتفاع محصول در پرتودهی یک طرفه برای اینکه هم نسبت



شکل (۶): نمودار دز - عمق در امتداد رخداد بیشینه و کمینه دز در محصول برای نتایج تجربی.

در جدول ۲،  $R_{max}$  عمقی است که دز جذبی در آن بیشینه است.  $R_{opt}$  یا عمق بهینه، عمقی است که دز جذبی در آن با دز جذبی در سطح محصول برابر است.  $R_{50}$  عمقی است که دز جذبی به نصف دز بیشینه در محصول افت می‌کند.  $R_{50e}$  عمقی است که دز جذبی در آن نصف دز جذبی در سطح محصول است و  $R_p$  برد عملی الکترون‌ها می‌باشد [۱۵].

جدول (۲): عمق‌های مختلف نمودارهای دز - عمق برای داده‌های

#### تجربی و محاسباتی

اختلاف	MCNP	Dosimetry	عمق استاندارد (g/cm <sup>2</sup> )
-	۳/۱	۳/۱	$R_{max}$
۵/۲	۴/۰	۳/۸	$R_{opt}$
۷/۱	۴/۵	۴/۲	$R_{50}$
۶/۸	۴/۷	۴/۴	$R_{50e}$
۳/۹	۵/۳	۵/۱	$R_p$

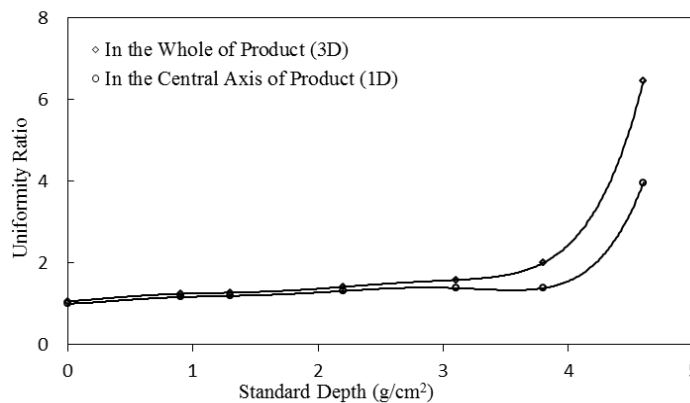
در ادامه، با توجه به نتایج محاسباتی و تجربی به دست آمده، منحنی دو بعدی دز جذبی بر حسب فاصله از مرکز محصول در عمق ۳/۸ g/cm<sup>2</sup> (عمق بهینه)، در شکل ۷ آمده‌است. نتایج حاکی از توافق داده‌های محاسباتی و تجربی است. در این شکل کاهش دز در لبه‌های محصول و یکنواختی دز در نواحی میانی که از لبه‌ها دور است کاملاً مشهود است.



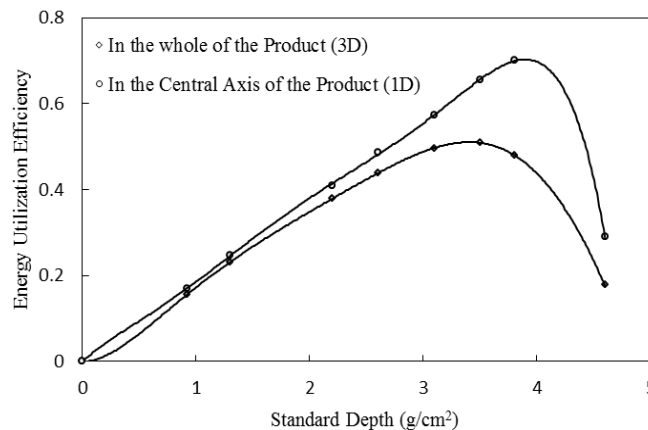
یکنواختی چندان زیاد نشود و هم اینکه انرژی دستگاه حداکثر کارایی را داشته باشد، عمق بهینه است.  
 ۳.۳. تعیین آهنگ تولید جرمی سیستم  
 آهنگ تولید جرمی را با استفاده از داده‌های جدول ۳ و رابطه (۵) برای سیستم الکترونی مورد استفاده در این تحقیق می‌توان تعیین کرد. بر این اساس آهنگ تولید برای یک دز کمینه مشخص (۱۰/۶ kGy) و ضریب اسکن ۰/۳۱ در این مسئله، در حالت یک بعدی با کارایی انرژی ۰/۷۰ مقدار ۰/۴۸ kg/s و در حالت سه بعدی با کارایی انرژی ۰/۴۸ مقدار ۰/۴۲ kg/s به دست می‌آید. این بدان معناست که کاهش دز در لبه‌ها باعث کاهش آهنگ تولید جرمی به اندازه تقریباً ۳۰ درصد شده است.

جدول (۳): مقادیر بیشینه و کمینه دز جذبی، نسبت یکنواختی و کارایی در دو حالت یک و سه بعدی

عمق استاندارد (g/cm <sup>2</sup> )	دز بیشینه (kGy)	دز کمینه (یک بعدی) (kGy)	دز کمینه (سه بعدی) (kGy)	نسبت یکنواختی (یک بعدی)	نسبت یکنواختی (سه بعدی)	کارایی (یک بعدی) (%)	کارایی (سه بعدی) (%)
۰	۱۵/۵	۱۵/۵	۱۴/۵	۱/۰۰	۱/۰۶	۰	۰
۰/۹	۱۸/۰	۱۵/۵	۱۴/۵	۱/۱۶	۱/۲۴	۱۶/۹	۱۵/۶
۱/۳	۱۸/۵	۱۵/۵	۱۴/۵	۱/۱۹	۱/۲۷	۲۴/۸	۲۳/۲
۲/۲	۲۰/۴	۱۵/۵	۱۴/۵	۱/۳۱	۱/۴۱	۴۱/۰	۳۷/۹
۳/۱	۲۱/۴	۱۵/۵	۱۳/۵	۱/۳۸	۱/۵۸	۵۷/۳	۴۹/۶
۳/۸	۲۱/۴	۱۵/۵	۱۰/۶	۱/۳۸	۲/۰۰	۷۰/۰	۴۸/۰
۴/۶	۲۱/۴	۵/۴۰	۳/۳۰	۳/۹۶	۶/۵۴	۲۹/۰	۱۷/۸



شکل (۸): نسبت یکنواختی دز به ازای عمق استاندارد محصول برای دو حالت یک و سه بعدی.



شکل (۹): نمودار کارایی انرژی در عمق‌های مختلف محصول برای دو حالت یک و سه بعدی.

## ۴. نتیجه‌گیری

کاهش دز در لبه‌ها باعث کاهش بیشینه کارایی انرژی از ۰/۷۰ به ۰/۴۸ شده و آهنگ تولید جرمی سیستم را حدود ۳۰ درصد کاهش می‌دهد.

محاسبات شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های تجربی در این مقاله نشان دهنده چگونگی تاثیر کاهش دز در لبه‌های محصول پرتودهی یک طرفه بر پارامترهای پرتودهی سیستم می‌باشد. کاهش دز در لبه‌های محصول، دز جذبی کمینه در محصول را کاهش داده و نسبت یکنواختی دز را افزایش می‌دهد و باعث کاهش بیشینه کارایی انرژی در عمق بهینه شده و به همان نسبت آهنگ تولید جرمی سیستم را کاهش می‌دهد. بطوریکه

## ۵. سپاسگزاری

با تشکر از کلیه کارمندان و پرسنل آزمایشگاه دزیمتری پژوهشکده کاربرد پرتوهای یزد که در انجام اندازه‌گیری‌های تجربی این تحقیق، صمیمانه ما را یاری دادند.

## ۶. مراجع

- [1] R.B. Miller. Electronic irradiation of foods: an introduction to the technology. Springer Science, United States of America, (2005).
- [2] N.J. Carron. An introduction to the passage of energetic particles through matter. Taylor & Francis, New York, (2006).
- [3] A. Toutaoui, N. Khelassi-Toutaoui, Z. Brahimi, A. Chafik Chami. Effects of physics change in Monte Carlo code on electron pencil beam dose distributions. Radiation Physics and Chemistry. 81 (2012) 1-8.
- [4] F. Ziaie, Z. Zimek, S. Bulka, H. Afarideh, S.M. Hadji-Saeid. Calculated and measured dose distribution in electron and X-ray irradiated water phantom. Radiation Physics and Chemistry. 63 (2002) 177-183.
- [5] M.R. Cleland, R.A. Galloway, A.H. Heiss, J.R. Logar. Comparisons of Monte Carlo calculations with absorbed dose determinations in flat materials using high-current, energetic electron beams. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 261 (2007) 90-93.
- [6] R.B. Miller. Food irradiation using bremsstrahlung x-rays. Radiation Physics and Chemistry. 68 (2003) 963-974.
- [7] M.R. Cleland, L.A. Parks. Medium and high-energy electron beam radiation processing equipment for commercial applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 208 (2003) 74-89.
- [8] D. Defrise, M. Abs, F. Genin, Y. Jongen. Technical status of the first industrial unit of the 10 MeV, 100 kW Rhodotron. Radiation Physics and Chemistry. 46 (1995) 473-476.
- [9] M. Van Lancker, A. Herer, M.R. Cleland, Y. Jongen, M. Abs. The IBARhodotron: An industrial high-voltage high-powered electron beam accelerator for polymers radiation processing. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 151 (1999) 242-246.
- [10] M.R. Cleland, R.A. Galloway, F. Genin, M. Lindhom. The use of dose and charge distributions in electron beam processing. Radiation physics and Chemistry. 63 (2002) 729-733.
- [11] V. Lopez, M. Ciofalo, A. Parlato. A feasibility study on the application of radiation technology to wastewater treatment in Sicily. Graduation Course in Nuclear Engineering. Faculty of Engineering, University of Palermo, Italy, (2006).
- [12] M.R. Cleland, R.A. Galloway, A.J. Berejka. Energy dependence of electron beam penetration, area throughput rates and electron energy utilization in the low-energy region. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 261 (2007) 94-97.
- [13] International standard ISO/ASTM. Standard practice for use of a cellulose triacetate dosimetry system. ISO/ASTM 51650, PA, USA, (2005).
- [14] J.F. Briesmeister-Editor, MCNP - A general Monte Carlo N - particle transport code-version 4c. Diagnostics Applications Group, Los Alamos National Laboratory, (2000).
- [15] International Standard ISO/ASTM. Standard practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV. ISO/ASTM 51649, PA, USA, (2005).
- [16] ICRU. Radiation dosimetry: Electron with initial energies between 1 and 50 MeV, ICRU Report 21, Bethesda-Maryland, USA, (2001).
- [17] International standard ISO/ASTM. Standard guide for selection and calibration of dosimetry systems for radiation processing, ISO/ASTM 51261, PA, USA, (2002).