

محاسبه ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا به عنوان ماده معادل بافت با کمک کد MCNPX

سید میلاد وهابی^۱، مستعان بحرینی پور^{۱*} و مجتبی شمسایی زفرقندی^۱

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

^{*}تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، کدپستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

پست الکترونیکی: mostean-bahreini@aut.ac.ir

چکیده

چوب ریزوفورا نوعی چوب است که خواص اندرکنشی آن با پرتو، مشابه با آب می باشد. اخیراً یک مدل جدید مبتنی بر کد MCNP4C برای محاسبه ضرایب تضعیف جرمی چند پلیمر پیشنهاد شده است. هدف از این مقاله، محاسبه ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا در محدوده انرژی بین ۱۵/۷۷ تا ۶۰ کیلو الکترون ولت با استفاده از این مدل می باشد. مدل مذکور در ابتدا برای بافت نرم، پستان و آب مورد استفاده قرار گرفت و پس از اعتبارسنجی با داده های XCOM، برای این چوب به کار گرفته شد. خطای نسبی شبیه سازی همواره کمتر از ۰/۵۵٪ بوده است. نتایج حاصل شده تطابق خوبی با داده های XCOM داشتند.

کلیدواژگان: ضریب تضعیف جرمی، چوب ریزوفورا، MCNPX، معادل بافت، XCOM.

۱. مقدمه

که I و I_0 به ترتیب تابش تضعیف شده و تضعیف نشده و t

ضخامت جرمی جاذب است.

ضریب تضعیف جرمی کلی برای یک ماده چند عنصری، مجموع حاصل ضرب مقادیر ضریب جرمی $(\mu/\rho)_i$ و کسر وزنی هر عنصر w_i است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$\mu/\rho = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (2)$$

ضریب تضعیف خطی μ احتمال اندرکنش فوتون در واحد

مسیر طی شده است. ضریب تضعیف جرمی (μ/ρ) یک

ضریب مستقل از چگالی (ρ) می باشد که با تقسیم μ بر ρ به دست می آید [۱]. رابطه تغییرات شدت تابش با (μ/ρ) به

صورت زیر قابل تعریف است:

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)t} \quad (1)$$

ضریب تضعیف جرمی کمیته بنیادی جهت تعیین نفوذ فوتون‌ها و پرتو ایکس و محاسبه انرژی انباشت در مواد بیولوژیکی و حفاظا می‌باشد. اندازه‌گیری ضرایب تضعیف فوتون‌ها در مواد زیستی و سایر مواد اهمیت بسزایی در حوزه‌های صنعت، بیولوژی، کشاورزی و پزشکی دارد. علاوه بر این، مقادیر دقیق ضرایب تضعیف جرمی فوتون جهت تهیه و تدارک داده‌های ضروری در زمینه‌های مقطع‌نگاری، طیف-سنجی، رادیوگرافی، فیزیک اتمی، پزشکی تشخیصی مطالعات فلورسانس پرتوگاما، بلورنگاری و بیوفیزیک تابش مورد نیاز است [۲، ۳]. به‌همین دلیل، از همان روزهای آغازین مطالعات پرتو ایکس، اندازه‌گیری ضرایب تضعیف جرمی و مقایسه آن‌ها با داده‌های نظری صورت‌گرفته و کارهای تحقیقاتی برجسته‌ای در رابطه با اندازه‌گیری و محاسبه این ضرایب منتشر شده است. ضرایب تضعیف برخی از اسیدهای چرب [۴]، مس، ایندیوم و سلنیوم در حالت عنصری و نیمه‌رسانای $CuInSe_2$ [۵]، نمونه‌های بیولوژیکی مثل استخوان، ماهیچه، چربی و آب [۶]، نمونه‌های بیولوژیکی حاوی هیدروژن، کربن، نیتروژن و اکسیژن [۷]، بتن، باکلیت و سیمان [۸-۱۰]، آمینواسیدها [۱۱]، بافت‌ها و اعضای بدن انسان [۱۲]، اکسیدهای فلزی سنگین [۱۳]، نمونه‌های بیولوژیکی و زمین شناختی [۱۴]، سرامیک بر پایه سرب [۱۵] و چند پلیمر [۱۶] در انرژی‌های متفاوت اندازه‌گیری یا از طریق شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند.

نظر به اینکه استفاده از فانتوم آب برای اندازه‌گیری پارامترهای دزیمتری همواره عملی نیست، فانتوم‌های جامد همگنی از جمله پلی‌استرن، آکرلیک و مواد مخصوص کاربرد گسترده‌ای مخصوصاً در دزیمتری بالینی دارند [۱۷]. چوب ریزوفورا^۱ نوعی چوب است که خواص اندرکنشی آن با پرتو، همانند آب می‌باشد. علاوه بر این، دارای مشابهت‌هایی با سایر

فانتوم‌های استاندارد از نظر خواص رادیومتریکی است [۱۸-۲۱].

خواص ضریب تضعیف خطی گستره‌ای از چوب‌های جنگلی حرا در انرژی فوتون $59/54 \text{ keV}$ مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهده شد که چوب ریزوفورا در این بین پتانسیل معادل بافت بودن برای دزیمتری تابش را داراست زیرا خواص آن برحسب چگالی-جرم و تضعیف مشابه آب می‌باشد. در انرژی‌های کبالت- 60 ، این چوب با چگالی $1/040 \text{ g/cm}^3$ درصد دزعمقی را فراهم می‌کند که در محدوده 2% مقادیر مربوط به آب است [۲۲]. بررسی‌های بیشتری شامل آزمودن شدت انتقالی و پراکندگی برای گستره‌ای از چوب‌های جنگلی، آب و لاستیک اصلاح شده تحت هشت زاویه متفاوت پراکندگی از 10 تا 45 درجه انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که چوب ریزوفورا و لاستیک اصلاح شده مشخصات رادیوگرافیکی و پراکندگی مشابهی با آب دارند [۲۳].

ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا برای محدوده انرژی $15/77 \text{ keV}$ تا $25/27 \text{ keV}$ تعیین و نتایج با مقادیر تئوری مقایسه شد. همچنین مشاهده شد که نتایج، انطباق خوبی با داده‌های XCOM داشتند [۲۴]. اخیراً ضرایب تضعیف جرمی، عدد اتمی مؤثر و چگالی الکترونی چوب ریزوفورا و تخته خرده چوب با استفاده از کد MCNP5 در بازه انرژی 10 keV تا 60 keV محاسبه شده‌اند [۲۵].

هدف از این مقاله محاسبه ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا و چند ماده در انرژی $15/77 \text{ keV}$ تا 60 keV با استفاده از کد MCNPX می‌باشد. مدل مورد استفاده در این جا مطابق با مدل گزارش شده در مقاله وهابی و همکاران است [۱۶]. تفاوت این مدل با مدل مرجع [۲۵] در ابعاد، نوع آشکارساز، هندسه و چشمه می‌باشد. نهایتاً نتایج شبیه‌سازی با داده‌های XCOM مقایسه شدند.

¹Rhizophora

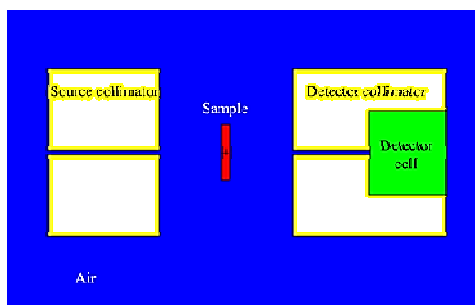
۲. مواد و روش‌ها

برنامه XCOM برای محاسبه ضریب تضعیف جرمی مورد استفاده قرار گرفت. این برنامه توسط برگر و هابل توسعه داده شده است که برای محاسبه ضریب تضعیف جرمی در انرژی‌های ۱ keV تا ۱۰۰ GeV به کار می‌رود [۲۶، ۲۷].

کد مونت کارلو MCNP که در آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس توسعه یافته است، یک کد بین‌المللی شناخته شده جهت آنالیز ترابرد نوترون، پرتوهای گاما و الکترون‌ها با استفاده از روش مونت کارلو می‌باشد. در این مقاله از نسخه MCNPX استفاده شد. شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این هندسه مبتنی بر مدل ارائه شده توسط وهابی و همکاران می‌باشد که اخیراً منتشر شده است. نمونه، استوانه‌ای با قطر ۸ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر است.

درصد وزنی عنصری و مشخصات مواد به کار رفته در این شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است. کولیماتورها، استوانه‌هایی سربی با قطر داخلی ۳ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. فاصله چشمه تا نمونه ۲۷/۵ سانتی‌متر و فاصله نمونه تا آشکارساز ۲۰/۵ سانتی‌متر فرض شد.

آشکارساز از نوع سوسوزن NaI و به شکل استوانه‌ای با قطر ۶ سانتی‌متر و ضخامت ۱۱ سانتی‌متر می‌باشد. محیط بیرونی غیر از نمونه، آشکارساز و کولیماتورها کره‌ای از جنس هوا با شعاع ۱۰۰ سانتی‌متر و فضای خارج از آن خلأ است. چشمه، صفحه‌ای تک انرژی با انرژی‌های ۶۰، ۵۵، ۵۰، ۴۵، ۴۰، ۳۵، ۳۰، ۲۵/۲۷، ۲۴/۲۱، ۲۲/۱۶، ۲۱/۱۸، ۱۷/۴۸ و ۱۵/۷۷ کیلو الکترون‌ولت در نظر گرفته شد.



شکل (۱): هندسه شبیه‌سازی شده.

جدول (۱): مشخصات مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی.

درصد وزنی (%)								چگالی (g/cm ³)	ماده
Cl	S	P	Na	O	N	C	H		
-	-	-	-	۸۷/۹۰۰۰	-	-	۱۱/۱۰۰۰	۱	آب
-	-	-	-	۷۶/۱۸۲۸	۲/۶۰۰۰	۱۱/۱۰۰۰	۱۰/۱۱۷۲	۱	بافت نرم (ICRU 44)
۰/۱۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۵۲/۷۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۳۳/۲۰۰۰	۱۰/۶۰۰۰	۱/۰۲	پستان (ICRU 44)
-	-	-	-	۵۴/۴۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۴۰/۱۶۰۰	۵/۴۱۰۰	۱/۰۴	چوب ریزوفورا

گرفت. تعداد ذرات برابر با ۲۰۰۰۰۰۰۰ ذره در نظر گرفته شد.

تالی F4 برای محاسبه خروجی شبیه‌سازی مدنظر قرار

۳. نتایج و بحث

در ابتدا کد MCNPX مورد استفاده قرار گرفت تا مقادیر ضریب تضعیف جرمی برای آب، پستان و بافت نرم [۲۸] محاسبه گردند. مقادیر ضریب تضعیف جرمی با استفاده از MCNPX نیز محاسبه شد. مقادیر شبیه‌سازی و XCOM برای این سه ماده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

اختلاف نسبی بین دو روش محاسباتی کمتر از $\pm 0.5\%$ مشاهده شد که در مقایسه با مرجع [۲۵] بهبود یافته‌است. به علاوه، این امر نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده در این مقاله مدل مناسبی برای محاسبه ضرایب تضعیف جرمی مواد می‌باشد. مقالات مشابهی به اعتبارسنجی کد MCNPX به عنوان روشی جایگزین برای XCOM و آزمایشات تجربی در محاسبه ضرایب تضعیف جرمی مواد مختلف پرداخته‌اند [۲۹، ۳۰].

در مرحله بعد، پس از اعتبارسنجی، مدل مورد استفاده برای محاسبه ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا به‌کار گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با داده‌های XCOM در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش انرژی، ضرایب تضعیف جرمی کاهش می‌یابد. جذب فوتوالکتریک در انرژی‌های کمتر از 30 keV غالب است. این امر به دلیل اهمیت بستگی اتمی رخ می‌دهد.

در این ناحیه انرژی، منحنی‌های ضریب تضعیف جرمی ناپیوستگی لبه جذب از خود نشان نمی‌دهند زیرا مواد مورد استفاده در این مقاله عناصر با عدد اتمی بالا ندارند [۳۱]. سهم جذب فوتوالکتریک در انرژی بیش از 30 keV قابل اغماض خواهد بود و پدیده غالب در این محدوده پراکندگی کامپتون

می‌باشد. این امر به این دلیل رخ می‌دهد که سطح مقطع مؤثر به‌طور عکس با انرژی فوتون ورودی متناسب است. همچنین از شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود که داده‌های شبیه‌سازی و XCOM توافق خوبی با یکدیگر دارند. اختلاف نسبی بین دو روش محاسباتی کمتر از $\pm 0.5\%$ بوده است. این امر بار دیگر اعتبار مدل مورد استفاده در این مقاله در محاسبه ضریب تضعیف جرمی را نشان می‌دهد.

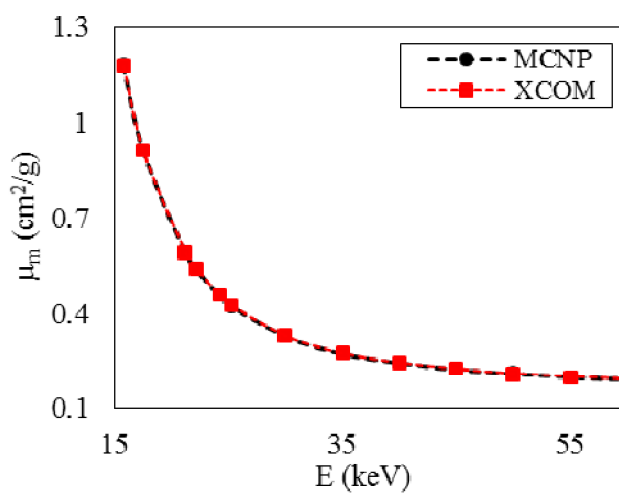
نتایج شبیه‌سازی چوب ریزوفورا با آب و بافت نرم موردقیاس قرار گرفتند. این امر از طریق محاسبه اختلاف نسبی محقق شد. نتایج در قالب شکل ۳ نشان داده شده است. تغییرات در مقادیر ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا در مقایسه با آب و بافت نرم با اختلاف نسبی به ترتیب کمتر از 13% و 9% مشاهده شد.

همچنین از جدول ۲ و شکل ۲ مشاهده می‌شود که مقادیر ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا به پستان نزدیک‌تر است و این امر با یافته‌های مرجع [۲۱] مطابقت دارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف نسبی در مقادیر ضریب تضعیف جرمی نمونه‌های چوب ریزوفورا در مقایسه با آب و بافت نرم مربوط به انرژی 15.77 keV می‌باشد. در این انرژی جذب فوتوالکتریک غالب است.

این رفتار به دلیل بستگی شدید جذب فوتوالکتریک به عدد اتمی و همچنین وجود عناصر با عدد اتمی بالاتر (کربن و نیتروژن) در چوب ریزوفورا می‌باشد. در انرژی 60 keV که پراکندگی کامپتون غالب است، اختلاف نسبی کمترین مقدار ممکن است زیرا چگالی الکترون تقریباً برابری در این ناحیه از انرژی، در نمونه‌های فوق‌الذکر وجود دارد.

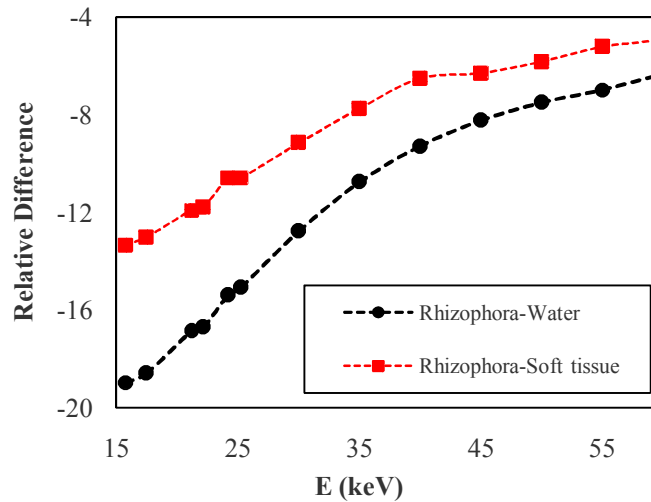
جدول (۲): مقادیر ضریب تضعیف جرمی فوتونی برای بافت نرم، پستان و آب.

ضریب تضعیف جرمی (cm^2/g)						انرژی (keV)
آب		پستان		بافت نرم		
MCNP	XCOM	MCNP	XCOM	MCNP	XCOM	
۱/۴۶۱	۱/۴۶۳	۱/۲۱۷	۱/۲۱۱	۱/۳۶۶	۱/۳۶۵	۱۵/۷۷
۱/۱۲۵	۱/۱۲۱	۰/۹۴۱	۰/۹۳۸	۱/۰۵۳	۱/۰۴۹	۱۷/۴۸
۰/۷۱۲	۰/۷۱۲	۰/۶۱۰	۰/۶۱۱	۰/۶۷۲	۰/۶۷۱	۲۱/۱۸
۰/۶۴۷	۰/۶۴۶	۰/۵۵۶	۰/۵۵۸	۰/۶۱۱	۰/۶۱۰	۲۲/۱۶
۰/۵۴۰	۰/۵۴۰	۰/۴۷۲	۰/۴۷۳	۰/۵۱۱	۰/۵۱۳	۲۴/۲۱
۰/۴۹۸	۰/۴۹۸	۰/۴۳۸	۰/۴۳۹	۰/۴۷۳	۰/۴۷۴	۲۵/۲۷
۰/۳۷۶	۰/۳۷۶	۰/۳۴۰	۰/۳۴۰	۰/۳۶۱	۰/۳۶۰	۳۰
۰/۳۰۷	۰/۳۰۸	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۹۷	۰/۲۹۷	۳۵
۰/۲۶۹	۰/۲۶۸	۰/۲۵۴	۰/۲۵۳	۰/۲۶۱	۰/۲۶۱	۴۰
۰/۲۴۳	۰/۲۴۴	۰/۲۳۳	۰/۲۳۳	۰/۲۳۸	۰/۲۳۸	۴۵
۰/۲۲۷	۰/۲۲۷	۰/۲۱۹	۰/۲۱۹	۰/۲۲۳	۰/۲۲۲	۵۰
۰/۲۱۵	۰/۲۱۵	۰/۲۰۸	۰/۲۰۸	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۵۵
۰/۲۰۶	۰/۲۰۶	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۰/۲۰۳	۰/۲۰۳	۶۰



شکل (۲): مقایسه بین داده‌های شبیه‌سازی و XCOM برای مقادیر ضریب تضعیف جرمی

بر حسب انرژی برای چوب ریزوفورا.



شکل (۳): اختلاف نسبی در ضرایب تضعیف جرمی (%) بر حسب انرژی بین چوب ریزوفورا، آب و بافت نرم.

نسبت به مرجع [۲۵] به مقادیر تئوری نزدیکتر بوده و در این زمینه بهبود خوبی حاصل شد. نتایج همچنین نشان داد که ضریب تضعیف جرمی وابسته به انرژی است و با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. این بستگی انرژی در انرژی‌های کم‌تر از ۳۰ keV به دلیل غالب بودن پدیده فوتوالکتریک بیشتر مشاهده می‌گردد. در انرژی بیش از ۳۰ keV ضرایب تضعیف جرمی به دلیل غالب بودن پراکندگی کامپتون، روند تقریباً ثابتی را دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، کد MCNPX برای محاسبه مقادیر ضریب تضعیف جرمی چوب ریزوفورا، آب، پستان و بافت نرم در انرژی ۱۵/۷۷ keV تا ۶۰ keV مورد استفاده قرار گرفت. قابلیت مدل استفاده شده در محاسبات ضریب تضعیف جرمی رضایت‌بخش ارزیابی شد. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های برنامه XCOM مطابقت بسیار خوبی داشت، به‌گونه‌ای که داده‌ها

۵. مراجع

- [1] H. Cember, Introduction to Health Physics. McGraw-Hill, New York, (2000).
- [2] N. Ekinici, N. Astam. Measurement of mass attenuation coefficients of biological materials by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry. Radiat. Meas. 42(3) (2007) 428–430.
- [3] S. Gowda, S. Krishnaveni, T. Yashoda, T. Umesh, R. Gowda. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some thermoluminescent dosimetric compounds. Pramana. 63(3) (2004) 529–541.
- [4] G. Bhandal, K. Singh, R. Rani, V. Kumar. Energy absorption coefficients for 662 and 1115 keV gamma rays in some fatty acids. Appl. Radiat. Isot. 45(3) (1994) 379–381.
- [5] U.u. Çevik, H. Baltaş, A. Çelik, E. Bacaksız. Determination of attenuation coefficients, thicknesses and effective atomic numbers for CuInSe₂ semiconductor. Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 247(2) (2006) 173–179.
- [6] A. Akar, H. Baltaş, U. Çevik, F. Korkmaz, N. Okumuşoğlu. Measurement of attenuation coefficients for bone, muscle, fat and water at 140, 364 and

- 662keV γ -ray energies. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 102(2) (2006) 203–211.
- [7] V. Manjunathaguru, T. Umesh. Simple parametrization of photon mass energy absorption coefficients of H-, C-, N-and O-based samples of biological interest in the energy range 200–1500 keV. *Pramana.* 72(2) (2009) 375–387.
- [8] O. Gurler, U.A. Tarim. An investigation on determination of attenuation coefficients for gamma-rays by Monte Carlo method. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 293(1) (2012) 397–401.
- [9] S. Sharifi, R. Bagheri, S. Shirmardi. Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Ann. Nucl. Energy.* 53 (2013) 529–534.
- [10] N. Demir, U.A. Tarim, M.-A. Popovici, Z.N. Demirci, O. Gurler, I. Akkurt. Investigation of mass attenuation coefficients of water, concrete and bakelite at different energies using the FLUKA Monte Carlo code. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 298(2) (2013) 1303–1307.
- [11] P.S. Kore, P.P. Pawar. Measurements of mass attenuation coefficient, effective atomic number and electron density of some amino acids. *Radiat. Phys. Chem.* 98 (2014) 86–91.
- [12] V. Singh, N. Badiger, N. Kucuk. Assessment of methods for estimation of effective atomic numbers of common human organs and tissue substitutes: waxes, plastics and polymers. *J. Radioprot.* 49(2) (2014) 115–121.
- [13] A. El-Khayatt, A. Ali, V.P. Singh. Photon attenuation coefficients of Heavy-Metal Oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: A comparison study. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 735 (2014) 207–212.
- [14] V. Trunova, A. Sidorina, V. Kriventsov. Measurement of X-ray mass attenuation coefficients in biological and geological samples in the energy range of 7–12keV. *Appl. Radiat. Isot.* 95 (2015) 48–52.
- [15] A. Vejdani-Noghreiyani, E. Aliakbari, A. Ebrahimi-Khankook, M. Ghasemifard. Theoretical and experimental determination of mass attenuation coefficients of lead-based ceramics and their comparison with simulation. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 31(2) (2016) 142–149.
- [16] S.M. Vahabi, M. Bahreinipour, M.S. Zafarghandi. Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study. *Vacuum.* (2016).
- [17] F.M. Khan, J.P. Gibbons. *Khan's the physics of radiation therapy.* Lippincott Williams & Wilkins (2014).
- [18] D. Banjade, A. Tajuddin, A. Shukri. A study of Rhizophora spp wood phantom for dosimetric purposes using high-energy photon and electron beams. *Appl. Radiat. Isot.* 55(3) (2001) 297–302.
- [19] M.W. Marashdeh, R. Hashim, A.A. Tajuddin, S. Bauk, O. Sulaiman. Effect of particle size on the characterization of binderless particleboard made from Rhizophora spp. Mangrove wood for use as phantom material. *BioResources* 6(4) (2011) 4028–4044.
- [20] M. Marashdeh, S. Bauk, A. Tajuddin, R. Hashim. Measurement of mass attenuation coefficients of Rhizophora spp. binderless particleboards in the 16.59–25.26 keV photon energy range and their density profile using x-ray computed tomography. *Appl. Radiat. Isot.* 70(4) (2012) 656–662.
- [21] A. Abuarra, S. Bauk, R. Hashim, S. Kandaiya, E.T. Touse, K. Aldroobi. Microstructure examination, elemental composition analysis of gum arabic bonded Rhizophora spp. Particleboards and their potential as tissue equivalent material. *Int. J. Chem. Environ. Biol. Sci.* 2(1) (2014) 2320–4087.
- [22] D. Bradley, A. Tajuddin, C.W.A.C.W. Sudin, S. Bauk. Photon attenuation studies on tropical hardwoods. *Int. J. Rad. Appl. Instrum. A.* 42(8) (1991) 771–773.
- [23] A. Tajuddin, C.C.W. Sudin, D. Bradley. Radiographic and scattering investigation on the suitability of Rhizophora sp. as tissue-equivalent medium for dosimetric study. *Radiat. Phys. Chem.* 47(5) (1996) 739–740.
- [24] B. Shakhreet, S. Bauk, A. Tajuddin, A. Shukri. Mass attenuation coefficients of natural Rhizophora spp. wood for X-rays in the 15.77–25.27 keV range. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 135(1) (2009) 47–53.
- [25] M.W. Marashdeh, I.F. Al-Hamarneh, E.M.A. Munem, A. Tajuddin, A. Ariffin, S. Al-Omari. Determining the mass attenuation coefficient, effective atomic number, and electron density of raw wood and binderless particleboards of Rhizophora spp. by using Monte Carlo simulation. *Results. Phys.* 5 (2015) 228–234.

- [26] M. Berger, J. Hubbell. Photon Cross section on a Personal Computer (XCOM). Center for Radiation Research of Standards. MD 20899.
- [27] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.
- [28] M. Bethesda. Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), (1989).
- [29] M. Medhat, S. Shirmardi, V. Singh. Comparison of geant 4, MCNP simulation codes of studying attenuation of gamma rays through biological materials with XCOM and experimental data. J. Comput. Appl. Math. (2014).
- [30] V. Singh, S. Shirmardi, M. Medhat, N. Badiger. Determination of mass attenuation coefficient for some polymers using Monte Carlo simulation. Vacuum. 119 (2015) 284–288.
- [31] S. Jayaraman, L.H. Lanzl. Clinical radiotherapy physics, Springer Science & Business Media, (2011).