

استفاده از مواد جدید در طراحی حفاظ متوقف کننده های باریکه چشمه نور

ایران (ILSF) با استفاده از کد مونت کارلو FLUKA

سلماز وجدانی^{(۱)*}؛ محمد هادی هادی زاده یزدی^(۲)؛ جواد رحیقی^(۳)

^۱ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، مشهد، ایران و پژوهشگاه دانشهای بنیادی، مرکز تحقیقات فیزیک و ریاضیات،

طرح چشمه نور ایران، تهران، ایران.

^۲ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک، مشهد، ایران.

^۳ پژوهشگاه دانشهای بنیادی، مرکز تحقیقات فیزیک و ریاضیات، طرح چشمه نور ایران، تهران، ایران.

چکیده:

چشمه نور ایران یک سینکروترون نسل سوم است که در مراحل اولیه طراحی می باشد. هدف از این تحقیق بررسی خاصیت تضعیف کنندگی مواد جدیدی که می توانند جایگزین بتون معمولی شوند در انرژی های بالا از مرتبه مگا و گیگا الکترون ولت می باشد، تا کارایی این مواد در استفاده به عنوان ماده حفاظ در سینکروترون برای اولین بار مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور شاریدگی و فاکتور انتقال این مواد برای نوتون و گاما با استفاده از شبیه سازی با آخرین نسخه کد چند منظوره مونت کارلو FLUKA محاسبه شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی بتون فوق سنگین جدید با چگالی 1 gr/cm^3 تضعیف کنندگی بهتری در برابر پرتوهای گاما و نوترون دارد.

کلمات کلیدی: سینکروترون، متوقف کننده باریکه، حفاظ، فاکتور انتقال، شاریدگی، بتون، کد مونت کارلو FLUKA.

مقدمه:

جهت ساخت حفاظ می توان از مصالح مختلفی استفاده کرد ولیکن بتون به عنوان یکی از رایج ترین و مقرون به صرفه ترین این مصالح، به منظور حفاظت بیولوژیکی در نیروگا ههای هسته ای، شتابگرها، واحدهای پزشکی و صنعتی و مراکز تحقیقات هسته ای و ... به طور وسیع مورد استفاده قرار می گیرد. بتون به دلیل دارا بودن مواد سبک و سنگین و خواص مناسب، به عنوان یک ماده بسیار عالی و با تنوع زیاد، برای استفاده در حفاظ مورد توجه می باشد. خواص مکانیکی رضایت بخش، هزینه اولیه و نگهداری کم، سهولت و تنوع در ساخت و امکان قالب گیری با شکل های پیچیده نیز، از دیگر مزایای استفاده از بتون به عنوان حفاظ پرتوهاست. بتون ماده مناسبی برای حفاظ پرتوهای گاما و نوترون می باشد. استفاده از بتون به عنوان حفاظ برای شتابگرها در سراسر دنیا متداول است. در سالهای اخیر دانشمندان مطالعات گسترده ای بر روی مواد جدید برای حفاظ سازی انجام داده اند. مواد جدید ساخته شده خصوصیات مکانیکی و خاصیت تضعیف کنندگی بهتری نسبت به بتون معمولی از خود نشان داده اند. تاکنون از این مواد جدید برای ساخت حفاظ در شتابگرهای با انرژی بالا استفاده نشده است این مواد تنها به عنوان حفاظ چشمه های نوترون و گاما با انرژی پایین مورد استفاده قرار می گیرند. چشمه نور ایران در مراحل اولیه طراحی می باشد، بنابراین فرصت بسیار مناسبی برای بررسی مواد جدیدی که دارای خصوصیات مکانیکی لازم می باشند و می توانند جایگزین بتون معمولی شوند، وجود دارد. هدف این تحقیق بررسی خاصیت تضعیف کنندگی چند



19 th Iranian's Nuclear Conference

ماده جدید در انرژی های بالا از مرتبه مگا الکترون ولت و گیگا الکترون ولت برای تأسیسات شتابگر سینکروترون الکترونی ایران و مقایسه این مواد با بتون معمولی می باشد .

روش کار :

شبیه سازی با استفاده از کد مونت کارلوی FLUKA: بیشترین اتلاف در تأسیسات سینکروترونی در متوقف کننده های باریکه^۱ رخ می دهد به همین دلیل برای شبیه سازی و انجام محاسبات هندسه متوقف کننده باریکه شتابگر خطی و بوستر برای دو انرژی ۱۵۰ MeV و ۳ GeV در نظر گرفته شده است تا کارایی این مواد در حد بالای اتلاف بررسی شود . هنگامی که عملیات تزریق از شتابگر خطی به بوستر انجام نمی گیرد ، باریکه در متوقف کننده باریکه ، اتلاف می شود . در متوقف کننده باریکه تقریباً صد درصد باریکه الکترونی با انرژی ۱۵۰ MeV - انرژی باریکه الکترونی در ILSF هنگام تزریق از شتابگر خطی به بوستر ۱۵۰ MeV است - اتلاف می شود . در اثر برهم کنش باریکه الکترونی با ماده متوقف کننده باریکه ، آبشار الکترومغناطیسی در آن ایجاد می شود . استفاده از آهن به عنوان متوقف کننده باریکه در اکثر شتابگرها متداول است . استوانه ای آهنی به طول ۳۵.۴ cm و شعاع ۳.۸۴ cm به طور مؤثر ۹۹.۹۹٪ آبشار الکترومغناطیسی را در متوقف کننده باریکه در بر می گیرد . برای متوقف کردن باریکه هنگامی که تزریق از بوستر به حلقه انبارش صورت نمی گیرد نیز از متوقف کننده باریکه استفاده می شود . متوقف کننده باریکه بوستر نیز استوانه ای با ابعاد اشاره شده در بالا می باشد . انرژی باریکه الکترونی در ILSF هنگام تزریق از بوستر به حلقه انبارش ۳ GeV است ، که تقریباً صد درصد آن در متوقف کننده باریکه اتلاف می شود .

انتخاب مواد: کلمانیت و اپوکسی رزین : مواد حاوی بور اغلب در حفاظ های نوترون مورد استفاده قرار می گیرند . می توان با اضافه کردن سنگدانه های طبیعی بور به بتون معمولی خاصیت تضعیف کنندگی آن را بهبود بخشید اما طبق تحقیقات انجام شده استفاده از سنگدانه های بوردار طبیعی ، اثرات سوء از جمله کاهش مقاومت مکانیکی و افزایش شکنندگی بر بتون ، دارد . مصالح مهم بور عبارتند از : کلمانیت ، بوروکلسیت ، اولکسیت ، پایگیت و تورمالین . کلمانیت یک سنگ معدن طبیعی حاوی بور می باشد که قیمت پائینی دارد . حدود چهل سال است که دانشمندان در صدد استفاده از کلمانیت به عنوان یک حفاظ نوترونی هستند اما ساختن بتون به دلیل مقاومت مکانیکی پایین کلمانیت و قابلیت جزئی انحلال آن در آب امکان پذیر نبود . اما به تازگی دانشمندان ژاپنی نوعی ماده جدید به عنوان حفاظ نوترونی حاوی کلمانیت و اپوکسی رزین ساخته اند که مقاومت مکانیکی آن ۳ برابر بتون معمولی است . فرآیند ساخت آسان ، اثر حفاظتی بالا ، پایداری بالا در برابر نوترون و قیمت ارزان از مزایای این ماده جدید می باشند . نمونه ساخته شده توسط دانشمندان ژاپنی با دو روش شبیه سازی با کد MCNP4C و آزمایش با چشمه نوترون ^{252}Cf با شدت $(1.992 \times 10^6 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2})$ مورد بررسی قرار گرفته است . نتایج بررسی نشان دهنده خاصیت تضعیف کنندگی نوترونی بهتر این ماده

^۱ Beam stops

جدید نسبت به بتون می باشد [۱].

جدول (۱) درصد وزنی عناصر مختلف موجود در کلمانیت و اپوکسی رزین، بتون فوق سنگین Hormirad، بتون معمولی و بتون باریت .

بتون معمولی		بتون باریت		بتون فوق سنگین Hormirad		کلمانیت و اپوکسی رزین	
درصد وزنی	نماد شیمیایی عنصر	درصد وزنی	نماد شیمیایی عنصر	درصد وزنی	نماد شیمیایی عنصر	درصد وزنی	نماد شیمیایی عنصر
۰.۲۴۸	H	۰.۳۵۸	H	۶۰.۸۰	Fe	۴۳.۸۰۵	O
۵۷.۴۹۳	C	۳۱.۱۶۲	O	۳۱.۲۶	O	۳.۸۰۰	H
۱.۵۲۰	O	۰.۱۱۹	Mg	۴.۳۶	Ca	۱.۲۰۰	N
۰.۱۲۶	Na	۰.۴۱۸	Al	۱.۸۷	Si	۲۵.۵۰۰	C
۱.۹۹۵	Mg	۱.۰۴۵	Si	۰.۴۴	H	۰.۰۰۵	Li
۳۰.۴۶۲	Al	۱۰.۷۸۵	S	۰.۳۹	Mg	۱.۰۴۱	Si
۱.۰۰۴	Si	۵.۰۱۹	Ca	۰.۱۹	Ti	۰.۳۱۸	Al
۴.۲۹۵	K	۴.۷۵۰	Fe	۰.۱۷	Al	۰.۲۱۰	Fe
۰.۶۳۳	Ca	۴۶.۳۴۰	Ba	۰.۰۶	K	۱۱.۸۵۲	Ca
۲.۲۱۰	Fe	-	-	۰.۰۶	Mn	۰.۲۴۷	Mg
-	-	-	-	۰.۰۵	V	۰.۰۲۲	Na
-	-	-	-	۰.۰۴	C	۰.۰۷۳	K
-	-	-	-	۰.۰۱	S	۰.۰۰۷	Ti
-	-	-	-	۰.۰۰۳	N	۰.۴۳۶	P
-	-	-	-	۰.۲۹	P	۹.۴۲۴	B
۲.۳۴(g/cm ^۳)	چگالی	۳.۳۵(g/cm ^۳)	چگالی	۴.۱(g/cm ^۳)	چگالی	۱.۷۴(g/cm ^۳)	چگالی

بتون فوق سنگین جدید: بتون فوق سنگین جدید با چگالی ۴,۱۰ گرم بر سانتی متر مکعب بسیار غنی از مگنتیت می باشد بطوریکه ۶۰.۸۰ درصد آن را آهن و ۳۱,۲۶ درصد را اکسیژن تشکیل می دهد. درصد وزنی آهن این بتون از بیشترین درصد وزنی آهن بتونهای مگنتیت ساخته شده در گذشته که حدود ۴۸ درصد است بیشتر می باشد [۲,۳]. این نمونه بتون ساخته شده توسط متخصصان اسپانیایی، تضعیف کنندگی بهتری در برابر پرتوهای گاما نسبت به بتون معمولی از خود نشان داده است هم چنین نتایج بررسی محاسبات مونت کارلو با کد MCNP^۵ و آزمایش با چشمه نوترون ^{۲۴۱}Am-Be در آزمایشگاه مهندسی هسته ای دانشگاه UPM^۱ نشان دهنده خاصیت تضعیف کنندگی نوترونی بهتر این ماده جدید نسبت به بتون معمولی می باشد. این بتون فوق سنگین با نام تجاری HormiradTM ساخت اسپانیا در دسترس می باشد و هم اکنون از این بتون برای ساختن درها و مخازن^۲ و در شتابگرهای کلینیکی استفاده می شود [۴].

بتون باریت: بتون باریت حاوی درصد وزنی بالایی از باریوم می باشد، وجود عنصر سنگین باریوم در این بتون باعث افزایش چگالی بتون می شود. نتایج شبیه سازی با کدهای مونت کارلو با چشمه های آزمایشگاهی در انرژی های پائین نشان دهنده بهبود خاصیت تضعیف کنندگی در برابر پرتوهای گاما در این بتون نسبت به بتون معمولی به دلیل وجود سنگ دانه های باریت می باشد [۵].

برای بررسی خاصیت تضعیف کنندگی مواد جدید شایستگی و فاکتور انتقال- با استفاده از رابطه ارائه شده- برای نوتون و گاما که دو منبع مهم تابش در تأسیسات سینکروترونی هستند، محاسبه گردیده است .

^۱ Universidad Politécnica de Madrid
^۲ bunker

$$T_d = D_d / D$$

در این رابطه T_d فاکتور انتقال، D_d دُز معادل^۱ در نقطه ای بعد از حفاظ با ضخامت d و D دُز معادل در نقطه ای قبل از حفاظ با ضخامت d می باشد. برای محاسبه فاکتور انتقال نیاز به تعیین دُز معادل گاما و نوترون داریم برای این کار ضخامتهای مختلف ۲۵ cm، ۵۰ cm، ۷۵ cm و ۱۰۰ cm از یک ماده حفاظ به عنوان مثال بتون جلوی هدف آهنی و به فاصله ۱ متر از آن و به فاصله ۳ متر از چشمه قرار داده می شود، با استفاده از کارت USBIN دُز معادل نوترون و گاما در ناحیه دُزیمتری از جنس هوا با ابعاد $2.5(cm) \times 2.5(cm) \times 2.5(cm)$ بعد از ضخامت های مختلف ماده حفاظ و در مکان قبل از حفاظ (بدون حضور ماده حفاظ) محاسبه می شود. انرژی چشمه (باریکه الکترونی) هنگام شبیه سازی برای متوقف کننده باریکه شتابگر خطی، ۱۵۰ MeV و برای شبیه سازی برای متوقف کننده باریکه بوستر ۳ GeV در کارت BEAM مشخص می شود. مواد مورد استفاده در حفاظ سازی که عبارتند از: کلمانیت و اپوکسی رزین، بتون فوق سنگین جدید Hormirad، بتون باریت و بتون معمولی با درصد وزنی که با استفاده از کارت MATERIAL به همراه کارت COMPOUND به برنامه داده می شود معرفی می گردند. برای محاسبه شاریدگی^۲ و دُز معادل نوترونها باید واکنشهای فوتو هسته ای فعال باشد. این کار از طریق تنظیم کارت PHOTONUC در کارت فیزیک صورت می گیرد. در کارت PHOTONUC کلیه کارت های مربوط به واکنشهای فوتو هسته ای، رزونانسی، تشدید غول آسا و تولید شبه دوترون فعال گردیده است. برای چهار ماده مورد نظر دُز معادل نوترون و گاما برای هر دو انرژی ذکر شده در بالا محاسبه می شود. در کارت اولیه (PRIMARY) تعداد ذراتی که ترابرد می شوند مشخص می شود، برای این شبیه سازی تعداد ذرات ۱۰۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. برای محاسبه شاریدگی نوترون و گاما از کارت USBDX استفاده شده است. این کارت مستقیماً اجازه محاسبه شار تابعی از زاویه و انرژی را در یک سطح همزمان می دهد. شاریدگی کل نوترون و گاما بطور جداگانه در هر یک از بلوک های ماده حفاظ با ضخامت های مختلف با اجرای ۳۴ برنامه تعداد با تعداد ذرات اولیه ۱۰۰۰۰۰۰ محاسبه شده است.

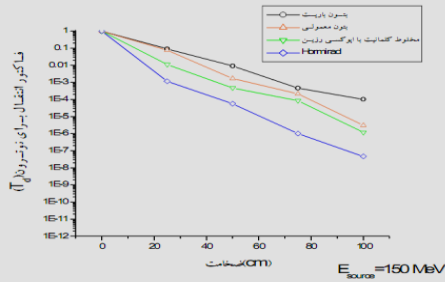
نتایج:

با استفاده از اجرای ۳۴ برنامه دُز معادل کل برای نوترون و گاما بطور جداگانه در ناحیه دُزیمتری ذکر شده در بالا محاسبه گردیده است. هر یک از این برنامه ها در ۲۰۰ سیکل و در زمانی حدود ۴۳۲۰ دقیقه اجرا شده اند. خطای بدست آمده برای این اندازه گیری ها حدود ۱ درصد می باشد. برای مقایسه این مواد با یکدیگر نمودارهای فاکتور انتقال و شاریدگی بر حسب ضخامت ماده حفاظ برای مواد مختلف رسم شده است.

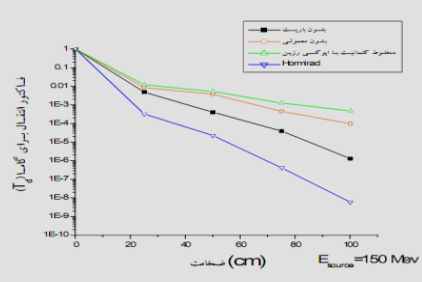
^۱ Dose equivalent

^۲ Fluence

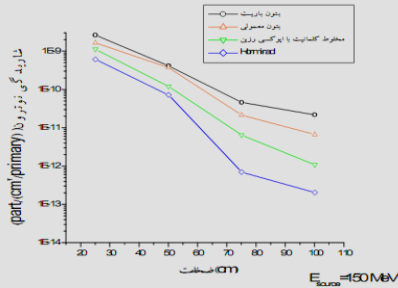
19 th Iranian's Nuclear Conference



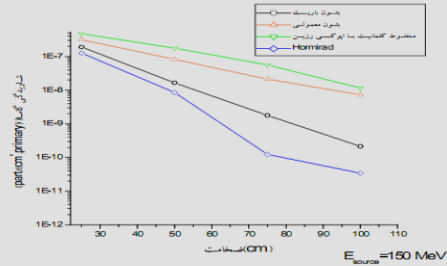
شکل (۲) نمودار فاکتور انتقال برای نوترون برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۱۵۰ MeV.



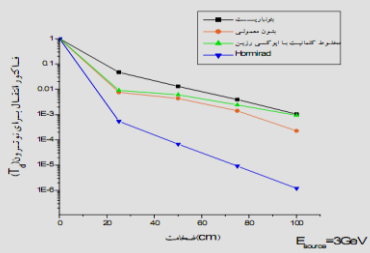
شکل (۱) نمودار فاکتور انتقال گاما برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۱۵۰ MeV.



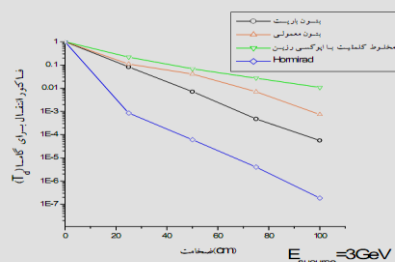
شکل (۴) نمودار شایستگی نوترون برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۱۵۰ MeV.



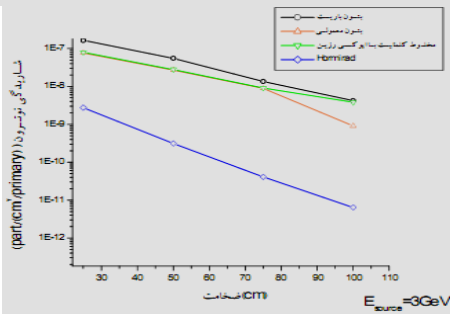
شکل (۳) نمودار شایستگی گاما برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۱۵۰ MeV.



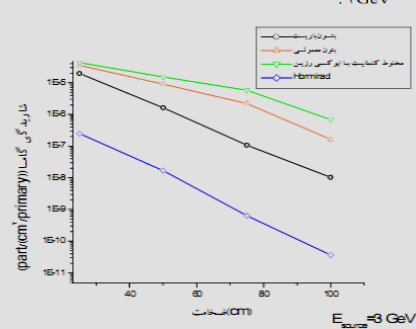
شکل (۶) نمودار فاکتور انتقال برای نوترون برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۳ GeV.



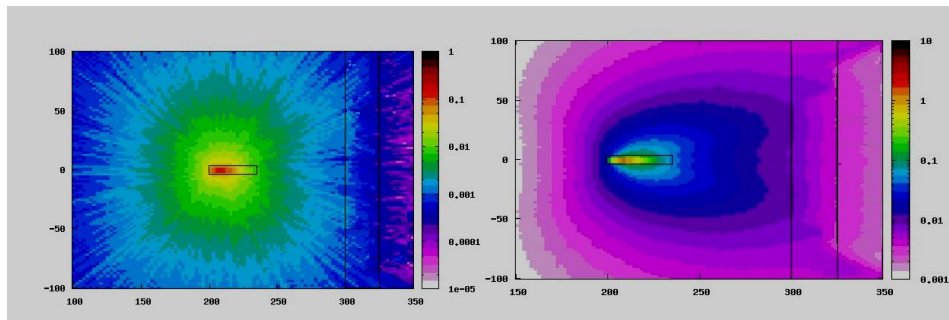
شکل (۵) نمودار فاکتور انتقال گاما برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۳ GeV.



شکل (۸) نمودار شایستگی نوترون برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۳ GeV.



شکل (۷) نمودار شایستگی گاما برای هر چهار ماده برای چشمه ای با انرژی ۳ GeV.



شکل (۹): (شکل راست) خروجی کارت USRBIN نمایشگر دُز معادل نوترون و (شکل چپ) خروجی کارت USRBIN نمایشگر دُز معادل گاما در ناحیه ای با ابعاد $(350 \text{ cm}) \times (200 \text{ cm}) \times (200 \text{ cm})$ شامل هدف و حفاظ بتونی با ضخامت ۲۵ cm برای چشمه ای با انرژی ۱۵۰ MeV.

بحث و نتیجه گیری :

باتوجه نمودارهای فاکتور انتقال و شاریدگی بدترین خاصیت تضعیف کنندگی در برابر پرتوهای گاما در هر دو انرژی چشمه مربوط به مخلوط کلمانیت با اپوکسی رزین می شود این ماده برای چشمه با انرژی 150 MeV خاصیت تضعیف کنندگی نوترونی بهتری نسبت به بتون معمولی و باریت از خود نشان داده اما وقتی انرژی چشمه افزایش یافته و به 3 GeV رسیده ، خاصیت تضعیف کنندگی آن از بتون معمولی کمتر شده است. عنصر بور که در انرژی های پائین باعث بهبود تضعیف کنندگی این ماده در برابر نوترون می شد در انرژی های خیلی بالا کارائی لازم را ندارد (سطح مقطع پائین جذب نوترون در انرژیهای بالا). مخلوط کلمانیت با اپوکسی رزین تنها به عنوان حفاظ نوترون و در انرژی پائین 150 MeV ماده مناسبی نسبت به بتون معمولی می تواند باشد. بتون باریت برای چشمه با انرژی های 150 MeV و 3 GeV در برابر پرتوهای گاما خاصیت تضعیف کنندگی بهتری نسبت به بتون معمولی و مخلوط کلمانیت و اپوکسی رزین همان طور که انتظار می رفت از خود نشان داده است اما بالعکس خاصیت تضعیف کنندگی این ماده برای نوترون در هر دو انرژی چشمه از همه مواد بدتر است . بتون باریت تنها به عنوان حفاظ گاما ماده مناسبی نسبت به بتون معمولی می تواند باشد . اما از میان این مواد بتون فوق سنگین Hormirad برای چشمه با انرژی های 150 MeV و 3 GeV در برابر پرتوهای گاما و نوترون خاصیت تضعیف کنندگی خیلی بهتری نسبت به بتون معمولی و سایر مواد مذکور همان طور که انتظار می رفت از خود نشان داده است . ماده ای به عنوان حفاظ در تأسیسات سینکروترونی استفاده می شود باید خاصیت تضعیف کنندگی بالائی در برابر پرتوهای گاما و نوترون داشته باشد . با توجه به نتایج شبیه سازی Hormirad جایگزین بسیار مناسبی برای بتون معمولی در بکارگیری در ساخت دیواره ها و ساختمان تأسیسات (خصوصاً در مکانهایی که با محدودیت ابعاد روبرو هستیم و ناگزیریم که از حفاظ با ضخامت کم استفاده کنیم) می تواند باشد.

مراجع :

1. Koichi Okuno, Neutron Shielding Material Based on Colemanite and Epoxy Resin , Radiation Protection Dosimetry , Vol. ۱۱۵, No. ۱-۴, pp. ۲۵۸-۲۶۱, (۲۰۰۵).
2. R.G. JAEGER, E.P. BLIZARD, A.B. CHILTON, M. GROTENHUIS, A. HÖNIG, TH. A. JAEGER, H.H. EISENLOHR, *Engineering Compendium on Radiation Shielding- Volume II: Shielding Materials*, Springer, Berlin/Heidelberg (۱۹۷۵).
3. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, *Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities*, NCRP Report No. ۱۴۴.
4. Eduardo Gallego, Alfredo Lorente, Héctor René Vega-Carrillo ,Testing of a New High Density Concrete as a Neutron Shielding Material, Nuclear Engineering Department, Technical University of Madrid (UPM), Spain, ۲۰۰۸ .
5. S.J. Stankovic, R.D. Ilic, K. Jankovic, D. Bojovic and B. Loncar , Gamma Radiation Absorption Characteristics of Concrete with Components of Different Type Materials, Selected papers presented at the Eleventh Annual Conference of the Materials Research Society of Serbia, YUCOMAT , ۲۰۰۹