مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱، شمارهٔ ۱، زمستان ۱۳۹۱

طراحی، آماده‌سازی و کنترل کیفی چشمهٔ استاندارد ^{60}Co تولیدی در راکتور تهران

حمید روان‌بخش[۱]، حسین زمانی زینلی[۲]*، علی اکبر میرزایی[۱] و ارژنگ شاهور[۲]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، مجتمع پیامبر اعظم، دانشگاه آزاد تهران مرکز، تهران، ایران

[۲] پژوهشکده کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج، ایران

* کرج، انتهای بلوار مؤذن، انتهای بلوار مرکز تحقیقات هسته‌ای، پژوهشکده کشاورزی، پزشکی و صنعتی، صندوق پستی: ۴۳۱۱۱- ۳۱۴۸۶

پست الکترونیکی: hzeinali@nrcam.org

چکیده

در این طرح تحقیقاتی، طراحی، آماده‌سازی، کنترل کیفی و تولید چشمهٔ استاندارد بسته و استوانه‌ای رادیوایزوتوپ ^{60}Co از طریق واکنش $^{59}Co\ (n,\gamma)$ طبق استانداردهای بین‌المللی مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از تولید چشمه‌های ^{60}Co، آزمون‌های کنترل کیفی شامل آزمون نشتی و آلودگی سطحی بر روی نمونه‌های تولیدی انجام گرفت، سپس فعالیت چشمه‌های تولیدی ^{60}Co به وسیلهٔ اتاقک یونش کروی با حجم بزرگ ۱ لیتری اندازه‌گیری شد. مطابق نتایج آزمون‌های انجام‌شده، نمونه‌های تولیدی فاقد نشتی و آلودگی سطحی بودند و فعالیت چشمه‌های ^{60}Co تولیدی در راکتور تحقیقاتی تهران که در ستون گرمایی با شار نوترون‌های گرمایی $۱/۱۸\times۱۰^{۱۲}\ cm^{-2}S^{-1}$ پرتودهی شده بودند، برابر ۵۸۰/۶ و ۶۲۳/۱ میکرو کوری به دست آمد. تحقیقات حاضر، نشان داد امکان ساخت چشمه‌های ^{60}Co با پرتوزایی‌های مختلف به عنوان چشمه‌های استاندارد در کشور موجود است.

کلیدواژگان: ^{60}Co، راکتور تحقیقاتی، تهران، تولید، کنترل کیفی.

۱. مقدمه

^{60}Co با نیمه‌عمر ۵/۲ سال و گسیل دو گاما با انرژی‌های ۱/۱۷ MeV و ۱/۳۳ MeV یکی از رادیوایزوتوپ‌های پرکاربرد در صنعت، پزشکی، تحقیقات علمی و کشاورزی است. از پرتوهای گاما گسیلی از آن برای درمان سرطان، استریل کردن داروها و تولیدات مصرفی، به عنوان چشمهٔ خارجی در رادیوتراپی و استریل کردن دستگاه‌ها و وسایل در پزشکی استفاده می‌شود [۱].

در صنعت، ^{60}Co به همراه ^{192}Ir از پرکاربردترین ایزوتوپ‌ها برای رادیوگرافی صنعتی است. یکی از آزمون‌های غیر مخرب بررسی اتصالات انجام شده در لوله‌ها، سازه‌هایی که از جنس استیل می‌باشد، دیگ‌های بخار، ساخت کشتی و هواپیما است [۲]. در تحقیقات شیمی و بیولوژی به عنوان یک ردیاب از ^{60}Co استفاده می‌شود [۱]. همچنین برای استریل کردن و از بین بردن عوامل بیماری‌زا و بالا بردن زمان نگهداری مواد غذایی و از بین بردن آفات در میوه‌ها و حبوبات، زودباروری و به تأخیر انداختن جوانه زدن زودرس در پیاز و سیب‌زمینی و بسیاری کاربردهای دیگر در کشاورزی از پرتو گامای ^{60}Co استفاده می‌گردد [۳ و ۴]. مناسب‌ترین روش تولید ^{60}Co، فعال‌سازی نوترونی ^{59}Co به وسیلهٔ نوترون‌های گرمایی در راکتورهای هسته‌ای است [۵ و ۶].

اصلی‌ترین کار انجام شده در راکتورهای تحقیقاتی تولید رادیوایزوتوپ‌های گوناگون جهت استفاده در پزشکی، کشاورزی و صنعت است. راکتور تحقیقاتی تهران دارای قدرت ۵ مگاوات است که از آذر ۱۳۴۶ برای اولین بار شروع به کار کرد. راکتور تهران از نوع استخری باز است که با دارا بودن هفت کانال پرتودهی نوترون شامل دو سیستم پنوماتیک،

مکان‌های پرتودهی در داخل قلب راکتور و ستون حرارتی، امکان انجام کارهای تحقیقاتی پایه در زمینهٔ فیزیک راکتور، فیزیک نوترون، بررسی اثر پرتوهای مختلف بر مواد و تولید رادیوایزوتوپ گوناگون از جمله ^{131}I، ^{32}F، ^{192}Ir، ^{137}Cs و... را فراهم می‌سازد. با توجه به اهمیت رادیوایزوتوپ ^{60}Co و از آنجا که چشمه‌های ^{60}Co به صورت استاندارد در داخل کشور تولید نشده است [۷] در این تحقیق، امکان تولید رادیوایزوتوپ ^{60}Co از طریق واکنش $^{59}Co\ (n,\gamma)\ ^{60}Co$ در راکتور تحقیقاتی تهران مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل تئوری

راکتورها و به‌ویژه راکتورهای تحقیقاتی، یکی از چشمه‌های مهم نوترون است که با ایجاد نوترون بسیار زیاد، امکان تولید ایزوتوپ‌های مختلف را می‌دهد. عوامل اثرگذار در نوع واکنش انجام شده و نرخ تولید ایزوتوپ در راکتور عبارت‌اند از:

الف) انرژی و شار نوترون‌ها

ب) سطح مقطع مؤثر برای واکنش مورد نظر

ج) مشخصات و کیفیت هستهٔ هدف

شار نوترنی عبارت است از نسبت چگالی نوترون‌ها به میانگین سرعت آن‌ها که واحد آن $cm^{-2}s^{-1}$ است که با توجه به سرعت نوترون‌ها، واکنش‌های متفاوتی بین نوترون‌ها و هستهٔ هدف صورت می‌گیرد [۵]. احتمال واکنشی را که نوترون با هستهٔ هدف انجام می‌دهد، می‌توان به طور کمّی بر اساس سطح مقطع بیان کرد. سطح مقطع عبارت است از سطحی فرضی به دور هسته که اگر نوترون‌ها در این سطح فرود آیند، واکنش مورد نظر انجام می‌گیرد [۵]. مشخصات و کیفیت هستهٔ هدف باید به گونه‌ای باشد که در هنگام تولید ایزوتوپ، ایجاد احتراق و انفجار نکند؛ خلوص ایزوتوپیک قابل قبول داشته باشد؛ دارای فرمی باشد که بیشترین شار نوترونی فرودی را جذب کند و دارای شکل شیمیایی باشد که برای کاربردهای متفاوت به راحتی از آن استفاده کرد [۵].

برای تولید ^{60}Co مطابق با منابع انرژی مطلوب، شار نوترونی در گسترهٔ انرژی حرارتی می‌باشد [۵ و ۶]. استفادهٔ نوترون‌های حرارتی بدین سبب مهم است که در هنگام تولید ^{60}Co، امکان تولید سایر ایزوتوپ ناخواسته که از واکنش نوترون با ^{59}Co ایجاد می‌شود و اغلب نیمه‌عمر بالایی دارند، به حداقل می‌رسد. جدول (۱) ایزوتوپ‌های ایجاد شده در هنگام فعال‌سازی ^{59}Co با انرژی‌های مختلف نوترون را نشان می‌دهد [۸].

جدول (۱): ایزوتوپ‌های ایجاد شده در هنگام فعال‌سازی کبالت-۵۹ با انرژی‌های مختلف نوترون [۸]

ایزوتوپ به دست آمده	نوع واکنش	انرژی نوترون [MeV]	نیمه‌عمر
^{59}Fe	n,p	۰/۸	۵/۴۴ d
^{56}Mn	n , α^+	حرارتی	۲/۵۸ h
^{54}Mn	n, $2n\alpha^+$	۱۷/۵	۳۱۲ d
^{57}Co	n ,3 n	۱۹/۴	۲۷۲ d
^{58}Co	n ,2 n	۱۰/۶	۷۰/۹ d
^{58}Co	n ,2 n	۱۰/۶	۹/۰۴h
^{60}Co	n , γ	حرارتی	۵/۲۷ y

۳. تولید رادیوایزوتوپ ^{60}Co

برای تولید ^{60}Co به روش فعال‌ساز نوترونی، پودر ^{59}Co با خلوص ۹۹ درصد با جرم‌های ۴ و ۵ گرم در کپسول‌هایی از جنس آلومینیم قرار می‌گیرد و سپس در کپسول‌ها بسته می‌شود [۶] و بعد از انجام آزمون نشتی، در ظرف آلومینیومی که مخصوص قرار دادن نمونه‌ها در راکتور است، جای داده می‌شود (شکل ۱).

شکل (۱): ظرف مخصوص راکتور و کپسول‌ها

سپس به مدت ۱۶۸ ساعت (برابر ۶۰۰ MWh) در راکتور تحقیقاتی تهران (با توان ۳/۵ MW) درون ستون نوترون‌های حرارتی تحت بمباران نوترون‌های حرارتی با شاری برابر $1/18\times10^{12}\ cm^{-2}s^{-1}$ قرار داده شد [۹]. بعد از پایان پرتودهی برای خروج نمونه‌ها از ظرف آلومینیومی مخصوص قراردهی نمونه در راکتور و انجام آزمون‌های کنترل کیفی به هاتسل انتقال داده شد.

لازم به ذکر است که برای از بین بردن ایزوتوپ‌های ناخواسته تولید شده در روند تولید کبالت-۶۰ مانند ^{56}Mn و همچنین از بین بردن پرتوزایی کپسول‌های آلومینیومی، نمونه‌های تولیدی به مدت ۹۰ روز در هاتسل قرار داده شد و سپس آزمون‌های کنترل کیفی بر روی آن‌ها انجام گرفت.

٤. آزمون‌های کنترل کیفی چشمه‌های تولیدی

برای بالا بردن ایمنی در هنگام کار و قبل از هر گونه استفاده و اندازه‌گیری به وسیلهٔ چشمه‌های تولیدی، این چشمه‌ها نیاز به کنترل کیفی دارند، و باید کپسول و یا ماده که دربرگیرندهٔ چشمهٔ پرتوزاست، به گونه‌ای باشد که در شرایط کاری مختلف، نشتی‌ناپذیری این چشمه‌ها را فراهم کند. آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های تولید شده عبارت‌اند از:

الف) آزمون غوطه‌ور برای نشتی

ب) آزمون سایش برای آلودگی سطحی

ج) به دست آوردن فعالیت چشمه‌های تولیدی [۱۰ و ۱۱].

٤ـ۱. آزمون غوطه‌ور

در این آزمون، چشمه باید در مایعی که به کپسول یا مادهٔ دربرگیرندهٔ مادهٔ پرتوزا آسیب نرساند و در طول آزمون کوچک‌ترین ردّ مواد پرتوزا را به خوبی نشان دهد، غوطه‌ور گردد؛ مایعی که این شرایط را به خوبی برآورده می‌کند، آب مقطر است. چشمه‌های تولیدی به مدت ٢٤ ساعت در دمای اتاق در آب مقطر قرار داده می‌شود، سپس چشمه را از آب مقطر خارج کرده و پرتوزایی آب مقطر اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی چشمه نشتی ندارد که پرتوزایی خالص آب که عبارت است از شمارش اندازه‌گیری شده برای آب منهای شمارش زمینه، کمتر از ۲۰۰ Bq باشد [۱۰ و ۱۱].

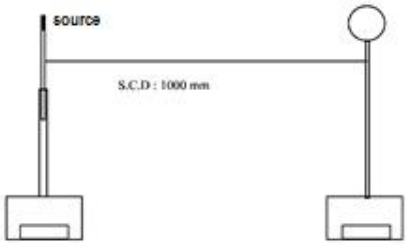
٤ـ۲. آزمون سایش

از آنجا که کپسول نیز در هنگام تابش نوترون، فعال شده است، باید کپسول بعد از تولید مورد آزمایش قرار گیرد. آزمون ایده‌آل برای این اندازه‌گیری، آزمون سایش خشک است که در این آزمایش، کل سطح خارجی چشمهٔ بسته با یک سواب خشک از جنس کاغذ صافی سایش داده می‌شود و سپس پرتوزایی خالص سواب اندازه‌گیری می‌گردد. در صورتی سطح خارجی آلودگی ندارد که پرتوزایی خالص سواب که عبارت‌اند از شمارش اندازه‌گیری شده برای سواب منهای شمارش زمینه، کمتر از $٠/٤\ bq/cm^2$ باشد [۱۰].

در آزمون‌های نشتی و آلودگی سطحی پرتوزایی طی ۱۰ ثانیه شمارش به وسیلهٔ آنالیزور چند کاناله در دو کانال پایین ۲۵ و کانال بالا ۲۵۵ در ولتاژ ۵۳۰ ولت اندازه‌گیری شده است.

٤ـ۳. به دست آوردن فعالیت چشمه‌های تولید

یکی دیگر از آزمون‌های کنترل کیفی، تعیین دقیق فعالیت است که بعد از انجام تست‌های نشتی، فعالیت دقیق اندازه‌گیری می‌شود. فعالیت دقیق چشمه‌های تولیدی در آزمایشگاه استاندارد دزیمتری پرتوهای پژوهشکده تحقیقات پزشکی، صنعتی و کشاورزی کرج با استفاده از اتاقک یونش کروی LS-01 که دارای حجم ۱۰۰۰ سانتی‌متر مکعب است، اندازه‌گیری شد [۱۲ و ۱۳].



شکل (۲): نمایی از اندازه‌گیری بار

در این روش، چندین مرتبه بار الکتریکی ایجاد شده توسط چشمهٔ ^{60}Co در اتاقک یونش توسط الکترومتر در بازهٔ زمانی یکسان در فاصلهٔ یک متری چشمه از مرکز اتاقک یونش اندازه‌گیری می‌شود [۱۲ و ۱۳]، سپس طبق رابطهٔ (۱) آهنگ دز را بر حسب گری بر واحد زمانی به دست می‌آید:

$$\dot{D} = N_K.(M_u/t) \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱) N_K فاکتور کالیبراسیون هوای آزاد اتاقک یونش برای فوتون با انرژی مورد نظر است و واحد آن میکروگری بر نانوکولن می‌باشد؛ M_u بار جمع‌آوری شده در زمان t و دمای K و فشار P توسط اتاقک یونش بر حسب کولن است و t زمان جمع‌آوری بار توسط اتاقک یونش است. از آنجا که فاکتور کالیبراسیون در دما و فشار مختلف، متفاوت

است، از این رو باید تصحیح دما و فشار را به دست آورد و در آهنگ دز به دست آمده اعمال کرد. این تصحیح برابر است با:

$$k_{TP} = \left(\frac{273.16+T}{293.16}\right).\left(\frac{1013.25}{P}\right) \quad (۲)$$

در رابطهٔ (۲) دما (T) بر حسب سانتی‌گراد و فشار (P) بر حسب میلی‌بار است. این ضریب تصحیح با ضرب شدن در آهنگ دز محاسبه شده اعمال می‌شود. برای به دست آوردن اکتیویته با تبدیل آهنگ دز به آهنگ پرتودهی و با استفاده از رابطهٔ (۳) اکتیویته دقیق چشمه به دست می‌آید:

$$\frac{dx}{dt} = \Gamma\frac{A}{d^2} \quad (۳)$$

در رابطهٔ (۳) Γ گامافاکتور نامیده می‌شود که رابطهٔ بین میزان پرتودهی و اکتیویته را مشخص می‌کند. A فعالیت چشمه بر حسب کوری و X پرتودهی بر حسب واحد پرتودهی است [۱۲ و ۱۳].

مطابق با استانداردهای بین‌المللی، حداکثر خطای پذیرفتنی فعالیت یک چشمهٔ پرتوزای استاندارد، ۵ درصد فعالیت اندازه‌گیری شده است. از این رو، بررسی خطاهای اندازه‌گیری فعالیت ضروری می‌باشد. این خطاها عبارت‌اند از خطای ابعاد چشمه (که ناشی از دقیق نبودن اندازه‌گیری ابعاد کپسول‌های آلومینیومی است)، خطای فاصله (که ناشی از دقیق نبودن اندازه‌گیری فاصلهٔ چشمه با نقطهٔ وسط اتاقک یونش است)، خطای جمع‌آوری بار و الکترومتر (که از خطا در جمع‌آوری بار توسط اتاقک یونش و اندازه‌گیری الکترومتر ناشی می‌شود)، اثر ضخامت به کار رفته در کپسول بر روی چشمه، بازتاب پرتوها در آزمایشگاه (که به ابعاد آزمایشگاه وابسته است)، خطای ناشی از چگالی هوا، غیر یکنواختی و پراکندگی پودر چشمه، خطای حاصل از واپاشی رادیوایزوتوپ در طول اندازه‌گیری نیمه‌عمر ایزوتوپ و افت پرتوزایی چشمه در مسیر رسیده به آشکارساز در هوا که باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری فعالیت دقیق چشمه‌های تولیدی می‌شود [۱۲ و ۱۳].

۵. نتایج

۵ـ۱. نتایج آزمون‌های آلوگی نشتی و سطحی

مقادیر پرتوزایی آب مقطر پس قرار دادن ۲ کپسول چشمه ^{60}Co به مدت ۲۴ ساعت در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین نتایج پرتوزایی سواب‌ها برای بررسی آلودگی سطحی کپسول چشمه‌های تولید در جدول (۳) ارائه شده است.

۵ـ۲. اندازه‌گیری فعالیت دقیق چشمه

بعد از انجام آزمایش‌های تست نشتی، اکتیویته‌های چشمه‌های تولیدی به وسیلهٔ اتاقک یونش کروی اندازه‌گیری شد. ابتدا بار جمع شده ناشی از پرتودهی نمونهٔ ^{60}Co در محل اتاقک یونش کروی در ۳ دقیقه اندازه‌گیری می‌شود که نتایج به دست آمده در جدول (٤) نمایش داده شده است. در این آزمایش، خطای بار جمع‌آوری شده دستگاه (نشتی اتاقک یونش) برابر ۰/۱۲ پیکو آمپر است. با ضرب مقدار بار جمع‌آوری شده در ضریب کالیبراسیون دستگاه که برابر ۲٤/۳۵ $\frac{\mu Gy}{nC}$ است، آهنگ دز به دست می‌آید [١٤]. تصحیح دما- فشار در برای هر نمونه در جدول (٤) نشان داده شده است. سپس با استفاده از رابطهٔ (٤) اکتیویته محاسبه می‌گردد؛ اکتیویته‌های به دست آمده در آزمایشگاه در جدول (٤) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج آزمون غوطه‌وری

کد نمونه	کانل ۱ (۲۵)	کانل ۲ (۲۵۵)	شمارش	شمارش پس از تصحیح شمارش زمینه
زمینه	۲۹٤	۰	۲۹٤	–
زمینه	۲٦٤	۰	۲٦٤	–
زمینه	۲٤۸	۰	۲٤۸	–
C	۲۹۸	۱	۲۹۷	۲۸
E	۳۱٦	۰	۳۱٦	٤۷

جدول (۳): نتایج آزمون آلودگی سطحی

شماره نمونه	نتیجه آزمون(برحسب bq/cm^2)
C	۰
E	۰/۲۸

جدول (٤): بار اندازه‌گیری شده توسط اتاقک یونش برای هر چشمه

نتایج کالیبراسیون در چشمه‌های تولیدی	نمونهٔ E	نمونهٔ C
جرم نمونه(g)	٤/٦۱	۵/۳۱
میانگین اندازه‌گیری بار (PC)	۱۱/۳۵	۱۲/۰۷
تصحیح دما- فشار	۱/۲۰۱	۱/۲۰۳
آهنگ دز (Gy/h)	٦/۵۸	۷/۰۷
اکتیویته (µCi)	۵۸۰/۵۹	٦۲۳/۱٤

جدول (۵): خطاهای اندازه‌گیری در زمان تعیین اکتیویته

خطاها (بر حسب در صد)	نمونهٔ C	نمونهٔ E
خطای الکترومتر	۰/۹۲	۰/۹۰
خطای اتلاف کپسول	۱/۵	۱/۵
خطای اندازه‌گیری	۰/۰۵	۰/۰۵
خطای فاصله	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
سایر خطاهای استاندارد (مطابق با استانداردهای ISO)	۲	۲
جمع خطاها	٤/٤٧١	٤/٤٧

٦. بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است، تمامی اکتیویته‌های به دست آمده از حد مورد نظر نشتی کمترند، و تمامی نمونه‌های تولیدی فاقد نشتی می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۳)، آلودگی سطحی کپسول صفر است. این نتیجه از قبل نیز قابل پیش‌بینی بود، زیرا عناصری که در تولید کپسول استفاده شده است، مانند آلومینیوم و آلیاژهای آن مانند سرب دارای سطح مقطع نوترونی بسیار کمی در مقابل ^{59}Co دارند، و از طرفی ایزوتوپ‌های تولید در زمان تولید ^{60}Co دارای نیمه‌عمر بسیار کمی هستند و مقدار این ایزوتوپ‌ها پس از چند نیمه‌عمر به صفر می‌رسد.

در جدول (٤) فعالیت‌های چشمه‌های تولیدی به صورت دقیق محاسبه شده و خطای اندازه‌گیری فعالیت برابر ٤/٤٧ درصد است. همان‌طور که گفته شد، اگر خطای اندازه‌گیری فعالیت کمتر از ۵ درصد باشد، چشمه استاندارد است.

رادیوایزوتوپ ^{60}Co یکی از پرکاربردترین ایزوتوپ‌ها در صنعت، تحقیقات، پزشکی و کشاورزی است که در حال حاضر، از سایر کشورها خریداری و استفاده می‌شود. در این تحقیق، امکان تولید چشمه‌های ^{60}Co در راکتور تهران بررسی شد. چشمه‌های تولید با توجه به هزینهٔ کم تولید، سهولت آماده‌سازی و امکان تولید انبوه چشمه‌های ^{60}Co قادر به تأمین بیشتر نیازهای داخل کشور و همچنین صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌باشد، لذا می‌توان برای تولید چشمه‌های استاندارد نقطه‌ای یا ویالی و... ^{60}Co از این روش و با توجه به امکانات کشور استفاده کرد.

از آنجا که چشمهٔ ^{60}Co با فعالیت بالا و با مقادیر متفاوت استفاده می‌شود و با توجه به وجود امکانات موجود در کشور، امکان تولید چشمه‌های ^{60}Co تا فعالیت ۵۰۰ Ci در مدت ۱۵۰ روز پرتودهی با شار $۱/۱۸\times۱۰۱۲\ cm^{-2}s^{-1}$ وجود دارد. این مقدار فعالیت، اکثر نیازهای داخلی به ^{60}Co را بر طرف می‌کند.

تشکر و قدردانی

لازم است از تمامی کارکنان آزمایشگاه دزیمتری و مونیتورینگ ثانویه پژوهشکدهٔ کشاورزی و پزشکی و صنعتی کرج به‌خصوص مهندس کریمی‌فر، دکتر اربابی و مهندس فیضی، کارکنان راکتور تحقیقاتی تهران، کارکنان شرکت پارس ایزوتوپ به‌ویژه دکتر داورپناه، مهندس سیاحی و مهندس بروجردی و مسئول هاتسل ^{60}Co مهندس سلیمانی برای کمک و همکاری بی‌دریغ در طول انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی شود.

مراجع

[1] B.P.Fairand, " Radiation sterilization for health care products X ray, gamma and electron beam," CRC Press, New York (2002).
[2] G.Foldiac, "Industrial application of radioisotopes," Akademiai Kiado, Budapest, Hungary (1986).
[3] R.A.Molins "Food irradiation: Principles and applications", John Wiley & Sons, New York (2001).
[4] R.F.Morrissey, C.M.Herring, "Radiation sterilization: past, present and future," Radiat. Phys. Chem. 63 217–221 (2002).
[5] S.Sahoo,S.Sahoo, " Production and Applications of Radioisotopes," Physics Education, (April − June 2006).
[6] International Atomic Energy Agency, "Manual for reactor produced radioisotopes," IAEATECDOC 1340 (2003).
[۷] فناوری هسته‌ای- تدوین و گردآوری پژوهشگران علوم و فنون هسته‌ای زیر نظر محمد قنادی مراغه، چاپ ۱۳۸۹ نوبت اول، جلد اول ۷۹ ـ ۹۶.
[8] E. Simeckova, P. Bem, "Themeasurement of neutron activation cross Section of ^{59}Co below 36 MeV" Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 2, pp. 1801_1804 (August 2011).
[9] N.E.Holden, K,A.Holden,"Re-examination of 2200 metrekecond cross section experiments for neutron capture and fission standards," *Pure & Appl. Chern,* Vol. 61, No. 10, pp. 1505-1 51 0, (1989).
[10] Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), "Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor," Rev. 2 (October 2002).
[11] Institute of Standards and Industrial Research of Iran, "ISIRI 11038" 1st.edition.
[12] International Atomic Energy Agency, "*Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy*," IAEATECDOC 1274 (march 2002).
[13] NBS measurement services, "calibration gamma- ray emitting brachytherapy sources" coden:XNBSAV. (1991).
[14] International atomic energy agency, "calibration certificate no.IRN/2012/7," (2012/05/03).