روش درمان با گیراندازی نوترون در بور

(Boron Neutron Capture Therapy)

www.ketab.ir

فائزه رحمانی

شماره ۵۲۵

سرشناسه: رحمانی، فائزه، ۱۳۵۹ -

عنوان و نام پدیدآور: روش درمان با گیراندازی نوترون در بور= oron neutron capture therapy/ فائزه رحمانی.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۴۰۱.

مشخصات ظاهری: ۱۸۳ ص.: مصور(بخشی رنگی)، جدول، نمودار.

شابک: 978-622-5234-09-3

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: کتابنامه: ص. ۱۴۸ - ۱۸۳.

موضوع: درمان به روش گیراندازی بور و نوترون /Boron-neutron capture therapy

موضوع: سرطان -- پرتودرمانی /Cancer -- Radiotherapy

رده‌بندی کنگره: RC۲۷۱

رده‌بندی دیویی: ۶۱۶/۹۹۴۰۶۴۲

شماره کتابشناسی ملی: ۹۱۰۰۱۷۱

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی press.kntu.ac.ir

عنوان: روش درمان با گیراندازی نوترون در بور

مؤلف: دکتر فائزه رحمانی

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۱

شمارگان: ۲۰۰ جلد

چاپ: نقش‌آفرین

صحافی: گرنامی

قیمت: ۱۱۰,۰۰۰ تومان

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی- شماره ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲

میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات

تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

پیش‌گفتار

شاید اولین مواجهه من با درمان مبتنی بر نوترون پر از سوال بود، کاربرد نوترون با اثرات سوء جانبی برای درمان؟ در آخر سال کارشناسی ارشد به این موضوع علاقه‌مند شدم و در دوره دکترا این موضوع را برای کار انتخاب کردم. این موضوع نیز مانند بسیاری از جریان‌های علمی ایجاد شده در زمینه کاربرد پرتوها، بر اساس نگاه دقیق و مساله‌محور **استاد عزیزم شهید دکتر مجید شهریاری** بود که با ظرافت علمی و هوش خود، موضوعات علمی را به دقت رصد می‌کرد. بر اساس آینده‌ای که برای موضوعات مختلف ترسیم می‌کرد، بی‌باک، راسخ، آرام و بی‌هیاهو کار می‌کرد و زمانی‌که تلاشش به بار می‌نشست، ثمره آن را بی هیچ چشم‌داشتی با همگان تقسیم می‌کرد تا انگیزه‌ای قوی برای جهش‌های جدی‌تر در جامعه علمی باشد.

پیش‌گفتار کتاب را به نام این بزرگ‌مرد مزین کردم، که این روزها بیش از پیش نیاز به حضور معلمان عالِمی چون او برای پویاکردن فضای دانشگاهی احساس می‌شود.

و اما این کتاب، با توجه به تجربه کاری بیش از ۱۵ سال در زمینه درمان با نوترون، لازم دانستم تا کتابی را شامل مبانی درمان و روش کار مبتنی بر فراز و فرودها در گذر زمان تالیف کنم و در نهایت به وضعیت فعلی و جایگاه آن در علم درمان هسته‌ای در دنیا و ایران بپردازم.

همان‌طور که در کتاب هم اشاره می‌شود، روش "درمان با گیراندازی نوترون در بور" (Boron Neutron Capture Therapy :BNCT) با قدمتی بیش از ۷ تا ۸ دهه، به عنوان یک روش درمانی امیدبخش برای درمان برخی از تومورها است که جایگزین درمان با سایر روش‌ها ندارند. شروع پژوهش در این حوزه در ایران به حدود ۱۵ سال می‌رسد که در مقایسه با روزهای نخست، جایگاه قابل توجهی دارد، هرچند که در زمینه‌هایی فاصله قابل توجهی با تحقیقات دنیا دارد.

همین فاصله و فضاهای خالی پژوهشی که هرگز به آن پرداخته نشده، و از طرفی توانمندی موجود در کشور برای فعالیت در این زمینه، انگیزه دیگری شد تا اطلاعات جامع در این زمینه در دنیا گردآوری شده و سپس در مقایسه با پژوهش‌هایی که در ایران انجام شده است، برای تدوین نقشه راهی برای ادامه مسیر مد نظر قرار گیرد. بر این اساس، در این کتاب علاوه بر معرفی مبانی این روش درمانی، ضرورت‌ها، تجهیزات پرتودهی و اندازه‌گیری، و نیز استانداردهای بین‌المللی این روش درمانی، به دسته‌بندی و جمع‌بندی هدفمند پژوهش‌ها حول موضوع BNCT نیز پرداخته می‌شود که همچنان در حال توسعه هستند. همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌های این کتاب، فعالیت‌هایی است که در ایران، به عنوان یکی از مراکز پژوهشی فعال در این زمینه انجام شده است و می‌تواند در جهت‌دهی پژوهش‌های بعدی و توسعه زیرساخت‌های پژوهشی مرتبط با آن مفید باشد.

از آنجا که اجرای BNCT دارای ماهیتی چندرشته‌ای است، لذا مستلزم همسوکردن رشته‌های تخصصی متفاوتی است تا یک فرایند درمانی کامل و بدون عیب پیاده‌سازی شود.

علاوه بر پژوهش‌های گسترده در دنیا بر روی این روش، توسعه امکانات و ابزار در حوزه درمان و نیز انواع اندازه‌گیری‌ها به منظور پایش و کنترل کیفیت درمان، در ایران نیز طی دهه گذشته پژوهش‌های زیادی بر روی این روش انجام شده است. چنانچه این موضوع به عنوان یکی از پرطرفدارترین زمینه‌های پژوهشی در دانشگاه‌ها در رشته‌های مرتبط با علم هسته‌ای تبدیل شده است.

از آنجا که هیچ ساخته دست بشری نمی‌تواند بی‌عیب باشد، این متن علمی نیز استثناء نیست، بنابراین از خوانندگان و متخصصان فن خواهشمندم نقاط ضعف و یا اشکالات آن را گوشزد کنند که با دیده منت پذیرای نکات مطرح شده خواهم بود.

www.ketab.ir

در پایان، بر خود لازم می‌دانم یاد دو استاد فقید، دکتر مجید شهریاری و دکتر مصطفی سهراب‌پور را گرامی بدارم، که هرآنچه امروز در حوزه کاربرد پرتوها در ایران با نگاه رو به رشد و توسعه در جریان است، مدیون نگاه روزآمد علمی، همت و امید و اعتقاد راسخ ایشان به راهی بود که در آن گام برمی‌داشتند.

فائزه رحمانی
اسفند ۱۴۰۰

www.ketab.ir

فهرست

فصل ۱: روش درمان با گیراندازی نوترون در بور ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ مبانی روش درمان با گیراندازی نوترون در بور ۱

۱-۳ فیزیک اندرکنش نوترون با بور-۱۰ ۲

۱-۴ داروی بور ۳

۱-۵ باریکه نوترون درمانی ۵

۱-۶ انواع سرطان‌های قابل درمان با BNCT و نتیجه مطالعات بالینی ۶

۱-۷ چشم‌انداز درمان با BNCT ۱۱

۱-۸ باریکه نوترون درمانی ۱۱

۱-۸-۱ مشخصات باریکه درمانی نوترون ۱۳

فصل ۲: ملاحظات طراحی باریکه نوترونی براساس چشمه‌های نوترونی قابل کاربرد در BNCT ۱۷

۲-۱ مقدمه ۱۷

۲-۲ انواع چشمه‌های نوترونی ۱۷

۲-۲-۱ راکتور هسته‌ای ۱۸

۲-۲-۲ شتاب‌دهنده ذرات ۲۰

۲-۲-۳ مولدهای نوترون ۲۶

۲-۲-۴ شتاب‌دهنده الکترون (تولید فتونوترون) ۲۶

۲-۲-۵ استفاده از راکتورهای زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده‌ها ۳۰

۲-۲-۶ چشمه رادیوایزوتوپی ۳۰

۲-۲-۷ کالیفورنیوم۲۵۲ ۳۱

۲-۳ ملاحظات طراحی باریکه نوترونی ۳۲

۲-۳-۱ شکل‌دهی طیف نوترونی ۳۲

www.ketab.ir

فصل ۳: دزیمتری و اندازه‌گیری پارامترهای باریکه نوترونی درمان ۳۹
۳-۱ مقدمه ۳۹
۳-۲ مولفه‌های پرتو در BNCT ۳۹
۳- ۲-۱ اندازه‌گیری باریکه در-هوا ۴۰
۳- ۲-۲ اثر زیستی نسبی (RBE) ۴۲
۳- ۲-۳ ضریب شایستگی (FOM) در فانتوم ۴۳
۳-۳ اندازه‌گیری در فانتوم و دزیمتری در BNCT ۴۵
۳- ۳-۱ اتاقک یونش دوگانه ۴۶
۳- ۳-۲ دزیمتر گرمالیانی ۴۷
۳- ۳-۳ ژل دزیمترها ۴۸
۳- ۳-۴ دزیمتر فریک (سولفات آهن) ۵۰
۳- ۳-۵ آشکارسازهای آلانین ۵۰
۳- ۳-۶ آشکارسازهای حبابی فوق‌گرم ۵۰
۳- ۳-۷ شمارنده شکافت ۵۲
۳- ۳-۸ سایر آشکارسازها ۵۲
۳- ۳-۹ میکرودزیمتری ۵۲
۳-۴ روش‌های اندازه‌گیری طیف نوترونی ۵۴
۳- ۴-۱ آشکارساز فعالسازی ۵۵
۳- ۴-۲ طیف‌سنجی بر اساس کندسازی نوترون ۵۵
۳-۵ طراحی درمان ۵۹
۳- ۵-۱ محاسبه دز ۶۰
۳- ۵-۲ اندازه‌گیری توزیع دز فیزیکی ۶۰
۳-۶ تعیین غلظت و تصویربرداری از بور ۶۱
۳- ۶-۱ تصویربرداری مولکولی بور ۶۲
۳- ۶-۲ تعیین بور با استفاده از آشکارسازی گامای آنی ۶۳
۳- ۶-۳ تعیین غلظت بور با روش آنالیز گامای آنی ۶۳
۳- ۶-۴ تعیین توزیع و غلظت بور مبتنی بر اندازه‌گیری تک گامای گسیل‌شده (تصویربرداری اسپکت) ۶۴
۳- ۶-۵ روش پرتونگاری خودکار نوترون (طیف‌نگاری آلفا) ۶۸

www.ketab.ir

۳-۷ فانتوم‌های مورداستفاده در BNCT ۷۰

فصل ۴: مراکز فعال دنیا در زمینه BNCT ۷۵
۴-۱ مقدمه ۷۵
۴-۲ ایالات متحده آمریکا ۷۶
۴-۳ ژاپن ۸۴
۴-۴ ایتالیا ۹۳
۴-۵ فنلاند ۱۰۲
۴-۶ هلند ۱۰۴
۴-۷ آرژانتین ۱۰۶
۴-۸ انگلستان ۱۰۹
۴-۹ بلغارستان ۱۱۰
۴-۱۰ چین ۱۱۲
۴-۱۱ تایوان ۱۱۴
۴-۱۲ ترکیه ۱۱۶
۴-۱۳ آلمان ۱۱۷
۴-۱۴ اسلوونی ۱۱۷
۴-۱۵ جمهوری چک ۱۱۸
۴-۱۶ روسیه ۱۲۳
4-۱۷ سوئد ۱۲۴
۴-۱۸ قزاقستان ۱۲۶
۴-۱۹ سایر کشورها ۱۲۶

فصل ۵: مراکز فعال ایران در زمینه BNCT ۱۲۸
۵-۱ مقدمه ۱۲۸
۵-۲ راکتورهای تحقیقاتی ۱۲۸
۵- ۲-۱ راکتور تحقیقاتی تهران (TRR) ۱۲۸

www.ketab.ir

۵- ۲-۲ راکتور مینیاتوری اصفهان (MNSR) ۱۳۴
۵-۳ شتاب‌دهنده ۱۳۶
۵- ۳-۱ شتاب‌دهنده پروتون در کرج ۱۳۶
۵- ۳-۲ شتاب‌دهنده الکترون ۱۳۷
۵-۴ تجهیزات اندازه‌گیری‌های نوترونی ۱۴۰
۵- ۴-۱ طیف‌نگاری باریکه درمانی نوترون ۱۴۰
۵- ۴-۲ سامانه تصویربرداری TENIS ۱۴۲
۵-۵ بررسی چشم انداز پیش روی BNCT در ایران ۱۴۴
مراجع ۱۴۸

www.ketab.ir

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: طرح‌وارهای از جذب نوترون حرارتی در بور-۱۰ و تولید ذرات ثانویه [۴]..... ۳
شکل ۱-۲: نمونه‌ای از موقعیت تومور GBM در سر..... ۷
شکل ۱-۳: نمونه‌ای از ملانومای پوستی..... ۸
شکل ۱-۴: نمونه‌ای از تومور در محل گردن..... ۸
شکل ۱-۵: باریکه نوترون حرارتی و فوق‌حرارتی در عمق بافت [۱]..... ۱۲
شکل ۲-۱: قلب راکتور تحقیقاتی تهران شامل قلب راکتور به همراه بیم‌تیوب‌ها و ستون حرارتی و اتاق درمان [۱۲۵]..... ۱۹
شکل ۲-۲: طیف نوترون خروجی از انتهای بیم‌تیوب‌های راکتور تحقیقاتی تهران [۱۲۵]..... ۲۰
شکل ۲-۳: سطح‌مقطع اندرکنش پروتون با لیتیوم [۱۳۴]..... ۲۱
شکل ۲-۴: طرح‌واره‌ای از درمان با شتاب‌دهنده پروتون به عنوان چشمه نوترونی [۱۳۶]..... ۲۲
شکل ۲-۵: بهره نوترونی ایجاد شده در هدف‌های ضخیم لیتیومی و بریلیومی به صورت تابعی از انرژی پروتون برخوردی [۱۴۴]..... ۲۴
شکل ۲-۶: هدف مولد نوترون لیتیومی ۱: لایه لیتیومی ۲: ورودی آب خنک‌کننده ۳: خروجی آب..... ۲۴
شکل ۲-۷: طیف نوترون تولیدی به ازای انرژی‌های متفاوت پروتون برخوردی مبتنی بر اندرکنش تلاشی در تانتالیوم [۹۵]..... ۲۵
شکل ۲-۸: سطح‌مقطع تولید فتونوترون (الف) تنگستن (ب) بریلیوم [۱۶۱]..... ۲۷
شکل ۲-۹: هدف ترکیبی فتونوترون ۱: هدف فوتونی ۲ و ۳: هدف فتونوترونی [۱۵۸]..... ۲۸
شکل ۲-۱۰: نمونه‌ای از تولید فتونوترون در شتاب‌دهنده (تولید فتونوترون در سرب) [۱۵۶]..... ۲۹
شکل ۲-۱۱: نمونه‌ای از تولید فتونوترون در شتاب‌دهنده (تولید فوتون تابش برمزی در تنگستن و تولید فتونوترون در بریلیوم و دوتریوم) [۱۶۷]..... ۲۹
شکل ۲-۱۲: طیف نوترون کالیفورنیوم۲۵۲..... ۳۱
شکل ۲-۱۳: طیف فوتون کالیفورنیوم۲۵۲..... ۳۱
شکل ۲-۱۴: طرح‌واره کلی یک مجموعه BNCT در راکتور..... ۳۳
شکل ۳-۱: پروفایل آهنگ دز عمقی در امتداد باریکه به صورت تابعی از عمق فانتوم سر با پرتودهی با باریکه نوترون فوق‌حرارتی [۱۲۱]..... ۴۴
شکل ۳-۲: نمونه‌ای از ارتباط قابل سنجه دز فیزیکی در BNCT با استاندارد دزیمتری بین‌المللی. استفاده از روش‌های مختلف دزیمتری و ارتباط آنها با هم..... ۴۵
شکل ۳-۳: نمایی از اتاقک یونش دوگانه..... ۴۷
شکل ۳-۴: (الف) نمونه‌ای از چندین قرص TLD به همراه (ب) سیستم خوانش TLD و (ج) طرح‌واره‌ای از سیستم..... ۴۸
شکل ۳-۵: نمونهای از مراحل تهیه ژل دزیمتر [۱]، (ب) توزیع دز در ژل دزیمتر [۲۱۶، ۲۱۷]..... ۴۹
شکل ۳-۶: دزیمتر حالت جامد آلانین..... ۵۰
شکل ۳-۷: (الف) طرح‌واره آشکارساز حبابی SDD به همراه سیستم خوانش [۲۲۸] (ب) ایجاد حباب در اثر پرتوگیری در SDD..... ۵۱

www.ketab.ir

شکل ۳-۸: نمایی از TEPC دو قلو با نمایش محل ورود و خروج گاز. دیواره کاتد دارای دو قسمت است، بخشی حاوی بور ۱۰ و بخشی بدون بور [۲۳۴]..... ۵۳
شکل ۳-۹: (الف) ساختار آرایه دیود پایه SOI (ب) سطح‌مقطع دیود با ابعاد تقریبی [۲۵۰]..... ۵۴
شکل ۳-۱۰: مجموعه‌ای از کره‌های بانر [۲۷۲]..... ۵۶
شکل ۳-۱۱: طیف نوترونی ثبت شده توسط کره‌های بانر [۲۷۳]..... ۵۷
شکل ۳-۱۲: طیف‌سنج تک‌کروی چند آشکارساز (TLD) (الف) نمونه ساخته شده (ب) طرح‌واره [۲۷۴]..... ۵۸
شکل ۳-۱۳: سیستم (الف) اندازه‌گیری و اصلاح زمینه (ب) طیف‌سنج نوترونی [۲۷۱]..... ۵۸
شکل ۳-۱۴: سیستم PGNAA طراحی‌شده در انتهای یک بیم‌تیوب راکتور ۱- فیلتر بیسموت ۲- فیلتر Al_2O_3 ۳- همسوساز آهن ۴- همسوساز پلی‌اتیلنی ۵- حفاظ سربی ۶- آشکارساز HPGe ۷- نمونه بور [۳۲۸] ۶۴
شکل ۳-۱۵: (الف) طرح‌واره سیستم اسپکت [۳۳۵ (ب) تجهیزات درمانی BNCT به همراه سیستم اسپکت متداول [۳۳۶]..... ۶۶
شکل ۳-۱۶: طرح‌واره‌ای از ماسک مورا- رتبه ۱۳- موزاییکی ۲ در ۲ [۳۴۱]..... ۶۸
شکل ۳-۱۷: (الف) تصویر آشکارساز CR39 حاوی بور ۱۰ سونش شده. نقاط مشکی با قطری حدود ۱ میکرومتر نشان‌دهنده رد یون‌های لیتیوم و آلفا هستند (ب) تلفیق شکل سلول‌ها با رد ذرات [۳۴۹]..... ۶۹
شکل ۳-۱۸: فانتوم سر انسان بر مبنای کانتورهای تهیه شده از مقطع‌نگاری رایانه‌ای از فانتوم سر استاندارد با قابلیت قرار گیری آشکارساز در نقاط مختلف سر [۳۶۷]..... ۷۱
شکل ۳-۱۹: فانتوم آکریلیک استاندارد با قابلیت جاگذاری آشکارساز در مناطق مختلف [۳۶۸]..... ۷۱
شکل ۳-۲۰: فانتوم فایبرگلس آنتروپومورفیک پرشده از آب با دیواره‌های شیشه‌ای حاوی اتاقک‌های یونش [۱-۶۱]..... ۷۲
شکل ۳-۲۱: فانتوم سر اسنایدر تعریف شده به عنوان ورودی کد MCNP (الف) تحلیلی (ب) ووکسل‌بندی شده [۳۷۰]..... ۷۳
شکل ۳-۲۲: فانتوم سر زوبال تعریف‌شده به عنوان ورودی کد MCNP [۳۷۱]..... ۷۳
شکل ۳-۲۳: فانتوم تمام بدن (الف) میرد (ب) شبه میرد (یانچ)..... ۷۴
شکل ۴-۱: نمای افقی از تجهیزات پرتودهی نوترون فوق‌حرارتی BMRR [۳۸۹]..... ۷۸
شکل ۴-۲: نمای تجهیزات BNCT در راکتور تریگا در WSU [۳۹۲]..... ۷۹
شکل ۴-۳: راکتور MIT مبتنی بر FCB [۳۹۵]..... ۸۰
شکل ۴-۴: راکتور تحقیقاتی دانشگاه ایالتی اوهایو [۳۹۸]..... ۸۲
شکل ۴-۵: چشمه ABNS در OSU..... ۸۳
شکل ۴-۶: نمایی از JRR-4 [۴۰۳]..... ۸۴
شکل ۴-۷: تجهیزات باریکه درمانی در راکتور JRR-4 [۴۰۵]..... ۸۵
شکل ۴-۸: نمایی از راکتور موساشی [۴۰۶]..... ۸۶
شکل ۴-۹: تامین شار نوترون فوق‌حرارتی در ستون حرارتی با خروج گرافیت [۴۰۶]..... ۸۶
شکل ۴-۱۰: نمایی از تجهیزات پیشرفته پرتودهی در راکتور KUR [۴۰۸]..... ۸۷
شکل ۴-۱۱: نمایی از چشمه نوترون فوق‌حرارتی مبتنی بر شتاب‌دهنده (C-BENS) [۴۱۵]..... ۸۸
شکل ۴-۱۲: نمای سیستم BNCT مبتنی بر شتاب‌دهنده (شرکت Sumitomo Heavy Industry) [۴۱۸]..... ۸۹
شکل ۴-۱۳: تلسکوپ گاما در KUR-HWNIF [۴۲۱]..... ۹۰
شکل ۴-۱۴: تجهیزات iBNCT با شتاب‌دهنده پروتون ۸ مگاالکترون‌ولت [۴۲۵]..... ۹۱
شکل ۴-۱۵: طرح‌واره‌ای از ۴ درمان همزمان با شتاب‌دهنده [۱۴۹]..... ۹۱
شکل ۴-۱۶: نمای افقی از قلب راکتور ADSR به عنوان کارخانه نوترون [۴۲۸]..... ۹۳

www.ketab.ir

شکل ۴-۱۷: ستون حرارتی راکتور TAPIRO (الف) نمای جانبی (ب) نمای از بالا [۴۳۰]..... ۹۴
شکل ۴-۱۸: نمایی از تجهیزات HYTHOR [۴۳۱]..... ۹۵
شکل ۴-۱۹: نمایی از شکل‌دهنده طیف برای تامین نوترون فوق‌حرارتی [۴۳۴]..... ۹۶
شکل ۴-۲۰: نمایی از شکل‌دهنده طیف بهینه شده [۴۳۵]..... ۹۷
شکل ۴-۲۱: تجهیزات BNCT برای درمان کبد خارج از بدن با نوترون حرارتی [۹۰]..... ۹۸
شکل ۴-۲۲: نمایی از تجهیزات شتاب‌دهنده در LNL شامل ALPI و TANDEM..... ۹۹
شکل ۴-۲۳: چشمه نوترون حرارتی مبتنی بر شتاب‌دهنده برای درمان ملانوما در LNL [۴۴۲]..... ۹۹
شکل ۴-۲۴: (الف) طرح اول مبتنی بر بریلیوم (ب) طرح دوم مبتنی بر هدف ترکیبی [۱۶۷]..... ۱۰۱
شکل ۴-۲۵: طرح PhoNeS با شتاب‌دهنده الکترون ۱۸ MeV [۱۵۷]..... ۱۰۱
شکل ۴-۲۶: نمای (الف) جانبی (ب) بالای راکتور تریگا در فنلاند [۴۴۷]..... ۱۰۳
شکل ۴-۲۷: نمای جانبی از شکل‌دهنده طیف نوترون برای تامین باریکه نوترون فوق‌حرارتی [۴۴۷]..... ۱۰۳
شکل ۴-۲۸: نمای بیم تیوب HB11 در HFR پتن [۴۵۰]..... ۱۰۴
شکل ۴-۲۹: پیکربندی فیلتر شامل شاتر اضطراری آب [۱۲۳]..... ۱۰۵
شکل ۴-۳۰: نمای کلی تجهیزات درمانی در راکتور پتن [۴۴۸]..... ۱۰۵
شکل ۴-۳۱: قرارگیری نگهدارنده کبد در ساختار گرافیتی [۴۵۲]..... ۱۰۶
شکل ۴-۳۲: پارامترهای بهینه‌سازی شده شکل‌دهنده طیف نوترونی برای BNCT در راکتور RA-6 [۴۵۳]..... ۱۰۷
شکل ۴-۳۳: تجهیزات نصب شده BNCT در اتاق درمان راکتور RA-6 آرژانتین [۴۵۴]..... ۱۰۷
شکل ۴-۳۴: اتاق درمان راکتور RA-6 [۴۵۳]..... ۱۰۸
شکل ۴-۳۵: چشمه نوترونی BAGINS..... ۱۰۹
شکل ۴-۳۶: طرح‌واره مجموعه تولید نوترون درمانی شامل هدف نوترونی، کندکننده و شکل‌دهنده [۴۵۸]..... ۱۱۰
شکل ۴-۳۷: (الف) نمای قلب IRT-200 (ب) نمای قلب به همراه کانال‌ها و کانال BNCT ۱: کانال افقی ۲: مجتمع سوخت ۳: کانال عمودی ۴: بازتابنده سربی (۱۰ سانتی‌متر) ۵: کندکننده/فیلتر (آلومینیوم ۱۸ سانتی‌متر، PTFE ۱۳ سانتی‌متر، کادمیوم ۰/۰۵ سانتی‌متر) ۶: حفاظ سربی کلیا (۶ سانتی‌متر) ۷: همسوساز سربی (۱۵ سانتی‌متر) [۴۶۲]..... ۱۱۱
شکل ۴-۳۸: طرح‌واره‌ای از IHNI [۴۶۸]..... ۱۱۳
شکل ۴-۳۹: کلیات طرح BNCT مبتنی بر شتاب‌دهنده با چشمه بریلیومی [۴۷۱]..... ۱۱۴
شکل ۴-۴۰: نمایی از تجهیزات پرتودهی در راکتور THOR [۳۸۲]..... ۱۱۵
شکل ۴-۴۱: نمایی از راکتور THOR شامل کانال‌ها و تجهیزات تامین باریکه [۴۷۵]..... ۱۱۵
شکل ۴-۴۲: نمایی از تجهیزات تامین باریکه نوترون فوق‌حرارتی از قلب راکتور تا اتاق درمان [۴۷۶]..... ۱۱۶
شکل ۴-۴۳: نمایی از (الف) قلب راکتور و (ب) کانال تعبیه شده برای تامین نوترون فوق‌حرارتی در راکتور تریگای JSI [۴۸۰]..... ۱۱۸
شکل ۴-۴۴: نمایی از (الف) راکتور LVR-15 و (ب) کانال پرتودهی BNCT..... ۱۱۹
شکل ۴-۴۵: ترکیب شکل‌دهنده طیف راکتور LVR-15 سال ۱۹۹۹..... ۱۲۰
شکل ۴-۴۶: مجموعه راکتور LVR-15..... ۱۲۰
شکل ۴-۴۷: تغییر چیدمان سوخت‌گذاری در قلب راکتور LVR-15 [۴۹۳]..... ۱۲۲
شکل ۴-۴۸: نمایی از قلب راکتور و بیم تیوب HEC-1 برای BNCT [۴۹۴]..... ۱۲۳
شکل ۴-۴۹: آلومینیوم ۶ سانتی‌متر، بیسموت ۵ سانتی‌متر، همسوساز سرب طول ۵ و ضخامت ۳ سانتی‌متر..... ۱۲۴
شکل ۴-۵۰: سطح‌مقطع افقی راکتور R2-0 برای تامین باریکه Studsvik برای BNCT..... ۱۲۵
شکل ۴-۵۱: طرح‌واره‌ای از اصلاح ستون حرارتی برای شار نوترون فوق‌حرارتی [۵۰۳]..... ۱۲۶

www.ketab.ir

شکل ۵-۱: قلب راکتور تحقیقاتی تهران به عنوان نمونه‌ای از یک قلب راکتور به همراه بیم‌تیوب‌ها و ستون حرارتی و اتاق درمان [۱۲۵]..... ۱۲۹
شکل ۵-۲: اندازه‌گیری و شبیه‌سازی طیف نوترون در امتداد بیم‌تیوب‌ها [۱۲۵]..... ۱۳۰
شکل ۵-۳: مراحل خارج کردن بلوک‌های گرافیتی از ستون حرارتی [۱۲۵]..... ۱۳۱
شکل ۵-۴: ۱- قلب راکتور، ۲- بلوک سربی، ۳- جعبه‌های آلومینیومی بلوک‌های گرافیتی، ۴- کندکننده آلومینیوم، ۵- همسوساز (خالی حاوی هوا)، ۶- بازتابنده سربی، ۷- حفاظ گاما از بیسموت، ۸- فیلتر نوترون حرارتی کادمیومی، ۹- فانتوم سر [۱۲۵]..... ۱۳۲
شکل ۵-۵: طیف نوترون پس از عبور از شکل‌دهنده طیف [۱۲۵]..... ۱۳۲
شکل ۵-۶: ۱- فیلتر بیسموت، ۲- فیلتر اکسید آلومینیوم، ۳- همسوساز آهنی، ۴- همسوساز پلی‌اتیلنی، ۵- حفاظ سرب، ۶- آشکارساز ، ۷- نمونه [۳۲۸]..... ۱۳۳
شکل ۵-۷: (الف) مشخصات کلی قلب راکتور MNSR (ب) نمای جانبی (ج) نمای بالا از تجهیزات پرتودهی نوترونی (چپ نوترون حرارتی و راست نوترون فوق‌حرارتی)..... ۱۳۵
شکل ۵-۸: ۱- کندکننده اول آهن ۲- کندکننده دوم MgF_2 ۳- کندکننده سوم CF_2 ۴- مسیر عبور نوترون ۵- حفاظ گاما و بازتابنده سربی ۶- همسوساز نیکل ۷- حفاظ نوترون پلی‌اتیلن بوردار [۵۱۷]..... ۱۳۷
شکل ۵-۹: ۱- چشمه فتونوترون ۲- بازتابنده سربی ۳- کندکننده اول MgF_2 ۴- کندکننده دوم TiF_3 ۵- حفاظ گامای بیسموت ۶- همسوساز نیکل [۵۱۸]..... ۱۳۸
شکل ۵-۱۰: نمایی از شکل‌دهنده طیف متغیر مبتنی بر شتاب‌دهنده. الف) طرح مفهومی شکل‌دهنده طیف متغیر به همراه تخت بیمار ب) مراحل مختلف تغییر سر شکل‌دهنده طیف متغیر [۵۲۶]..... ۱۳۹
شکل ۵-۱۱: طرح‌های مختلف از مجموعه شکل‌دهنده طیف [۵۲۷]..... ۱۴۰
شکل ۵-۱۲: طرح‌واره آشکارساز چندلایه شامل ۱- سوسوزن لیتیوم یدید LiI(Eu) ۲- لایه‌های پلی‌اتیلنی HDPE (قطر ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر) ۳- مخزن حاوی آب بوردار [۲۷۱]..... ۱۴۱
شکل ۵-۱۳: طیف بازیابی‌شده نوترون در خروجی پنجره درمان [۲۷۱]..... ۱۴۱
شکل ۵-۱۴: (الف) نمایی از سامانه TENIS (ب) نمای دیگر از سامانه [۵۳۷]..... ۱۴۳
شکل ۵-۱۵: ثبت گامای ۲/۲۲ مگاالکترون‌ولت در سامانه TENIS [۵۳۶]..... ۱۴۴
شکل ۵-۱۶: ثبت شار نوترون حرارتی در فانتوم [۵۳۶]..... ۱۴۴

www.ketab.ir

فهرست جداول

جدول ۱-۱: مشخصات باریکه مطلوب درمانی نوترون به توصیه آژانس بین‌المللی انرژی اتمی..... ۱۶
جدول ۲-۱: انواع اندرکنش‌های تولید نوترون با شتاب‌دهنده ذرات [۱۴۱، ۱۴۲]..... ۲۳
جدول ۵-۱: فازهای اجرایی برای اخذ مجوز اجرای یک روش درمانی به عنوان روش پزشکی..... ۱۴۵

www.ketab.ir