



بررسی درصد دز عمقی باریکه‌های فوتونی و وابستگی آن به آهنگ دز در دزیمتر ژلی - پلی مری نورمکسیک PAGAT با استفاده از تکنیک ام.آر.آی

بختیار آزادبخت*^۱، کمال حداد^۲، محمدحسن زحمت‌کش^۳

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد، صندوق پستی: ۵۱۸، بروجرد- ایران

۲- دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۸۴۴۷۱-۷۱۹۴۶، شیراز- ایران

۳- انستیتو پرتو پزشکی نوین تهران، صندوق پستی: ۱۴۶۶۵-۵۹۹، تهران- ایران

چکیده: برای تعیین درصد دز عمقی باریکه‌های فوتونی با انرژی‌های مختلف در دزیمتر ژلی - پلی مری PAGAT و وابستگی آن به آهنگ دز با استفاده از تکنیک ام.آر.آی از مواد و ترکیبات شیمیایی با درصد‌های وزنی زیر استفاده شده است: ۴/۵ درصد بیس N'-N متیلن- بیس-آکریل آمید ۴/۵ درصد آکریل آمید، ۵ درصد ژلاتین، ۵ میلی‌مول تتراکسیس، ۰/۰۱ میلی‌مول هیدروکینون و ۸۶ درصد آب دو بار تقطیر شده. برای تابش دهی ویال‌ها از فوتون‌های ^{۶۰}Co دستگاه درمانی سری Theratron-۷۸۰C انستیتو پرتو پزشکی نوین تهران و شتاب‌دهنده‌ی خطی الکتنا بیمارستان نیروی هوایی تهران استفاده شده است. تصویربرداری با استفاده از یک سیستم ام.آر.آی ساخت شرکت زیمنس به قدرت ۱/۵T انجام شده است. تمام ژل‌های پلی مری یک روز پس از ساخت، پرتو دهی شده و یک روز بعد از پرتو دهی با استفاده از سیستم ام.آر.آی تصویربرداری شده‌اند. در تعیین درصد دز عمقی در ژل پلی مری نورمکسیک PAGAT، برای انرژی‌های بالاتر، فوتون‌ها تمایل به نفوذ بدون پراکندگی در ماده داشته و پراکندگی فوتون‌ها نیز رو به جلو می‌باشد. میزان دز عمقی باریکه‌های فوتونی ^{۶۰}Co در عمق ۰/۵cm برابر ۱۰۰ درصد بوده و برای عمق ۲۱cm این مقدار به ۴۸ درصد کاهش یافته است و برای فوتون‌های ۴، ۶ و ۱۸MV شتاب‌دهنده میزان دز عمقی بیشینه برای عمق ۲۱cm، به ترتیب، به مقادیر ۵۷/۳، ۵۹/۷۳ و ۵۹/۷۳ درصد کاهش یافته است و این نشان می‌دهد که برای انرژی‌های بالاتر میزان تجمع دز در فواصل عمقی بیش تر خواهد بود. بررسی حساسیت ژل PAGAT به آهنگ دز نشان داد که با تغییر آهنگ دز از ۸۰ به ۴۸۰cGy/min تغییر در مقادیر آهنگ واهلش عرضی، R₂، مشاهده نشده است. به عبارت دیگر این نشان می‌دهد که ژل پلی مری PAGAT به آهنگ دز وابسته نبوده و در نتیجه می‌توان برای بالا بردن سرعت پرتو دهی و کاهش زمان پرتو دهی از آهنگ‌های دز بالاتر استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: دزیمتر ژلی - پلی مری، ژل پلی مری نورمکسیک PAGAT، درصد دز عمقی، آهنگ دز

Investigation of Percentage Depth Dose (PDD) and Dose Rate Dependence of PAGAT Polymer Gel Dosimeter for Photon Beams Using MRI Technique

B. Azadbakht*¹, K. Hadad², M.H. Zahmatkesh³

1- Faculty of Engineering, Borujerd Islamic Azad University, P.O.Box: 518, Borujerd - Iran

2- Faculty of Engineering, Shiraz University, P.O.Box: 71946-84471, Shiraz - Iran

3- Novin Medical Radiation Institute, P.O.Box: 14665-599, Tehran - Iran

Abstract: In this work, the investigation of the normoxic PAGAT polymer-gel dosimeter percentage depth dose (PDD) and its dose rate dependence has been made. Using MRI, the formulation to give the maximum change in the transverse relaxation rate R₂ was determined to be 4.5% N,N'-methylene-bis-acrylamide (bis), 4.5% acrylamid (AA), 5% gelatine, 5mM tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium chloride (THPC), 0.01 mM hydroquinone (HQ) and 86% HPLC(Water). Irradiation of vials was performed using photon beams of Co-60 therapy unit and an Electa linear accelerator. Gel dosimeters were imaged in a Siemens Symphony 1.5 Tesla clinical MRI scanner using a head coil. Post-manufacture irradiation and post imaging times were both selected to be 1 day. For determining the percentage depth dose of the PAGAT gel it was found that at the depth of 21cm, the percentage depth dose for 1.25 MeV γ -ray photons of ⁶⁰Co and for 4,6 and 18 MV x-ray photons of Electa linear accelerator, are 48%, 52%, 57.3% and 59.73%, respectively. Thus, in the case of the higher energy photon beams, a higher dose can be delivered to deep-seated tumors. The dose rate dependence of PDD was studied for 6 MV x-ray photons with the use of dose rates of 80, 160, 240, 320, 400 and 480cGy/min. No trend in polymer-gel dosimeter 1/T₂ dependence was found on the mean dose rate and energy for the photon beams.

Keywords: Polymer-Gel Dosimeter, PAGAT Normoxic Polymer Gel, PDD, Dose Rate

*email: azad_bakhtiar@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۲/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۸/۱۱/۱۲



فضایی دز جذبی در دزیمتر را حفظ می‌کند [۲]. در دزیمترهای فریک، غلظت یون‌های فریک و در ژل‌های پلی‌مری غلظت تراکم پلی‌مرها است که به دز جذب شده بستگی دارد.

با وجود این که بسیاری از محققین در توسعه‌ی ژل‌های فریک بیش‌تر تلاش کرده‌اند ولی امروزه تمایل به ژل‌های پلی‌مری بیش از ژل‌های فریک است و این به خاطر پخش یون‌های فریک در ژل فریک است که کارآیی و کاربری آن را محدود می‌سازد. پخش یون‌های فریک موجب مخدوش شدن و سپس از بین رفتن داده‌های فضایی دز می‌گردد و این، موجب محدودیت زمانی عملی از زمان شروع تابش تا پایان اندازه‌گیری دز در میدان‌های تابشی چندگانه و یا محیط‌هایی که چشمه دارای خروجی پایین است، می‌گردد. اثرات پخش را می‌توان به طور نسبی و با استفاده از روش‌های واپیچش^(۱) ولی با عدم قطعیت بالا تصحیح کرد [۲]. مشکلات مربوط به پلی‌مریزاسیون و ضرورت شرایطی مانند کم‌اکسیژنی^(۲) در ژل‌های پلی‌مری^(۳) PAG باعث شد که این ژل‌ها توسعه یافته و با به کارگیری و استفاده از ترکیباتی مثل آنتی‌اکسیدان‌ها یک ژل پلی‌مری نورمکسیک مثل PAGAT^(۴) ساخته شود. این کار با اضافه کردن تتراکیس^(۵) (THPC) به عنوان یک آنتی‌اکسیدان به ژل پلی‌مری PAG در شرایط محیطی دما و فشار معمولی انجام شد [۴، ۵، ۶، ۷].

در مطالعات مربوط به ژل PAGAT نقش‌های مختلف مواد شیمیایی تشکیل‌دهنده مورد بررسی قرار گرفته و غلظت‌های مختلف مواد، حساسیت و خطی بودن دزیمتر بعد از پرتوگیری بررسی شده است [۴]. ژل PAGAT برخلاف سایر ژل‌های پلی‌مری، نیاز به محیط بدون اکسیژن و شرایط کم‌اکسیژنی ندارد. مواد تشکیل‌دهنده‌ی دزیمترهای ژلی - پلی‌مری عبارت‌اند از آب (با بیش‌ترین مقدار و حدود ۸۰-۹۰٪)، مونومرها و عامل ژل‌کننده (ژلاتین، آگارز و ...) که برای تثبیت تراکم پلی‌مری ایجاد شده و به منظور حفظ توزیع فضایی دز جذبی استفاده می‌شود. برای ژل‌های نورمکسیک که می‌توان آن‌ها را در شرایط معمولی اکسیژن ساخت یک ماده‌ی ضداکسایش نیز اضافه می‌شود (معمولاً با غلظت از مرتبه‌ی میکرومول) [۲ تا ۸]. وابستگی چندانی به آهنگ دز در استفاده از آن‌ها برای دزیمتری با ژل‌های پلی‌مری مشاهده نشده است اگر چه پاسخ دز به دمایی که در آن دزیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد بستگی

دزیمترهای ژلی - پلی‌مری، دسته‌ی جدیدی از دزیمترها هستند که در انواع مختلف پرتودرمانی‌های جدید قابل استفاده‌اند [۱]. دزیمترهای ژلی تنها دزیمترهای سه‌بعدی واقعی هستند. دزیمتر به طور هم‌زمان هم فانتوم هست و هم می‌تواند توزیع دز را در هندسه‌ی کامل سه‌بعدی اندازه‌گیری کند [۲ تا ۵]. دزیمترهای ژلی دزیمترهای جمع‌کننده‌ی دز با قابلیت حفظ توزیع فضایی دز در درون خود هستند و انعطاف‌پذیری شکل، از آن‌ها دزیمتر منحصر به فردی ساخته است که برای بررسی توزیع دزهای پیچیده، چنان که در شرایط کلینیکی مشاهده می‌شود، بالقوه بسیار مناسب‌اند. نتایج به دست آمده نیاز به ضرایب تصحیح ندارند. این ژل‌ها را می‌توان معادل بافت نرم در نظر گرفت.

خاصیت سه‌بعدی دزیمترهای ژلی - پلی‌مری مهم‌ترین مزیت آن‌ها برای بازبینی روش‌های درمانی به کمک باریکه‌ی فوتونی است. از نظر تئوری به کمک دزیمترهای ژلی می‌توان توزیع دز را به صورت سه‌بعدی در هر نقطه حتی در فواصل کم‌تر از یک میلی‌متر از چشمه به دست آورد [۶]. از دیگر مزایای دزیمترهای ژلی نسبت به سایر دزیمترها این است که اجازه می‌دهند بازبینی جامعی از تمام پرتودرمانی‌های متعارف مانند تصویربرداری یا تعریف اندام داشته باشیم [۳]. توزیع سه‌بعدی دز ثبت شده در ماتریس شیمیایی دزیمتر ژلی به روش‌های تصویربرداری اندازه‌گیری می‌شود. در این دزیمتر در آغاز محلول مونومرها در ماتریس دزیمتر معلق می‌باشد. این مونومرها بعد از تابش دیدن با توجه به مقدار تابش پلی‌مریزه می‌گردند. سپس تصویر دوطبقه‌ی سه‌بعدی این مونومرها به روش‌های رایج تصویربرداری تهیه می‌گردد و بعد از درجه‌بندی، توزیع دز تابش محاسبه می‌شود. بنابراین، دزیمترهای ژلی - پلی‌مری نامزد بسیار خوبی برای بازبینی دزهای سه‌بعدی می‌باشند.

عواملی مانند دقت، حساسیت، زمان مورد نیاز برای دزیمتری، قابلیت سه‌بعدی بودن و قیمت باعث شده‌اند که این روش دزیمتری نسبت به روش‌هایی مانند TLD، اتاقلک‌های یونش و فیلم دزیمتری به حالت آرمانی نزدیک‌تر باشد [۱ تا ۷]. در حال حاضر دو نوع دزیمتر ژلی قابل شناخت هستند. ژل‌های فریک که براساس دزیمتری فیزیکی کار می‌کنند و ژل‌های پلی‌مری. هر دو سیستم شامل یک ماتریس دارای هیدروژل هستند که توزیع



۲-۲ فانتوم‌ها

در این تحقیق از دو نوع فانتوم یکی برای بررسی حساسیت ژل PAGAT به آهنگ دز و دیگری برای تعیین درصد دز عمقی استفاده شده است. فانتوم به کار رفته برای بررسی حساسیت دزیمتر ژلی - پلی مری PAGAT به آهنگ دز، ویال‌هایی از جنس پرسپکس به شعاع ۰٫۵cm، ارتفاع ۱۵cm و حجم ۱۵cm^۳ بودند. و برای تعیین درصد دز عمقی از فانتوم‌های استوانه‌ای به شعاع ۱cm، ارتفاع ۲۵cm و حجم ۱۰۰cm^۳ استفاده شده است. پس از شستن فانتوم‌ها با آب مقطر و خشک کردن آن‌ها، ژل آماده شده به آرامی در آن‌ها ریخته شد تا این که کاملاً پر شدند. پس از ریختن ژل درب ورودی آن‌ها توسط چسب نواری کاملاً بسته شده و در یخچال در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شدند.

۳-۲ روش‌های پرتودهی

۳-۲-۱ پرتودهی با استفاده از سیستم پرتودهی ^{۶۰}Co

در پرتودهی با استفاده از سیستم پرتودهی ^{۶۰}Co آنستیتو پرتو پزشکی نوین تهران محدوددهی دز استفاده شده از ۵۰ تا ۵۰۰cGy بود. برای پرتودهی، از میدان ۲۰cm×۲۰cm با عمق ۵cm و فاصله‌ی چشمه از سطح ۱۰۰cm استفاده شد. برای بررسی حساسیت ژل PAGAT به آهنگ دز، فانتوم‌ها در یک تانک آب به ابعاد ۲۰cm×۲۵cm×۲۰cm جای‌گذاری، و برای تعیین درصد دز عمقی برحسب عمق، فانتوم‌ها در یک تانک آب به ابعاد ۱۰cm×۱۰cm×۳۰cm به صورت ایستاده بر روی سطح تخت درمان مقابل چشمه قرار داده شدند.

۳-۲-۲ تابش‌دهی به کمک شتاب‌دهنده‌ی خطی

برای بررسی پاسخ دزیمتر ژلی - پلی مری نورمکسیک PAGAT در مواردی نظیر تعیین درصد دز عمقی، تغییر آهنگ و اهلش عرضی R_۲ با آهنگ دز و مقایسه‌ی نتایج با مورد Co-۶۰، پرتودهی فانتوم‌ها توسط پرتوهای ایکس ۴، ۶ و ۱۸MV شتاب‌دهنده‌ی خطی الکتا^(۷) بیمارستان نیروی هوایی تهران انجام پذیرفت. هنگام پرتودهی توسط پرتوهای ایکس شتاب‌دهنده همانند پرتوهای گامای سیستم پرتودهی ^{۶۰}Co، تمام فانتوم‌های مربوط به آزمایش بررسی حساسیت ژل PAGAT به آهنگ دز،

دارد [۶]. در این تحقیق درصد دز عمقی^(۶) با انرژی‌های مختلف و تغییر آهنگ و اهلش عرضی R_۲ با آهنگ دز در ژل پلی مری نورمکسیک PAGAT بررسی شده است.

۲- بخش تجربی

۱-۲ مواد و روش‌ها

۱-۱-۲ ساخت ژل PAGAT

برای ساختن ژل PAGAT از مواد و ترکیبات شیمیایی با درصد‌های وزنی زیر استفاده شده است: ۴٫۵ درصد N، N'-متیلن-بیس-آکریل آمید، ۴٫۵ درصد آکریل آمید، ۵ میلی‌مول تتراکس، ۰٫۰۱ میلی‌مول هیدروکینون و ۸۶ درصد آب دو بار تقطیر شده [۷]. ابتدا ژلاتین در آب دو بار تقطیر شده خیسانده شده و توسط دستگاه هم‌زن مغناطیسی هم‌زده شد، تا این که دمای آن به ۴۹°C رسید. پس از شفاف شدن محلول ژلاتین، ابتدا N، N'-متیلن-بیس-آکریل آمید اضافه گردید. در پودر سفیدرنگ N، N'-متیلن-بیس-آکریل آمید یک قطعه‌ی به هم چسبیده وجود داشت که در حین توزین مشاهده نشده بود و حل شدنش زمان زیادی طول کشید. پس از انحلال آن، پودر آکریل آمید به محیط اضافه شده و تا انحلال کامل هم‌زده شد. در نهایت با اضافه کردن هیدروکینون و تتراکس ژل PAGAT آماده شد. جدول ۱ مقایر و درصد‌های وزنی ترکیبات شیمیایی به کار رفته برای تهیه‌ی ۱۰۰ml ژل PAGAT را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر و درصد‌های وزنی ترکیبات شیمیایی به کار رفته برای

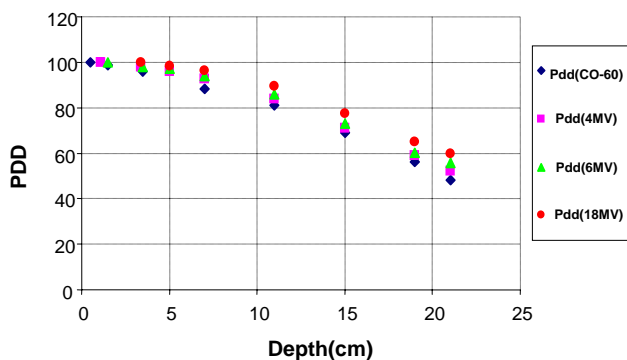
تهیه‌ی ۱۰۰ml ژل PAGAT.

Component	Quantity	
Gelatine (300Bloom)	5%	5gr
N,N'-methylen-bis-acrylamide (bis)	4.5%	4.5gr
Acrylamide (AA)	4.5%	4.5gr
Tetrakis-phosphonium chloride (THPC)	5mM	0.088cc
Hydroquinone (HQ)	0.01mM	0.11cc
HPLC (Water)	86%	86ml



جدول ۲- پروتکل تصویربرداری استفاده شده با سیستم ام.آر.آی کلینیک نور.

PARAMETERS	
Field of view (FOV) {mm}	256
Marrix size (MS)	512×512
Slice Thickness (d) {mm}	4
Repetition Time (TR) {ms}	3000
Echo Time (TE) {ms}	20
Number of Slices	1, 2, 3, 4
Number of Echoes	32
Total Measurement Time {min}	25-30
Resolution {mm}	0.5
Band With {Hz/Pixel}	130



شکل ۱- درصد دز عمقی فوتون‌های با انرژی‌های مختلف در ژل پلی‌مری نورمکسیک PAGAT.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود برای آن که به صورت عملی بتوان از دز عمقی استفاده نمود بهتر است آن را به صورت درصد بیان کرد. باید توجه داشت که درصد دز عمقی به خروجی دستگاه بستگی ندارد. خروجی یک دستگاه پرتو ایکس ممکن است با تعویض لوله تغییر کند، هم‌چنان که شتاب‌دهنده‌های خطی معمولاً خروجی‌های متفاوتی دارند و فعالیت چشمه‌های پرتو گاما نیز به علت واپاشی، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. هیچ کدام از این تغییرات نمی‌توانند بر میزان درصد دز عمقی تأثیر بگذارند. درصد دز عمقی بنا به تعریف برابر است با

$$PDD = \frac{D_d}{D_{dm}} \times 100 = \frac{R_d}{R_{dm}} \times 100$$

که در آن، dm عمق مرجع است یعنی عمقی که در آن دز بیشینه است، که در آب و محیط‌های معادل آن برای پرتوهای گامای ^{60}Co و پرتوهای ایکس ۴، ۶ و ^{18}MV به ترتیب، برابر ۰،۵، ۱،۱، ۱،۵ و $^{3,4}\text{cm}$ می‌باشد.

عوامل مؤثر در تعیین درصد دز عمقی عبارت‌اند از: عمق، نوع پرتو، میدان تابش، فاصله‌ی چشمه از سطح و انرژی پرتو. در این

در یک تانک آب به ابعاد $20\text{cm} \times 25\text{cm} \times 20\text{cm}$ جای گذاری شدند و برای پرتودهی، از میدان $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ با عمق 5cm و $SSD=100\text{cm}$ استفاده شد. برای تعیین درصد دز عمقی بر حسب عمق، فانتوم‌ها به صورت عمودی در یک تانک آب به ابعاد $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 30\text{cm}$ جای گذاری شدند که در این حالت نیز برای پرتودهی از میدان $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ با آهنگ 400cGy/min و $SSD=100\text{cm}$ استفاده شد.

۴-۲ تصویربرداری

بعد از پرتودهی، تمام دزیمترهای ژلی- پلی مری در داخل یک تانک آب به ابعاد $20\text{cm} \times 25\text{cm} \times 20\text{cm}$ قرار داده شده و برای هم‌دما شدن با اتاق به داخل اتاق ام.آر.آی انتقال داده شدند. سیستم تصویربرداری استفاده شده یک دستگاه ام.آر.آی با قدرت $1,5T$ و ساخت کشور آلمان بود. با توجه به اساس کار که بر رابطه‌ی بین دز و $R2$ استوار بوده از پروتکل مندرج در جدول ۲ استفاده شده است.

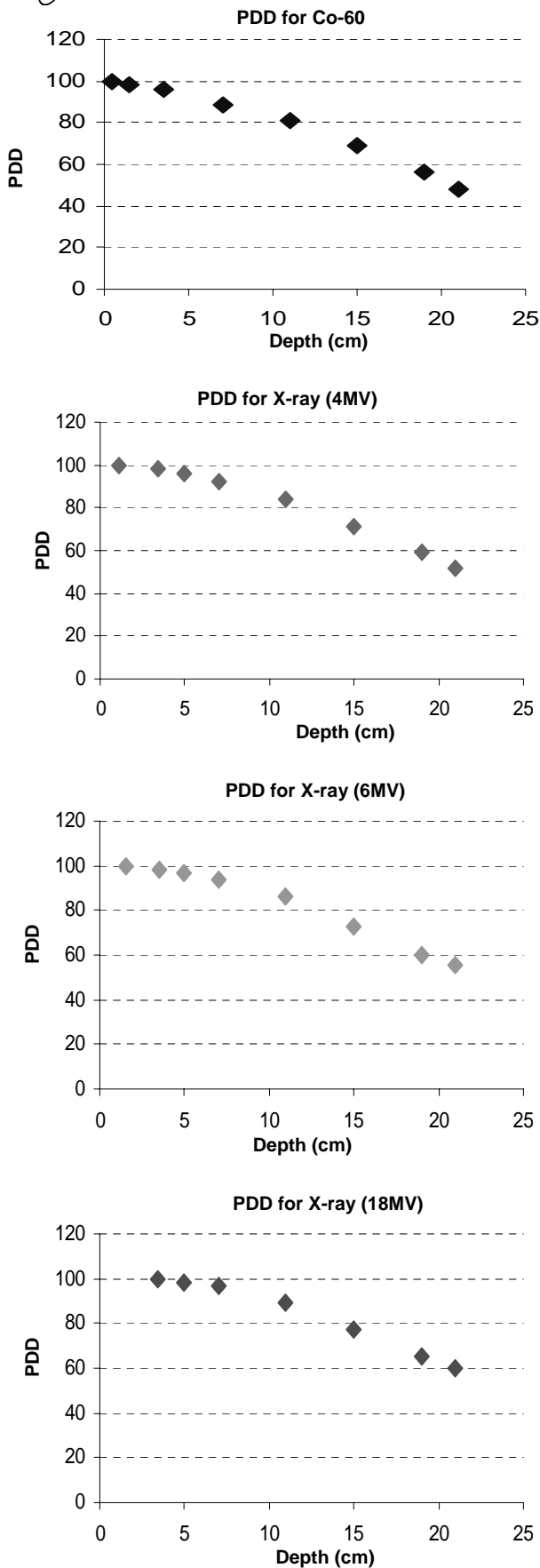
۵-۲ پردازش و تحلیل داده‌ها

پس از تصویربرداری، تصاویر به یک کامپیوتر شخصی انتقال داده شده و توسط نرم‌افزار MATLAB در نقاط مختلف با کشیدن پیکسل‌های کوچک مقادیر آهنگ و اهلش عرضی $R2$ آن نقاط مشخص شد. سعی بر آن بود پیکسل‌ها از نقاطی انتخاب شوند که دارای انحراف معیارهای کم‌تری بودند. در نهایت از آهنگ‌های و اهلش عرضی $R2$ به دست آمده از این پیکسل‌ها میانگین‌گیری و به عنوان آهنگ و اهلش عرضی $R2$ نهایی آن دز گزارش شدند.

۳- نتایج

۱-۳ تعیین درصد دز عمقی در ژل پلی‌مری نورمکسیک PAGAT در انرژی‌های مختلف

برای تعیین درصد دز عمقی در ژل پلی‌مری نورمکسیک PAGAT، ۴ نمونه فانتوم با پرتوهای گامای ^{60}Co و پرتوهای ایکس ۴، ۶ و ^{18}MV تا دز ۲۵ گری پرتودهی شدند. برابر ۱۰۰٪ قرار دادن مقدار $R2$ بیشینه‌ی خوانده شده در نقطه‌ی تجمع، مقادیر خوانده شده برای سایر نقاط به‌نجار شدند. شکل ۱ نمودار درصد دز عمقی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- درصد دز عمقی در ژل PAGAT برای پرتوهای گامای ^{60}Co و پرتوهای ایکس ۴، ۶ و ۱۸MV.

تحقیق و همان سان که از شکل ۱ مشخص است برای تعیین درصد دز عمقی تحت شرایط یکسان فاصله‌ی چشمه از سطح، نوع پرتو و اندازه‌ی میدان پرتودهی و انرژی پرتو مورد بررسی قرار گرفته است. دز عمقی ابتدا به سرعت افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک بیشینه به صورت تقریباً نمایی رو به کاهش می‌گذارد. برای انرژی‌های بالاتر، فوتون‌ها تمایل به نفوذ بدون پراکندگی در ماده داشته و پراکندگی فوتون‌ها رو به جلو می‌باشد. بنابراین با افزایش انرژی و تحت شرایطی که در بالا گفته شد میزان دز عمقی برای پرتوهای گامای ^{60}Co در عمق ۰٫۵cm برابر ۱۰۰ درصد بوده و برای عمق ۲۱cm این مقدار به ۴۸ درصد کاهش یافته است و برای فوتون‌های ایکس ۴، ۶ و ۱۸MV دز عمقی بیشینه برای عمق ۲۱cm، به ترتیب، به ۵۲، ۵۷٫۳ و ۵۹٫۷۳ درصد کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که برای تومورهای عمقی در صورتی که بخواهیم از دز بالاتری در تابش‌دهی استفاده کنیم، باید به انرژی‌های بالاتر روی بیاوریم. بنابراین در ژل پلی‌مری نورمکسیک PAGAT که معادل بافت نرم می‌باشد برای عمق ۳٫۴cm دز عمقی بیشینه‌ی برابر با ۱۰۰ درصد مربوط به پرتوهای ایکس ۱۸MV می‌باشد. این مقدار برای پرتو گامای ^{60}Co برابر ۹۶ درصد بود. برای عمق ۲۱cm در مورد پرتوهای ایکس ۱۸MV مقدار دز عمقی برابر ۵۹٫۷۳ درصد می‌باشد که این مقدار برای پرتوهای گامای ^{60}Co برابر ۴۸ درصد بود. این نشان می‌دهد که برای انرژی‌های بالاتر میزان تجمع دز در فواصل عمقی بیش‌تر خواهد بود. شکل ۲، درصد دز عمقی در ژل پلی‌مری نورمکسیک PAGAT را برای پرتوهای گامای ^{60}Co و پرتوهای ایکس ۴، ۶ و ۱۸MV به طور جداگانه نشان می‌دهد.

۳-۲ بررسی حساسیت ژل PAGAT به آهنگ دز

در این مرحله ۶ فانتوم استوانه‌ای به شعاع‌های ۰٫۵cm، ارتفاع ۱۲cm و حجم ۱۵cm^3 ، پر شده با ژل PAGAT ساخته شد و یک روز بعد توسط پرتوهای ایکس ۶MV و تا دز ۲۰ گری با آهنگ دزهای ۸۰، ۱۶۰، ۲۴۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۴۸۰cGy/min پرتودهی و یک روز بعد تصویربرداری شدند. مقادیر R_{21} یا T_{21}/T_{21} زمان واهلش عرضی ناشی از غیرهم‌فاز شدن اسپین‌ها برای آهنگ دزهای مختلف به دست آمد. شکل ۳ تغییرات آهنگ واهلش عرضی R_{21} با آهنگ دز برای ژل PAGAT را نشان می‌دهد.



۴- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار دز عمقی در مورد پرتوهای گامای ^{60}Co در عمق ۰/۵cm برابر ۱۰۰ درصد بوده و در عمق ۲۱cm این مقدار به ۴۸ درصد کاهش می‌یابد. برای پرتوهای ایکس ۴، ۶ و ۱۸MV حداکثر مقدار دز عمقی برای عمق ۲۱cm، به ترتیب، به ۵۲، ۵۷/۳ و ۵۹/۷۳ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده، به این نتیجه رسیدیم که برای فواصل عمقی در صورتی که بخواهیم از دز بالاتری در تابش دهی استفاده شود، باید از انرژی‌های بالاتر استفاده کنیم و به طور کلی می‌توان گفت میزان تجمع دز برای انرژی‌های بالاتر در فواصل عمقی بیش تر است. نتایج به دست آمده برای درصد دز عمقی در دزیتر PAGAT با نتایج نوووتنی و همکارانش برای درصد دز عمقی در ژل BANG-۲ هم‌خوانی دارد [۹]. هم‌چنین نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج پاپاس و همکارانش قابل مقایسه است [۱۰].

در بررسی حساسیت ژل PAGAT نسبت به آهنگ دز، مقدار R_2 برای تمام آهنگ دزها ثابت بود و تغییری مشاهده نشد (مقدار حساسیت از مرتبه $4 \times 10^{-7} \text{ Gy}^{-1}$ بود که کاملاً قابل چشم‌پوشی است). با توجه به این که دزیتر ژلی- پلی مری PAGAT به آهنگ دز حساس نیست، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ژل PAGAT برای بالا بردن سرعت پرتودهی و کاهش زمان پرتودهی در کارهای کلینیکی می‌توان از آهنگ‌های بالاتر دز استفاده نمود. این کار با نتایج به دست آمده توسط نوووتنی و همکارانش بر روی ژل BANG-۲ و ماریانسکی و همکارانش بر روی ژل BANG هم‌خوانی دارد [۹، ۱۰ و ۱۱].

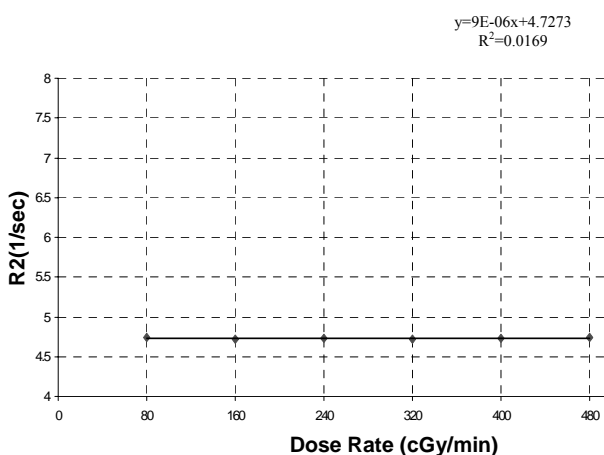
پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Deconvolution
- ۲- Hypoxic
- ۳- PAG: Polyacryl Amid Gelatine
- ۴- PAGAT: Polyacryl Amid Gelatine Agarose and Tetrakis
- ۵- THPC: Tetrallydroxymethyl Phosphonium Chloride (tetrekis)
- ۶- PDD: Percentage Depth Dose
- ۷- Elekta

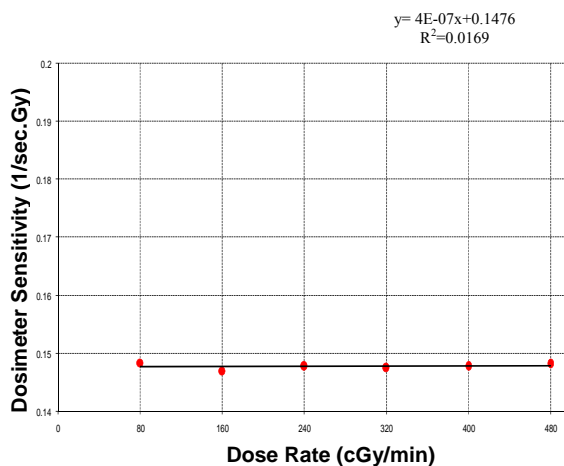
همان‌طور که از شکل ۳ پیدا است مقدار آهنگ واهلش عرضی R_2 برای تمام آهنگ دزها ثابت بوده و تغییری در آن مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ژل PAGAT برای بالا بردن سرعت پرتودهی و کاهش زمان پرتودهی در کارهای کلینیکی می‌توان از آهنگ‌های دز بالاتر استفاده نمود. شیب ورودی به خروجی دزیتر را حساسیت می‌نامند. حساسیت در این دزیتر از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است

$$\text{Dosimeter Sensitivity} = \frac{R_2 - R_2(0)}{D}$$

که در آن آهنگ واهلش عرضی اندازه‌گیری شده برای دز D و $R_2(0)$ آهنگ واهلش عرضی زمینه یا آهنگ واهلش عرضی R_2 برای دز صفر می‌باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که این دزیتر به آهنگ دز حساس نیست (در واقع میزان حساسیت آن $4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \text{ Gy}^{-1}$ است که قابل چشم‌پوشی است).



شکل ۳- تغییرات آهنگ واهلش عرضی R_2 با آهنگ دز برای ژل پلی مری نورمکسیک PAGAT.



شکل ۴- بررسی وابستگی حساسیت ژل PAGAT به آهنگ دز.

**References:**

1. M. Oldham, S. Kumar, J. Wong, D.A. Jaeffray, "Optical-CT gel-dosimetry I: Basic investigation," *Med. phys.* 30(4), 623-634 (April 2003).
2. E.B. Podgorsak, [Editor of] "Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students," ISBN. 92-0-107304-6, International Atomic Energy Agency (IAEA), Austria (2005).
3. K. Vergote, "Development of polymer gel dosimetry for applications in intensity-modulated radiotherapy," PhD. Thesis. Department of Radiotherapy and Nuclear Medicine, Faculty of Medicine and Health Sciences, University of Gent, Belgium (2005).
4. A.J. Venning, S. Brindha, B. Hill, C. Baldock, "Preliminary study of a normoxic PAG gel dosimeter with tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium chloride as an antioxidant," Third International Conference on Radiotherapy Gel Dosimetry. *Journal of Physics: Conference Series*, 155-158, 3(2004).
5. M.H. Zahmatkesh, R. Kousari, Sh. Akhlaghpour, S.A. Bagheri, "MRI gel dosimetry with methacrylic acid. Ascorbic acid. Hydroquinone and Copper in Aharose (MAGICA) gel," Preliminary Proceedings of DOSGEL. Sep. 13-16, Ghent. Belgium (2004).
6. Y. De Deen, N. Reynaert, C. De Wagter, "On the accuracy of monomer/polymer gel dosimetry in the proximity of high-dose-rate Ir192 source," *Phys. Med Biol.* 46, 2801-2825 (2001).
7. A.J. Venning, B. Hill, S. Brindha, B.J. Healy, C. Baldock, "Investigation of the PAGAT polymer gel dosimeter using magnetic resonance imaging," *Phys. Med. Biol.* 50, 3875-3888 (2005).
8. B. Hill, A. Venning, C. Baldock, "The dose response of normoxic polymer gel dosimeters measured using X-ray CT," *The British Journal of Radiology*, 78, 623-630 (2005).
9. J. Novontny, V. Spevacek, P. Dvorak, T. Cechak, "Energy and dose rate dependence of BANG-2 polymer-gel dosimeter," *Med. Phys.* 28, 0094-2405 (2001).
10. E. Pappas, A. Angelopoulos, P. Kipouros, L. Vlachos, S. Xenofos, I. Seimenis, "Evaluation of the performance of VIPAR polymer gels," *Med. Phys. Biol.* 48, N65-N73 (2003).
11. M.J. Maryanski, G.S. Ibbott, P. Estman, R.J. Schulz, J.C. Gore, "Radiation therapy dosimetry using magnetic resonance imaging of polymer gels," *Med. Phys.* 23, 699-705 (1996).