



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۸-۱۷۰-۱۰-A

## بررسی اثر تغییرات دما بر روی پارامتر گرما-نوری ماده معادل بافت در دزیمتری پرتوهای یون ساز

سلیمی میدانشاهی، سحر<sup>۱</sup>؛ بیگزاده، امیرمحمد<sup>۲</sup>؛ رشیدیان وزیر، محمدرضا<sup>۳\*</sup>؛ شهشهانی، فاطمه

<sup>۱</sup> گروه فیزیک، دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا، تهران

<sup>۲</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، تهران

<sup>۳</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فن آوری‌های کوانتومی، تهران

\*mrashidian@aeoi.org.ir

چکیده: در این کار تجربی پارامتر گرما-نوری ماده معادل بافت در دزیمتری پرتوهای یون ساز (آب) اندازه‌گیری شده است. امروزه باریکه‌های پرتوهای یون ساز، که یکی از آنها ذرات الکترون است، کاربرد بسیاری در پرتودرمانی سرطان، پرتودهی مواد با هدف استریلیزاسیون تجهیزات پزشکی، تغییر خواص مواد و پلیمرها با هدف ارتقای کیفیت آنها، پرتودهی مواد غذایی برای افزایش زمان ماندگاری آنها در انبارها و حذف آفات آنها و ... یافته‌اند. در مبحث پرتودرمانی، محیط آب اغلب به عنوان فانتومی مناسب برای اندازه‌گیری توزیع دز جذبی الکترون‌ها در بدن بیماران مورد استفاده واقع می‌شود. برای ساخت دزیمترهای نوری، آگاهی از مقدار پارامتر گرما-نوری ماده یک اصل اساسی است که این نوع از دزیمترها با نام کالریمترهای تداخل‌سنجی شناخته شده‌اند. در این کار با استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زندر و حل روابط نظری مورد نیاز، پارامتر گرما-نوری در بازه دمایی بزرگ ۳۴ تا ۷۶ سلسیوس اندازه‌گیری شده است.  
کلیدواژه: تمام‌نگاری، تمام‌نگاری رقمی، ضریب شکست آب، تداخل‌سنج ماخ-زندر

### Investigating the effect of temperature variations on opto-thermal parameter of tissue-equivalent material in ionizing beam dosimetry

Salimi Meidanshahi, Sahar<sup>1</sup>; Beigzadeh, Amirmohammad<sup>2</sup>; Rashidian Vaziri, Mohammad Reza<sup>3\*</sup>; Shahshahani, Fatemeh<sup>1</sup>

\*mrashidian@aeoi.org.ir

<sup>1</sup> Department of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran

<sup>3</sup> Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran

**Abstract:** In this experimental work, the opto-thermal parameter of the tissue equivalent material in the dosimetry of ionizing radiation (water) has been measured. Nowadays, ionizing beams, where one of them is electron particles, are widely used in cancer radiotherapy, irradiation of materials with the aim of sterilizing medical equipments, changing the properties of materials and polymers to improve their quality, irradiating foods to increase their shelf life in warehouses and elimination, and etc. In case of radiation therapy, the water is often used as a suitable phantom to measure the distribution of electron absorption doses in patients' bodies. To make optical dosimeters, knowing the value of the opto-thermal parameter is a basic principle that these types of dosimeters are known as interferometric calorimeters. In this work, using the Mach-Zander interferometer and the solution of the required theoretical relations, the thermo-optical parameter is measured in the large temperature range of 34 to 76 degrees Celsius

**Keywords:** holography, digital holography, Water, Refractive index, Optical interferometer

## ۱. مقدمه

دمایی ضریب شکست محیط، فاز میدان الکتریکی باریکه لیزری مورد استفاده را تغییر می‌دهد. با اندازه‌گیری تغییرات فاز میدان با استفاده از روش‌های نوری، می‌توان میزان دز جذب شده در محیط را بدست آورد؛ بنابراین برای استفاده از محیط آب برای دزیمتری تابش الکترونی، باید تغییرات دمایی ضریب شکست آن پیش از استفاده در کالریمتر به‌دقت مشخص باشد. از آنجایی که با تغییر میزان ناخالصی، تغییر چگالی و نیز تغییر فشار محیط هوا در محیط اندازه‌گیری، ضریب شکست آب تغییر می‌کند [۷]، اندازه‌گیری تغییرات دمایی آب در همان محیط مورد استفاده برای کالریمتری تابش الکترونی ضروری است.

در این مقاله، به گزارش اندازه‌گیری ضریب شکست آب با استفاده از یک چیدمان تداخل‌سنجی ماخ-زندر پرداخته شده است. هدف، مشخصه‌یابی و اندازه‌گیری دقیق وابستگی ضریب شکست آب مورد استفاده در آزمایشگاه پیش از ساخت یک کالریمتر تابش الکترونی بوده است.

## ۲. چیدمان تداخل‌سنجی ماخ-زندر و روش

## اندازه‌گیری

شکل ۱ سیستم تداخل‌سنجی ماخ-زندر مورد استفاده در کار تجربی را نشان می‌دهد. در این چیدمان تداخل‌سنجی، ابتدا باریکه نوری خارج شده از لیزر پس از بازتاب از آینه ۱ از تیغه نیم‌موج اول عبور می‌کند. با دوران تیغه نیم‌موج اول، جهت قطبش خطی باریکه اصلی دوران یافته و سپس دو مؤلفه این باریکه توسط شکافنده باریکه قطبش‌گر از یکدیگر تفکیک می‌شوند. به این ترتیب و با دوران تیغه نیم‌موج اول امکان تنظیم دلخواه نسبت شدت بین دو باریکه خارج شده از باریکه‌شکن قطبش‌گر وجود خواهد داشت. بخش اول باریکه، مشخص شده با علامت ۱ در شکل، به عنوان باریکه مرجع از تیغه نیم‌موج دوم عبور می‌کند. نقش تیغه نیم‌موج دوم در مسیر باریکه مرجع، دوران مجدد جهت قطبش و همسوسازی آن با جهت قطبش باریکه دوم است. باریکه مرجع پس از بازتاب از سطح آینه ۲، از طریق باریکه‌شکن ترکیب به سطح حساس به نور دوربین دیجیتال می‌رسد. باریکه دوم یا همان باریکه شیئی نیز، مشخص شده با علامت ۲ در شکل، پس از بازتاب از سطح آینه ۳ و عبور از سلول حاوی نمونه و باریکه-شکن ترکیب به دوربین می‌رسد. در نهایت باریکه شیئی با باریکه مرجع روی سطح حساس به نور دوربین دیجیتال برهم‌نهی شده و طرح نوارهای تداخلی شکل خواهد گرفت. این

امروزه سرطان به یکی از علت‌های عمده مرگ انسان‌ها در جهان تبدیل شده است. اگرچه بسیاری از سرطان‌ها را می‌توان از راه جراحی تا حدودی درمان کرد، اما گزینه‌های جایگزین با آسیب‌زایی کمتر مانند روش‌های پرتودرمانی نیز در حال گسترش هستند. دو روش اصلی پرتودرمانی با نام‌های پرتودرمانی خارجی و پرتودرمانی داخلی (براکی تراپی) برای درمان سرطان مورد استفاده واقع می‌شوند [۱]. در براکی‌تراپی، منبع تابش در داخل بدن بیمار و نزدیک به توده سرطانی قرار داده می‌شود، درحالی‌که پرتودرمانی خارجی بر اساس استفاده از انواع مختلف منابع تابش یون‌ساز است که در خارج از بدن بیمار قرار می‌گیرند.

چالش اصلی در استفاده از روش‌های پرتودرمانی برای درمان بیماران سرطانی، تحویل و کمی‌سازی دقیق دز تابشی اعمال شده به بافت است. روش‌های متعدد دزیمتری برای اندازه‌گیری دز جذبی تابش‌ها وجود دارند. روش‌هایی مانند کالریمتری، استفاده از اتاقک‌های یونش، دزیمتری با استفاده از مواد نیمه‌هادی، لایه‌های رادیوکرومیک و ترمولومینسانس استفاده بسیاری در زمینه دزیمتری دارند. هر یک از این روش‌های دزیمتری مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد. روش پرکاربردی که برای دزیمتری بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، کالریمتری است [۲]. کالریمتر افزایش دمای ناشی از انرژی جذب شده در محیط بر اثر تابش یون‌ساز را اندازه می‌گیرد. ماده جاذب به طور معمول از جنس آب یا گرافیت انتخاب می‌شود. اختلاف دمای ایجاد شده در محیط با استفاده از یک دماسنج مناسب سنجیده شده و میزان دز جذب شده با استفاده از گرمای ویژه محیط محاسبه می‌شود. برای افزایش دقت روش کالریمتری باید از روش‌های اندازه‌گیری دمایی استفاده کرد که حساسیت بیشتری به تغییرات دمایی اندک محیط جاذب داشته باشند. باریکه‌های همدوس لیزری را می‌توان برای سنجش میزان تغییرات دمایی اندک ایجاد شده در محیط‌های جاذب مورد استفاده قرار داد [۳]. به علت خاصیت همدوسی بسیار بالای لیزرها، هرگونه تغییری که باعث برهم‌خوردگی اندک این همدوسی شود را می‌توان به‌دقت اندازه گرفت. استفاده از باریکه‌های لیزری برای دزیمتری تابش بسیار مورد توجه است [۲، ۴-۶]. تغییرات دمایی در محیط فانتوم جاذب تابش که برای کاربردهای درمانی اغلب آب در نظر گرفته می‌شود، باعث تغییر ضریب شکست آن می‌شود. تغییرات

مربوط به انتشار نور، تغییر فاز جبهه موج لیزری و تداخل امواج را برای شرایط مورد استفاده در این روش مورد بررسی قرار داد. اگر شدت جبهه موج‌های مرجع و شیئی را روی سطح دوربین به ترتیب با  $I_1$  و  $I_2$  نشان دهیم، شدت حاصل از برهم‌نهی به صورت زیر خواهد بود:

(۱)

که  $\Delta\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1$  اختلاف فاز بین دو جبهه‌ی موج است که به سبب تغییرات ضریب شکست ایجاد شده در ماده به علت تغییرات دمایی آن ایجاد می‌شود.  $\varphi_1$  و  $\varphi_2(t)$  به ترتیب فاز جبهه موج‌های مرجع و شیئی هستند. اختلاف فاز ایجاد شده بین دو جبهه موج بر اثر تغییرات دمایی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\Delta\varphi(t) = k \Delta OPL(t) \quad (2)$$

که  $\Delta OPL(t)$  اختلاف راه نوری بین دو باریکه مرجع و شیئی و  $k = 2\pi/\lambda$  عدد موج است.  $\lambda$  نیز طول موج لیزر مورد استفاده در چیدمان تداخل‌سنجی است. اختلاف راه نوری را می‌توان به شکل زیر نوشت:

(۳)

که در آن  $n(t)$  و  $l(t)$  به ترتیب ضریب شکست ماده و طول سلولی هستند که برای اندازه‌گیری ضریب شکست، ماده درون آن ریخته شده است. با بسط این رابطه و استفاده از روابط زیر:

(۴)

که در آن  $dn/dT$  ضریب نور-گرمایی ماده است و:

(۵)

که در آن  $\Delta l(t)$  تغییرات طول سلول است، پس از کمی عملیات جبری می‌توان به رابطه زیر رسید:

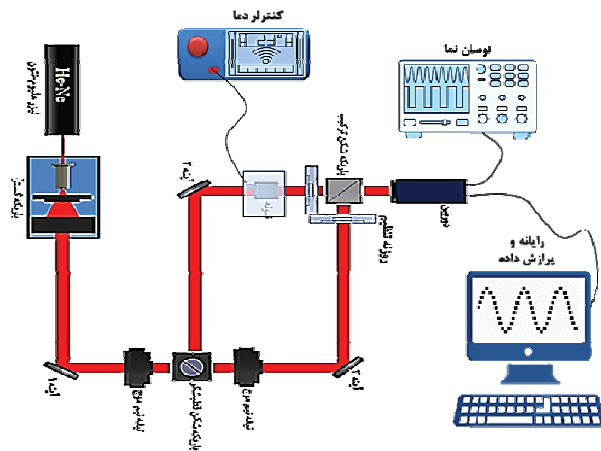
(۶)

که در آن  $n_0$  و  $l_0$  به ترتیب ضریب شکست ماده و طول اولیه سلول در دمای اولیه  $T_0$  هستند. در استخراج این رابطه، از رابطه زیر بین تغییرات طول راه نوری و تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده  $\Delta m(t)$  استفاده شده است:

(۷)

تصویر توسط دوربین ثبت و برای رؤیت و پردازش‌های بعدی از طریق نوسان‌نما به رایانه منتقل می‌شود.

لیزر مورد استفاده در این مطالعه، لیزر هلیوم نئون با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر، با قطبش خطی و توان ۵ میلی‌وات مدل MellesGriot098DPP بوده است. در این کار از یک سلول مکعب مستطیل شکل از جنس کوارتز به ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  سانتی‌متر مکعب و به ضخامت بدنه ۱ میلی‌متر، محتوی آب به عنوان نمونه جاذب استفاده شده است. دوربین دیجیتال مورد استفاده متعلق به شرکت The Imaging Source مدل DMK23G445 با پیکسل‌هایی با ابعاد  $3/7 \times 3/7$  میکرومتر مربع بوده است. از یک دماسنج دیجیتال به نام سانوارد مدل SUN15-T برای اندازه‌گیری و نمایش دما با دقت یک دهم درجه در چیدمان استفاده شده است. نوک فلزی دماسنج به شکلی از قسمت فوقانی در سلول ثابت شده است که تداخلی با باریکه لیزری عبوری از آن نداشته باشد.



شکل ۱: طرحی از چیدمان تجربی مورد استفاده

برای شروع آزمایش، ابتدا آب تا دمای ۷۵ درجه سلسیوس در ظرفی مجزا گرم شده است. آب گرم شده به داخل سلول کوارتز منتقل شده و پس از گذشت مدت زمان ۳ دقیقه، برای به تعادل رسیدن آب درون سلول کوارتز، ثبت نوارهای تداخلی توسط رایانه آغاز شده است. دما نیز به صورت مجزا و از طریق دماسنج اندازه‌گیری شده است.

### ۳. روابط نظری

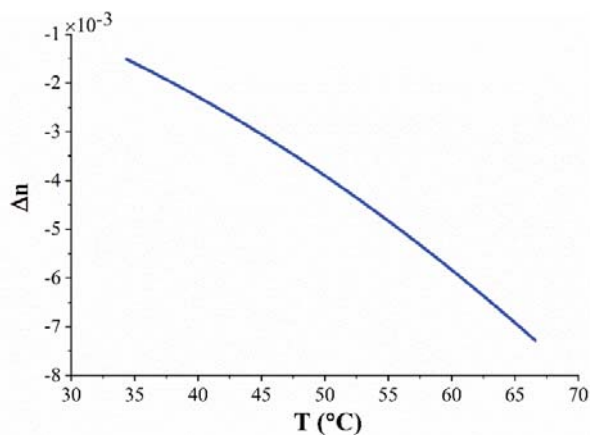
با سرد شدن تدریجی آب درون سلول، نوارهای تداخلی شروع به حرکت خواهند کرد. برای درک چگونگی شکل‌گیری طرح نوارهای تداخلی در روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال و علت جابه‌جایی آن با تغییرات دما، ابتدا باید روابط فیزیکی

بنابراین، با پایش طرح نوارهای تداخلی بر حسب زمان و اندازه-گیری تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده  $\Delta m(t)$  و اندازه-گیری همزمان تغییرات دمایی  $\Delta T(t)$ ، تغییرات دمایی ضریب شکست آب از طریق رابطه (۱۲) قابل محاسبه خواهد بود.

#### ۴. نتایج

تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده در طول مدت زمان آزمایش و سرد شدن تدریجی آب در شکل ۲- الف نشان داده شده است. شکل ۲- ب نیز اختلاف دماهای اندازه‌گیری شده در همین بازه زمانی از طریق دماسنج را نشان می‌دهد.

با اندازه‌گیری تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده و نیز تغییرات دما بر حسب زمان و با استفاده از رابطه (۶)، مقدار تغییرات دمایی ضریب شکست آب بر حسب زمان استخراج شده و در شکل ۲ نشان داده شده است. در استفاده از رابطه (۶)، مقادیر ثابت‌های  $n_0$  و  $l_0$  به ترتیب برابر با  $1/32249$  معادل با ضریب شکست آب در دمای اولیه  $66/5$  درجه سلسیوس و  $5$  سانتی-متر معادل با طول اولیه سلول کوارتز انتخاب شده‌اند. برای آنکه محاسبه تغییرات ضریب شکست آب با استفاده از رابطه (۶) دقت بالاتری داشته باشد، بزرگی ضریب انبساط گرمایی کوارتز  $\alpha$  ثابت فرض نشده و از مقادیر وابسته به دمای آن استفاده شده است. در این کار وابستگی دمایی ضریب انبساط گرمایی کوارتز از مرجع [۸] استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲: نتایج اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست آب درون سلول در طول مدت سرد شدن.

#### ۵. تحلیل خطا

در این کار، دقت دماسنج مورد استفاده برای اندازه‌گیری دما برابر با  $0/1$  درجه سلسیوس و دقت میکرومتر مورد استفاده

$$\Delta n_w(T) \times 10^5 = -8.889(T - 20^\circ\text{C}) - 0.1610(T - 20^\circ\text{C})^2 \quad (8)$$

به شکل زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$\langle \delta_{\Delta T}(T_j) \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N [\Delta n_w(T_i)_{\text{exp}} - \Delta n_w(T_i)_{\text{calc}}] \quad (9)$$

که در آن  $N$  تعداد داده‌های ضریب شکست اندازه‌گیری شده در بازه دمایی  $\Delta T$ ،  $\Delta n_w(T_i)_{\text{exp}}$  مقدار اندازه‌گیری شده تجربی تغییر ضریب شکست از دمای مرجع تا دمای  $T_i$  در بازه تغییرات دمایی  $T_j - \frac{1}{3}\Delta T < T_i < T_j + \frac{1}{3}\Delta T$  و  $\Delta n_w(T_i)_{\text{calc}}$  تغییرات ضریب شکست محاسبه شده از طریق رابطه (۱۷-۳) بین دماهای مرجع و  $T_i$  است. شکل (۱۸-۳) تغییرات کمیت  $\langle \delta_{\Delta T}(T_j) \rangle$ ، در بازه دمایی مورد استفاده برای اندازه‌گیری ضریب شکست در این کار را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، خطای اندازه‌گیری در دماهای بالاتر بیشتر است. داده‌های ارائه شده در این شکل، نتیجه‌گیری پیشین در مورد وجود خطای اندازه-گیری بیشتر در دماهای بالاتر، بدلیل وجود ناهمگنی دمایی در نمونه را تأیید می‌کند.

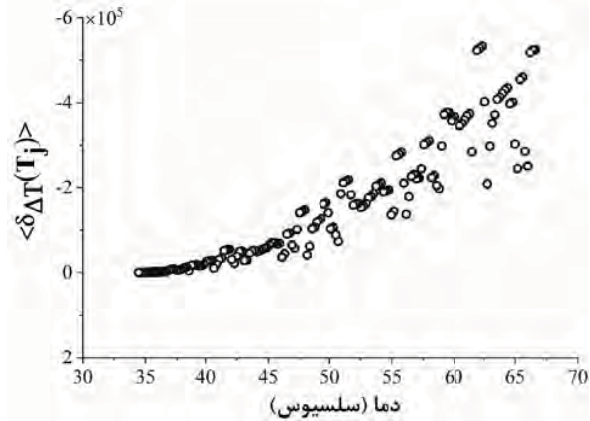
[۵] Flores-Martinez E, Malin M J and DeWerd L A 2016 Development and characterization of an interferometer for calorimeter-based absorbed dose to water measurements in a medical linear accelerator *Review of Scientific Instruments* **87** 114301

[۶] Hubley L, Roberts J, Meyer J, Moggré A and Marsh S 2019 Optical-Radiation-Calorimeter Refinement by Virtual-Sensitivity Analysis *Sensors* **19** 1167

[۷] Eisenberg H 1965 Equation for the refractive index of water *The Journal of Chemical Physics* **43** 3887-92

[۸] Polyakova I 2014 The main silica phases and some of their properties *Glass: Selected Properties and Crystallization* 197-268

[۹] Dobbins H M and Peck E R 1973 Change of refractive index of water as a function of temperature *JOSA* **63** 318-20



شکل ۳: تحلیل خطای اندازه‌گیری وابستگی دمایی ضریب شکست.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این کار به توصیف اندازه‌گیری تجربی ضریب شکست آب با استفاده از یک تداخل‌سنج ماخ-زندر پرداخته شده است. با توسعه روابط نظری موردنیاز، داده‌های تجربی بدست آمده مورد تفسیر قرار گرفته و وابستگی دمایی ضریب شکست آب در بازه دمایی ۳۴ تا ۷۶ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، نتایج با کارهای تجربی پیشین مورد مقایسه قرار گرفته و تحلیل خطا برای اندازه‌گیری‌ها به انجام رسیده است.

## مراجع

[۱] Haddadi G, Haddadi M B and Vardian M 2013 Different Radiotherapy Methods: A Review *Journal of Fasa University of Medical Sciences* **2** 235-40

[۲] امیرمحمد بیگ زاده، محمدرضا رشیدیان وزیری و فرهود ضیائی. "به کارگیری روش تداخل سنجی تمام نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه برای محاسبه میزان دز جذبی در پلیمر پلی متیل متاآکریلات"، مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۵، شماره ۴، ۱۳۹۶.

[۳] Beigzadeh A M, Rashidian Vaziri M R and Ziaie F 2017 Application of double-exposure digital holographic interferometry method for calculating the absorbed dose in poly(methyl methacrylate) environment *Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement* **5** 51-61

[۴] محمدرضا رشیدیان وزیری، امیرمحمد بیگ زاده و فرهود ضیائی. "اندازه‌گیری دز جذبی الکترون در فانتوم آب به روش تمام نگاری دیجیتال با باریکه لیزر"، مجله علمی پژوهشی «علوم و فن آوریهای پدافند نوین»، جلد ۹، شماره ۴، ۱۳۹۷.