



## اندازه‌گیری تغییرات دمایی ضریب شکست آب با استفاده از روش تداخل‌سنجی دیجیتال به منظور ساخت دزیومتر نوری

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

۱. گروه فیزیک، دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهراء، صندوق پستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳، تهران - ایران

۲. پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران - ایران

۳. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۱۱

### چکیده

استفاده از منابع نوری همدوس برای ساخت دزیومترهای نوری بسیار مورد توجه است. دزیومترهای نوری بیش‌تر برای کاربردهای پرتودرمانی مورد استفاده قرار گرفته و برای چنین کاربردهایی اطلاع از وابستگی دمایی ضریب شکست ماده مورد استفاده در قلب دزیومتر، اغلب آب، مورد نیاز است. در این کار، با برپایی و استفاده از یک تداخل‌سنج در محیط آزمایشگاه، وابستگی دمایی ضریب شکست آب اندازه‌گیری شده است. نوع چیدمان مورد استفاده به تفصیل توصیف شده و روابط نظری مورد نیاز برای تفسیر داده‌های تجربی به دست آمده است. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی پیشین نشان‌دهنده‌ی مطابقت مطلوب و صحت اندازه‌گیری‌ها است. نشان داده شده است که مدل چندجمله‌ای مرتبه دوم را می‌توان به خوبی برای تفسیر داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده قرار داد. نتایج ارایه شده در این مطالعه را می‌توان برای کلیه کاربردهایی که در آن‌ها اطلاع از وابستگی دمایی ضریب شکست آب پیش‌نیاز است به کار گرفت.

**کلیدواژه‌ها:** دزیومتر نوری، آب، ضریب شکست، تداخل‌سنج نوری

## Measuring the temperature variation of refractive index of water by digital interferometry for manufacturing an optical dosimeter

S. Salimi Meidanshahi<sup>1</sup>, M.R. Rashidian Vaziri<sup>2\*</sup>, A.M. Beigzadeh<sup>3</sup>, F. Shahshahani<sup>1</sup>

1. Department of Physics, Alzahra University, P.O.Box: 1993893973, Tehran - Iran

2. Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399511-13, Tehran-Iran

3. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

### Abstract

Using coherent light sources for manufacturing optical dosimeters is of considerable interest. Optical dosimeters are mostly employed for radiotherapy applications; where knowing the temperature dependency of refractive index of the used material in the core of dosimeter, often water, is required. In this work, by setting up and employing an interferometer in the laboratory, the temperature dependency of refractive index of water is measured. The setup is fully described and the required theoretical relations for interpreting the experimental data are developed. Comparing the results with the previous experimental data provided by other groups, demonstrates good compromise and confirms the accuracy of the measurements. It is shown that the second-order polynomial model can be efficiently used for interpreting the measurement data. The results of this study can be used in all those applications where knowing the temperature dependency of refractive index of water is a prerequisite.

**Keywords:** Optical dosimetry, Water, Refractive index, Optical interferometer

\*Email: mrashidian@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

روش‌های مختلف پرتودرمانی برای از بین بردن یا کوچک کردن بافت‌های سرطانی مورد استفاده واقع می‌شوند. در این روش درمانی، سلول‌های سرطانی در ناحیه درمان با استفاده از تابش‌های یونیزان دچار مرگ سلولی شده و ادامه رشد و تقسیم آن‌ها غیرممکن می‌شود. هدف غایی در پرتودرمانی از بین بردن بیش‌تر سلول‌های سرطانی در ناحیه درمان با حداقل آسیب به سلول‌های بافت‌های سالم مجاور است. دو روش اصلی پرتودرمانی با نام‌های پرتودرمانی خارجی و پرتودرمانی داخلی (براکی‌تراپی) 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 براساس استفاده از انواع مختلف منابع تابش یونیزان است که در خارج از بدن بیمار قرار می‌گیرند. انواع منابع تابش یونیزان، نظیر تابش‌های گاما، پروتون، الکترون و اشعه ایکس را می‌توان برای پرتودرمانی خارجی مورد استفاده قرار داد. پرتوهای پروتون موردنیاز برای پرتودرمانی را می‌توان از طریق شتاب‌دهندهایی نظیر سیکلوترون و سنکروترون به‌دست آورد. در مراکز درمانی، پرتو درمانی خارجی توسط پرتوهای ایکس و یا الکترون نیز به کمک شتاب‌دهنده‌های خطی<sup>۱</sup> به انجام می‌رسد. باریکه‌های الکترونی را می‌توان به دو شکل مستقیم و غیرمستقیم برای پرتودرمانی مورد استفاده قرار داد. در روش مستقیم، خود الکترون‌های شتاب گرفته به صورت مستقیم برای درمان تومورهای زیرپوستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش غیرمستقیم، از الکترون‌های شتاب گرفته برای تولید پرتوهای ایکس ثانویه استفاده شده و با توجه به عمق نفوذ بالای پرتوهای ایکس، به این روش می‌توان تومورهای موجود در عمق بافت را تحت تابش و درمان قرار داد.

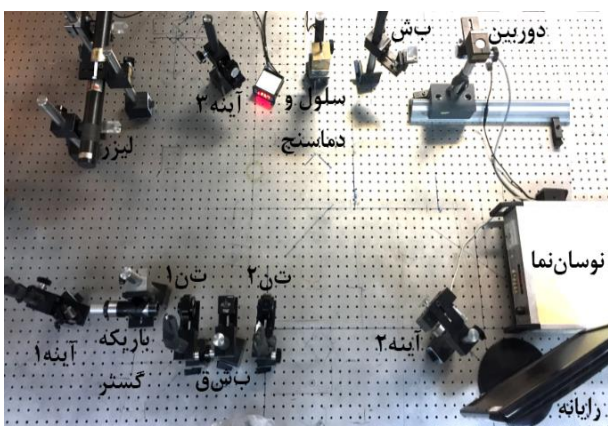
چالش اصلی در استفاده از روش‌های پرتودرمانی برای درمان بیماران سرطانی، تحویل و کمی‌سازی دقیق دز تابشی اعمال شده به بافت است. روش‌های متعدد دزیمتری برای اندازه‌گیری دز جذبی تابش‌ها وجود دارند. روش‌هایی مانند کالریمتری، استفاده از اتاقک‌های یونش، دزیمتری با استفاده از مواد نیمه‌هادی، لایه‌های رادیوکرومیک و ترمولومینسانس استفاده بسیاری در زمینه دزیمتری دارند. هر یک از این روش‌های دزیمتری مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند.

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 یونیزان را اندازه می‌گیرد. محیط 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 را که باعث برهم‌خوردگی اندک این همدوسی شود، می‌توان به‌دقت اندازه گرفت. استفاده از باریکه‌های لیزری و روش‌های نوری برای دزیمتری تابش بسیار مورد توجه هستند [۴-۸]. اصول کار دزیمترهای نوری برپایه روش کالریمتری است و به علت حساسیت بالا بیش‌تر برای کاربردهای پزشکی و تعیین میزان دز جذبی در روش‌های پرتودرمانی به کار گرفته می‌شوند [۵]. تغییرات دمایی در محیط فانتوم جاذب تابش، که برای کاربردهای درمانی اغلب آب در نظر گرفته می‌شود، باعث تغییر ضریب‌شکست آن می‌شود. تغییرات دمایی ضریب شکست محیط، فاز میدان الکتریکی باریکه لیزری مورد استفاده را تغییر می‌دهد. با اندازه‌گیری تغییرات فاز میدان با استفاده از روش‌های نوری و تداخل‌سنجی، می‌توان میزان دز جذب شده در محیط را به‌دست آورد [۸]. 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 [۹]، 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. تداخل‌سنج‌های نوری ابزارهای اندازه‌گیری دقیقی هستند که کاربرد بسیاری در اندازه‌گیری کمیات مختلف فیزیکی، از جمله ضریب شکست دارند [۱۰]. هدف از انجام این کار،

شکل ۲، چیدمان تجربی مورد استفاده در این کار را نشان می‌دهد که مطابق با طرح ارائه شده در شکل ۱ پیاده‌سازی شده است. لیزر مورد استفاده در این مطالعه، لیزر هلیوم نئون با طول موج  $632.8$  نانومتر، با قطبش خطی و توان  $5$  میلی‌وات مدل Melles Griot 098DPP بوده است. در این کار از یک سلول مکعب مستطیل شکل از جنس کوارتز به ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  سانتی‌متر و به ضخامت بدنه  $1$  میلی‌متر، محتوی آب به عنوان نمونه جاذب استفاده شده است. شیشه کوارتز از شرکت شات آلمان Schott SF6 (ضریب شکست و چگالی جرمی به ترتیب برابر با  $1.4805$  و  $5.18$  گرم بر سانتی‌متر مکعب) تهیه شده و در کارگاه اپتیک پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی برش و سایش - پولیش شده و در نهایت سلول از آن تهیه شده است. آب بی‌یون نیز از محصولات پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، با رسانش برابر با  $0.109$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده است. دوربین دیجیتال مورد استفاده متعلق به شرکت The Imaging Source مدل DMK23G445 با پیکسل‌هایی با ابعاد  $3.7 \times 3.7$  میکرومتر بوده است. از یک دماسنج دیجیتال به نام سانوار 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.

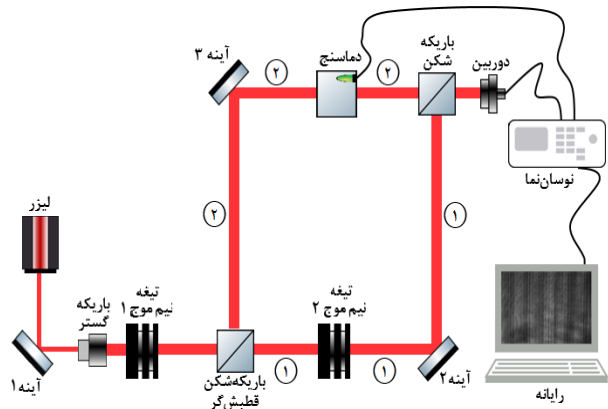


شکل ۲. چیدمان تجربی مورد استفاده. ت‌ن ۱: تیغه نیم‌موج ۱، بش‌ق: باریکه‌شکن قطبش‌گر، ت‌ن ۲: تیغه نیم‌موج ۲، بش: باریکه‌شکن ترکیب.

مشخصه‌یابی و اندازه‌گیری دقیق وابستگی دمایی ضریب شکست آب مورد استفاده در آزمایشگاه پیش از ساخت یک کالریمتر نوری بوده است.

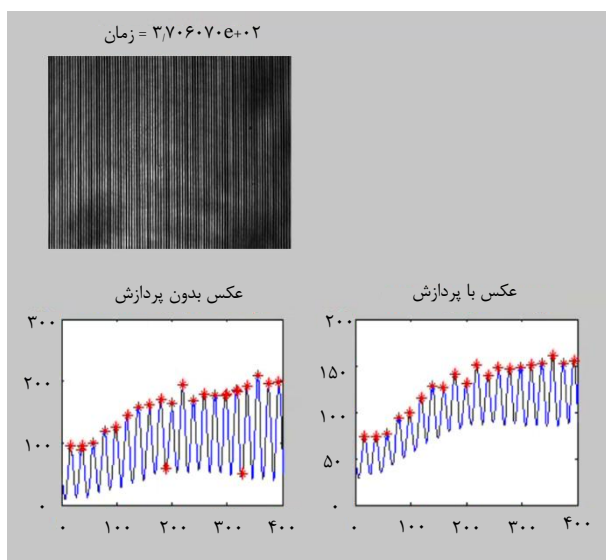
## ۲. روش اندازه‌گیری

شکل ۱ طرح سیستم تداخل‌سنجی دیجیتال 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 باریکه‌شکن 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 تصویر توسط دوربین ثبت و برای رؤیت و پردازش‌های بعدی از طریق نوسان‌نما به رایانه منتقل می‌شود.



شکل ۱. طرح چیدمان مورد استفاده.

علت وجود نوفه در تغییرات شدت، شناسایی شده است. برای حذف خطای شناسایی هوشمند نقاط بیشینه، باید ابتدا نوفه‌های موجود در طرح نوارهای تداخلی را حذف کرد. در این کار، حذف این نوفه‌ها با استفاده از صافی‌های پردازش تصویر به انجام رسیده است. بدین منظور، طرح نوارهای تداخلی با اعمال پیایی دوبار صافی میانه و دوبار صافی میانگین، هر دو با ابعاد  $3 \times 3$ ، پالایش شده است. نمودار نوسانی نشان داده شده در بخش پایین و سمت راست شکل ۳، تغییرات شدت را در امتداد همان خط و پس از اعمال صافی‌های پردازش تصویر میانه و میانگین نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصویر مشخص است، پس از حذف نوفه‌ها، الگوریتم هوشمند مورد استفاده در شناسایی مکان نقاط بیشینه دچار خطا نشده است. برای شمارش تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده، مکان هندسی متناظر با یکی از ستاره‌ها، معادل با مکان یکی از نوارهای تداخلی روشن، در طول زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در مدت زمان انجام آزمایش، تعداد دفعاتی که نقاط بیشینه از این نقطه عبور کرده‌اند برحسب زمان استخراج شده است.



شکل ۳. صفحه اصلی رابط کاربری نوشته شده در محیط متلب برای شمارش هوشمند نوارهای تداخلی.

برای شروع آزمایش، ابتدا آب تا دمای  $75$  درجه سلسیوس در ظرفی مجزا گرم شده است. آب گرم شده به داخل سلول کوارتز منتقل شده و پس از گذشت مدت زمان  $3$  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. با سرد شدن تدریجی آب درون سلول، نوارهای تداخلی شروع به حرکت خواهند کرد. در بخش بعد علت حرکت طرح نوارهای تداخلی و نحوه استخراج تغییرات دمایی ضریب شکست با شمارش میزان جابه‌جایی نوارها به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. آب درون سلول به تدریج و تا دمای محیط سرد شده و طرح نوارهای تداخلی به صورت پیوسته و در رایانه ثبت شده است.

برای شمارش هوشمند تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده، از الگوریتم هوشمند نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شده است. شکل ۳ صفحه اصلی رابط کاربری نوشته شده در محیط متلب برای شمارش هوشمند نوارهای تداخلی را نشان می‌دهد. یک نمونه از طرح نوارهای تداخلی ثبت شده توسط دوربین در قسمت بالای شکل نشان داده شده است.

برای یافتن مکان هندسی نقاط بیشینه شدت، معادل با مکان هندسی نوارهای تداخلی روشن در طرح نوارهای تداخلی، تغییرات شدت در امتداد یک خط افقی روی این طرح رسم می‌شود. در بخش پایین شکل ۳، تغییرات نوسانی شدت در امتداد این خط نمونه نشان داده شده است. برای یافتن هوشمند نقاط بیشینه این طرح، داده‌ها به صورت دسته‌های سه تایی متوالی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در صورتی که نقطه وسط در دسته داده سه‌تایی از دو داده دیگر بزرگ‌تر باشد، این داده به عنوان یک بیشینه محلی شناسایی می‌شود. به طور طبیعی با استفاده از این الگوریتم، در صورتی که طرح نوارهای تداخلی اولیه آلوده به اقسام نوفه‌های تجربی باشد، نقاط بیشینه جعلی نیز شناسایی خواهند شد. نمودار نوسانی نشان داده شده در بخش پایین و سمت چپ شکل ۳، تغییرات شدت را در امتداد خط انتخاب شده و پیش از اعمال صافی‌های پردازش تصویر نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشخص است، علاوه بر نقاط بیشینه واقعی تعدادی بیشینه جعلی نیز به

## ۳. روابط نظری

این کمیت‌ها به زمان وابسته هستند. ضریب شکست ماده از طریق رابطه زیر به زمان وابسته است:

$$n(t) = n_0 + \frac{dn}{dT} \Delta T(t) = n_0 + \Delta n(t) \quad (4)$$

که در آن  $n_0 = n_{T=T_0}$  ضریب شکست ماده در دمای اولیه  $T_0$  و  $dn/dT$  ضریب نور-گرمايي ماده است.  $\Delta T(t)$  نیز نشان‌دهنده تغییرات دمایی ایجاد شده در محیط برحسب زمان است. از سوی دیگر با تغییرات دما، ابعاد سلول به کار گرفته شده در چیدمان تجربی نیز تغییر خواهد کرد. اگر  $l$  نشان‌دهنده طولی از سلول باشد که باریکه شیئی از آن عبور می‌کند، وابستگی زمانی آن را با در نظر گرفتن ضریب انبساط حرارتی ماده‌ای که سلول از آن ساخته شده است  $\alpha$ ، می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$l(t) = l_0(1 + \alpha \Delta T(t)) = l_0 + \Delta l(t) \quad (5)$$

که در آن  $l_0 = l_{T=T_0}$  طول سلول در دمای اولیه  $T_0$  و  $\Delta l(t)$  تغییرات طول آن است. با بسط رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\Delta OPL(t) = \Delta n(t) \times l(t) + n(t) \times \Delta l(t) \quad (6)$$

با استفاده از رابطه (۴)، می‌توان رابطه (۶) را به شکل زیر نوشت:

$$\Delta OPL(t) = \Delta n(t) \times l(t) + n_0 \times \Delta l(t) \quad (7)$$

که در نوشتن آن به خاطر کوچکی در قیاس با دو جمله‌ی دیگر، از  $\Delta n(t) \times \Delta l(t)$  صرف‌نظر شده است. با استفاده از رابطه (۵) در رابطه (۷) و بیان آن برحسب  $\Delta n(t)$  خواهیم داشت:

$$\Delta n(t) = \frac{\Delta OPL(t) - n_0 l_0 \alpha \Delta T(t)}{l_0(1 + \alpha \Delta T(t))} \quad (8)$$

برای درک چگونگی شکل‌گیری طرح نوارهای تداخلی در روش تداخل‌سنجی دیجیتالی و علت جابه‌جایی آن با تغییرات دما، ابتدا باید روابط فیزیکی مربوط به انتشار نور، تغییر فاز جبهه‌موج لیزری و تداخل امواج را برای شرایط مورد استفاده در این روش مورد بررسی قرار داد. اگر شدت جبهه‌موج‌های 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:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi(t) \quad (1)$$

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 جبهه‌موج‌های مرجع و شیئی هستند. معادله (۱) جمع شدت‌های هر یک از دو موج را بیان می‌کند؛ به علاوه‌ی بخش متغیر نوسانی که نوارهای تداخلی را ایجاد می‌کند. با ثابت بودن چیدمان تداخل‌سنجی و لیزر مورد استفاده در آن، فاز جبهه موج مرجع ثابت بوده و با زمان تغییر نخواهند کرد. اختلاف فاز ایجاد شده بین دو جبهه‌موج 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 طول‌موج لیزر مورد استفاده در چیدمان تداخل‌سنجی است. اختلاف راه نوری را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\Delta OPL(t) = \Delta [n(t) \times l(t)] \quad (3)$$

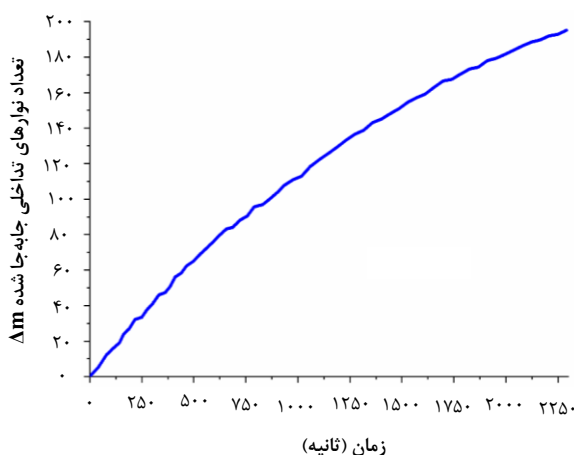
که در آن  $n(t)$  و  $l(t)$  به ترتیب ضریب شکست ماده و طول سلولی هستند که برای اندازه‌گیری ضریب شکست، ماده درون آن ریخته شده است. به علت تغییرات دمایی ایجاد شده، هر دو

اندازه‌گیری همزمان تغییرات دمایی  $\Delta T(t)$ ، تغییرات ضریب شکست محیط قابل محاسبه خواهد بود.

#### ۴. نتایج

روش اندازه‌گیری تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده  $\Delta m(t)$ ، در انتهای بخش ۲ مورد اشاره قرار گرفت. شکل ۴ تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده در طول مدت زمان آزمایش را نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز اختلاف دماهای اندازه‌گیری شده در همین بازه زمانی  $\Delta T(t)$  از طریق دماسنج را نشان می‌دهد.

با استفاده از داده‌های تجربی ارایه شده در شکل‌های ۴ و ۵ و با استفاده از رابطه (۱۱)، مقدار تغییرات دمایی ضریب شکست آب برحسب زمان استخراج شده است. در استفاده از رابطه (۱۱)، مقادیر ثابت‌های  $n_0$  و  $l_0$  به ترتیب برابر با  $۱/۳۲۴۹$  معادل با ضریب شکست آب در دمای اولیه  $۶۶/۵$  درجه سلسیوس و  $۵$  سانتی‌متر معادل با طول اولیه سلول کوارتز انتخاب شده‌اند. برای آن که محاسبه تغییرات ضریب شکست آب با استفاده از رابطه (۱۱) دقت بالاتری داشته باشد، بزرگی ضریب انبساط گرمایی کوارتز  $\alpha$  ثابت فرض نشده و از مقادیر وابسته به دمای آن استفاده شده است. بسیاری از کمیت‌های فیزیکی، نظیر ضریب انبساط گرمایی، بزرگی ثابتی نداشته و با تغییر سایر کمیات، نظیر دما، تغییر می‌کنند. در این کار وابستگی دمایی ضریب انبساط گرمایی کوارتز از مرجع [۱۲] استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۶). تغییرات دمایی ضریب شکست آب  $\Delta n$  در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۴. تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده در طول مدت سرد شدن آب داخل سلول.

بنابراین در صورتی که با استفاده از چیدمان تجربی مورد استفاده بتوان  $\Delta OPL(t)$  را اندازه‌گیری کرد، تغییرات ضریب شکست قابل استخراج خواهد بود.

در این کار برای اندازه‌گیری اختلاف راه نوری، از این واقعیت که مطابق با رابطه (۱)، طرح نوارهای تداخلی پویا بوده و با زمان تغییر می‌کند استفاده شده است. همان‌طور که در مرجع [۱۱] نیز اشاره شده است، پویایی طرح نوارهای تداخلی و جابه‌جایی آن را می‌توان برای اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست برحسب دما مورد استفاده قرار داد. برای این منظور باید دقت داشت که مطابق با رابطه (۱)، نوارهای تداخلی روشن و تاریک متناظر با مکان هندسی نقاطی هستند که به ترتیب برای آن‌ها  $\varphi(t)$  برابر با مضربی زوج و یا فرد از  $\pi$  باشد:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 2m(t)\pi && \text{برای نوارهای تداخلی روشن} \\ \varphi(t) &= (2m(t)+1)\pi && \text{برای نوارهای تداخلی تاریک} \end{aligned} \quad (9)$$

که  $m(t)$  یک عدد طبیعی متغیر متناظر با مرتبه نوار تداخلی است. با روشن کردن منبع گرمایش، نوارهای تداخلی تاریک و روشن شروع به حرکت خواهند کرد. اگر یک نقطه کنترلی، متناظر با یکی از پیکسل‌های دوربین دیجیتال را در نظر بگیریم و پس از سپری شدن زمان  $t$  تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده برابر با  $\Delta m(t)$  باشد، با استفاده از رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\Delta\varphi(t) = 2\Delta m(t)\pi \quad (10)$$

نوارهای تداخلی روشن یا تاریک

با ترکیب روابط (۲) و (۱۰) و استفاده از نتیجه حاصل در رابطه (۸)، خواهیم داشت:

$$\Delta n(t) = \frac{\lambda \Delta m(t) - n_0 l_0 \alpha \Delta T(t)}{l_0 (1 + \alpha \Delta T(t))} \quad (11)$$

بنابراین، با پایش طرح نوارهای تداخلی بر حسب زمان و اندازه‌گیری تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده  $\Delta m(t)$  و

۱.۴ اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده برای وابستگی دمایی ضریب شکست آب در این کار، مقایسه‌ای با کارمشابه و پراستنادی که در این زمینه وجود دارد به انجام رسیده است. در سال ۱۹۷۳، دابینز و پک [۱۱] گزارشی در مورد اندازه‌گیری ضریب شکست آب ارائه کرده و نتایج به دست آمده را با کارهای پیشین خود مقایسه کرده‌اند. در کار ارائه شده از چیدمان تداخل‌سنجی مایکلسون برای اندازه‌گیری وابستگی دمایی ضریب شکست آب استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده آن است که تغییرات دمایی ضریب شکست آب را می‌توان با چندجمله‌ای مرتبه دومی به شکل زیر بیان کرد:

$$\Delta n_w(T) \times 10^5 = -8,889(T - 20^\circ\text{C}) - 0,1610(T - 20^\circ\text{C})^2 \quad (12)$$

که در آن ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده دمای اولیه در آزمایش‌های انجام شده است. در همین کار [۱۱]، نشان داده شده است که چندجمله‌ای‌های مرتبه دوم مشابهی نیز قادر به توصیف داده‌های تجربی کارهای پیشین هستند. نشان داده شده است که چندجمله‌ای مرتبه دوم زیر:

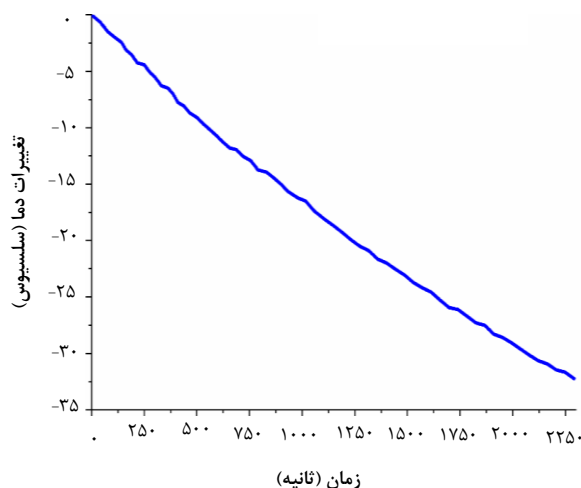
$$\Delta n_w(T) \times 10^5 = -8,732(T - 20^\circ\text{C}) - 0,1699(T - 20^\circ\text{C})^2 \quad (13)$$

به خوبی بیان‌گر داده‌های تجربی به دست آمده توسط تیلتون و تیلور [۱۳] است. رابطه زیر نیز بیان خوبی از داده‌های تجربی به دست آمده توسط آندرسون و همکاران [۱۴] ارائه می‌دهد:

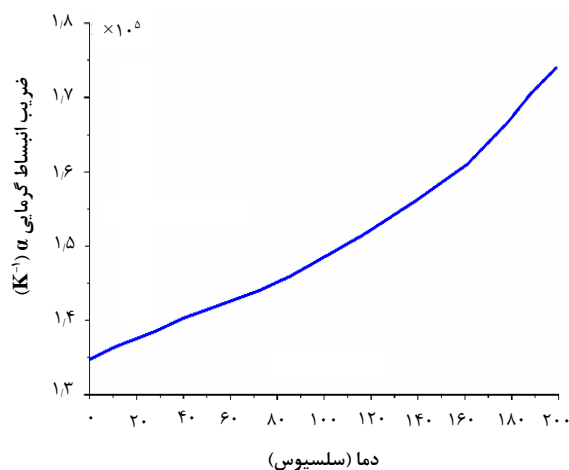
$$\Delta n_w(T) \times 10^5 = -8,741(T - 20^\circ\text{C}) - 0,1311(T - 20^\circ\text{C})^2 \quad (14)$$

به منظور اعتبارسنجی نتایج کسب شده در این کار با مدل چندجمله‌ای مرتبه دوم، تابع زیر بر روی داده‌های شکل ۶ برازش داده شده است:

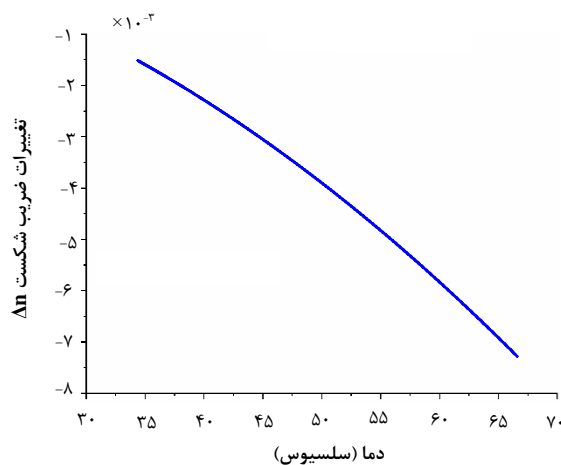
$$\Delta n_w(T) \times 10^5 = a(T - 20^\circ\text{C}) + b(T - 20^\circ\text{C})^2 \quad (15)$$



شکل ۵. داده‌های دمایی اندازه‌گیری شده از طریق دماسنج دیجیتالی.



شکل ۶. وابستگی دمایی ضریب انبساط گرمایی کوارتز، اکتباس شده از مرجع [۱۲].



شکل ۷. نمودار تغییرات دمایی ضریب شکست آب.

علاوه بر اندازه‌گیری‌های تجربی که توسط دیگران به انجام رسیده و در قسمت‌های فوقانی مورد بحث قرار گرفتند، در کار دیگری، آیزنبرگ [۹] نیز وابستگی تغییرات ضریب شکست آب به دما، چگالی جرمی و طول موج نوری را مورد بحث قرار داده است. در این کار نظری رابطه دمایی زیر برای تغییرات دمایی ضریب شکست آب ارائه شده است:

$$n = A\rho^B \exp(-CT) + 1 \quad (16)$$

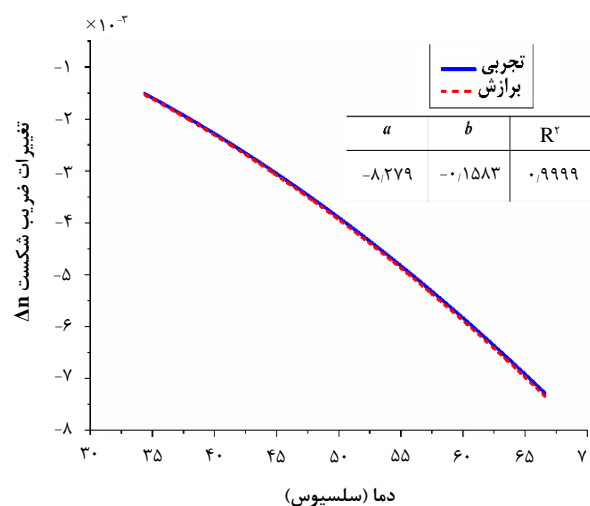
که در آن  $\rho$  چگالی جرمی آب و  $A$  و  $B$  و  $C$  مقادیری ثابت هستند. با استفاده از داده‌های ارائه شده در مرجع [۹]، مقادیر ثابت‌های  $A$ ،  $B$  و  $C$  به روش درون‌یابی به روش حداقل مربعات در طول موج لیزر هلیم-نئون مورد استفاده در این کار برابر با  $۰.۳۳۲۶۷۰۰$ ،  $۰.۹۷۵۲۲$  و  $۶.۷۰۵۳$  را به ترتیب برای ثابت‌های  $A$ ،  $B$  و  $C$  بر جای می‌نهد. با در نظر گرفتن چگالی آب برابر با یک، با استفاده از این ثابت‌ها در رابطه (۱۶)، وابستگی دمایی آب به دست آمده است. وابستگی دمایی آب به دست آمده بدین طریق در شکل ۹ نشان داده شده و با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در این کار مورد مقایسه قرار گرفته است.

در توجیه اختلاف موجود بین دو نمودار، باید این نکته را در نظر داشت که به علت وجود پاشندگی، ضریب شکست مواد وابسته به طول موج نور است. بنابراین با استفاده از نورهایی با طول موج‌های متفاوت برای اندازه‌گیری ضریب شکست، مقادیر متفاوتی حاصل خواهند شد. در کار آیزنبرگ، ضریب شکست آب با استفاده از نوری با طول موج  $۵۸۹.۳$  نانومتر و در این کار، مشابه با کار تجربی دابینز و پک، با استفاده از طول موج  $۶۳۲.۸$  نانومتر اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، در این کار چگالی جرمی آب دیونیزه مورد استفاده در آزمایشات اندازه‌گیری نشده است. بنابراین ممکن است تقریب در نظر گرفتن چگالی آب برابر با یک، تقریب خوبی برای رسم تغییرات دمایی ضریب شکست آب در شکل ۱۰ نباشد.

نتایج برازش به روش حداقل مربعات در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، مدل چندجمله‌ای درجه دوم به خوبی داده‌های تجربی به دست آمده در این کار را نیز توصیف می‌کند. مقدار  $R^2$  یا همان ضریب تشخیص را می‌توان به عنوان معیاری برای تشخیص کیفیت برازش مورد استفاده قرار داد. مقدار این کمیت هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، کیفیت برازش انجام شده بهتر است.

به منظور مقایسه بیشتر، تغییرات دمایی ضریب شکست آب با استفاده از رابطه (۱۲) استخراج شده و با تغییرات به دست آمده در این کار مقایسه شده است. شکل ۸، نتیجه مقایسه تغییرات دمایی ضریب شکست به دست آمده در این کار و کار انجام شده توسط دابینز و پک، رابطه (۱۲)، را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در تصویر مشخص است، تناظر به نسبت خوبی بین دو دسته اندازه‌گیری وجود دارد. فاصله گرفتن دو نمودار از یکدیگر در دماهای بالا را می‌توان نتیجه عدم کنترل دمایی سلول در این کار دانست. در این کار، آب ابتدا تا دمای پیشینه گرم شده و سپس به سلول اجازه داده شده است که به تدریج سرد شود. از آنجایی که آب در دماهای بالا سریع‌تر از دماهای پایین سرد می‌شود، اندازه‌گیری‌ها در دماهای بالاتر با سرعت بیشتر، و لذا با خطای بیشتری به انجام رسیده است. اما در دماهای پایین‌تر، سرعت سرد شدن کم‌تر، اندازه‌گیری‌ها با سرعت کم‌تر و لذا خطای اندازه‌گیری پایین‌تر بوده است.



شکل ۸. نتایج برازش مدل چندجمله‌ای مرتبه دوم بر روی نتایج تجربی.



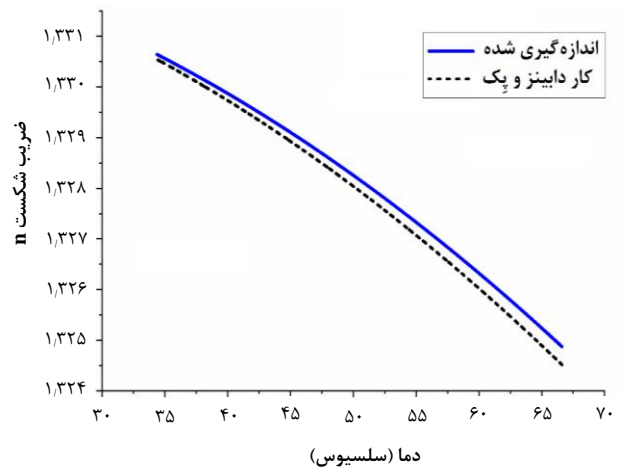
نتایج پیوسته ارایه شده در این شکل‌ها حاصل میانگین‌گیری نتایج سه آزمایش انجام شده مجزا هستند.

مطابق با آنچه که در مرجع [۱۱] مورد اشاره قرار گرفته است، مهم‌ترین منبع خطا در آزمایش‌های تداخل‌سنجی برای اندازه‌گیری ضریب شکست آب، ناهمگنی توزیع دمایی در داخل نمونه است. در این کار برای افزایش همگنی توزیع دمایی، به جای افزایش تدریجی دما از دماهای پایین‌تر، به نمونه آب اجازه داده شده است تا به تدریج از دماهای بالاتر به سمت دماهای پایین‌تر سرد شود. با این وجود، چون در دماهای بالاتر روند سرد شدن سریع‌تر از دماهای پایین‌تر است، احتمال شکل‌گیری ناهمگنی‌های دمایی در داخل نمونه آب در دماهای بالاتر محتمل‌تر خواهد بود. این نکته می‌تواند توجیهی برای فاصله گرفتن بین وابستگی دمایی‌های ضریب‌شکست اندازه‌گیری شده در این کار و کار تجربی دابینز و پک در دماهای بالاتر باشد (شکل ۹).

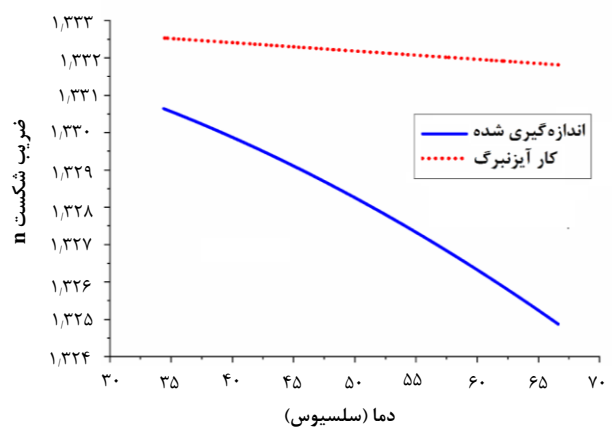
تحلیل خطای اندازه‌گیری‌ها با استفاده از روشی که در کار تجربی مشابه دابینز و پک نیز مورد استفاده قرار گرفته به انجام رسیده است. بدین منظور، میانگین تفاوت بین داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از طریق رابطه (۱۵)، به شکل زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\langle \delta_{\Delta T}(T_j) \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N [\Delta n_w(T_i)_{\text{exp}} - \Delta n_w(T_i)_{\text{calc}}] \quad (17)$$

که در آن  $N$  تعداد داده‌های ضریب‌شکست اندازه‌گیری شده در بازه دمایی  $\Delta T$ ،  $\Delta n_w(T_i)_{\text{exp}}$  مقدار اندازه‌گیری شده تجربی تغییر ضریب‌شکست از دمای مرجع تا دمای  $T_i$  در بازه  $T_j - \frac{1}{2}\Delta T < T_i < T_j + \frac{1}{2}\Delta T$  و  $\Delta n_w(T_i)_{\text{calc}}$  تغییرات ضریب شکست محاسبه شده از طریق رابطه (۱۵) بین دماهای مرجع و  $T_i$  است. شکل ۱۱ تغییرات کمیت  $\langle \delta_{\Delta T}(T_j) \rangle$  در بازه دمایی مورد استفاده برای اندازه‌گیری ضریب‌شکست در این کار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، خطای اندازه‌گیری در دماهای بالاتر بیش‌تر است. داده‌های ارایه شده در این شکل، نتیجه‌گیری پیشین در مورد وجود خطای اندازه‌گیری بیش‌تر در دماهای بالاتر، به دلیل وجود ناهمگنی دمایی در نمونه را تأیید می‌کند.



شکل ۹. مقایسه تغییرات ضریب شکست اندازه‌گیری شده در این کار با کار تجربی دابینز و پک [۱۱].



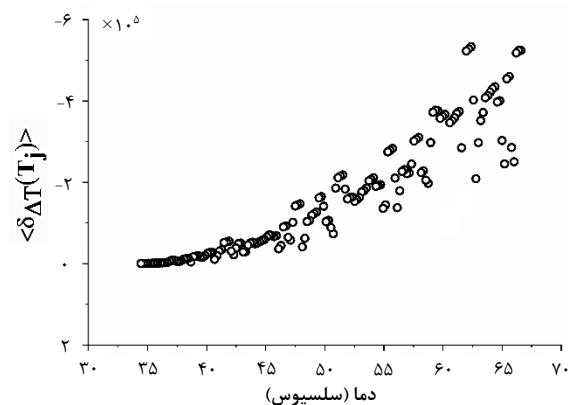
شکل ۱۰. مقایسه تغییرات ضریب شکست اندازه‌گیری شده در این کار با کار نظری آیزنبرگ [۹].

#### ۲.۴ تحلیل خطا

در این کار، دقت دماسنج مورد استفاده برای اندازه‌گیری دما برابر با ۰/۱ درجه سلسیوس و دقت میکرومتر مورد استفاده برای اندازه‌گیری طول سلول برابر با ۰/۰۱ میلی‌متر بوده است. اندازه پیکسل دوربین دیجیتال برابر با ۳/۷ میکرومتر و با در نظر داشتن عرض نوارهای تداخلی در حدود ۷۵ میکرومتر، دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی نوارهای تداخلی حدود ۰/۰۵ بوده است. همان‌طور که در مرجع [۱۱] ذکر شده است، استفاده از روش تداخل‌سنجی برای اندازه‌گیری وابستگی دمایی ضریب شکست، به منظور اندازه‌گیری در بازه‌های دمایی بسیار نزدیک و پیوسته است. در این کار نیز تصویر طرح نوارهای تداخلی توسط دوربین با نرخ ۲۵ هرتز ثبت شده و به همین دلیل نمودار شکل‌های ۴، ۵ و ۷ به صورت پیوسته ارایه شده‌اند.

## مراجع

1. G. Haddadi, M.B. Haddadi, M. Vardian, *Different Radiotherapy Methods: A Review. J. Fasa Univ. Med. Sci.* **2**, 235 (2013).
2. A. Beigzadehet al. Double-exposure holographic interferometry for radiation dosimetry: *A new developed model. Radiat. Meas.* **119**, 132 (2018).
3. A. M. Beigzadeh, M. R. Rashidian Vaziri, F. Ziaie, *Application of double-exposure digital holographic interferometry method for calculating the absorbed dose in poly(methyl methacrylate) environment. IJRSM* **5**, 51 (2017).
4. A. Beigzadeh, M. R. Vaziri, F. Ziaie, *Modelling of a holographic interferometry based calorimeter for radiation dosimetry. Nucl. Instrum. Meth. A* **864**, 40 (2017).
5. E. Flores-Martinez, M.J. Malin, L.A. DeWerd, *Development and characterization of an interferometer for calorimeter-based absorbed dose to water measurements in a medical linear accelerator. Rev. Sci. Instrum.* **87**, 114301 (2016).
6. L. Hubley et al. *Optical-Radiation-Calorimeter Refinement by Virtual-Sensitivity Analysis. Sensors* **19**, 1167 (2019).
7. A. Cavan, J. Meyer, in: *J. Phys. Conf. Ser. (IOP Publishing, 2013)*, pp. 012069.
8. A. Cavan, J. Meyer, *Digital holographic interferometry: A novel optical calorimetry technique for radiation dosimetry. Med. Phys.* **41**, 022102 (2014).
9. H. Eisenberg, *Equation for the refractive index of water. J. Chem. Phys.* **43**, 3887 (1965).
10. P. Hariharan, *Basics of interferometry*. 2nd ed. (Elsevier, 2007).
11. H. M. Dobbins, E. R. Peck, *Change of refractive index of water as a function of temperature. JOSA* **63**, 318 (1973).
12. I. Polyakova, *The main silica phases and some of their properties. Glass: Selected Properties and Crystallization*, 197 (2014).
13. L. Tilton, J. Taylor, *Refractive index and dispersion of distilled water for visible radiation, at temperatures 0 to 60 C. J. Res. Natl. Bur. Stand.* **20**, 419 (1938).
14. S. D. H. Andréasson, S. E. Gttstaesson, N.-O. Halling, *Measurement of the refractive index of transparent solids and fluids. JOSA* **61**, 595 (1971).



شکل ۱۱. تحلیل خطای اندازه‌گیری وابستگی دمایی ضریب شکست با استفاده از رابطه (۱۷).

## ۵. نتیجه‌گیری

در این کار به توصیف اندازه‌گیری تجربی ضریب شکست آب با استفاده از روش تداخل‌سنجی پرداخته شده است. با توسعه روابط نظری مورد نیاز، داده‌های تجربی به‌دست آمده مورد تفسیر قرار گرفته و وابستگی دمایی ضریب شکست آب در بازه دمایی ۳۴ تا ۶۶٫۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده، نتایج با کارهای تجربی پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج با کارهای تجربی پیشین نشان‌دهنده مطابقت مطلوب نتایج کسب شده است. نتایج ارایه شده در این کار را می‌توان برای کلیه کاربردهایی که در آن‌ها اطلاع از وابستگی دمایی ضریب شکست آب پیش‌نیاز است مورد استفاده قرار داد. هدف آتی این گروه کاری، ساخت نمونه اولیه یک دزیتر نوری برای باریکه‌های یونیزان، با استفاده از داده‌های ارایه شده در این کار برای وابستگی دمایی ضریب شکست آب است.