

ORIGINAL ARTICLE

**Post-processing of the camera images of the Holographic interferometric calorimeter system with water phantom under vertical and horizontal electron and proton beams irradiation( modeling)**

**Correspondence**

Email:

**How to cite**

**ABSTRACT**

The operation principle of calorimeters used for dosimetry of ionizing radiations is based on measuring the induced temperature difference in the adsorbent due to thermal energy deposition of the ionization radiation. In recent years, one of these methods has been the holographic optical calorimetry by laser beams. One of the problems that affect the response accuracy of the calorimeters is the heat transfer phenomenon in the adsorbent material. This phenomenon affects the measurement accuracy of the absorbed dose. In this research, a model was developed for the post-processing of camera images of the interferometric calorimeter system with a water phantom under vertical and horizontal irradiation with electron and proton beams.

**KEYWORDS**

Calorimetry, Ionization radiations, Response Post-Processing, Holography, Absorbed Dose.

فصلنامه علمی  
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

## پس پردازش تصاویر دوربین سیستم کالریمتر تداخل سنجی تمام‌نگاری با فانتوم آب تحت پرتو دهی عمودی و افقی با باریکه الکترون و پروتون (مدل سازی)

### چکیده

یکی از مهم‌ترین روش‌های دزیمتری تابش‌های یونساز بهره‌گیری از کالریمترهای تداخل‌سنجی تمام‌نگاری لیزری است. افزایش دمای ناشی از پرتوهای یون‌ساز به انرژی تحویلی، ظرفیت گرمایی ویژه ماده و جرم مورد استفاده به عنوان ماده فانتوم کالریمتر بستگی دارد. از جمله مسائلی که شدیداً بر روی دقت انواع کالریمترهای پرتوهای هسته‌ای استفاده‌شده موثر است، پدیده انتقال حرارت در ماده جاذب یا همان قلب کالریمترهای تداخل‌سنجی پرتوهای یون‌ساز است، که تأثیر مستقیمی روی سنجش دز جذبی دارد. در این پژوهش مدلی جهت پس‌پردازش تصاویر دوربین سیستم کالریمتر تداخل‌سنجی تمام‌نگاری با قلب آب تحت پرتو دهی عمودی و افقی با باریکه الکترون و پروتون توسعه داده شده است.

### واژه‌های کلیدی

کالریمتری، تابش‌های یونساز، پس‌پردازش پاسخ، تمام‌نگاری، دز جذبی.

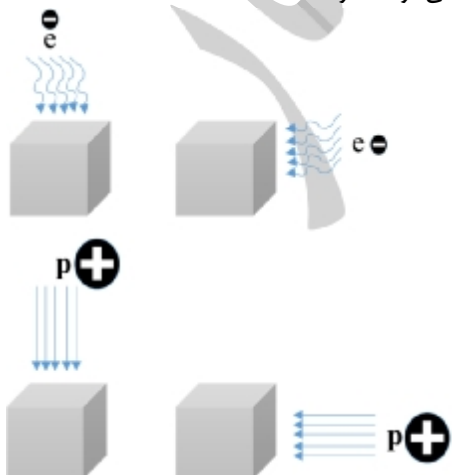
نویسنده مسئول:  
رایانامه:

استناد به این مقاله:

این مقاله در دو بخش اساسی ارائه می‌شود که در آنها با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، نحوه انتقال گرمای ایجاد شده در آب بررسی شده است. در بخش اول، ابتدا تابش پرتوهای الکترونی با انرژی 5 MeV از دو وجه جانبی و بالا را برای نمونه آب مورد تابش بررسی شده و تفاوت آنها با دقت مقایسه شده است. سپس با تغییر نوع تابش همین مسئله بررسی شده است. برای این منظور تابش از طریق پروتون‌هایی با انرژی 40 MeV انجام می‌شود. با حل معادلات انتقال حرارت بصورت تئوری نحوه تغییر دمایی سیستم تحت تابش شده است. در پژوهش‌های پیشین خروجی یا به عبارتی طرح‌های تداخلی سیستم کالریمتری تداخل‌سنجی مدل‌سازی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته شده است که توافق بسیار مطلوبی را با یکدیگر از نقطه نظر طرح تداخل ایجاد شده ناشی از پرتوهای یونساز و نیز پس‌پردازش حرارتی در تائیه‌های اول پس از پرتوگیری را نشان دادند. در این کار سیستم مدل شده و خروجی آن برای حالت پرتوگیری فانتوم آب از بالا و وجه کناری با باریکه‌های پرتون و الکترون بررسی شده است و خروجی آنها از نظر بحث انتقال حرارت و تغییر پاسخ کالریمتر در زمان‌های مختلف بررسی شده است.

### جزئیات محاسبات و شبیه‌سازی

محاسبات شبیه‌سازی به روش مونت کارلو برای جذب دز در آب به عنوان ماده جاذب در داخل نگهدارنده کوارتز به ابعاد  $3 \times 3 \times 3$  cm<sup>3</sup> انجام شده است. نحوه تشکیل و تغییر منحنی‌های هم دز و همچنین چگونگی فرآیند انتقال حرارت از جمله مواردی است که مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل ارائه شده (شکل 1)، ابتدا توزیع دز جذبی داخل محیط آب با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX برای یک چشمه تابش یونساز الکترونی و پروتونی به ترتیب با انرژی‌های 3 و 40 مگاالکترون‌ولت محاسبه می‌شود [13 و 15].



شکل 1. طرح استفاده‌شده برای محاسبه توزیع دز داخل سلول آب، e نماد الکترون و p نماد پروتون است.

دزیمتری روشی است که به وسیله آن میزان انرژی سپارش شده در مواد معادل با بافت مانند آب و نوع خاصی از گرافیت و پلیمرها در اثر تابش تعیین می‌گردد [1]. از مهم‌ترین روش‌های تعیین دز جذب شده در آزمایشگاه‌های استاندارد، اتافک‌های یونساز و سیستم‌های کالریمتری هستند [2]. در این میان، سیستم‌های کالریمتری مانند کالریمترهای آب و گرافیت برای تعیین دز جذب شده برای استفاده در پرتودرمانی استفاده می‌شوند [3]. افزایش دمای ناشی از تابش به انرژی تحویلی، ظرفیت گرمایی ویژه ماده و جرم تحت تابش بستگی دارد. در دزیمتری به روش کالریمتری، پس از جذب دز، انتقال حرارت با محیط اطراف پدیده‌ای است که بسیار مورد توجه است و از طریق این پدیده به دلیل تبادل گرما بین محیط و جسم جاذب، مقدار واقعی دز جذب شده در محیط تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

ثبت سه‌بعدی جبهه موج‌های نوری از طریق سیستم‌های تصویربرداری را روش تمام‌نگاری گویند و بر این اساس دو نوع تمام‌نگاری کلاسیک و دیجیتال مورد استفاده می‌باشد و تفاوت آنها در این است که در روش کلاسیک، ثبت موج نوری بر روی فیلم‌های حساس به نور و در روش دیجیتال بر روی دوربین‌های دیجیتال صورت می‌گیرد [4]. با وجود اهمیتی که این موضوع می‌تواند داشته باشد، یافتن منبعی که به بررسی اثر انتقال حرارت در کالریمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری پرداخته باشد، محدود و دشوار است. در این راستا مدل‌هایی نیز توسط افراد مختلف ارائه شده، اما به دلیل اینکه فرض‌ها و تقریب‌های ساده کننده زیادی در آنها به کار رفته قابل تعمیم نیستند. روش دیجیتال ابتدا در سال 1970 توسط هاسمن [5 و 6] و سپس توسط میلر [7] برای سنجش تغییرات دمایی ایجاد شده در اثر جذب تابش بکار گرفته شد. این کار با جایگزین شدن یک دیود نوری به جای فیلم حساس به نور توسط میلر و همکاران در سال 1975 [8] ادامه یافت. در سال 1988 لی<sup>1</sup> و گلدشتاین<sup>2</sup> اثر همرفت و نیز توزیع دما در آبی که به آن ذراتی برای افزایش رسانندگی الکتریکی افزوده شده بود و با یک صفحه برای تأمین انرژی داخلی آن گرم می‌شد را مورد بررسی قرار دادند [9] و با ادامه این مطالعات در سال 2017 سیستم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال به منظور اندازه‌گیری میزان تغییرات دمایی ناشی از جذب انرژی در ماده استفاده شد [10]. هدف از این مدل‌سازی‌ها بررسی اثر انتقال حرارت در اجسام جامد شفاف و معادل بافت مرسوم مورد استفاده در کالریمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری است [11-13].

به‌عنوان قلب اصلی کالریمتر) از نرم‌افزار حل المان محدود کامسول استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ماده جاذب سیال است، باید معادلات انتقال حرارت در محیط سیال (معادله ناویر استوکس) حل شود. رابطه (1) معادله گرمایی توصیف‌کننده انتقال حرارت با نام معادله انتقال حرارت رسانش گذرا است [14]:

رابطه (1) معادله گرمایی توصیف‌کننده رسانش با نام معادله انتقال حرارت رسانش گذرا است [11]:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن  $\dot{e}_{gen}$  آهنگ ثابت تولید گرما بر واحد حجم ماده جاذب با واحد  $\frac{W}{m^3}$  که یک پدیده حجمی است.  $\alpha$  ضریب پخش حرارتی نامیده شده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2)$$

که  $k$  ضریب هدایت گرمایی که در SI با واحد  $\frac{W}{m.K}$  است.  $\rho$  چگالی با واحد  $\frac{kg}{m^3}$  و  $c$  ظرفیت گرمایی ویژه با واحد  $\frac{J}{kgK}$  است. شرایط اولیه سیستم در شکل نشان داده شده است.

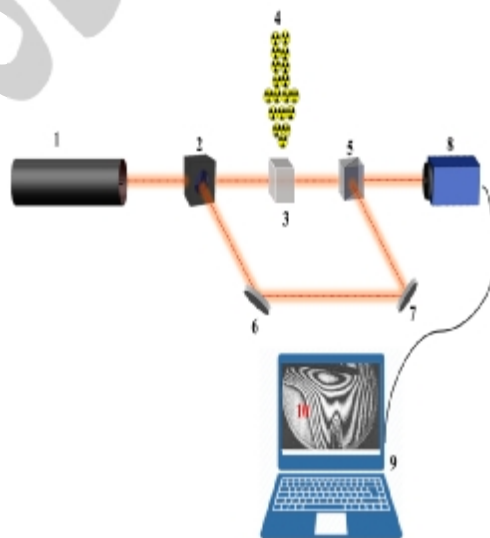


شکل 3. شرایط اولیه و مرزی حاکم بر سیستم

روش المان محدود پرکاربردترین روش برای حل مشکلات مدل‌های مهندسی و ریاضی است. برای حل مسئله به روش المان محدود از بسته نرم‌افزاری کامسول بهره برده شد. در این مدلسازی از ماژول انتقال حرارت در سیالات برای بررسی پدیده انتقال حرارت استفاده شد. شرایط مرزی حاکم دمای  $293.15 K$  محیط در نظر گرفته شده است (شکل 3). معادله انتقال حرارت رسانشی در آب برای پروفایل ایجاد شده در داخل ماده و برای زمان‌های 0، 20، 60 و 120 ثانیه حل شده و خروجی نیم‌رخ و نیز طرح تداخلی با استفاده از کد توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب ترسیم شد.

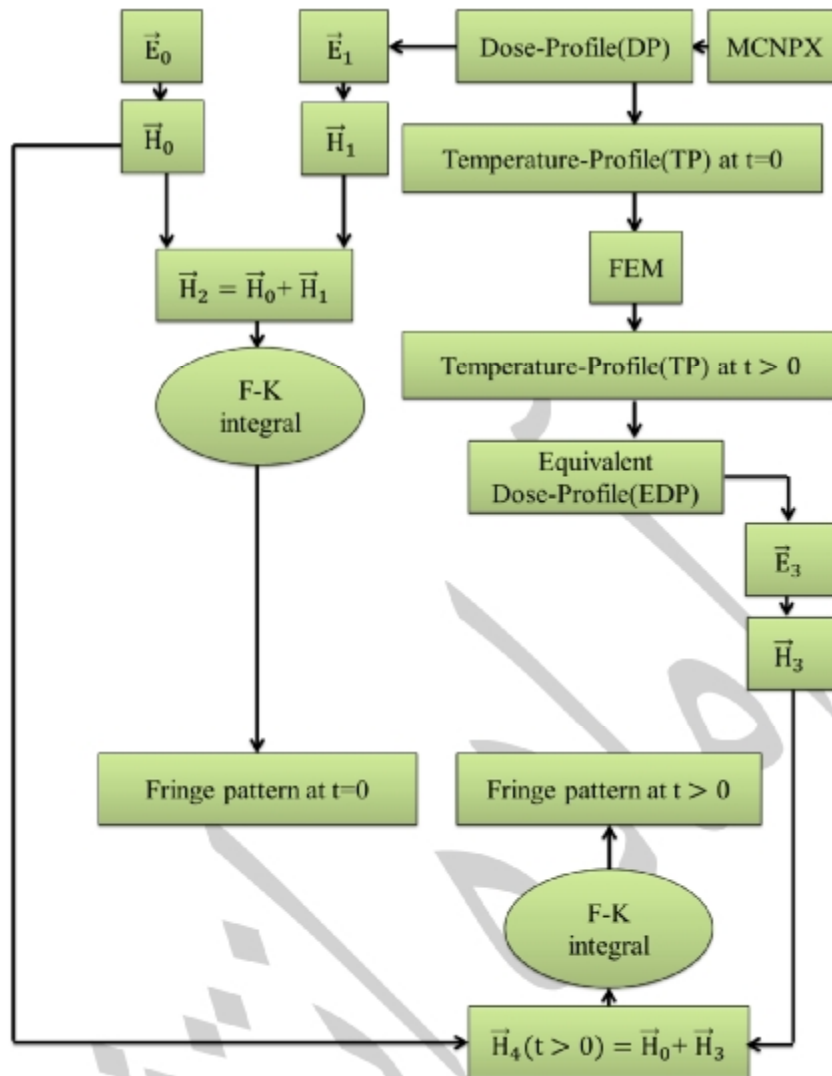
نحوه چیدمان تداخل‌سنج ماخ-زندر مورد استفاده در این پژوهش در شکل 2 نشان داده شده است. این تداخل‌سنج اغلب در کالریمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌های جذب دز در آب با استفاده از کد مونت‌کارلوی MCNP انجام شده است. نور در داخل ماده جاذب به دلیل جذب دز تغییر فاز داده و تمام روابط ریاضی مربوط به انتشار نور و این تغییر فاز از طریق برنامه‌های نوشته شده، در محیط متلب پیاده‌سازی شده است.

روش کامل مدل‌سازی این بخش و مقایسه و تطبیق نتایج مدل با نتایج تجربی به دست آمده از تحقیقات صورت گرفته توسط افراد دیگر به طور مفصل در مرجع [10] شرح داده شده است. پس از اطمینان از صحت کارکرد مدل، این مدل برای هندسه‌های مختلف بررسی شد و پس پردازش پاسخ سیستم مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار گرفت [16]، حال در این مطالعه مدل از نقطه نظر خروجی کالریمتر تمام‌نگاری تداخل‌سنجی برای باریکه‌های پروتونی و الکترونی که از وجه‌های جانبی و عمودی فانتوم را پرتو دهی می‌کنند مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل 2. اجزا و نحوه چیدمان مورد استفاده در مدلسازی کالریمتر تداخل‌سنجی تمام‌نگاری، (1) لیزر گازی، (2) باریکه شکن قطبشگر، (3) ماده تحت تابش (فانتوم یا قلب کالریمتر)، (4) تابش یونساز، (5) باریکه شکن ترکیب، (6 و 7) آینه‌ها، (8) دوربین CCD، (9) سیستم پردازش داده و (10) طرح تداخلی ایجاد شده در فانتوم

انتقال حرارت یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که در حضور دز تابش‌های یونساز می‌تواند برای ماده جاذب رخ دهد. از این رو برای بررسی نحوه انتقال حرارت در این ماده



شکل 4. طرحواره روش المان محدود، نحوه مدل‌سازی طرح‌های تداخلی ناشی از جذب دز در ماده

عددی استفاده شده است که نتایج به صورت نوارهای تداخلی است. نتایج به صورت نیم‌رخ دمایی، معادل با نیم‌رخ دز جذب شده در کالریمتر و نیز طرح‌های تداخلی ترسیم شده است که نماینده منحنی‌های هم دز ایجاد شده در ماده در زمان‌های مختلف پس از پرتودهی هستند.

### پرتودهی با الکترون 5 MeV از وجه کناری

هنگامی که ماده با پرتو الکترونی از وجه جانبی پرتو دهی می‌شود، نیم رخ دمایی سیستم از محل پرتودهی شروع به تغییر می‌کند. همان طور که در شکل 5 دیده می‌شود، با گذشت زمان دمای متمرکز در وجه جانبی کم کم شروع به پخش شدن کرده و به دلیل نیروی گرانشی موجود تا حدی نیز به سمت پایین حرکت می‌کند. اغتشاشات موجود در آب بر اثر تابش ابتدا به سمت بالای نمونه جابه‌جا شده و سپس به سمت پایین گرایش پیدا می‌کند.

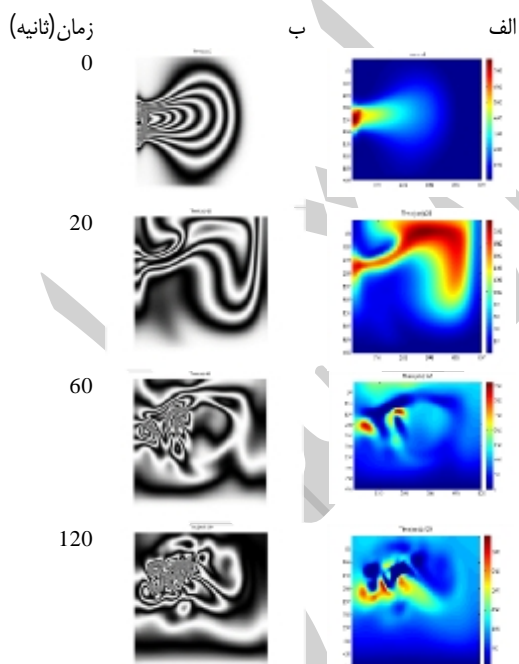
در طرحواره بالا روش تولید طرح‌های تداخلی در زمان‌های پس از جذب تابش یون‌ساز در ماده جاذب نشان داده شده است [12-14].  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_0$  به ترتیب میدان الکتریکی جبهه موج مرجع و شیئی ثبت شده بر روی دوربین و  $\vec{H}_0$  و  $\vec{H}_1$  تمام‌نگار اولیه و ثانویه قبل و پس از پرتودهی به ماده هستند. پارامتر  $D$  نیز بیانگر دز جذبی در ماده است [13].

### نتایج و بحث

چیدمان مشخص شده در شکل 2، برای تابش‌های الکترون و پروتون انجام شده است. انرژی پرتو الکترونی تابیده شده 5 MeV و انرژی پرتو پروتونی 40 MeV است. برای هر کدام از این تابش‌ها دو جهت‌گیری همانند شکل 1 (یکی از وجه بالا و دیگری از وجه جانبی) در نظر گرفته شد. برای بررسی اثر انتقال حرارت بر روی پاسخ کالریمترهای تداخل‌سنجی از روش المان محدود و همچنین روش حل

$q$  شار حرارتی،  $k$  رسانش حرارتی و  $\frac{dT}{dz}$  گرادیان دما در جهت عمودی است.

تأثیر بر انتقال حرارت: حرکت رو به پایین سیال با دمای کمتر و حرکت رو به بالا سیال گرمتر باعث افزایش انتقال حرارت در سیال می‌شود. این می‌تواند منجر به یکسان‌سازی سریع‌تر دما در طول زمان شود، اما در ابتدا، تفاوت دما قابل توجهی ایجاد می‌کند. به طور خلاصه، نیروی گرانشی سیال درون سلول کوارتز باعث می‌شود که سیال گرم‌تر و چگال‌تر بالا بیاید در حالی که سیال سردتر و متراکم‌تر لایه‌های پایین‌تر قرار می‌گیرد. این حرکت منجر به توزیع دمایی طبقه‌ای می‌شود، که دما در بالا متمرکز می‌شود و بر گسترش دمای کلی و دینامیک انتقال حرارت در سیال تأثیر می‌گذارد. تطابق کاملی بین نتایج محاسبات و آزمایش دیده می‌شود. همچنین با گذشت 120 ثانیه از زمان پرتودهی می‌توان بیان کرد که سیستم به تعادل گرمایی نمی‌رسد.



شکل 5. نیم رخ دز جذب شده برای تابش الکترونی 5 MeV از وجه جانبی الف) توزیع دمایی معادل توزیع دز در ماده جاذب و ب) نوارهای تداخلی ناشی از جذب دز در ماده که توسط دوربین کالریمتر ثبت و بازسازی شده است که نماینده نواحی هم دز در ماده تحت تابش یون ساز است.

نیروی گرانشی درون یک سیال، مانند نیروی سیال درون سلول کوارتز، نقش مهمی در حرکت گرادیان‌های دما و توزیع دمای کلی درون سیال دارد. نیروی گرانشی: نیروی گرانشی وارد بر یک عنصر سیال را می‌توان با این رابطه توصیف کرد [17]:

$$F_g = \rho \cdot V \cdot g \quad (3)$$

که  $F_g$  نیروی جاذبه،  $\rho$  چگالی سیال،  $V$  حجم عنصر سیال و  $g$  شتاب ناشی از گرانش است. نیروی شناوری و گرادیان دما: هنگامی که یک سیال گرم می‌شود، چگالی آن کمتر می‌شود و تمایل به بالا رفتن دارد، در حالی که سیال سردتر و متراکم‌تر پایین می‌رود. این پدیده با اصل ارشمیدس توصیف می‌شود و می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$F_b = \rho_{fluid} \cdot V_{displaced} \cdot g \quad (4)$$

که  $F_b$  نیروی شناوری است که بر سیال گرم شده وارد می‌شود [18].

همرفت: حرکت سیال در اثر اختلاف دما منجر به همرفت می‌شود. گرادیان دما باعث می‌شود سیال گرم‌تر و چگال‌تر بالا برود و سیال خنک‌تر و متراکم‌تر در پایین قرار گیرد. این را می‌توان با معادلات ناویر-استوکس توصیف کرد که بر حرکت سیال حاکم است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 u + g \quad (5)$$

که  $u$  سرعت سیال،  $P$  فشار،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی و  $g$  شتاب گرانش است.

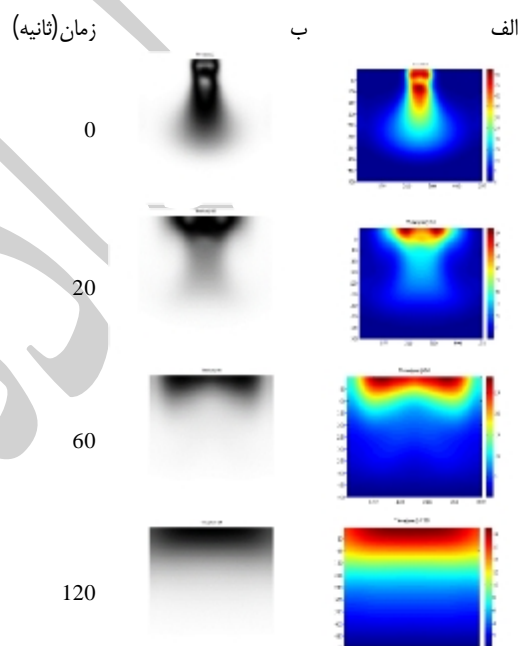
نیروی گرانش باعث افزایش سیال گرم‌تر می‌شود که منجر به غلظت گرما در بالای سلول کوارتز می‌شود. این منجر به توزیع غیر یکنواخت دما می‌شود که در آن دما در بالا بیشتر و در پایین پایین‌تر است.

لایه‌بندی<sup>1</sup> حرارتی: با بالا رفتن سیال گرم‌تر، یک پروفایل دمایی طبقه‌بندی شده ایجاد می‌کند. گرادیان دما را می‌توان با قانون هدایت گرما فوریه توصیف کرد:

$$q = -k \frac{dT}{dz} \quad (6)$$

## پرتو دهی با الکترون 5 MeV از وجه بالا

در شکل 6 نمایی از نیم رخ دمایی سیستم پس از تابش الکترونی از وجه بالا نشان داده شده است. از آنجایی که تابش پرتو از وجه بالا هم راستا با نیروی گرانشی وارد بر مولکول های آب است، توزیع دمایی سیستم پس از تابش دارای تقارن بوده و این تقارن با گذشت زمان تغییر نمی کند. همان طور که ملاحظه می شود، توزیع دمایی در ابتدا بصورت متمرکز در وجه بالایی بوده و سپس انتقال حرارت به سمت پایین و طرفین انجام می شود.



شکل 6. نیم رخ دز جذب شده برای تابش الکترونی 5 MeV از وجه بالا. الف) توزیع دمایی معادل توزیع دز در ماده جاذب و ب) نوارهای تداخلی ناشی از جذب دز در ماده که توسط دوربین کالریمتر ثبت و بازسازی شده است که نماینده نواحی هم دز در ماده تحت تابش یونساز است.

گرم شدن شیشه کوارتز در اثر جذب دز اثر بیشتری را در ناهمگنی نوارهای تداخلی پس از گذشت زمان نشان می دهد و این اتفاق زمانی که پرتو دهی از بالا صورت می گیرد کمتر است، زیرا سهم جذب دز توسط شیشه کوارتز کمتر شده است. نیروی گرانش بر روی مولکول های آب اثر می گذارد و باعث می شود که آب متراکم تر و خنک تر به لایه های زیرین رود در حالی که آب گرم شده و دارای چگالی کمتر بالا می آید. همانطور که تابش سطح بالایی فانتوم را گرم می کند، مولکول های آب در سطح انرژی می گیرند و انرژی جنبشی و

دمای آنها افزایش می یابد. این یک گرادیان دما بین لایه های بالایی و پایینی سلول ایجاد می کند. در زمان های اولیه پس از پرتو دهی از سطح بالا، توزیع متقارن دما شکل می گیرد، که لایه با بالاترین دما در سطوح بالایی سیال قرار می گیرد و به تدریج در عمق های بیشتر، کاهش می یابد. تقارن را می توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$T(z) = T_0 - \alpha z \quad (7)$$

که  $T(z)$  دما در ارتفاع  $z$ ،  $T_0$  دما در لایه بالایی و  $\alpha$  ثابتی است که نشان دهنده نرخ تغییر دما با ارتفاع است [19]. با گذشت زمان، گرمایش از بالا و نیروی گرانش باعث تشکیل سلول های همرفت می شود. آب گرم تر بالا می آید و آب سردتر به لایه های زیرین می رود که منجر به توزیع دما پویاتر و متقارن تر می شود. این فرآیند را می توان با معادلات ناویر-استوکس، که حرکت سیال و تغییرات دما را توضیح می دهد، توصیف کرد. با گذشت زمان، با رسیدن سیستم به حالت پایدار، توزیع دما به جای متقارن شدن، در لایه های هم دما از بالا به پایین چیده می شود. شیب دما در نزدیکی سطوح بالای فانتوم بیشتر و به سمت سطوح پایین کمتر می شود. این را می توان به صورت زیر نشان داد:

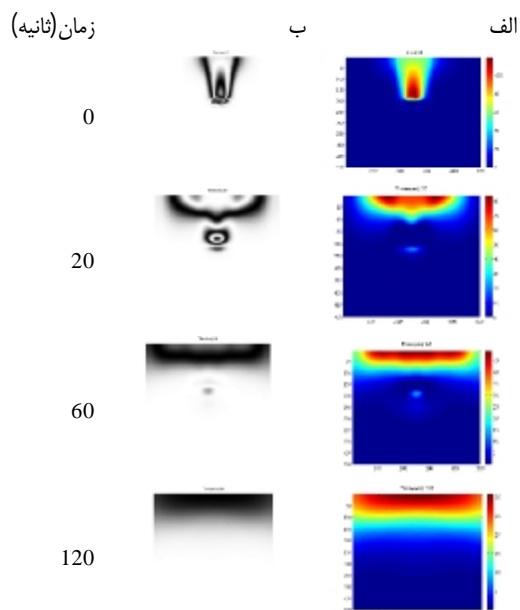
$$\frac{dT}{dz} \neq \text{constant} \quad (8)$$

که نشان دهنده تغییر در میزان کاهش دما با ارتفاع است. در نهایت، با نزدیک شدن سیستم به تعادل گرمایی، اختلاف دما کاهش یابد و منجر به توزیع یکنواخت تر دما می شود. با این حال، تقارن اولیه ایجاد شده توسط تابش از سطح بالایی توسط جریان های همرفتی و تأثیر گرانشی بر حرکت سیال، مختل می شود [20].

## پرتو دهی با پروتون 40 MeV از وجه کناری

همان طور که در شکل 7 دیده می شود، هنگامی که آب تحت تابش پروتون با انرژی بالاتر قرار می گیرد، برخلاف تابش الکترونی که توزیع دمایی ابتدا به سمت بالا و سپس به دلیل نیروی گرانشی به سمت پایین نیز منتقل می شود، در تابش پروتونی بخش دمایی بالایی آب، بصورت توده کوچکی است که با گذشت زمان ابتدا منتقل شده و سپس شروع به توزیع دما می کند. به دلیل انرژی بالاتر پروتون و همچنین تفاوت در نوع برهمکنش پروتون و الکترون با مولکول های آب، توزیع دمایی بالا به سرعت به سمت بالای نمونه منتقل شده و سپس پخش می شود.

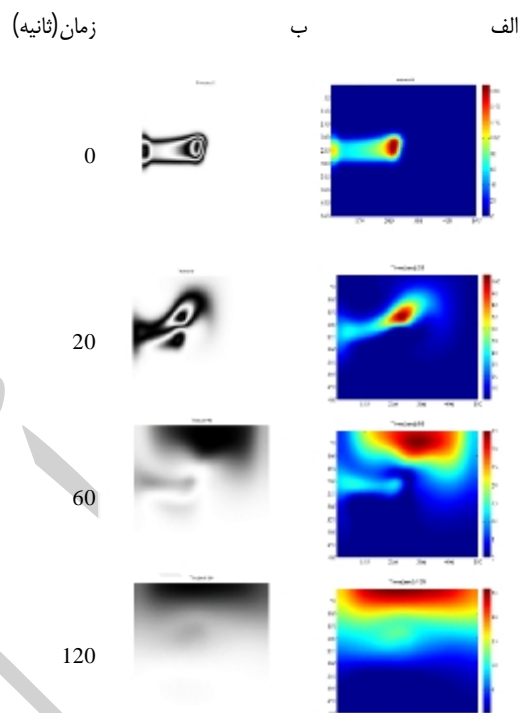




**شکل 8.** نیم رخ دز جذب شده برای تابش پروتونی 40 MeV از وجه بالا. الف) توزیع دمایی معادل توزیع دز در ماده جاذب و ب) نوارهای تداخلی ناشی از جذب دز در ماده که توسط دوربین کالریمتر ثبت و بازسازی شده است که نماینده نواحی هم دز در ماده تحت تابش یونساز است.

### نتیجه گیری

در این مطالعه‌ای به بررسی پس پردازش خروجی کالریمتر تداخل سنجی تمام‌نگاری تحت تابش عمودی و افقی با باریکه‌های الکترونی و پروتونی به صورت مدلسازی پرداخته شد. در این فرآیند اثر انتقال حرارت بر روی قلب با آب به روش کالریمتری تداخل سنجی تمام‌نگاری دیجیتال بررسی شد. برای این منظور از روش حل مسئله المان محدود و نیز نرم افزار متلب و کد توسعه داده شده در آن استفاده شد. اعتبارسنجی این مدل برای سایر هندسه‌ها در پژوهش‌های قبلی انجام شده است. نتایج نشان داد که طرح تداخلی نماینده منحنی‌های هم دز سیستم کالریمتری برای باریکه‌های الکترونی به سبب مسیر پر پیچ و خمی که آنها در داخل ماده طی می‌کنند در اندازه میدان تابشی یکسان با پروتون گسترده‌تر و پهن‌تر است و نیز به هم ریختگی و تغییر شکل طرح‌های تداخلی برای باریکه الکترون در زمان‌های پس از پرتو دهی بیشتر است به ویژه زمانی که پرتو الکترونی از وجه جانبی به ماده جاذب وارد شده باشد. انرژی بالاتر پروتون‌ها و برهم کنش آنها با مولکول‌های آب منجر به توزیع دمایی متمایز در مقایسه با الکترون‌ها می‌شود. در ابتدا، الکترون‌ها مشخصات دمایی یکنواخت تری ایجاد می‌کنند، در



**شکل 7.** نیم رخ دز جذب شده برای تابش پروتونی 40 MeV از وجه جانبی. الف) توزیع دمایی معادل توزیع دز در ماده جاذب و ب) نوارهای تداخلی ناشی از جذب دز در ماده که توسط دوربین کالریمتر ثبت و بازسازی شده است که نماینده نواحی هم دز در ماده تحت تابش یونساز است.

### پرتو دهی با پروتون 40 MeV از وجه بالا

میزان پخش شدگی توزیع دمایی برای تابش پروتونی از وجه بالا نسبت به تابش الکترونی از همین وجه تا حد زیادی مشابهند با این تفاوت که به دلیل انرژی بالاتر پرتو پروتونی و واگرایی کمتر آن در مسیر حرکت خود در درون ماده جاذب، میزان پخشیدگی توزیع دمایی ناشی از تخلیه انرژی آن کمتر است. با دقت در تمام تابش‌ها دیده می‌شود که اگر زمان کافی برای به تعادل رسیدن سیستم مهیا شود، به دلیل وجود نیروی گرانشی در نهایت انتقال حرارت به صورت توزیعی از بالا به پایین یعنی لایه‌های گرم‌تر به سبب چگالی کمتر در بالا و لایه سردتر به سبب چگالی بیشتر در قسمت پایین می‌شود که این پدیده در پرتو دهی از وجه جانبی با باریکه پروتون واضح است. بر این اساس نتیجه می‌گیریم که زمان لازم برای به تعادل رسیدن سیستم جهت انتقال حرارت، تنها برای تابش الکترونی از وجه جانبی بیشتر از 120 ثانیه است.



دگرگونی بیشتری در طرح تداخلی ایجاد می‌شود و در زمان 120 ثانیه تفاوت اساسی در آن نسبت به سایر حالتها مشاهده می‌گردد. شیشه کوارتز به دلیل چندین عامل کلیدی از قبیل ظرفیت گرمایی ویژه کم به آب، رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به آب، ساختار و چگالی متفاوت و... زمانی که در معرض جذب مقدار انرژی یکسان از هر منبع انرژی در اینجا تابش‌های یونساز قرار می‌گیرد، تغییرات دمایی قابل توجهی نسبت به آب نشان می‌دهد. نوارهای تداخل مشاهده شده در تداخل‌سنجی تمام‌نگاری، نتیجه برهم نهی هم‌دوس امواج نور است. هر گونه تغییر در طول مسیر نوری به دلیل انبساط حرارتی یا تغییرات ضریب شکست بر فاز امواج نور تأثیر می‌گذارد. ناهمگنی ایجاد شده در طول مسیر نوری ناشی از گرمایش موضعی کوارتز نسبت به سیال مجاور می‌تواند منجر به تغییرات در الگوی تداخل شود. این منجر به اعوجاج یا بی‌نظمی در نوارهای تداخلی می‌شود که می‌تواند به صورت جابه‌جایی نوارهای تداخلی، تغییر فاصله نوارهای تداخلی یا حتی ناپدید شدن نوارهای تداخلی در مناطق خاص ظاهر شود.

حالی که پروتون‌ها یک قله موضعی در عمق قله براگ ایجاد می‌کنند. با گذشت زمان، توزیع دما به دلیل مکانیسم‌های پخش حرارتی و ویژگی‌های منحصر به فرد سپارش انرژی از هر نوع ذره، به طور متفاوتی تغییر می‌کند. برای تابش الکترون، توزیع دما در نزدیکی سطح بالای فانتوم به دلیل اتلاف سریع انرژی و پراکندگی نسبتاً یکنواخت است. گرادیان دما کم است، و در عمق‌های بیشتر کاهش تدریجی دارد. برای تابش پروتون، توزیع دما با یک پیک در عمق مربوط به قله براگ مشخص می‌شود [21]. این منجر به افزایش دمایی موضعی بالا در آن عمق، با شیب دمایی بسیار تندتر در بالا و پایین این منطقه می‌شود. برای باریکه پروتونی به سبب وزن بیشتر این ذره واگرایی کمتری در طرح تداخلی دیده می‌شود ولی در نهایت پس از گذشت 120 ثانیه پس از پرتودهی، طرح‌های تداخلی برای سه حالت پرتودهی افقی و عمودی با پروتون و عمودی با الکترون شکل یکسانی به خود می‌گیرند. ولی برای باریکه الکترونی در پرتودهی جانبی به سبب انرژی پایین تر پرتو، تفاوت در برهمکنش و تخلیه حرارتی بدنه کوارتز به آب در زمان‌های پس از پرتودهی اعوجاج و

## References

- [1] F.H. Attix, Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, *John Wiley & Sons* 2008.
- [2] J. Seuntjens, A. DuSautoy, Review of calorimeter based absorbed dose to water standards, *Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry*, (2002) 37.
- [3] A. Krauss, The PTB water calorimeter for the absolute determination of absorbed dose to water in 60Co radiation, *Metrologia*, 43 (2006) 259.
- [4] Goodman JW, Lawrence RW. Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied physics letters*. 1967 Aug 1;11(3):77-9.
- [5] Hussmann EK. A holographic interferometer for measuring radiation energy deposition profiles in transparent liquids. *Applied optics*. 1971 Jan 1;10(1):182-6.
- [6] Hussmann EK, McLaughlin WL. Dose-distribution measurement of high-intensity pulsed radiation by means of holographic interferometry. *Radiation research*. 1971 Jul 1;47(1):1-4.
- [7] Miller A. Holography and interferometry in dosimetry. *Nukleonika*. 1979;24(9):907-25.
- [8] Miller A, Hussmann EK, McLaughlin WL. Interferometer for measuring fast changes of refractive index and temperature in transparent liquids. *Review of Scientific instruments*. 1975 Dec;46(12):1635-8.

## منابع

- [9] C. Ross, N. Klassen, K. Shortt, G. Smith, A direct comparison of water calorimetry and Fricke dosimetry, *Physics in medicine and biology*, 34 (1989) 23.
- [10] Beigzadeh AM, Vaziri MR, Ziaie F. Modelling of a holographic interferometry based calorimeter for radiation dosimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017 Aug 21;864:40-9.
- [11] Beigzadeh, A. M., Rashidian Vaziri, M. R., Ziaie, F. Application of double-exposure digital holographic interferometry method for calculating the absorbed dose in poly(methyl methacrylate) environment. *Journal of Radiation Safety and Measurement*, 2017; 6(4): 51-61
- [12] M. R. Rashidian Vaziri, A. M. Beygzadeh, F. Ziaei, Measuring the Absorbed Dose of Electron Radiation in Water Phantom Using Digital Holography Technique with a Laser Beam, *Nuclear Science & Technology Research Institute*, {2018}, 9(4).
- [13] D.B. Pelowitz, MCNPX User's Manual Version 2.5. 0, 76, *Los Alamos National Laboratory*, 2005.
- [14] Bergman, Theodore L., et al. Introduction to heat transfer. John Wiley & Sons, 2011.
- [15] A. Miller, W.L. McLaughlin." Holographic measurements of electron-beam dose

- distributions around inhomogeneities in water". *Phys Med Biol.* pp 285 1976.
- [16] Beigzadeh, A. M., et al. Double-exposure holographic interferometry for radiation dosimetry: A new developed model. *Radiation Measurements.* 2018 Dec 1;119:132-9.
- [17] Hou, Z., Guo, X., Liang, Z., Yang, K., Yang, C. and Wang, H.,. Improvement on numerical simulation of supercritical water flow in horizontal tubes: A buoyancy-tuned turbulent Prandtl number model. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 2024, 232, p.125928
- [18] Soldati, A. and Marchioli, C.,. Fluid Mechanics for Mechanical Engineers,2024. Springer.
- [19] Rizvi, S.S., 2024. Fluid Mechanics: Basic Concepts. In Food Engineering Principles and Practices: A One-Semester Course Cham: *Springer International Publishing,* 2024, (pp. 181-251).
- [20] Ramsey, A.S.,. Hydrostatics. *Cambridge University Press,* 2017.
- [21] Lourenço, A., Subiel, A., Lee, N., Flynn, S., Cotterill, J., Shipley, D., Romano, F., Speth, J., Lee, E., Zhang, Y. and Xiao, Z.,. Absolute dosimetry for FLASH proton pencil beam scanning radiotherapy, 2023. *Scientific Reports,* 13(1), p.2054