

## به کارگیری روش تداخل سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه برای محاسبه توزیع دز جذبی در پلیمر پلی‌متیل متاآکریلات

امیرمحمد بیگزاده<sup>۱</sup>، محمدرضا رشیدیان‌وزیری<sup>۲</sup> و فرهود ضیائی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.  
<sup>۲</sup> پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.  
<sup>۳\*</sup> تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶  
پست الکترونیکی: [fziaie@aeoi.org.ir](mailto:fziaie@aeoi.org.ir)

### چکیده

تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال به روش نوردهی دوگانه، روش نوری توانمند و پرکاربردی در زمینه اندازه‌گیری دقیق تغییرات ایجاد شده در کمیت‌های فیزیکی خاص نظیر چگالی، ضریب شکست و غیره است. در این مقاله برای برآورد میزان دز جذبی حاصل از باریکه الکترونی در محیط پلیمر پلی‌متیل متاآکریلات، این روش مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. با بهره‌گیری از این روش می‌توان پس از تفسیر طرح نوارهای تداخلی حاصله، منحنی‌های هم‌دز و منحنی دز-عمق را که کاربرد بسیاری جهت طراحی درمان و پایش میزان دز جذبی دارند را به دست آورد. نتایج محاسبات بیانگر قابلیت به‌کارگیری این روش نوری برای پایش برخط میزان دز جذبی حاصل از تابش پرتو، از طریق بررسی طرح نوارهای تداخلی شکل گرفته است.

**کلیدواژگان:** دزیمتری تابش، تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، پلیمرهای معادل بافت، پلی‌متیل متاآکریلات، تداخل‌سنج.

### ۱. مقدمه

مختلف برای ثبت تغییرات جزئی کمیت‌های فیزیکی، از قبیل تغییرات در ضریب شکست، دما، ارتعاشات و محتوای انرژی ماده به‌کار گرفته می‌شوند [۱]. یکی از کمیت‌هایی که می‌توان تغییرات آن را با استفاده از تداخل‌سنج‌های لیزری اندازه‌گیری کرد، انرژی سپارش شده در یک ماده تحت تابش است [۲ و ۳]. تغییر در محتوای انرژی یک ماده می‌تواند به سبب سپارش انرژی توسط انواع پرتوهای یونساز و غیر یونساز به ماده

در جهان علم و فناوری امروز، استفاده از باریکه‌های لیزری به‌عنوان منابع همدوس نوری روز به روز در حال گسترش است. یکی از کاربردهای برتر لیزر استفاده در دستگاه‌های تداخل‌سنجی نوری<sup>۱</sup> است. تداخل‌سنج‌هایی با چیدمان‌های

<sup>۱</sup> Optical interferometry

باشد. از جمله پرتوهای یون‌سازی که می‌توان میزان انرژی سپارش شده در مواد را توسط آن‌ها مورد بررسی قرار داد، پرتوهای پراثرژی الکترونی هستند که در صنعت پزشکی هسته‌ای و برای درمان تومورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه سرطان به یکی از علت‌های عمده مرگ و میر انسان‌ها در نقاط مختلف جهان تبدیل شده است [۴]. اگرچه بسیاری از سرطان‌ها را می‌توان از راه جراحی درمان کرد، اما گزینه‌های جایگزین با آسیب‌زایی کمتر، مانند فناوری‌های پیشرفته پرتودرمانی نیز در حال گسترش روزافزون هستند. پرتوهای الکترونی با خاصیت منحصر به فرد خود قادر به تحویل انرژی خود در یک فاصله مشخص بوده و با یون‌سازی در طول مسیر باعث بروز آسیب‌های کشنده در سلول‌های بدخیم می‌شوند. در هر حال نباید از نظر دور داشت که تابش نمی‌تواند سلول‌ها را از لحاظ بدخیم یا خوش خیم بودن تفکیک کند و از این‌رو تابش ممکن است در طول مسیرش منجر به تخریب و یا نابودی سلول‌های سالم نیز گردد. بنابراین آگاهی از نحوه توزیع انرژی سپارش شده در بافت نیاز اصلی و حیاتی طراحی درمان با استفاده از پرتوهای یون‌ساز الکترونی است [۵]. در اینجا چالش اصلی، تحویل و کمی‌سازی دقیق میزان انرژی سپارش شده در واحد جرم یا همان دز جذبی دریافت شده توسط بافت خواهد بود [۶]. استفاده از منحنی‌های هم‌دز روشی استاندارد برای طراحی درمان با استفاده از باریک‌های یون‌ساز است [۷و۵].

با ترکیب اطلاعات قابل‌دستیابی از این طرح اعم از منحنی‌های هم‌دز<sup>۱</sup> و نمودار توزیع دز-عمق<sup>۲</sup> می‌توان داده‌های مناسبی برای طراحی درمان به‌دست آورد. از آنجایی که محور مرکزی توزیع دز-عمق به خودی خود برای مشخصه‌یابی سه بعدی یک پرتو تابشی کافی نیست، به منظور بررسی تغییرات

حجمی یا سطحی توزیع دز، اطلاعات دز محور مرکزی با اطلاعات منحنی‌های هم‌دز، که خطوطی گذرنده از نقاط با مقادیر دز یکسان هستند، ترکیب می‌شوند. این منحنی‌ها اغلب در بازه‌های منظمی از دز جذب شده کشیده می‌شوند و به صورت درصد دز نسبت به یک نقطه مرجع بیان می‌شوند. بنابراین منحنی‌های هم‌دز بیانگر سطح دز جذبی بوده و خصوصیتی مشابه با منحنی‌های هم‌دما و هم‌فشار دارند. مقدار دز این منحنی‌ها یا نسبت به نقطه دز بیشینه واقع بر روی محور مرکزی یا نسبت به یک فاصله ثابت در طول محور مرکزی محیط تحت تابش به‌هنگار می‌شوند. نمودارهای دسته اول زمانی کاربرد دارند که بدون توجه به جهت تابش پرتو، فاصله چشمه تا سطح بدن برای درمان بیمار ثابت باشد. در نمودارهای گروه دوم، منحنی‌های هم‌دز نسبت به یک عمق خاص که بیشتر از عمق دز بیشینه و مطابق با محور چرخش یک واحد<sup>۳</sup> درمانی هم‌محور است به‌هنگار می‌شود [۵].

روش معمولی که برای دستیابی به طرح منحنی‌های هم‌دز مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از اتاقک‌های یونش در محیط معادل با بافت است [۵]. برای به‌دست آوردن منحنی‌های هم‌دز با استفاده از اتاقک‌های یونش، باید از دو اتاقک در داخل حجم محیط استفاده کرد. یکی از این اتاقک‌ها در محیط ثابت است و مقدار دز مرجع را ثبت می‌کند. اتاقک دیگر باید در امتداد عرض و عمق نمونه حرکت داشته باشد تا دز جذبی در نقاط مختلف را ثبت کند. از تقسیم داده‌های گزارش شده توسط دو اتاقک یونش، طرح منحنی‌های هم‌دز به‌دست می‌آید [۵]. استفاده از اتاقک‌های یونش در محیط معادل با بافت، که اغلب آب در نظر گرفته می‌شود، نیازمند عایق‌سازی آن‌ها در برابر نفوذ آب است. علاوه‌براین، ابعاد این اتاقک‌ها تفکیک فضایی اندازه‌گیری دز را محدود می‌سازد.

<sup>1</sup> Isodose curves

<sup>2</sup> Depth dose

<sup>3</sup> Unit

روشی جدید که برای اندازه‌گیری دز جذبی در محیط آب ارائه شده، بر استفاده از قابلیت سیستم‌های تداخل‌سنجی نوری در اندازه‌گیری دقیق میزان انرژی سپارش شده در محیط پایه-گذاری شده است [۸]. ترکیب این روش تداخل‌سنجی با قابلیت منحصربه‌فرد روش تمام‌نگاری نور<sup>۱</sup> در تصویربرداری و استخراج اطلاعات در سه‌بعد، امکان پایش سه‌بعدی میزان دز جذبی در محیط را مهیا می‌سازد. روش تداخل‌سنجی تمام-نگاری با نوردهی دوگانه<sup>۲</sup> در دو سبک کلاسیک، با استفاده از فیلم‌های حساس به نور و یا دوربین دیجیتال و پردازش اطلاعات در رایانه، برای دزیمتری تابش مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸-۱۱ و ۳]. اصل کلی اندازه‌گیری دز در این روش بر این پایه استوار است که به علت خاصیت همدوسی بسیار بالای امواج لیزری، هرگونه تغییری که باعث برهم خوردگی اندک این همدوسی شود را می‌توان به دقت با استفاده از یک لیزر و در قالب یک تداخل‌سنج اندازه گرفت. هاسمن نخستین فردی بود که در سال ۱۹۷۱ روش تداخل-سنجی تمام‌نگاری را برای دزیمتری تابش به کار برد [۲]. او از تحلیل طرح تداخلی به دست آمده در یک سلول تحت تابش باریکه الکترونی، منحنی‌های هم دز را استخراج کرد. این کار با کمی تغییر توسط میلر، هاسمن و مک لافلین در سال ۱۹۷۵ و برای منابع پرتوی با انرژی‌های مختلف به انجام رسید [۹]. کار بعدی در زمینه دزیمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری توسط میلر در سال ۱۹۷۶ به انجام رسید که اندازه‌گیری‌های اولیه‌ی هاسمن را با استفاده از تداخل‌سنجی تمام‌نگاری برای مشاهده نحوه تغییر دز در فصل مشترک بافت و استخوان ادامه داد. او در کار خود از یک سلول حاوی آب که در داخل آن یک گوی آلومینیومی بود بهره‌برد [۱۰]. او با استفاده از روش نوردهی دوگانه بر روی فیلم حساس به نور و با ثبت طرح

تداخلی پرتو الکترونی خروجی از یک شتاب‌دهنده الکترونی توانست طرح تداخلی را برای یک سلول شیشه‌ای محتوی آب به دست آورد. نخستین بار این ایده که طرح تداخلی به دست آمده می‌تواند بیانگر نواحی هم-دز در سلول تحت تابش باشد نیز در همین کار مطرح گردید. از آنجایی که در حالت واقعی منحنی‌های هم-دز غیرقابل مشاهده هستند، با استفاده از یک سیستم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال می‌توان طرح‌های تداخلی که نماینده نواحی هم دز هستند را به صورتی هم‌زمان با تابش پرتو یون‌ساز در داخل حجم ماده مشاهده کرده و از نحوه سپارش انرژی آگاه شد. با وجود مطرح شدن این ایده اولیه، تاکنون کار چندانی بر روی نحوه ارتباط میان طرح تداخلی نوری قابل مشاهده و منحنی نواحی هم-دز در روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال و کمی‌سازی این ارتباط به انجام نرسیده است. در این مطالعه مدلی برای شبیه‌سازی بر مبنای تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه برای دست‌یابی به طرح تداخلی نماینده منحنی‌های هم‌دز ناشی از یک چشمه الکترونی در پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات<sup>۳</sup> (PMMA) ارائه شده است. PMMA به سبب ویژگی معادل بافت بودن بسیار مورد توجه افراد در دزیمتری پرتوها بوده است [۱۵-۱۲]. در مدل ارائه شده ابتدا توزیع دز جذبی درون محیط پلیمر با استفاده از کد مونت‌کارلوی MCNPX برای یک چشمه الکترونی محاسبه شد. در ادامه با ارائه روابط نوری مورد نیاز و برنامه‌نویسی در محیط برنامه متلب<sup>۴</sup>، طرح نوارهای تداخلی<sup>۵</sup> حاصل از توزیع دز محاسبه شده توسط برنامه MCNPX به دست آمد. با استفاده از مدل ارائه شده، نشان داده شده است که چگونه می‌توان از طرح نوارهای تداخلی شکل گرفته و قابل مشاهده در روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری

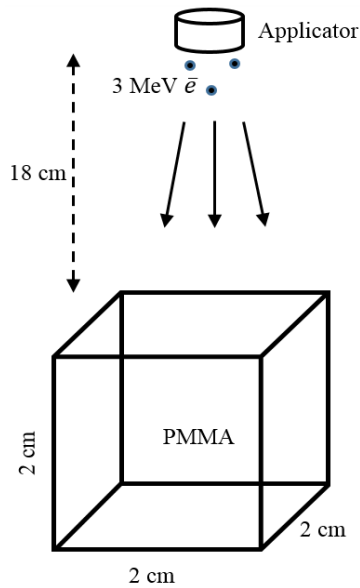
<sup>3</sup> Poly methyl meta Acrylate

<sup>4</sup> MATLAB

<sup>5</sup> Fringe pattern

<sup>1</sup> Optical holography

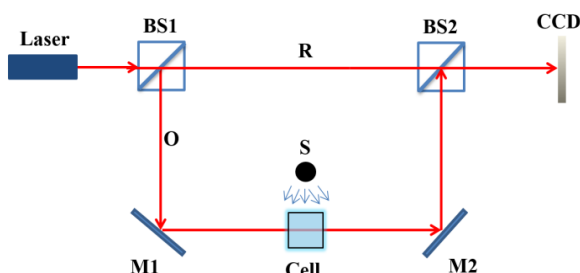
<sup>2</sup> Double-exposure holographic interferometry



شکل (۱): طرح مورد استفاده برای محاسبه توزیع دز داخل سلول PMMA با استفاده از کد MCNPX.

## ۲.۲. به دست آوردن طرح تداخلی

برای به دست آوردن طرح نوارهای تداخلی با استفاده از روش تداخل سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه، ابتدا باید روابط فیزیکی مربوط به انتشار، تغییر فاز جبهه موج لیزری، و تداخل امواج را برای شرایط مورد استفاده در این روش مورد بررسی قرار داد. شکل ۲ طرحی از یک سیستم تداخل سنجی ماخ زندر<sup>۱</sup> ساده را نشان می‌دهد که اغلب در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸].



شکل (۲): طرح یک تداخل سنج ماخ زندر. به ترتیب، BS1 و BS2، شکافنده‌های باریکه اول و دوم، M1 و M2 آینه‌های تخت اول و دوم، cell سلول، S منبع تابش الکترونی، R و O باریکه‌های مرجع و شیئی و CCD دوربین دیجیتال را نشان می‌دهند.

دیجیتال با نوردهی دوگانه، برای به دست آوردن مقادیر کمی دز جذبی و ارائه منحنی‌های هم‌دز و دز-عمق در نمونه استفاده کرد. نتایج بیانگر تطابق مطلوب میان اطلاعات دز جذبی اولیه محاسبه شده توسط برنامه MCNPX با اطلاعات بازیابی شده از طرح نوارهای تداخلی است.

## ۲. توصیف مدل

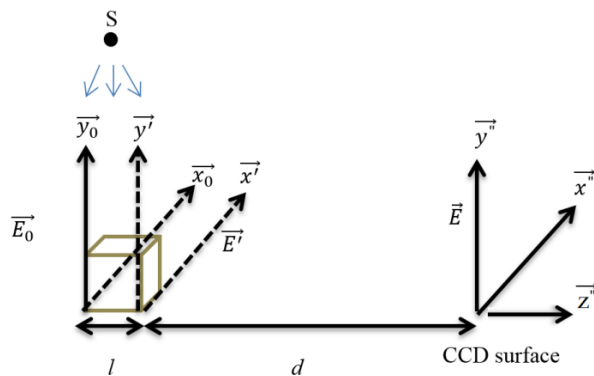
### ۱.۲. محاسبه توزیع دز جذبی در PMMA

در این مدل‌سازی ابتدا از کد مونت‌کارلوی MCNPX برای محاسبه توزیع دز جذبی در داخل یک سلول مکعبی از جنس PMMA به ابعاد  $2 \times 2 \times 2$  سانتی‌متر مکعب استفاده شد. برای این منظور توزیع دز برای یک چشمه الکترونی ۳ مگاالکترون ولتی که در فاصله ۱۸ سانتی‌متری از سطح بالای سلول قرار داشته است محاسبه شد. برای آن‌که امکان مقایسه نتایج مدل‌سازی انجام شده در این کار با آزمایش‌های تجربی پیشین فراهم شود، این فاصله با توجه به هندسه کار تجربی که پیش از این توسط میلر و همکارانش به انجام رسیده، انتخاب گردید [۱۰].

در این روش ابتدا با استفاده از دستور مش تالی، پروفایل دز یک چشمه الکترونی با انرژی ۳ مگاالکترون ولت در ماده پلی‌متیل‌متاکریلات محاسبه شد. در محاسبات از کارت TMESH با مش مکعبی پیش‌فرض سپارش انرژی مربوط به بخش داده‌های فوتو-اتمی کتابخانه ENDF/B-VI استفاده شد. در نهایت پروفایل دز ایجاد شده در ماده برای دستیابی به نوارهای تداخلی هم‌ارز به‌عنوان ورودی به الگوریتم نوشته شده در MATLAB منتقل گردید. شکل ۱ طرح مورد استفاده برای محاسبه را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Mach-Zehnder interferometer

به این منظور باید اختلاف فاز ایجاد شده در باریکه موج شیئی پس از عبور از داخل محیط تحت تابش را به دست آورده و انتشار آن تا رسیدن به سطح دوربین مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۳، طرح نمونه تحت تابش به صورت مکعبی و سیستم‌های مختصاتی مورد نیاز برای مدل‌سازی فیزیکی فرآیند نشان داده شده‌اند.



شکل (۳): طرحی از هندسه مورد استفاده برای دستیابی به طرح تداخلی.

صفحات جانبی مکعب در صفحات  $(x_0, y_0)$  و  $(x', y')$  قرار دارند. فرض می‌شود که یک موج تخت نوری  $E_0 = A_0 e^{ik_0 z}$  در راستای  $z$  در حال انتشار باشد. دامنه میدان  $k_0 = 2\pi/\lambda$  عدد موج است. این موج نوری از نمونه عبور کرده و به صورت میدان  $E'$  از آن خارج می‌شود. میدان  $E'$  سپس در فضای آزاد بین دو صفحه  $(x', y')$  و  $(x'', y'')$  به فاصله  $d$  منتشر شده و به صفحه حساس به نور دوربین می‌رسد. اگر مبدأ محور  $z$  در صفحه  $(x_0, y_0)$  در نظر گرفته شود، در این صورت جبهه‌ی موج مختلط خارج شده از نمونه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E' = A_0 e^{ik_0 n_0 l} \quad (1)$$

که در آن  $n_0$  ضریب شکست و  $l$  ضخامت نمونه است. رابطه‌ی ۲ در حالتی برقرار است که منبع تابش یون‌ساز خاموش بوده و تغییرات ضریب شکست ناشی از جذب تابش درون نمونه وجود نداشته باشد. این جبهه موج تغییر فاز

در این سیستم تداخل‌سنجی، ابتدا باریکه نوری خارج شده از لیزر توسط یک شکافنده‌ی باریکه<sup>۱</sup> به دو بخش تقسیم شده و سپس در دو بازوی<sup>۲</sup> مختلف تداخل‌سنج انتشار می‌یابد. در بازوی اول، باریکه‌ی مرجع<sup>۳</sup> پس از عبور از شکافنده‌های باریکه‌ی اول و دوم به صورت مستقیم به دوربین دیجیتال خواهد رسید. در بازوی دوم، پس از بازتاب باریکه شیئی<sup>۴</sup> از آینه اول و عبور از مکعب ساخته شده از جنس پلیمر به عنوان شیء در کار حاضر، از آینه دوم بازتابیده شده و پس از ترکیب مجدد با باریکه مرجع در شکافنده به دوربین دیجیتال خواهد رسید. دو باریکه روی سطح حساس به نور دوربین دیجیتال برهم‌نهی کرده و در صورت وجود اختلاف فاز بین آن‌ها، طرح نوارهای تداخلی را شکل خواهند داد. این تصویر توسط دوربین ثبت شده و برای رؤیت و پردازش‌های بعدی به رایانه منتقل می‌شود. آنچه که تاکنون شرح داده شد توصیف یک سیستم تداخل‌سنجی است که اغلب در تمام‌نگاری دیجیتال به کار گرفته می‌شود. در به کارگیری از سیستم تداخل‌سنجی به روش نوردهی دوگانه، دو تصویر دیجیتال از طرح‌های تداخلی که با نام تمام‌نگار<sup>۵</sup> نیز شناخته می‌شوند، توسط دوربین ثبت می‌گردند. یک تمام‌نگار در حضور منبع تابش الکترونی و تمام‌نگار دیگر در عدم حضور منبع مذکور در چیدمان نوری<sup>۶</sup> شکل ۲ ثبت خواهند شد. روش استفاده از این دو تمام‌نگار برای بازیابی اطلاعات دز تابشی و روابط فیزیکی مورد نیاز برای شکل‌گیری دو تمام‌نگار در بخش بعدی شرح داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اختلاف فاز بین دوباریکه‌ی مرجع و شیئی علت شکل‌گیری تمام‌نگار است.

<sup>1</sup> Beam splitter

<sup>2</sup> Arm

<sup>3</sup> Reference beam

<sup>4</sup> Object beam

<sup>5</sup> Hologram

<sup>6</sup> Optical setup

که در آن  $dn/dT$  با نام ضریب نور-گرمايي<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. تغییرات دمایی ضریب شکست منجر به تغییرات طول مسیر نوری<sup>۲</sup> خواهد شد. بنابراین میدان مختلط الکتریکی خارج شده از نمونه را در نوردهی دوم و در زمان روشن بودن منبع تابش یون‌ساز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E'(x', y') = A e^{ik_0 \int_0^l n(x', y', z) dz} = A e^{ik_0 n_0 l} e^{i\phi(x', y')} \quad (6)$$

که در آن  $\phi(x', y')$  بیانگر اختلاف فاز القا شده در جبهه موج میدان در اثر تابش یون‌ساز و جذب دز در درون ماده است:

$$\phi(x', y') = \frac{k_0}{c} \frac{dn}{dT} \int_0^l D(x', y', z) dz \quad (7)$$

زمانی که  $\Delta T(x, y, z)$  صفر باشد، معادله ۷ با معادله ۱ برای نمونه‌ی تابش ندیده یکسان خواهد بود. انتشار میدان بین صفحات  $(x', y')$  و  $(x'', y'')$  را مطابق با اصل هویگنس-فرنل<sup>۳</sup> می‌توان با انتگرال فرنل-کیرشهف توصیف کرد:

$$E_2(x'', y'') = -\frac{ik}{d} e^{ikd} e^{\frac{ik}{2d}(x''^2 + y''^2)} \times \iint dx' dy' E'(x', y') e^{\frac{ik}{2d}(x'^2 + y'^2)} e^{-\frac{ik}{2d}(x'x'' + y'y'')} \quad (8)$$

زیرنویس ۲ نشان‌دهنده میدان موج رسیده به صفحه نمایشگر پس از عبور از نمونه تحت تابش است. تمامی برنامه‌های ترابرد ذرات، توزیع دز را به صورت گسسته محاسبه می‌کنند. با دنبال کردن روابط ۴ تا ۸، می‌توان نتیجه گرفت که انتگرال پراش نیز به صورت گسسته خواهد بود:

$$E_2(m_1 \Delta x'', m_2 \Delta y'') = \frac{-ik}{d} e^{ikd} e^{\frac{ik}{2d}(m_1^2 \Delta x''^2 + m_2^2 \Delta y''^2)} \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{L=0}^{M-1} E'(k \Delta x', L \Delta y') e^{\frac{ik}{2d}(k \Delta x'^2 + L \Delta y'^2)} e^{-i2\pi(\frac{m_1 k}{N} + \frac{m_2 L}{M})} \quad (9)$$

دیگری برابر با  $k_0 d$  را در انتشار بین دو صفحه  $(x', y')$  و  $(x'', y'')$  به دست خواهد آورد:

$$E_1 = A_0 e^{ik_0(d+n_0 l)} \quad (2)$$

بنابراین زیرنویس ۱، مشخص‌کننده میدان موج نوری در صفحه مشاهده برای نمونه تابش ندیده است.

تمام‌نگار مربوط به نوردهی اول را می‌توان با استفاده از تداخل امواج نوری و مطابق با رابطه زیر به دست آورد:

$$H_1 = |E_1 + A_0| \quad (3)$$

حال فرض کنید که در دومین نوردهی، نمونه تحت تابش یون‌ساز قرار گیرد. از آنجا که تمام انرژی جذب شده در یک ماده در نهایت به انرژی گرمایی تبدیل خواهد شد، گرادیان دمایی در درون ماده شکل خواهد گرفت. این گرادیان دمایی با استفاده از معادله کالریمتریک زیر با میزان دز جذب شده در محیط در ارتباط است:

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{1}{c} D(x, y, z) \quad (4)$$

$(x, y, z)$  نشان‌دهنده مختصات داخل نمونه و  $\Delta T(x, y, z)$  بیانگر تغییر دما در هر یک از این مختصات است. بنابراین میزان تغییرات دمایی در ماده به میزان دز جذبی و ظرفیت ویژه گرمایی ماده بستگی دارد. همان‌طور که اشاره شد توزیع دز در داخل نمونه را می‌توان با استفاده از یک برنامه‌ی مونت‌کارلوی مناسب مانند کد MCNPX، محاسبه کرد. ضریب شکست یک ماده طبق رابطه‌ی زیر به تغییرات دما وابسته است:

$$n(x, y, z) = n_0 + \frac{dn}{dT} \Delta T(x, y, z) \quad (5)$$

<sup>1</sup> Thermo-optic coefficient

<sup>2</sup> Optical pathlength

<sup>3</sup> Huygens-Fresnel principle

### ۳.۲. بازیابی اطلاعات توزیع دز

به منظور بازیابی اطلاعات مربوط به دز جذبی، از سازوکار ذکر شده در مرجع [۱۸] استفاده شده است. به این منظور ابتدا نوارهای تداخلی روشن متوالی با عدد طبیعی  $m$  نمایه‌گذاری می‌شوند. سپس با استفاده از رابطه زیر مقادیر دز در مکان هر یک از این نوارهای تداخلی محاسبه می‌شود:

$$D \cong m \frac{c\lambda}{l \left( \frac{dn}{dt} \right)} \quad (11)$$

که در آن  $m$  نشان‌دهنده مرتبه نوار تداخلی<sup>۱</sup> است. با استخراج مقادیر دز از طریق رابطه ۱۱ می‌توان منحنی‌های هم-دز و دز-عمق را به‌دست آورد. علاوه بر این، با مقایسه این مقادیر تقریبی با مقادیر خروجی از برنامه محاسباتی MCNPX، می‌توان دقت تقریب به‌کار گرفته شده را مورد ارزیابی قرار داد.

### ۳. نتایج

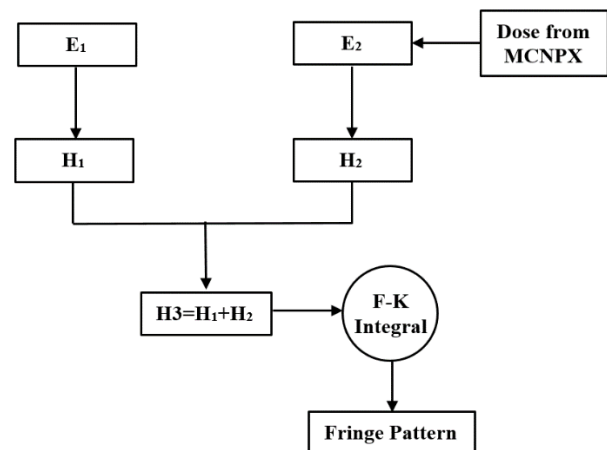
برای انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها، ابتدا باید مقادیر ثابت مورد نیاز در روابط ذکر شده را انتخاب نمود. در این کار، مقدار ضریب شکست پلیمر پلی‌متیل متآکریلات شفاف ۱/۴۹۰۸ در نظر گرفته شده است [۱۹].

مقادیر  $\frac{1}{C} \times 10^{-4} - [20]$  و ۱/۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب نیز به ترتیب برای ضریب نور-گرمایی و چگالی این پلیمر استفاده شده‌اند. لیزر انتخابی از نوع هلیوم-نون، که به علت کیفیت بالای باریکه اغلب در سیستم‌های تداخل‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد با طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر در نظر گرفته شد. میزان عبوردهی پلیمر پلی‌متیل متآکریلات در این ناحیه از طول موج بیش از ۹۰ درصد است [۲۱ و ۲۲]. در جدول ۱

که  $m_1, m_2$  و  $m_3$  مش‌های مربعی را در مختصات دکارتی  $m_1 \Delta x'$ ,  $m_2 \Delta y'$  و  $m_3 \Delta z$  مشخص می‌کنند. در رابطه ۹ فرض شده است که دز جذبی توسط برنامه ترابرد ذرات در  $N \times M \times P$  خانه و به‌صورت گسسته محاسبه می‌شود. بر اساس رابطه ۹،  $E_2$  را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های تبدیل فوریه سریع گسسته و به‌صورت عددی محاسبه کرد [۱۶]. زمانی که نمونه تحت تابش است تمام‌نگار مربوط به نوردهی دوم، را نیز می‌توان با استفاده از تداخل امواج نوری و مطابق با رابطه زیر به دست آورد:

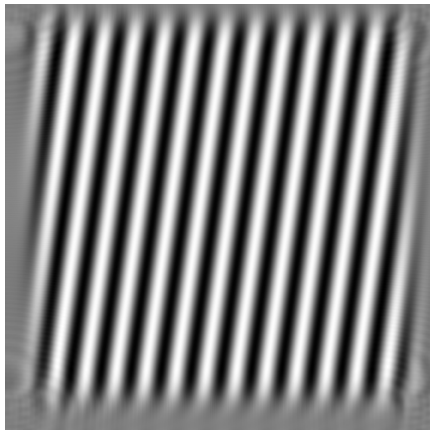
$$H_2 = |E_2 + A_0|^2 \quad (10)$$

طرح نوارهای تداخلی به‌دست آمده در آزمایش‌های تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه را می‌توان با محاسبه انتگرال فرنل-کیرشهف برای حاصل جمع دو تمام-نگار  $H_1$  و  $H_2$  محاسبه کرد [۱۷]. شکل ۴ درخت‌واره‌ی مراحل موردنیاز برای محاسبه طرح نوارهای تداخلی را نشان می‌دهد. برای پیاده‌سازی روابط این بخش و به‌دست آوردن دو تمام‌نگار در آزمایش‌های تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه، مطابق با روابط ۳ و ۱۰، و به‌دست آوردن طرح تداخلی از نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

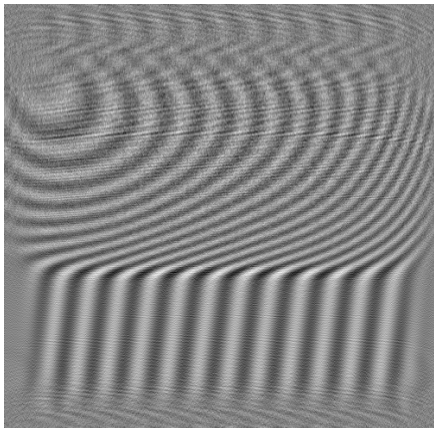


شکل (۴): درخت‌واره‌ی مراحل موردنیاز برای محاسبه طرح نوارهای تداخلی.

<sup>1</sup> Fringe order number



(الف)



(ب)

شکل (۵): تمام‌نگارهای الف) اول و ب) دوم، مربوط به پیش و پس از آغاز فرآیند تابش‌دهی با باریکه الکترون‌های ۳ MeV.

شکل ۶ الف طرح نوارهای تداخلی به‌دست آمده از ترکیب تمام‌نگارهای اول و دوم، مطابق با دستورکار ارائه شده در شکل ۴ را نشان می‌دهد. طرح نوارهای تداخلی به‌دست آمده شباهت بسیاری به طرح نوارهای تداخلی تجربی به‌دست آمده در کارهای پیشین دارد [۲۱ و ۲۲]. که نشان‌دهنده صحت محاسبات و مدل‌سازی انجام شده است. به‌منظور بررسی بیش-تر و مقایسه، در شکل ۶ ب طرح دز محاسبه شده توسط برنامه MCNPX نیز نمایش داده شده است. مقایسه شکل‌های ۶ الف و ۶ ب مزیت اصلی به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری با نوردی دوگانه در امر دزیمتری را نشان می‌دهد.

مقادیر ثابت‌های پلیمر پلی‌متیل متاآکریلات مورد استفاده در این کار درج شده است.

جدول (۱): مشخصات پلی‌متیل متاآکریلات.

نام ماده	پلیمر پلی‌متیل متاآکریلات
ضریب شکست در دمای °C ۲۰/۱	[۲۱] ۱/۴۹۰۸
گذردهی در طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر	[۲۲, ۲۳] بیش از ۹۰ درصد
ضریب نور- گرمایی	[۲۴] $\frac{1}{C} \times 10^{-4}$

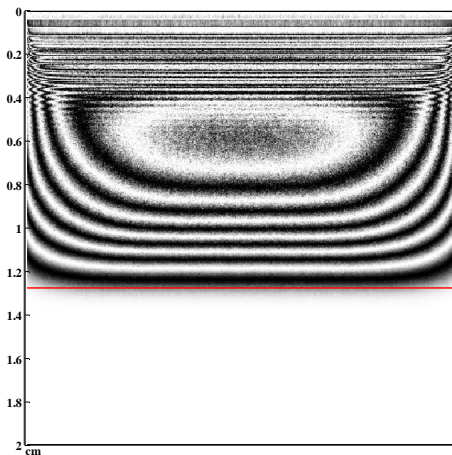
شکل‌های ۵ الف و ۵ ب تمام‌نگارهای به‌دست آمده به ترتیب پیش و پس از تابش‌دهی را نشان می‌دهد که بر اساس روابط ۳ و ۱۰ به‌دست آمده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نوارهای منظم و موازی شکل‌گرفته بر روی تمام‌نگار اول، پس از آغاز تابش‌دهی با باریکه الکترونی ۳ مگاالکترون ولتی، در تمام‌نگار دوم دچار تغییر شکل شده است. از این رو با بهره‌گیری از این روش می‌توان با تغییر میزان انرژی باریکه الکترونی نحوه تغییر شکل نوارهای تداخلی را مورد بررسی قرار داده و ظاهر فیزیکی تمام‌نگاری را به‌دست آورد.

سیستم‌های تداخل‌سنجی به‌عنوان ابزارهای اندازه‌گیری دقیق، نسبت به شرایط محیطی بسیار حساس بوده و باید پیش از شروع کار نسبت به تنظیم بودن کلیه اجزای آن اطمینان حاصل کرد.

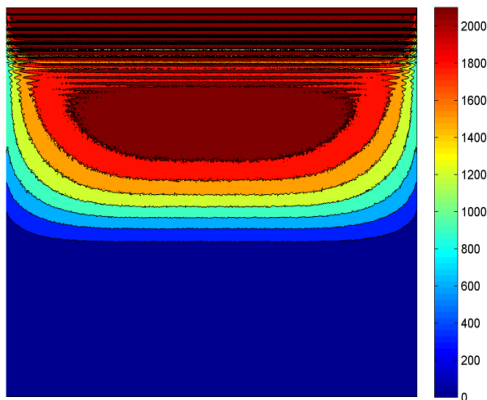
کار تنظیم و کالیبره کردن سیستم تداخل‌سنجی، فرآیندی زمان‌بر بوده و نیاز به دقت و تخصص فراوان دارد. از این رو استفاده از مدل ارائه شده در کار حاضر پیش از شروع آزمایش، می‌تواند در تنظیم سیستم تداخل‌سنجی و از این منظر که پیش و پس از تابش باریکه، انتظار ثبت و به‌دست آوردن چه نوع تمام‌نگاری وجود دارد بسیار سودمند باشد.



شده به دست آمده است. این موضوع در تطابق کامل با نتایج ارائه شده در مراجع است [۱۰].



(الف)



(ب)

شکل (۶): (الف) طرح نوارهای تداخلی و (ب) طرح نواحی هم‌دز.

۲- همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد برد الکترون‌ها در حدود ۱/۲۷ سانتی‌متر است. به منظور بررسی این موضوع برد الکترون‌های با انرژی ۳ مگا‌الکترون ولت با کد محاسباتی ESTAR نیز محاسبه شد. برد الکترون‌های محاسبه شده با خطی افقی در شکل ۶ الف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، برد الکترون‌ها با موقعیت مکانی آخرین نوار تداخلی تاریک قابل مشاهده، متنظر است. این نتیجه مهم می‌تواند در کاربردهای تجربی کمک شایانی به مشاهده پذیر کردن برد الکترون‌ها درون ماده داشته باشد. پیش از این در کار دوانی و همکارانش [۳] پیشنهاد داده شده بود که

نوارهای روشن و تاریک در طرح نوارهای تداخلی شکل ۶ الف بیانگر نواحی هم‌دز در شکل ۶ ب هستند. در روش تداخل سنجی تمام‌نگاری با نوردهی دوگانه، طرح نوارهای تداخلی نشان داده شده در شکل ۶ الف بر روی رایانه قابل مشاهده است.

بنابراین با مشاهده طرح نوارهای تداخلی می‌توان از نواحی و منحنی‌های هم‌دز در درون ماده که در هنگام اندازه‌گیری توزیع آن‌ها نامعلوم است، اطلاع پیدا کرد. در آزمایش‌های تجربی دو تمام‌نگار اول و دوم در شکل ۴ توسط دوربین دیجیتال ذخیره می‌شوند. به دست آوردن طرح نوارهای تداخلی مطابق با دستورالعمل این شکل نیز در کسری از ثانیه توسط رایانه‌های پرسرعت قابل انجام است.

بنابراین می‌توان به صورت هم‌زمان با تابش پرتو و با تغییر زمانی شرایط چشمه، تمام‌نگارها را ثبت و پردازش کرده و طرح نواحی هم‌دز را روی رایانه مشاهده کرد. این مهم مزیتی چشم‌گیر نسبت به استفاده از اتاقک‌های یونش جهت ثبت نواحی هم‌دز دارد که توصیف آن در بخش مقدمه ارائه شد. در گام بعد باید میزان دز جذبی در نواحی هم‌دز را از روی طرح نوارهای تداخلی استخراج کرد. در شکل ۷ مقدار دز بر حسب عمق روی محور مرکزی تابش نشان داده شده است.

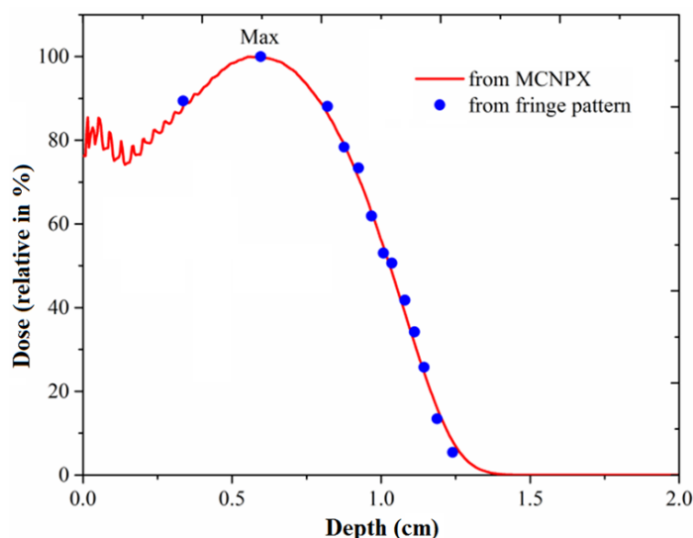
داده‌های رسم شده به صورت خط پیوسته مربوط به دز محاسبه شده توسط کد MCNPX روی خط مرکزی شکل ۶ ب، و داده‌های ارائه شده به صورت نقاط گسسته مربوط به داده‌هایی هستند که روی محور مرکزی شکل ۶ الف و با توجه به رابطه ۱۱ به دست آمده‌اند. هم‌خوانی مطلوب بین داده‌ها نشان‌دهنده دقت مناسب رابطه تقریبی ۱۱ در تعیین مقادیر دز-عمق است. با بررسی شکل ۶ نتایج مهمی استخراج می‌گردد:

۱- مقایسه بین شکل‌های ۶ الف و ۶ ب بیانگر منطبق بودن موقعیت مکانی نوارهای تداخلی با نواحی هم‌دز است که با محاسبه مستقیم توزیع دز و مقایسه آن با الگوی تداخلی ایجاد

در شکل ۷ نمودار دز-عمق این منحنی‌ها نسبت به نقطه دز بیشینه واقع بر روی محور مرکزی به‌هنگام، و سپس بر حسب درصد بیان شده است. مقدار بیشینه دز با توجه به نمودار به دست آمده در عمق ۵ میلی‌متری است. برای به‌دست آوردن مقدار دز در هر عمق، ابتدا دز در مش‌های هم‌ارتفاع در راستای تابش باریکه الکترونی با هم جمع و در نهایت مقدار دز در هر ارتفاع به مقدار دز بیشینه تقسیم شده است. خارج قسمت این تقسیم‌ها به درصد تبدیل و منحنی دز-عمق رسم شده است.

مکان آخرین نوار تداخلی در آزمایش‌های تداخل‌سنجی تمام-نگاری با نوردهی دوگانه می‌تواند معرف برد ذرات در درون ماده باشد. نتایج کار ما بیانگر صحت این ایده و مطابقت مکان آخرین نوار تداخلی با برد الکترون‌ها دارد.

۳- مقایسه بین شکل توزیع دز و طرح تداخلی ایجاد شده مزیت مهم کالریمترهای تمام‌نگاری تداخل‌سنجی را در تبدیل توزیع دز به الگوهای تداخلی قابل مشاهده و قابل تشخیص را که به راحتی می‌توان با استفاده از دوربین CCD آن‌ها را کنترل نمود نشان می‌دهد.



شکل (۷): منحنی دز-عمق برای باریکه الکترونی ۳ مگا الکترون‌ولتی در امتداد محور مرکزی. الف) خط پیوسته، دز به‌دست آمده از محاسبات MCNPX و ب) نقاط داده، دز به دست آمده از طرح نوارهای تداخلی.

#### ۴. نتیجه‌گیری

میزان دز جذب شده مورد نیاز هستند، با استفاده از طرح نوارهای تداخلی به‌دست آمده در این روش، مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روش ارائه شده، می‌توان میزان دز جذبی توسط تابش‌های مختلف در محیط‌های دیگر را نیز به‌دست آورده و برای کنترل حد بیشینه مجاز دز جذبی در شرایط عملی به‌کار گرفت.

نتایج به‌دست آمده از کار حاضر بیانگر مزیت چشم‌گیر روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه در تبدیل طرح دز جذبی در محیط پلیمری به طرح نوارهای تداخلی‌ای دارد که امکان مشاهده و پایش آن‌ها، هم‌زمان با فرآیند تابش‌دهی وجود دارد. روش به‌دست آوردن نواحی هم دز و منحنی دز-عمق، که برای طراحی فرآیند درمان و پایش

## ۵. مراجع

- [1] P. Lu, L. Men, K. Sooley, Q. Chen. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *Appl. Phys. Lett.* 94.13 (2009) 131110.
- [2] E.K. Hussman. A holographic interferometer for measuring radiation energy deposition in transparent liquids. *Appl. Opt.* 10(1971)182-186.
- [3] J.A. Devaney. The use of a holographic interferometer to measure absorbed energy distributions in water from pulsed electron beams. *Nucl. Instrum. Methods.* 120.1 (1974) 77-84.
- [4] WHO. WHO-Cancer. (2011) [cited 2011 9/52011].
- [5] F.M. Khan, J.P. Gibbons. Khan's the physics of radiation therapy. Lippincott Williams & Wilkins, (2014).
- [6] E.B. Pogorsak. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. IAEA, (2005).
- [7] E.C. Halperin, L.W. Brady, D.E. Wazer, C.A. Perez. Perez & Brady's principles and practice of radiation oncology. Lippincott Williams & Wilkins, (2013).
- [8] A. Cavan, J. Meyer. Digital holographic interferometry: A novel optical calorimetry technique for radiation dosimetry. *Med Phys.* 41.2 (2014).
- [9] A. Miller, E.K. Hussmann, W.L. McLaughlin. Interferometer for measuring fast changes of refractive index and temperature in transparent liquids. *Rev. Sci. Instrum.* 46 (1975) 1635-1638.
- [10] A. Miller, W.L. McLaughlin. Holographic measurements of electron-beam dose distributions around inhomogeneities in water. *Phys Med Biol.* 21.2 (1976) 285.
- [11] A. Miller, W. L. McLaughlin. Imaging and measuring electron beam dose distributions using holographic interferometry. *Nucl. Instr. Meth.* 128.2 (1975): 337-346.
- [12] B. Grosswendt. The angular dependence and irradiation geometry factor for the dose equivalent for photons in slab phantoms of tissue-equivalent material and PMMA. *Radiat Prot Dosim.* 35.4 (1991) 221-235.
- [13] M.E. Poletti, O.D. Goncalves, I. Mazzaro. X-ray scattering from human breast tissues and breast-equivalent materials. *Phys. Med. Biol.* 47.1 (2001) 47.
- [14] A.K. Jones, D.E. Hintenlang, W.E. Bolch. Tissue-equivalent materials for construction of tomographic dosimetry phantoms in pediatric radiology. *Med Phys.* 30.8 (2003) 2072-2081.
- [15] J.L. Chartier, B. Grosswendt, G.F. Gualdrini, H. Hirayama, C-M. Ma, F. Padoani, N. Petoussi, S. M. Seltzer, M. Terrissol. Reference fluence-to-dose-equivalent conversion coefficients and angular dependence factors for 4-element ICRU tissue, water and PMMA slab phantoms irradiated by broad electron beams. *Radiat. Prot. Dosim.* 63.1 (1996) 7-14.
- [16] J.W. Cooley, P.A. Lewis, P.D. Welch. The fast Fourier transform and its applications. *IEEE Trans. Edu.* 12 (1969) 27-34.
- [17] U. Schnars. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms. *JOSA A.* 11 (1994) 2011-2015.
- [18] E.K. Hussmann, W.L. McLaughlin. Dose-distribution measurement of high-intensity pulsed radiation by means of holographic interferometry. *Radiat. Res.* 47.1 (1971) 1-14.
- [19] G. Beadie, M. Brindza, R.A. Flynn, A. Rosenberg, J.S. Shirk. Refractive index measurements of poly (methyl methacrylate) (PMMA) from 0.4-1.6  $\mu\text{m}$ . *Appl. Opt.* 54.31 (2015) F139-F143.
- [20] L. Hongy, D.E. Day, J.O. Stoffer. Optical and mechanical properties of optically transparent poly (methyl methacrylate) composites. *Polym Eng Sci.* 32.5 (1992) 344-350.
- [21] M. Chahar, A. Vazid, K. Sushil. Spectral Investigations of Kiton Red-620 Doped Polymethylmethacrylate. *MSA.* (2012).
- [22] I. Jones, J. Rudlin. Process monitoring methods in laser welding of plastics. *Proceedings of the conference joining plastics.* (2006).