



ساخت و مشخصه‌یابی پوسته‌های پلی‌استایرنی برای هدف‌های گداخت لیزری

فهیمة رضازاده آذری، مرضیه ولی‌اقبال، بهاره زارع فارسانی، امیرحسین فرهبد*
پژوهشکده‌ی پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله، فعالیت‌های صورت گرفته به منظور ساخت پوسته‌های پلی‌استایرنی هدف به روش ریز کپسول‌سازی برای استفاده در گداخت لیزری بررسی شده است. ضروری است کپسول‌های هدف دارای ساختاری کاملاً کروی، متقارن و از نظر ترکیب شیمیایی عاری از هرگونه ناخالصی با توزیع عنصری مشخص باشند تا از ناپایداری‌های هیدرودینامیکی طی فرایند فشرده‌سازی هدف تا حد امکان کاسته شود. ضخامت دیواره و قطر پوسته‌های کروی ساخته شده به ترتیب $27 \pm 2 \mu\text{m}$ و $750 \pm 50 \mu\text{m}$ است. به منظور بررسی کیفیت پوسته‌ها و تعیین ضخامت و نایکنواختی دیواره‌ی آنها از روش تمام‌نگاری بر پایه‌ی تداخل‌سنج ماخ-زندر استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: گداخت محصورسازی اینرسی، ریز کپسول‌سازی، تمام‌نگار دیجیتالی میکروسکوپی

Fabrication and Characterization of Polystyrene Shells for Laser Fusion Targets

F. Rezazadeh Azari, M. Valieghbal, B. Zarefarsani, A.H. Farahbod*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran-Iran

Abstract: In this article, the activities to fabricate the polystyrene micro-shells by the microencapsulation method for laser fusion targets are presented. To reduce the Rayleigh-Taylor hydrodynamic instabilities in the process of target compression, the target requires a spherical symmetry, excluding any impurity with pre-defined elemental distribution. The polystyrene shells have wall thickness $27 \pm 2 \mu\text{m}$ and diameter $750 \pm 50 \mu\text{m}$, respectively. The transmission holographic Mach-Zehnder interferometer method has been utilized to characterize the micro-shell quality by measurement of the wall thickness and nonuniformity of the micro-shells.

Keywords: *Inertial Confinement Fusion (ICF), Microencapsulation (MEC), Digital Holographic Microscopy (DHM)*



۱. مقدمه

از مشخصه‌های این روش می‌توان به سادگی فناوری ساخت، امکان تولید انبوه محصول و مقرون به صرفه بودن اشاره کرد [۱]. ریزکپسول‌سازی بر پایه‌ی روش امولسیون چندتایی^(۵) استوار است. امولسیون‌های چندتایی نوآوری جدیدی در فناوری امولسیون هستند. این دسته از امولسیون‌ها برای ساخت ذرات و کپسول‌ها بسیار مناسبند [۲]. در این روش از سه فاز امتزاج‌ناپذیر برای آماده‌سازی ریزگره‌ها استفاده می‌شود، که دست‌یابی به پوسته‌های هم‌مرکز با گریت بالا را از طریق تنظیم چگالی امکان‌پذیر می‌سازد.

برای مشخصه‌یابی پوسته‌های گریت روش‌های گوناگونی وجود دارد. از آنجایی که هدف‌های ICF، ریزگره‌هایی با قطر کم‌تر از ۱ mm هستند، استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون با استفاده از روش‌های آنالیز PIXE^(۶)، RBS^(۷) و STIM^(۸) قادر به تصویربرداری از نحوه‌ی تغییرات چگالی نمونه‌ها برحسب عمق نمونه با قدرت تفکیک در حد میکرون و آشکارسازی ناخالصی و عناصر ناخواسته در حد ppm هستند. به کمک باریکه‌ی میکرونی پروتون (Micro-PIXE) می‌توان توان تفکیک را به میزان زیادی بهبود بخشید و تصویری دو بُعدی از سطح نمونه‌ی مورد بررسی و توزیع عناصر موجود در نمونه به دست آورد. هم‌چنین با استفاده از این روش می‌توان برای نمونه‌های نازک که باریکه‌ی یونی قادر به عبور از آن باشد، توزیع چگالی سطحی نمونه را برحسب عمق مطالعه کرد که به آن Micro-STIM گفته می‌شود. علاوه بر آن، استفاده از آشکارسازی ذرات برگشتی از نمونه که به صورت کشسان پراکنده می‌شوند یا روش Micro-RBS، اطلاعات مفیدی از توزیع عمقی عناصر تشکیل‌دهنده‌ی نمونه به دست می‌دهد [۳]. علاوه بر این، روش‌های اپتیکی برای مشخصه‌یابی هدف‌های گداخت لیزری مقرون به صرفه‌اند و تصاویری با کیفیت بالا به دست می‌دهند. از میان روش‌های اپتیکی می‌توان به تمام‌نگاری دیجیتالی اشاره کرد که در این پژوهش استفاده شده است [۴، ۵].

۲. مواد و روش‌ها

برای تهیه‌ی ریزگره‌های پلیمری، روش‌های متعددی وجود دارد که هر روش ویژگی منحصر به فرد و ملزومات آماده‌سازی

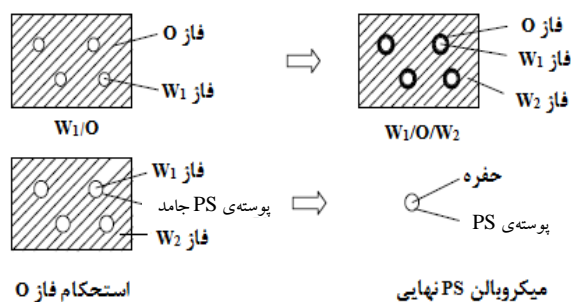
گداخت به روش محصورسازی اینرسی به کمک تابش‌های پرتو لیزر بر پایه‌ی متراکم‌سازی پوسته‌ی گریت غالباً پلیمری (کپسول هدف) حاوی مخلوط دوتریم-تریتم با نسبت‌های مولی برابر و با قطری از مرتبه‌ی ۱۰۰۰ میکرون ناشی از فشار کندگی سطح استوار است. لایه‌ی بیرونی کپسول از جنس عناصر با عدد اتمی پایین مانند کربن و یا عناصر سبک‌تر از آن است که سوخت DT را در دمای پایین‌تر از نقطه‌ی سه‌گانه در برمی‌گیرد. هم‌چنین پوسته‌ی هدف قابلیت نفوذ کوچکی در مقابل نیتروژن و اکسیژن دارد و با افزودن درصد پایینی از مواد با عدد اتمی بالا، تاری^(۱) آن کنترل می‌شود. یک هدف آرمانی برای گداخت اینرسی از گریت بالا، هم‌مرکز بودن لایه‌ها، همواری سطح و یکنواختی کامل برخوردار است تا ناپایداری‌های هیدرودینامیکی ریلی-تیلور طی فرایند متراکم‌سازی هدف به حداقل کاهش یابد.

هدف‌های تهیه شده از پوسته‌های شیشه‌ای با وجود استحکام و تقارن بالا و سطحی هموار، نفوذپذیری کم در مقابل گازها دارند، اما چگالی و جرم اتمی بالای عناصر تشکیل‌دهنده‌ی شیشه، زمان و دمای بالا برای سوخت‌رسانی به پوسته‌های شیشه‌ای، تعدد آزمایش‌های ممکن را محدود می‌سازند. به این دلیل، هدف‌هایی از جنس پلیمر با حداقل عدد اتمی میانگین مورد نظر است تا تولید الکترون‌های داغ به حداقل کاهش یابند. الکترون‌های داغ سبب پیش‌گرمایش لایه‌های درونی هدف و در نتیجه کاهش راندمان فرایند فشردگی سوخت می‌شوند. هم‌چنین نفوذ-پذیری بیش‌تر هدف‌های پلیمری سبب کاهش زمان سوخت-رسانی به هدف می‌شود. برای ساخت این هدف‌ها از روش‌های مختلفی از جمله برج سقوط تولید ریزگره (کوره گرمایی)^(۲)، روش ریزکپسول‌سازی^(۳) و روش قالب با قابلیت دی‌پلیمریزه شدن^(۴) به کار می‌رود.

برای ساخت ریزگره‌های پلیمری و فومی با قابلیت‌های بالا و طراحی بهینه، از روش ریزکپسول‌سازی در دو نوع ساده و کنترل شده بهره گرفته شده است. ریزکپسول‌سازی فرایندی است که در طی آن، ریزگره‌ها یا پوسته‌های گریت توخالی، حاصل می‌شوند.



شکل ۱. نمایش کلی ساختار سه فازي ریزگره‌ی به دست آمده از روش ریزکپسول‌سازی [۶].



شکل ۲. آماده‌سازی ریزگره‌های پلی‌استایرنی با استفاده از روش ریزکپسول‌سازی [۸].



شکل ۳. چیدمان آزمایشگاهی ساخت ریزگره‌های پلی‌استایرنی به روش ریزکپسول‌سازی.

۲.۲ نحوه‌ی آزمایش

برای ساخت ریزگره‌های پلی‌استایرنی به روش ریزکپسول‌سازی، به تهیه‌ی دو محلول با ماهیت آبی و یک محلول با ماهیت آلی نیاز است. فاز آبی اول (W_1)، شامل آب مقطر خالص (بدون امولسیفایر)، و فاز آبی دوم (W_2) شامل محلول پلی‌وینیل الکل در آب است. فاز آلی (O) شامل محلول پلی‌استایرن در مخلوطی از حلال‌های بنزن و ۲-دی‌کلرواتان است، به طوری که چگالی فاز O در حد ۱ حفظ شود. شایان ذکر است که هر دو فاز O و W_2 به ترتیب، با به کارگیری فیلترهای تفلونی (۰/۲ میکرونی) و سلولز استاتی (۰/۴۵ میکرونی) فیلتر می‌شوند تا هرگونه گرد و غبار، ناخالصی و ذرات ریز مزاحم در حین واکنش از آنها حذف شود.

روش کار به این صورت است که، ابتدا مقدار مشخصی از فاز آلی در ویال شیشه‌ای ریخته، و سپس فاز آبی W_1 به آن افزوده، و به مدت ۲۰min هم‌زده می‌شود تا امولسیون نسبتاً

خاصی دارد. روش‌های تهیه‌ی ریزگره‌های پلیمری عبارتند از: روش قطره مایع (کوره حرارتی با خوراک مایع)، روش قطره‌ای با ژل خشک (کوره‌ی حرارتی با خوراک ژل خشک)، روش خود مونتاژی، ریزکپسول‌سازی، و قالب‌گیری [۶].

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، در روش ریزکپسول‌سازی از سه فاز برای آماده‌سازی ریزگره‌ها استفاده می‌شود:

فاز W_1 : آب مقطر (آب و امولسیفایر)،

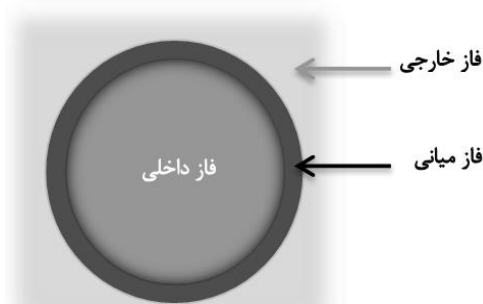
فاز O: محلول پلیمری (پلی‌استایرن محلول در بنزن و ۲-دی‌کلرواتان)،

فاز W_2 : آب مقطر و عامل تعلیق‌ساز (پلی‌وینیل الکل).

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سه فاز ذکر شده به ترتیب فازهای داخلی^(۹)، میانی^(۱۰) و خارجی^(۱۱) سازنده‌ی ریزگره را تشکیل می‌دهند که دیواره‌ی اصلی آن از جنس ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی فاز میانی است [۷]. فاز W_1 در فاز O با هم‌زدن پراکنده می‌شود تا امولسیون W_1/O تشکیل شود. سپس، مجموعه‌ی فوق به فاز W_2 افزوده می‌شود. محصول این فرایند، سیستم سه‌فازی $W_1/O/W_2$ است. مراحل تشکیل امولسیون سه‌گانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱.۲ چیدمان آزمایشگاهی

چیدمان مجموعه‌ی مورد نیاز برای ساخت ریزگره‌های پلیمری به روش ریزکپسول‌سازی، در شکل ۳ نشان داده شده است که شامل راکتور (ظرف شیشه‌ای دو جداره)، حمام ترموستاتیک، هم‌زن مکانیکی، هم‌زن شیشه‌ای (دوتیغه)، هیتر-مگنت، ترازوی دیجیتال، محلول‌های مربوط به فازهای آلی (O) و آبی (W_1 و W_2)، تجهیزات شیشه‌ای، حلال‌ها (۲-دی‌کلرواتان و بنزن) است.





یکنواخت

w_1/o تشکیل شود. لازم به ذکر است که سرعت دوران هم‌زن در لحظه‌ی افزایش w_1 به 90 تا 100 rpm و دمای محلول 25°C است. سپس امولسیون اولیه w_1/o را به فاز آبی w_2 که در دمای 25°C درون ظرف دوجداره توسط هم‌زن مکانیکی با سرعت دوران 70 rpm هم‌زده و اضافه می‌شود. امولسیون سه‌تایی $w_2/o/w_1$ که در حقیقت شامل تعلیق قطره w_1/o در محلول آبی PVA (پلی‌وینیل‌الکل) است، تشکیل می‌شود. شایان توجه است که به کارگیری و استفاده از عامل تعلیق‌ساز PVA (پلی‌وینیل‌الکل)، خود مانع کلاستر شدن و به هم چسبیدگی ریزگره‌ها می‌شود. بعد از پایداری نسبی امولسیون، دور هم‌زن تا دور نهایی مورد نظر کاهش داده، و برنامه‌ی دمایی حمام ترموستاتیک آغاز می‌شود تا به دمای نهایی مطلوب برسد. پس از گذشت 6 h و اتمام فرایند، ریزگره‌های تشکیل شده، جمع‌آوری و پس از شستشو با آب به آرامی به بشری محتوی آب مقطر منتقل می‌شوند و تدریجاً تا 40°C گرم و هم‌زده می‌شوند تا باقی‌مانده‌ی پلی‌وینیل‌الکل از سطح ریزگره‌ها شسته شود. ریزگره‌ها سپس برای شستشوی تکمیلی به بشر حاوی متانول منتقل می‌شوند. جای‌گزینی تدریجی حلال متانول با آب داخل ریزگره‌ها، از تخریب سطح ریزگره‌ها طی فرایند خشک شدن آنها جلوگیری می‌کند. پس از گذشت 24 تا 48 h از قرارگیری ریزگره‌ها در متانول به منظور خشک‌سازی نهایی، نمونه‌ها در دمای محیط داخل کریستالیزور به دور از گرد و غبار و آلاینده‌های محیطی قرار می‌گیرند.

با توجه به این که سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده پیوسته نیست، و به صورت batch است و فرایندها درون ظرف دو جداره یک لیتری انجام می‌شوند، آهنگ تولید در این جا قابل توجه نیست اما می‌توان گفت که در هر batch به طور متوسط حدود 100 تا 150 ریزگره با کیفیت لازم و حائز ارزش بررسی و مشخصه‌یابی تولید می‌شوند.

اگرچه در بسیاری از مقالات منتشر شده در زمینه‌ی ساخت ریزگره‌های پلیمری، از ماده‌ی فعال سطحی (امولسیفایر) به منظور پایداری بیش‌تر امولسیون و افزایش کارایی کیفی محصول بهره گرفته شده است [۹-۱۱]، در پژوهش حاضر، مزیت عمده و اصلی عدم استفاده از امولسیفایر، جلوگیری از ایجاد حفره در دیواره‌ی ریزگره (طی فرایند خشک‌سازی) و جلوگیری از کدر شدن آن است. از آن جا که تهیه‌ی ریزگره‌های شفاف با

کیفیت دیواره مناسب، مهم‌ترین هدف ما در پژوهش اخیر بوده است، به منظور دست‌یابی به این هدف، امولسیفایر حذف شده است و در غیاب امولسیفایر پایداری امولسیون‌ها از طریق هماهنگی و تنظیم بهینه‌ی دور نهایی هم‌زن، دمای پخت نهایی و تعداد پره‌های هم‌زن شیشه‌ای به کار رفته، جبران شده است.

لازم به ذکر است که به کارگیری امولسیفایر منجر به ایجاد حباب‌های هوای ناشی از خشک شدن قطرات آب به دام افتاده در دیواره ریزگره می‌شود که خود موجب کدر شدن آن می‌شود. علاوه بر آن، از آن جا که آب داخل ریزگره از طریق نفوذ خارج می‌شود و این امر برای مولکول حجیم امولسیفایر ممکن نیست، احتمال باقی ماندن امولسیفایر در داخل ریزگره وجود دارد.

از آن‌جایی که شواهد به دست آمده طی آزمایش‌های انجام شده با به کارگیری هم‌زن شیشه‌ای سه‌پره، دال بر نتایج هم‌چون کوچک‌تر شدن اندازه‌ی ریزگره‌ها، افزایش میزان تخریب نمونه‌ها و کاهش تعداد ریزگره‌های سالم بود، جای‌گزینی هم‌زن شیشه‌ای سه‌پره با نوع دوپره‌ی آن، منجر به کاهش احتمال برخورد پره‌های بیش‌تر طی فرایند ساخت می‌شود که این امر تا حد بسیار زیادی از تخریب ریزگره‌ها و ایجاد نمونه‌های دارای نقص ساختاری جلوگیری می‌کند.

گرفته‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته در راستای ساخت ریزگره‌های پلی‌استایرنی در جدول ۱ ارائه شده است.

طی فرایند ساخت ریزگره‌های پلی‌استایرنی (آزمایش‌های شماره‌ی ۱ تا ۴)، گرچه در ابتدا ریزگره‌هایی در ابعاد بزرگ (800 میکرون) نیز تشکیل می‌شوند اما این پوسته‌ها تا پایان کار به دلیل افزایش دما (در نمونه‌های آزمایش شماره‌ی ۱ و ۲) و دور بالای هم‌زن (در هر ۴ آزمایش)، پایدار و سالم باقی نمی‌مانند. بنابراین همان‌گونه که از شکل ۴ و داده‌های جدول ۱، مشخص است، با کاهش تدریجی دور نهایی هم‌زن، احتمال برخورد ریزگره‌ها با یک‌دیگر، پره‌های هم‌زن و دیواره‌ی ظرف کاهش می‌یابد. به دلیل حساسیت دیواره‌ی نازک ریزگره‌ها نسبت به برخورد، کاهش دور نهایی هم‌زن سبب کم شدن احتمال تخریب ناشی از برخورد می‌شود و تعداد بیش‌تری از ریزگره‌ها سالم و بی‌نقص باقی می‌مانند. هم‌چنین هر چه سرعت هم‌زن بیش‌تر باشد، قطر ریزگره‌های به‌دست آمده، کاهش می‌یابد. لازم به

هم‌زن و دمای پخت، به ترتیب، ۵۵ rpm و ۴۵°C است به منظور تعیین گرویت، اندازه‌گیری قطر، بررسی یکنواختی سطح و همگنی دیواره، نمونه‌ی شماره ۸ که نمونه‌ی ساخته شده تحت شرایط بهینه است، به کمک روش تمام نگاری دیجیتال میکروسکوپی با چیدمان ماخ-زندر عبوری بررسی شد [۱۲]، [۱۳]، داده‌های حاصل از مشخصه‌یابی به تفصیل در بخش ۳ بیان شده است.

۳. مشخصه‌یابی

مانع اصلی متراکم‌سازی متقارن و یکنواخت هدف در فرایند گداخت لیزری، ناپایداری‌های هیدرودینامیکی است. اختلالاتی که سبب این ناپایداری‌ها می‌شوند علل مختلفی دارند که مهم‌ترین آنها کیفیت هدف‌های ساخته شده است. از این رو لازم است که هدف‌های ساخته شده، کاملاً متقارن، و ضخامت دیواره‌ی آنها ثابت باشند. در این راستا مشخصه‌یابی هندسی هدف، نظیر عیوب سطح خارجی، ناهم‌مرکز بودن پوسته‌ها و نایکنواختی ضخامت دیواره از ضروریات لازم برای یک هدف مناسب به شمار می‌آید.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، از میان نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌ی شماره‌ی ۸ برای انجام آنالیزهای مشخصه‌یابی انتخاب شد. به دلیل حساسیت و شکنندگی، لازم است ریزگره با دقت بالایی به کمک چسب بر روی لوله شیشه مویینی به صورت پایه، نصب و استوار شود. به منظور پایش و اطمینان از سالم بودن نمونه‌ها، دوربین CMOS با تفکیک ۳ مگا پیکسل در محل چشمی میکروسکوپ نوری نصب شد. تصویر میکروسکوپی یکی از نمونه‌های ساخته شده (نمونه‌ی شماره‌ی ۸) در شکل ۵ نشان داده شده است.

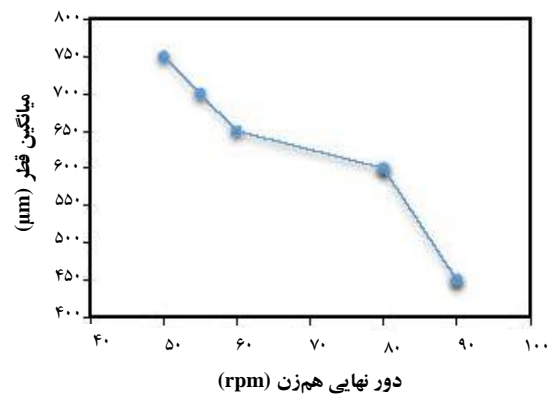
چیدمان بر پا شده برای تصویربرداری از ریزگره پلی-استایرنی، تداخل‌سنج ماخ-زندر عبوری است که در شکل ۶ نشان داده شده است. برای تشکیل طرح تداخلی، از باریکه‌ی لیزر پیوسته‌ی

هلیم-نئون غیرقطبیده با طول موج ۶۳۲٫۸ nm و توان ۲mw استفاده شد. دوربین CCD مدل (DFK1280x960HV) با اندازه‌ی پیکسل ۴٫۵۶ μm برای ثبت تصاویر به کار رفته است. باریکه‌ی لیزر به وسیله‌ی شکافنده‌ی پرتو به دو بخش تقسیم می‌شود تا امکان اجرای چیدمانی براساس ساختار تداخل‌سنج

ذکر است که دور نهایی هم‌زن، برای محلول $w_p/o/w_p$ ، باید از دور اولیه‌ی هم‌زن برای محلول w_1/o ، کم‌تر باشد در غیر این صورت اثر امولسیون اولیه را کاهش می‌دهد. زیرا هنگامی که سرعت هم‌زن از حدود مشخصی ۱۰۰rpm تجاوز نماید، امولسیون w_1/o تخریب می‌شود که این خود منجر به کاهش تعداد پوسته‌های توخالی و هدر رفت بیش‌تر مواد اولیه می‌شود. هم‌چنین کاهش بیش از حد دور هم‌زن منجر به تجمع پوسته‌ها بر روی هم و چسبندگی آنها می‌شود که خود زمینه‌ساز تخریب نمونه‌های ساخته شده خواهد بود.

جدول ۱. داده‌های تجربی ساخت ریزگره‌های پلی‌استایرنی

شماره‌ی آزمایش	میانگین قطر خارجی (μm)	دما °C	دور نهایی هم‌زن (rpm)
۱	۴۰۰-۵۰۰	۶۵	۹۰
۲	۴۰۰-۵۰۰	۷۰	۹۰
۳	۵۰۰-۷۰۰	۵۰	۸۰
۴	۵۰۰-۷۰۰	۴۵	۸۰
۵	۶۰۰-۷۰۰	۴۵	۶۰
۶	۶۰۰-۸۰۰	۴۵	۶۰
۷	۶۰۰-۸۰۰	۴۵	۵۵
۸	۷۰۰-۸۰۰	۴۵	۵۰

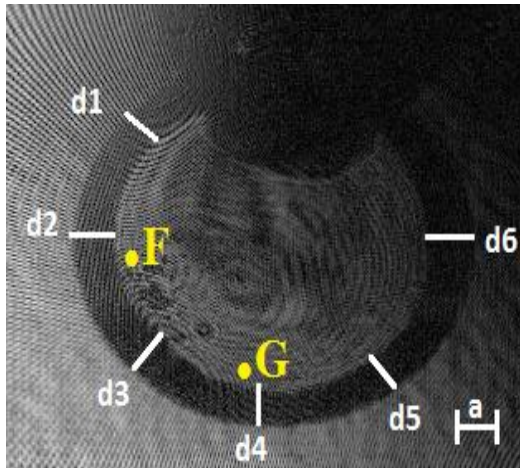


شکل ۴. نمودار تغییرات قطر میانگین برحسب دور نهایی هم‌زن.

فرآوری یا پخت، عنوان مرحله‌ای است که طی آن گرمایش تدریجی امولسیون $w_p/o/w_p$ به منظور حذف تدریجی حلال‌ها، تثبیت آهسته‌ی استحکام دیواره‌ها، حذف حفره‌ها از دیواره ریزگره‌ها و افزایش تعداد ریزگره‌های سالم صورت می‌گیرد. اگر دما از مقدار بهینه‌ی مشخص شده (۴۵°C) بیش‌تر شود، حلال‌ها سریع‌تر از داخل ریزگره‌ها تبخیر می‌شوند و در نتیجه منجر به تخریب دیواره می‌شوند. هم‌چنین اگر دمای پخت از مقدار بهینه کم‌تر باشد، منجر به طولانی‌تر شدن زمان پخت و بروز مشکلات بیش‌تر می‌شود. بنابراین مقادیر بهینه‌ی دور نهایی



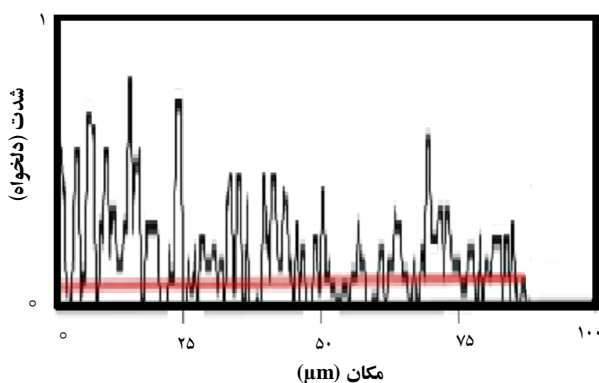
نایکنواختی در ضخامت پوسته در نقاط مختلف است [۱۴]. برای بررسی همگنی فضای داخل پوسته، نمودار تغییرات شدت برحسب مکان نیز رسم شد. در شکل ۸، نمودار تغییرات مکانی شدت از نقطه‌ی F(۷۷, ۱۲۵) تا G(۱۴۵, ۱۸۰) به فاصله‌ی ۸۷,۴۵ μm به کمک نرم‌افزار هولو ویژن رسم شده است. تغییر شدت در نقاط مختلف نشان‌دهنده‌ی ناهمگنی بخش مورد نظر است.



شکل ۷. ضخامت پوسته در مکان‌های d۱, d۲, d۳, d۴, d۵ و d۶ برحسب مقیاس $a=18\ \mu\text{m}$ و ناحیه‌ی بررسی همگنی نمونه از نقطه‌ی F تا G.

جدول ۲. ضخامت پوسته در شش مکان مشخص شده در شکل ۷

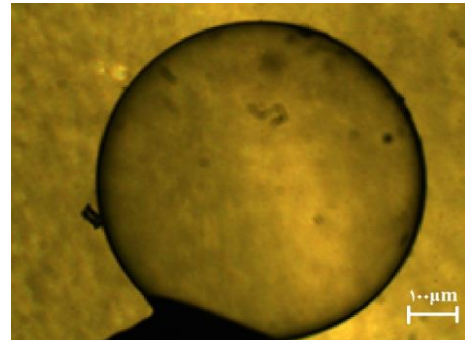
درصد نایکنواختی ضخامت پوسته	ضخامت پوسته ($\alpha=18\ \mu\text{m}$)	مکان
٪۱۳	۱,۱۳ a	d۱
٪۳۹	۱,۳۹ a	d۲
٪۲۱	۱,۲۱ a	d۳
٪-۴	۰,۹۶ a	d۴
٪۲۳	۱,۲۳ a	d۵
٪۴۵	۱,۴۵ a	d۶



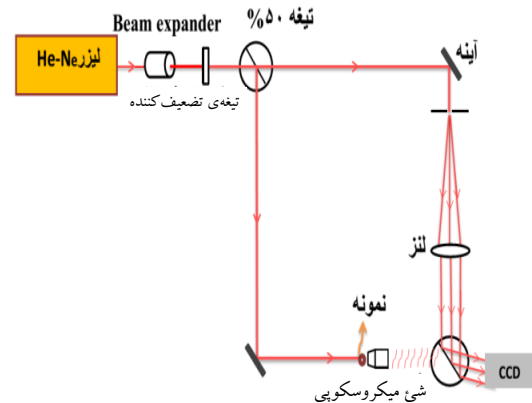
شکل ۸. نمودار شدت برحسب مکان از نقطه‌ی F تا G.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

ماخ-زندر را فراهم سازد. در بازوی جسم تداخل‌سنج، یک شیء میکروسکوپ در حالت عبور قرار دارد و طرح تداخلی دو جبهه-ی موج مرجع و جسم که یک تمام‌نگار عبوری از نمونه است پس از ثبت با دوربین به رایانه منتقل می‌شود.



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی شماره‌ی ۸



شکل ۶. چیدمان مورد استفاده برای تصویربرداری از هدف.

طرح تداخلی ثبت شده از طریق تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی در نرم‌افزار هولو ویژن^(۱۲) به روش فرنل، بازسازی شد. تصویر بازسازی شده‌ی نهایی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضخامت پوسته که در تصویر میکروسکوپی قابل تشخیص نیست، در تصویر بازسازی شده‌ی طرح تداخلی قابل مشاهده است و نشان‌دهنده‌ی برتری تصویربرداری به روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی در مقایسه با تصویربرداری ساده‌ی میکروسکوپی است. از آن‌جا که یکنواختی ضخامت هدف حائز اهمیت است، پس از بازسازی تصویر، ضخامت پوسته در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد. مقادیر به دست آمده و درصد نایکنواختی ضخامت پوسته در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل به طور متوسط حاکی از ۲۲,۸۳٪



1. Opacity
2. Drop Tower
3. Microencapsulation
4. Depolymerizable mandrel (PAMS-GDP)
5. Multi Emulsion
6. Proton-Induced X-Ray Emission
7. Rutherford Backscattering Spectrometry
8. Scanning Transmission Ion Microscopy
9. Internal Phase
10. Surrounding Phase
11. External Phase
12. Holography

مراجع

- [1] L. Zhang, Y. Dan, G. Dang-zhong, T. Yong-jian, Z. Young-ining, W. Shu-huai, Fabrication of deuterated solid ICF target, *High Power Laser and Particle Beams* **11(5)** (1999) 605-608.
- [2] T. D. Boone, Overview of modeling efforts in support of microencapsulated polymer mandrel formation, *J. Moscow Phys. Soc.* **8** (1998) 79-86.
- [3] A. J. Antolak, A. E. Pontau, D. H. Morse, D. L. Weirup, D. W. Heikkinen, M. Cholewa, G. S. Bench, G. J. F. Legge, Ion microtomography and particle-induced X-ray emission analysis of direct drive inertial confinement fusion targets, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10** (1992) 1164-1169.
- [4] T. P. Bernat, D. H. Darling, and J. J. Sanchez, Applications of holographic interferometry to cryogenic ICF target characterization, *J. Vac. Sci. Technol. A* **20** (1982) 1362-1365.
- [5] D. Gabor, Microscopy by reconstructed wavefront, *Proc. R. Soc. Lond. A* (1948) 454-487.
- [6] C. Lattaud, Synthesis of low density foam shells for inertial confinement fusion experiments, (27 Septembre 2011), Thèse, Institut de Chimie Moléculaire de l'Université de Bourgogne (ICMUB).
- [7] W. S. Wei Bin, A review of recent progress in preparation of hollow polymer microspheres, *Petroleum Science* **6(3)** (2009) 306-312.

با توجه به بررسی‌های انجام یافته در زمینه‌ی ساخت ریزگره‌ها و پژوهش‌های به عمل آمده در راستای تولید انبوه ریزگره‌های پلیمری برای اهداف ICF، ریزکپسول‌سازی از نظر کیفیت و مقرون به صرفه بودن، روشی کارآمد است. در این پژوهش ریزگره‌هایی از جنس پلی‌استایرنی به روش ریزکپسول‌سازی ساخته شده‌اند. اگرچه در بسیاری از مقالات منتشر شده در زمینه ساخت ریزگره‌های پلیمری از ماده‌ی فعال سطحی (امولسیفایر) به منظور پایداری بیش‌تر امولسیون و افزایش کارایی کیفی محصول بهره گرفته شده است [۹-۱۱]، در پژوهش حاضر، مزیت عمده و اصلی عدم استفاده از امولسیفایر، جلوگیری از ایجاد حفره در دیواره‌ی ریزگره (طی فرایند خشک‌سازی) و کدر شدن آن است. از آن‌جا که تهیه‌ی ریزگره‌های شفاف با کیفیت دیواره‌ی مناسب، مهم‌ترین هدف در فعالیت اخیر بوده است، به منظور دستیابی به این هدف، امولسیفایر حذف شده است، و در غیاب امولسیفایر، پایداری امولسیون‌ها از طریق هماهنگی و تنظیم بهینه‌ی دورنمایی هم‌زن، دمای پخت‌نهایی و تعداد پره‌های هم‌زن شیشه‌ای به کار رفته، جبران شده است.

یکی از نتایج به دست آمده، تأثیر آشکار کاهش دمای نهایی پخت بر پایداری ریزگره‌های در ابعاد بزرگ‌تر است که براساس مشاهدات حاصل از آزمایش، دمای پخت بهینه 45°C به دست آمد. هم‌چنین کاهش تدریجی دور اولیه‌ی هم‌زن و پایین بودن مقدار دور نهایی آن، تأثیر به‌سزایی در جلوگیری از تخریب ریزگره‌ها و حفظ نمونه‌های بزرگ‌تر دارد. پس از طی مراحل ساخت ریزگره، از روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی با چیدمان ماخ-زندر عبوری برای مشخصه‌یابی ریزگره‌های پلیمری استفاده شد. تمام‌نگار پس از ثبت در CCD توسط نرم-افزار هولووژن بازسازی شد. اندازه‌گیری ضخامت پوسته در نقاط مختلف تصویر بازسازی شد. به طور متوسط 22.83% نایکنواختی در ضخامت پوسته را نشان می‌دهد. هم‌چنین ثابت نبودن (منطبق نبودن بر خط ثابت قرمز شکل ۸) تغییرات شدت برحسب مکان از نقطه‌ی F تا G نشان از ناهمگنی نمونه در این فاصله دارد.

پی‌نوشت‌ها



- doped polystyrene shells via emulsion Techniques, *Fusion Sci. Technol.* **49(1)** (2006) 74-78.
- [10] Pei-jun Cai, Yong-jian Tang, Fabrications of iron (III) oxide doped polystyrene shells, *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** (2004) 419-421.
- [11] Uichi Kubo, Hitoshi Nakano, and Hyo-gun Kim, Fabrication of cross-linked polymer shells for inertial confinement fusion experiments, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15(3)** (1997) 683-685.
- [12] V. Micó, C. Ferreira, Z. Zalevsky and J. García, Superresolution digital holographic microscopy for three-dimensional samples, *Optics Express* **16(23)** (2008) 19260-19270.
- [13] V. Micó, C. Ferreira, Z. Zalevsky and J. García, Basic principles and applications of digital holographic microscopy, *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*, A. Méndez-Vilas and J. Díaz (Eds.) (2010) 1411-1418.
- [8] W. S. Wei Bin, Preparation of polystyrene hollow microspheres from waste foamed polystyrene plastics by microencapsulation method, The 5th ISFR (October 11-14, 2009) Chengdu, China, 160-164.
- [9] Pei-Jun Cai, Yong-Jian Tang, Lin Zhang and Wei-Dong Wu, Fabrications of metallic oxide
- [14] B. Zarefarsani, M. Valieghbal, M. Tarkashvand and A. H. Farahbod, Characterization of inertial confinement fusion targets based on transmission holographic Mach-Zehnder interferometer, 22nd Iranian Conference on Optics and Photonics and 8th Conference on Photonics Engineering and Technology, University of Yazd, Yazd (2016).

