

# بکارگیری تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی به منظور بررسی میکروبال‌های پلیمری

مرضیه ولی اقبال<sup>۱\*</sup>، بهاره زارع فارسانی، امیرحسین فرهد

## چکیده

برای دستیابی به گداخت به روش محصورسازی اینرسی ضروری است تا میکروبال‌های پلیمری از کرویت، تقارن و یکنواختی سطح بسیار بالایی برخوردار باشند تا از بروز ناپایداری هیدرودینامیکی طی فرآیند فشرده-سازی هدف تا حد امکان کاسته شود. ناپایداری‌های ریلی-تیلور در عملکرد هدف‌های طراحی شده برای آزمایش‌های ICF نقش بسزایی دارند. به همین دلیل لازم است هدف‌های ساخته شده متقارن و ضخامت سطوح ثابتی داشته باشند. روش‌های مختلفی برای مشخصه‌یابی این کپسول‌ها وجود دارد. در این مقاله از روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی با پیکر بندی تداخل‌سنج ماخ-زندر عبوری برای کنترل کیفی هدف-های گداخت لیزری استفاده شده است. ترکیب تمام‌نگاری دیجیتال با میکروسکوپ یا تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی، امکان دستیابی به تصویری با وضوح بالا از نمونه سه بعدی را بوسیله بازسازی عددی فراهم می‌آورد. همچنین تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی فرآیندی غیرمخرب است که برای حفظ کیفیت نمونه تحت مطالعه از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این روش ابتدا تمام‌نگار به وسیله CCD ثبت شده، سپس به کمک نرم‌افزار *Hologivision* بازسازی شده است. یکنواختی سطح، همگنی و ضخامت پوسته در نقاط مختلف نمونه در تصویر بازسازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت ضخامت پوسته در نقاط مختلف تصویر بازسازی شده، اندازه‌گیری شده و نایکنواختی ضخامت پوسته به طور متوسط ۲۲/۸۳ درصد به دست آمده است. این میزان نایکنواختی برای نمونه‌ها باید به حدقل برسد تا قابل استفاده در گداخت هسته‌ای باشد.

**واژه‌های کلیدی:** گداخت محصورسازی اینرسی، تداخل‌سنج ماخ-زندر، تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی.

## مقدمه

کمک باریکه‌های پر انرژی لیزر یا باریکه‌های یون طی چند نانو ثانیه تا بیش از  $10^3$  برابر چگالی متعارف هیدروژن در فاز جامد، و دما تا  $10^8$  درجه کلون افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، همجوشی هسته‌های اتم‌های هیدروژن به وقوع می‌پیوندد و مقدار قابل توجهی انرژی آزاد می‌شود. این عمل با استفاده از هدفی (کپسول) کروی حاوی قشر نازکی از سوخت جامد دوتریم-تری‌تیوم انجام می‌شود [۱ و ۲]. در گداخت به روش محصورسازی

یکی از رویکردهای رایج جهت انجام گداخت هسته‌ای، محصورسازی پلاسما به روش اینرسی<sup>۱</sup> است. برای دستیابی به شرایط گداخت به این روش، چگالی ایزوتوپ‌های سنگین اتم هیدروژن (دوتریم - تری‌تیوم) به

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای zibavali@ghbal@gmail.com

دانشمند انگلیسی تمام نگاری را پیش بینی کرد. ایده ثبت تصاویر به صورت سه بعدی از سوی گابور در سال ۱۹۷۱ جایزه نوبل را به خود اختصاص داد. گابور برای ثبت هم‌زمان دامنه و فاز امواج، پیشنهاد استفاده از فریزهای حاصل از تداخل امواج را ارائه کرد. در تمام-نگاری دیجیتال، پردازش توسط کامپیوتر انجام می‌شود. ترکیب تمام‌نگاری دیجیتال با میکروسکوپ یا تمام‌نگاری میکروسکوپی<sup>۵</sup> DHM رویکردی است که امکان دستیابی به تصویری با وضوح بالا از نمونه سه بعدی را بوسیله بازسازی عددی فراهم می‌آورد. اولین CCD مربوط به تصویربرداری به فرمت ۱۰۰×۱۰۰ پیکسل، در سال ۱۹۷۴ توسط شرکت فرچایلداکترونیک<sup>۶</sup> تولید گردید. در سال بعد این وسیله در دوربین‌های تلویزیونی برای رسانه‌های تجاری و بعدها در تلسکوپها و وسایل تصویر برداری پزشکی مورد استفاده قرار گرفت. مدتها پس از این زمان بود که CCD در دوربین‌های دیجیتالی مورد استفاده عموم قرار گرفت و تجاری شد. در اوایل سال ۱۹۹۰، حسگرهای تصویر CMOS به عنوان یک جایگزین مناسب برای CCDها پدیدار شدند. با توجه به اصول اولیه تداخل‌سنجی، پیکربندی-های متفاوتی در چیدمان DHM به کار می‌رود که از آن جمله می‌توان به پیکربندی ماخ-زندر، مایکلسون و تویمن-گرین اشاره نمود. در میان این پیکربندی‌ها، ماخ-زندر بیشترین استفاده را در DHM دارد [۷-۱۰].

### تئوری تمام‌نگاری

تمام‌نگار از تداخل بین دو موج هم‌دوس نتیجه می‌شود. موج شی O ناشی از جسم و موج مرجع R، این دو موج در صفحه تمام‌نگار، طرح تداخلی با توزیع شدت دو بعدی تولید می‌کنند. فاصله میان صفحه فوریه  $(x, y)$  و صفحه CCD  $(\xi, \eta)$  که توسط شئی میکروسکوپ ایجاد شده،  $d$  می‌باشد.  $\tilde{O}(x, y)$  میدان مختلط در

اینرسی نه تنها لازم است لیزرهای با توان بالا و پهنای تپ کوتاه مورد استفاده قرار گیرند، بلکه کپسول‌های تولید شده به لحاظ کرویت و یکنواختی سطح، باید از کیفیت بالایی برخوردار باشند. عامل اصلی عدم فشرده-سازی متقارن هدف، ناپایداری‌های هیدرودینامیکی است که از این میان ناپایداری‌های ریلی-تیلور<sup>۱</sup> غالب است. لذا ضروری است هدف از تقارن هندسی و همواری سطح و به طور کلی کیفیت بسیار بالایی برخوردار باشد. هدف‌ها غالباً پوسته‌های ریز کروی از جنس پلیمر به قطر چند صد میکرون هستند. برای ساخت این هدف‌ها از تکنیک‌های مختلفی از جمله برج سقوط تولید میکرو-کره (کوره گرمایی)<sup>۲</sup>، روش ریزکپسول‌سازی<sup>۳</sup> و روش قالب با قابلیت دپلیمریزه شدن<sup>۴</sup> استفاده می‌شود [۳].

مشخصه‌یابی هندسی هدف‌ها نظیر عیوب سطح خارجی آنها، ناهم مرکزی پوسته‌ها و ضخامت دیواره از جمله بخش‌های مهم و ضروری برای تهیه یک هدف قابل استفاده برای گداخت اینرسی به شمار می‌آید و کنترل کیفی هدف نقش مهمی در مراحل تولید آنها دارد. از میان روش‌های موجود در مشخصه‌یابی، روش‌های اپتیکی، مقرون به صرفه هستند و تصاویری با کیفیت بالا به دست می‌دهند [۵ و ۴]. روش تمام‌نگاری دارای توان تفکیک بالا در حد میکرومتر می‌باشد. با این وجود، رویکردهای تازه‌ای از این روش، توانسته است این مقدار را نیز بهبود بخشد. به عنوان مثال، اندازه‌گیری‌های تمام‌نگاری دیجیتالی در حد نانومتریک بوده که به ما امکان مشخصه‌یابی با کیفیت بالا برای سطح خارجی میکروبال‌های ICF را می‌دهد [۶]. در سال ۱۹۴۸ زمانی که دنیس گابور مطالعات خود را برای ارتقا وضوح تصویر در میکروسکوپ الکترونی انجام می‌داد دریافت که طرح تداخلی باریکه الکترون شامل اطلاعات کاملی از فاز و دامنه موج الکترون می‌باشد. در این سال بود که این

1 Rayleigh-Taylor instability

2 Drop Tower

3 Microencapsulation

4 Depolymerizable mandrel (PAMS-GDP)

5 Digital holographic microscopy (DHM)

6 Fairchild Electronics

$P$  دوره تناوب تولید طرح تداخلی به وسیله پرتو مرجع و تصویر است ( بطور کلی  $P$  می‌تواند از دو مولفه  $P_\eta$  و  $P_\xi$  در دو راستای  $\eta, \xi$  تشکیل شود). در صورت برقراری روابط زیر طرح خروجی توزیع شدت بوسیله CCD ثبت می‌شود.

$f_\xi \geq 1/2\Delta\xi$  و  $p_\xi \geq 2\Delta\xi$  در فضای فرکانس، بسامد در راستای  $\xi$ ،  $f_\xi$  می‌باشد و همه این موارد در جهت  $\eta$  نیز صادق است. ویژگی‌های  $CCD$ ،  $(M, N, \Delta\xi, \Delta\eta)$  مقدار  $\theta$  و در نتیجه  $P$  را محدود می‌کند در عمل ویژگی‌های آشکارساز  $CCD$  ثابت هستند. در صفحه هولوگرام داریم:

$\xi = n\Delta\xi$  و  $\eta = m\Delta\eta$  در حالی که  $n = 1, 2, \dots, N$  و  $m = 1, 2, \dots, M$  در صفحه شی:

$\Delta y = \frac{1}{M\Delta v} = \lambda d / M\Delta\eta$  و  $\Delta x = \frac{1}{N\Delta u} = \frac{\lambda d}{N\Delta\xi}$  در صفحه  $(\xi, \eta)$  که همان صفحه هولوگرام است شدت حاصل به عنوان یک تمام‌نگار دیجیتالی به صورت زیر ضبط می‌شود [۱۲]:

$$I(x, y) = |O(\xi, \eta) + R(\xi, \eta)|^2 \quad (3)$$

$$= |O(\xi, \eta)|^2 + |R(\xi, \eta)|^2 + O(\xi, \eta)R^*(\xi, \eta) + O^*(\xi, \eta)R(\xi, \eta)$$

بنابراین در فرآیند تمام‌نگاری هیچ یک از اطلاعات بسامد فضایی حذف نمی‌شود. از آنجایی که تصویر اولیه از تصویر مزدوج و ترم مرتبه صفرم کاملاً جدا است ما می‌توانیم دو ترم دیگر را حذف کنیم که بازسازی تصویر مختلط نمونه را از تبدیل فوریه معکوس از تصویر اولیه امکان‌پذیر می‌کند [۸].

### روش ساخت و آماده‌سازی نمونه

برای تهیه میکروبال‌های پلیمری، روش‌های متعددی وجود دارد که هر روش ویژگی منحصر به فرد و ملزومات آماده‌سازی خاصی دارد. روش‌های تهیه میکروبال‌های

صفحه فوریه می‌باشد و توزیع دامنه مختلط در صفحه  $(\xi, \eta)$  در شاخه تصویر به شکل زیر است [۱۲]:

$$O(\xi, \eta) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \iint O(x, y) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (1)$$

در همان زمان پرتو مرجع به صورت مایل با زاویه  $\theta$  به  $CCD$  می‌رسد. علاوه بر این برای جبران واگرایی دو پرتو تداخلی یک سری لنز اضافی معمولاً در مسیر نوری باریکه مرجع قرار می‌گیرد. هر دو پرتو واگرا از فاصله  $d$  در مقابل  $CCD$  می‌آیند. این تفاوت در واگرایی به صورت دیجیتالی قابل جبران است. موج مرجع که از نقطه‌ی  $(x_R, 0)$  به صفحه کانونی تصویر می‌آید به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$R(\xi, \eta) = R_o \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda d}[(\xi - x_R)^2 + \eta^2]\right] = C_o \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda d}x_R\xi\right] \quad (2)$$

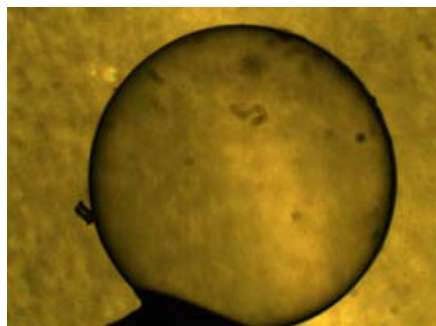
که  $C_o$  فاکتوری ثابت است مقدار  $x_R$  و  $d$  ماکزیمم مقدار  $\theta$  و همچنین مینیمم مقدار هایی را که می‌تواند به وسیله  $CCD$  ضبط شود محدود می‌کند.

فرض می‌کنیم  $CCD$ ،  $M \times N$  پیکسل و  $\Delta\xi$  و  $\Delta\eta$  فاصله میان مراکز پیکسل‌ها در راستای  $\eta, \xi$  هستند.



شکل ۲: ساختار پوسته کروی مورد استفاده در گداخت لیزری.

از آن جایی که پوسته‌های کروی بسیار حساس و شکننده هستند باید با دقت بسیار بالایی به کمک چسب بر روی پایه (لوله موئین) نصب گردند. قبل از پرتو دهی نمونه، برای اطمینان از سالم بودن آن به کمک دوربین (CMOS، ۳ مگا پیکسل) نصب شده بر روی میکروسکوپ، تصویر نمونه ثبت و در رایانه ذخیره می‌شود. تصویر میکروسکوپی نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است.

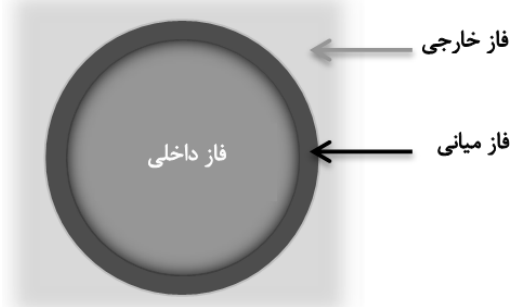


شکل ۳: تصویر تهیه شده از نمونه به کمک میکروسکوپ نوری.

### چیدمان تجربی

چیدمان بر پا شده برای تصویربرداری از میکروبالن‌های کروی پلیمری، تداخل سنج ماخ-زندر عبوری است که در شکل ۴ نشان داده شده است. برای تشکیل طرح تداخلی از باریکه لیزر پیوسته هلیوم-نئون غیر قطبیده به ترتیب با طول موج  $632.8$  نانومتر و توان  $2$  میلی‌وات استفاده شد. دوربین CCD مدل DFK(1280x960HV) ساخت شرکت Imaging Source با اندازه پیکسل  $4/56$  میکرومتر برای ثبت تصاویر به کار رفته است. باریکه لیزر توسط شکافنده پرتو به دو بخش تقسیم می‌شود، که امکان

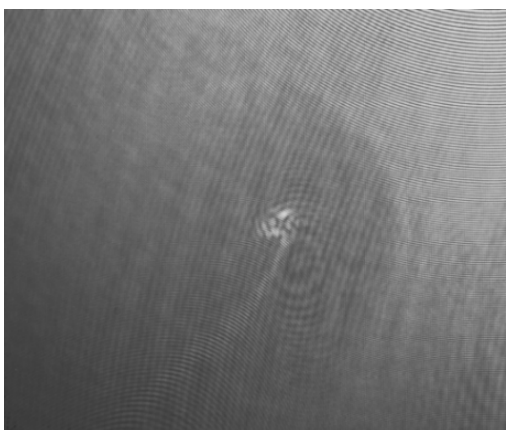
پلیمری عبارتند از [۵]: روش قطره مایع (کوره حرارتی با خوراک مایع)، روش قطره‌ای با ژل خشک (کوره حرارتی با خوراک ژل خشک)، روش خود مونتاژی، روش میکروانکپسولیشن و روش قالبی. همانگونه که پیشتر اشاره شد در روش میکروانکپسولیشن از سه فاز برای آماده‌سازی میکروبالن‌ها استفاده می‌شود. فاز  $W_1$ : آب مقطر (آب و امولسیفایر)، فاز O: محلول پلیمری (پلی - استایرن محلول در بنزن و  $10-2$  دی کلرواتان)، فاز  $W_2$ : آب مقطر و عامل تعلیق ساز (پلی وینیل الکل). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سه فاز ذکر شده به ترتیب فازهای داخلی، میانی و خارجی سازنده میکروبالن را تشکیل می‌دهند که دیواره اصلی میکروبالن از جنس ماده تشکیل دهنده فاز میانی می‌باشد [۱۳].



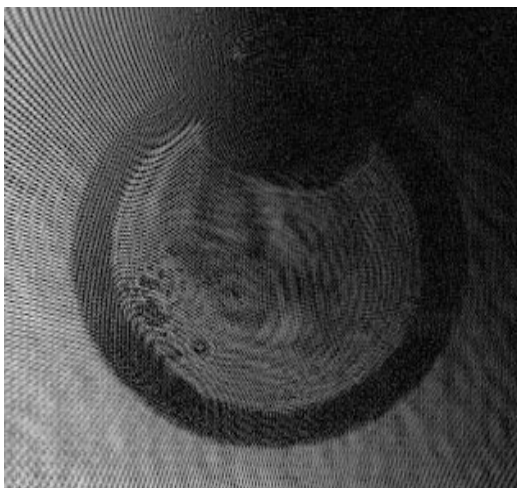
شکل ۱. نمایش کلی ساختار سه فازی میکروبالن به دست آمده از روش ریزکپسول سازی [۵].

در این روش ابتدا آب را در محلول آلی پلیمر به حالت امولسیون در آورده و پس از اختلاط کامل آن را ضمن هم زدن به محلول آبی ثانویه می‌افزاییم و پس از تنظیم دمای محلول و خروج حلال از فاز آلی، پوسته پلیمری حاوی آب باقی می‌ماند که پس از طی مراحل خشک کردن تبدیل به ریزکره توخالی از جنس پلی‌استایرن می‌شود. قطر نمونه‌های ساخته شده در حد  $400 \mu m$  -  $100$  است که ساختار آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

ساده میکروسکوپی دارد. از آنجایی که یکنواختی ضخامت هدف حایز اهمیت است، پس از بازسازی تصویر، ضخامت پوسته در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد. مقادیر به دست آمده و درصد نایکنواختی ضخامت پوسته در جدول ۱ آورده شده است. نتایج حاصل به طور متوسط حاکی از ۲۲/۸۳ درصد نایکنواختی در ضخامت پوسته در نقاط مختلف می‌باشد.

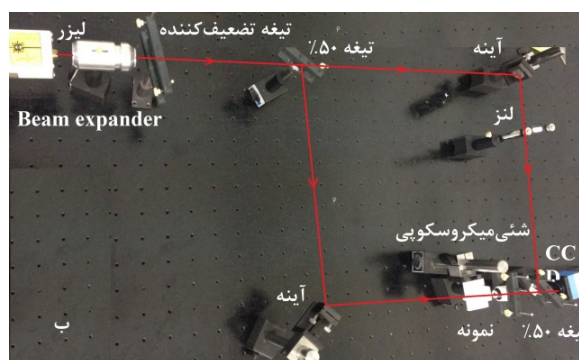
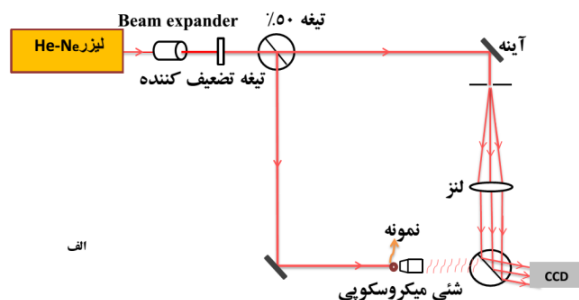


شکل ۵: طرح تداخلی نمونه هدف.



شکل ۶: تصویر بازسازی شده.

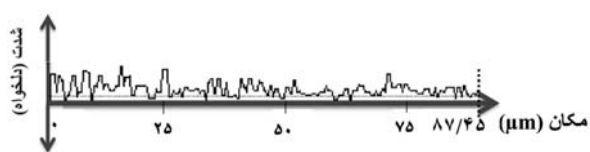
اجرای چیدمانی بر اساس ساختار تداخل سنج ماخ-زندر را فراهم می‌سازد. در بازوی جسم تداخل سنج یک شیبه میکروسکوپ در حالت عبور قرار دارد و طرح تداخلی دو جبهه موج مرجع و جسم که یک تمام‌نگار عبوری از نمونه است پس از ثبت بوسیله دوربین به رایانه منتقل می‌شود.



شکل ۴: (الف) چیدمان تجربی مورد استفاده برای تصویربرداری از هدف. (ب) تصویر چیدمان تجربی پیاده شده در آزمایشگاه کنترل کیفی هدف‌های گداخت لیزری.

### نتایج

طرح تداخلی ثبت شده از طریق تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی در شکل ۵ نشان داده شده است. تمام نگار ثبت شده در نرم افزار Hologvision به روش فرنل، بازسازی و پس زمینه تصویر توسط فیلترهای MVS و HPF حذف شده است. تصویر بازسازی شده نهایی در شکل ۶ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، ضخامت پوسته که در تصویر میکروسکوپی قابل تشخیص نیست در تصویر بازسازی شده طرح تداخلی قابل رویت است. این مزیت نشان از برتری تصویربرداری به روش تداخل سنجی اپتیکی در مقایسه با تصویربرداری



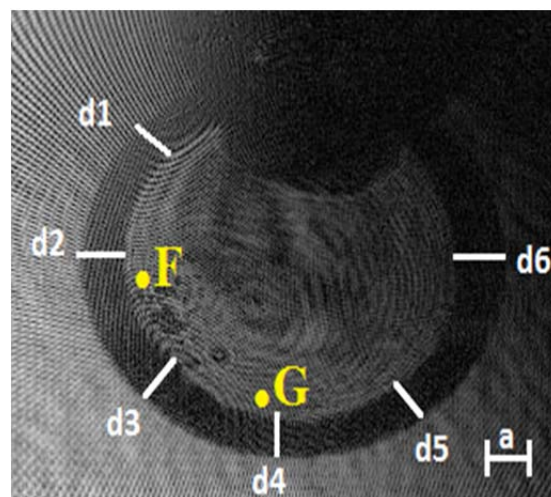
شکل ۸: نمودار شدت بر حسب مکان از نقطه F تا G.

### نتیجه گیری

از آنجاییکه هدف‌های مورد نیاز برای استفاده در گداخت لیزری می‌بایست از کرویت، تقارن و یکنواختی سطح بسیار بالایی برخوردار باشند، انتخاب روش مشخصه‌یابی مناسب برای بررسی میکروبالن‌های ساخته شده به روش ریزکپسول‌سازی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله از روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی با چیدمان ماخ-زندر عبوری بدین منظور استفاده شده است. تمام-نگار پس از ثبت در CCD توسط نرم‌افزار *HoloVision* بازسازی گردید. بنابر اندازه‌گیری‌های انجام شده روی ضخامت پوسته در نقاط مختلف تصویر بازسازی شده، به طور متوسط  $22/83$  درصد نایکنواختی در ضخامت پوسته مشاهده شده است. همچنین ثابت نبودن (منطبق نبودن بر خط‌چین افقی شکل ۷) تغییرات شدت بر حسب مکان از نقطه F تا G نشان از ناهمگنی نمونه در این فاصله دارد. این نتایج مشخصه-یابی در اختیار بخش ساخت میکروبالن‌ها قرار گرفته تا در ساخت نمونه‌هایی با کیفیت بهتر این موارد را مد نظر داشته باشند.

### سپاسگزاری

از خانم فهیمه رضازاده از آزمایشگاه شیمی پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، و همچنین آقای عیسی علیدخت که ما را در انجام این پژوهش یاری نموده‌اند سپاسگزاری می‌نماییم.



شکل ۷: ضخامت پوسته در مکان‌های

$d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$  بر حسب مقیاس  $a = 18 \mu m$  و

ناحیه بررسی همگنی نمونه از نقطه F تا G.

جدول ۱: ضخامت پوسته در شش مکان مشخص شده در شکل ۷.

مکان	ضخامت پوسته ( $a = 18 \mu m$ )	درصد نایکنواختی ضخامت پوسته
$d_1$	۱,۱۳a	%۱۳
$d_2$	۱,۳۹a	%۳۹
$d_3$	a۱,۲۱	%۲۱
$d_4$	۰,۹۶a	% -۴
$d_5$	۱,۲۳a	%۲۳
$d_6$	۱,۴۵a	%۴۵

علاوه بر این برای بررسی همگنی فضای داخل پوسته، نمودار تغییرات شدت بر حسب مکان ترسیم شده است. در شکل ۸ نمودار تغییرات مکانی شدت از نقطه F (۷۷,۱۲۵) تا G (۱۴۵,۱۸۰) به فاصله  $87/45 \mu m$  به کمک نرم‌افزار *HoloVision* ترسیم شده است. تغییر شدت در نقاط مختلف نشان‌دهنده ناهمگنی بخش مورد نظر است.

## مراجع

- [1] B.Kursunoglu, A. Perlmutter, S. M. Widmayer, "Progress in lasers and laser fusion" (1975).
- [2] John F. Holzrichter, Ph.D, "Lasers and inertial fusion experiments at livermore" (2006).
- [3] Y. D. G. D. Z. e. a. Zhang L. (1999) [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-QJGY199905021.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-QJGY199905021.htm).
- [4] Antolak, A.J., Pontau, A.E.&Morse, D.H. "Ion microtomography and particle-induced X-ray emission analysis of direct drive inertial confinement fusion targets" (1992).
- [5] T. P. Bernat, D. H. Darling, and J. J. Sanchez, "Applications of holographic interferometry to cryogenic ICF target characterization" (1982).
- [6] D.Gabor "Microscopy by reconstructed wavefront", (1948).
- [7] V. Micó, C. Ferreira, Z. Zalevsky and J. García, "Superresolution digital holographic microscopy for three-dimensional samples" (2008).
- [8] V. Micó, C. Ferreira, Z. Zalevsky and J. García, "Basic principles and applications of digital holographic microscopy" (2010).
- [9] Uichi Kubo, Hitoshi Nakano, and Hyogun Kim, "Fabrication of cross-linked polymer shells for inertial confinement fusion experiments" (1997).
- [10] W. J. Qu, C. O. Choo, V. R. Singh, Y. J. Yu, and A. Asundi, "Quasi-physical phase compensation in digital holographic microscopy," Journal of the Optical Society of America, (2009).
- [11] 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)).
- [12] H.J. Kreuzer and R.A. Pawlitzek, "Numerical Reconstruction for in-line holography under glancing incidence", In Fringe '97: Proceedings of the 3rd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Bremen, Germany, September 15-17 (1997).

