

# مطالعه و بهینه‌سازی سلول جذبی چندعبوری حلقوی هم-کانونی

آشفته اردکانی، پدram<sup>۱</sup>؛ حداد، محمد علی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فیزیک دانشگاه یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، یزد

<sup>۲</sup> گروه پژوهشی فوتونیک یزد، آزمایشگاه تحقیقاتی بیناب‌نگاری لیزری، دانشگاه یزد، یزد

## چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی طراحی سلول جذبی چندعبوری حلقوی مورد استفاده در بیناب‌نمایی جذبی لیزری مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، سلول‌های چندعبوری حلقوی با ساختار هم-کانونی غیر یکپارچه قابل استفاده در حسگرهای لیزری قابل حمل انتخاب شده و متغیرهای مؤثر در دقت اندازه‌گیری و ابعاد سلول، و همچنین پایداری اپتیکی لیزر در برابر لرزش و تنش‌های مکانیکی احتمالی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نمایه پرتوی خروجی سلول به کمک رهیافت اپتیک موجی نشانگر مزیت سلول چندعبوری حلقوی هم-کانونی غیر-یکپارچه است.

واژه‌های کلیدی: بیناب‌نمایی جذبی، سلول جذبی چندعبوری، طول مسیر نوری، بیناب‌نمایی لیزری

## Study and optimization of confocal circular multi-pass absorption cells

Ashofteh Ardakani, Pedram<sup>1</sup>; Haddad, Mohammad Ali<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Yazd University, Yazd

<sup>2</sup> Yazd Photonics Research Group, Laser Spectroscopy Research Laboratory, Yazd University, Yazd

## Abstract

The optimization of circular multi-pass absorption cells used in Laser Absorption Spectroscopy has been studied in this paper. In this case, segmented confocal circular multi-pass cells were selected and parameters related to measurement sensitivity, cell dimensions and optical stability of the cell towards vibrations and mechanical tensions were studied. Investigating intensity profile of output beam using wave-optics approach, indicates the advantages of utilizing segmented circular multi-pass cells.

**Keywords:** Absorption Spectroscopy, Multi-pass Absorption Cell, Optical Depth, Laser Spectroscopy

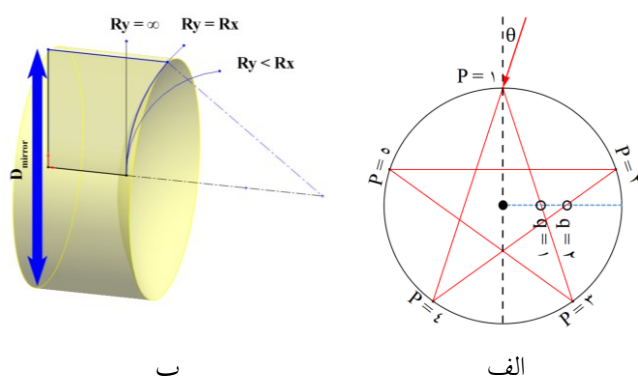
PACS No. 30

## مقدمه

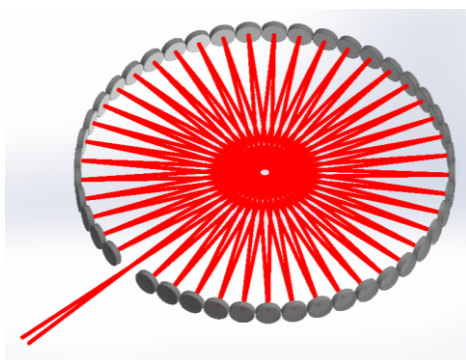
نرخ سیگنال به نوفه بسیار ناچیز است که منجر به بروز محدودیت در دقت اندازه‌گیری خواهد شد.

یکی از روش‌های رفع این چالش، افزایش طول مسیر نوری طی شده در نمونه گازی ( $L_{opt}$ ) به کمک سلول‌های جذبی است. سلول‌های جذبی قدیمی طویل و سنگین وزن هستند، فضای زیادی را اشغال می‌کنند و پر کردن آن‌ها با مقدار مورد نیاز نمونه گازی می‌تواند فرآیندی کند و هزینه‌بر باشد. اما در سلول‌های

بیناب‌نمایی جذبی روشی فراگیر برای اندازه‌گیری غلظت و تراکم نمونه‌های گازی است. بیشتر روش‌های بیناب‌نمایی جذبی لیزری بر پایه قانون بیر-لمبرت استوار هستند [۱]. بر اساس این قانون، نمونه گازی با مقدار جذب نور عبوری از نمونه و تغییر نرخ سیگنال به نوفه مرتبط است. در غلظت نمونه‌های بسیار کم جاذب،



شکل ۱: الف - هندسه ستاره چندضلعی منظم  $p=5$  و  $q=2$  با زاویه فرودی  $\theta=18^\circ$  [۷]. ب - آینه کروی به قطر  $D_{\text{mirr}}$  شعاع انحنای در صفحه اپتیکی  $R_x$  و در راستای عرضی  $R_y$



شکل ۲: چیدمان اپتیکی سلول چندعبوری حلقوی با هندسه هم‌کانونی غیر-یکپارچه، دارای مشخصات  $p=45$ ،  $q=22$  و  $\theta=2^\circ$

نکته مهم دیگر در طراحی سلول‌های چندعبوری، پایداری پرتو در آرایه اپتیکی سلول است. عوامل مؤثر در پایداری اپتیکی این آرایه‌ها شامل فاصله، محل قرارگیری و هندسه آینه‌های مورد استفاده است [۶]. یکی از آرایه‌های اپتیکی مورد استفاده در سلول‌های چندعبوری حلقوی، آرایه استوانه‌ای است؛ اما با توجه به ناپایداری اپتیکی این آرایه، طراحان به استفاده از آینه‌های کروی (شکل ۱-ب) و تشکیل آرایه‌هایی با پایداری اپتیکی بهتر همچون آرایه هم‌کانونی روی آوردند. لازمه تشکیل آرایه هم‌کانونی، روی هم قرار گرفتن کانون آینه‌های استفاده شده در چیدمان اپتیکی است.

### پارامترهای شبیه‌سازی

بیشتر نحوه گزینش زاویه فرودی، چشمه لیزر مورد استفاده، ابعاد، هندسه، محل قرارگیری و همچنین لایه‌نشانی پیشنهادی مناسب آینه‌ها در مرجع [۹] ارائه شد. در جدول ۱، پارامترهای

جذبی مدرن، به جای افزایش حجم مخزن نمونه، با استفاده از اجزای اپتیکی، نور به دفعات درون نمونه‌ی گازی هدایت شده و طول مسیر نوری افزایش می‌یابد. انواع سلول‌های معرفی شده در مرجع [۲] مرور شده‌اند. در این میان، ساختار ساده سلول حلقوی [۳] به دلیل فشردگی و قابل حمل بودن، بیشتر از نسخه‌های دیگر مورد توجه قرار گرفته است [۴]. از ویژگی‌های نسخه قابل حمل سلول چندعبوری می‌توان به حجم کوچک، وزن کم، پایداری اپتیکی، لرزش و تنش‌های مکانیکی احتمالی اشاره داشت.

در ادامه به معرفی اصول اولیه بررسی کمی و کیفی پایداری اپتیکی در سلول‌های چندعبوری حلقوی هم‌کانونی پرداخته خواهد شد. در نهایت مزیت‌های بکارگیری این نوع از سلول‌های چندعبوری نسبت به نسخه‌های پیشین [۹ و ۱۰] بیان می‌شوند.

### مبانی طراحی سلول چندعبوری حلقوی

همانگونه که پیشتر اشاره شد [۹]، افزایش طول مسیر نوری ( $L_{\text{opt}}$ ) در این سلول‌ها بوسیله افزایش تعداد بازتاب درون محفظه گاز حاصل می‌شود. این افزایش بازتاب طی بوجود آمدن الگوی هندسی ستاره چندضلعی منظم درون سلول امکان‌پذیر است. پارامترهای تعیین کننده این الگو شامل تعداد رأس‌ها ( $p$ ) و تراکم ستاره ( $q$ ) هستند. هر نیم-خط رسم شده از مرکز چندضلعی ستاره‌ای که از رأس عبور نکند  $q$  مرتبه با مسیر عبور پرتو تلاقی خواهد داشت. شکل ۱-الف نمایش‌دهنده تشکیل این الگو با تعداد ۵ رأس و تراکم ۲ است. زاویه مناسب برای تشکیل ساختار مورد نظر از طریق رابطه ۱ قابل محاسبه است [۵]:

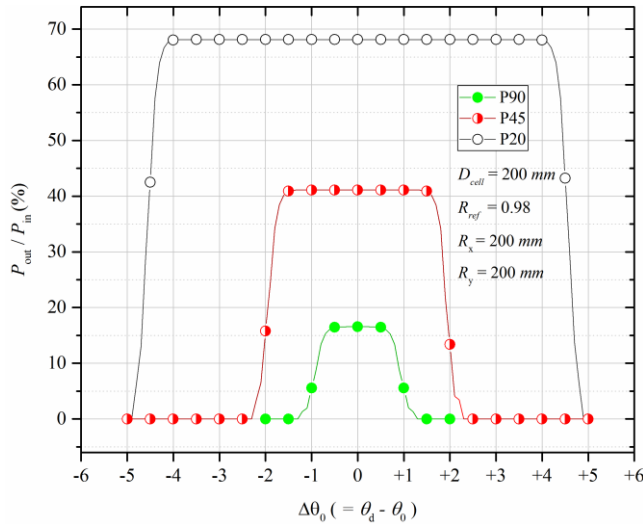
$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} \times \left( 1 - \frac{2 \times q}{p} \right) \quad (1)$$

پارامتر دیگری که نقش بنیادی در تعیین طول مسیر نوری دارد، قطر سلول ( $D_{\text{cell}}$ ) است. کمینه قطر سلول به ازای تعداد و قطر آینه‌های مورد استفاده ( $D_{\text{mirr}}$ ) از طریق رابطه ۲ بدست می‌آید:

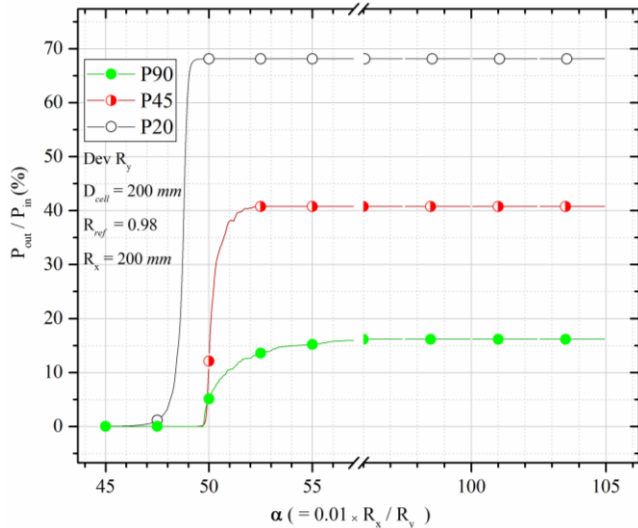
$$D_{\text{cell}} = D_{\text{mirror}} \times \left[ \tan \left( \frac{\pi}{p} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

در نهایت با مشخص شدن زاویه فرودی و قطر سلول، طول مسیر نوری از طریق رابطه ۳ قابل تخمین است:

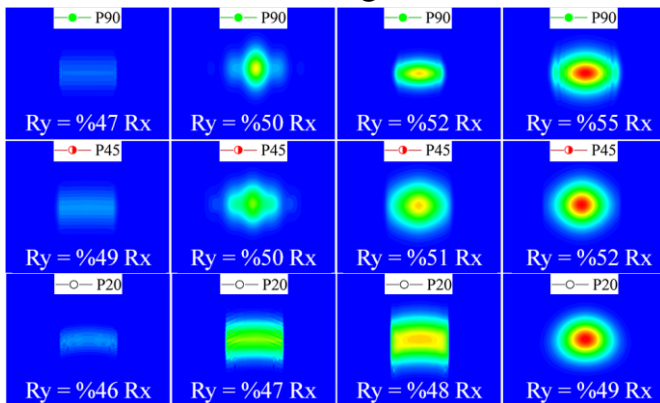
$$L_{\text{opt}} = D_{\text{cell}} \times \cos(\theta_0) \quad (3)$$



شکل ۴: محور افقی نشان‌دهنده میزان انحراف ( $\theta_d$ ) از زاویه فرودی مطلوب ( $\theta_0$ )  
بر حسب درجه و محور عمودی بیانگر نسبت شدت پرتوی خروجی ( $P_{out}$ ) به  
ورودی ( $P_{in}$ ) بر حسب درصد



شکل ۵: مقایسه پایداری شدت و نمایه پرتو در ساختارهای هم-کانونی و هم-  
مرکز به ازای تغییرات شعاع انحنای آینه‌ها در راستای عرضی



شکل ۶: نمایه پرتوی خروجی به ازای تغییرات شعاع انحنای آینه‌ها در راستای  
عرضی

مرتبط با سه آرایه اپتیکی سلول چندعبوری حلقوی هم‌کانونی  
آورده شده‌اند.

چشمه نور لیزری با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر ( $\lambda$ )، توان ۲۴۰  
میلی‌وات ( $P_{in}$ )، واگرایی ۱ میلی‌رادیان و قطبش عمودی ۹۸ درصد  
در حالت مد  $TEM_{00}$  انتخاب شد. با توجه به طول‌موج و قطبش  
چشمه لیزری، آینه‌های نقره‌اندود با ضریب بازتاب  $R_{ref} = 98\%$   
انتخاب شدند.

پس از انتخاب مقادیر به کمک مبانی ارائه شده، نمایه پرتوی  
خروجی از سلول چندعبوری حلقوی هم‌کانونی غیر-یکپارچه  
برای مقادیر ارائه شده جدول ۱ به کمک نرم‌افزار زیمکس مورد  
مطالعه قرار گرفت.

جدول ۱: مشخصات سه آرایه اپتیکی مورد نظر

| ردیف | $p$ | $q$ | $\theta_0$ | $\theta_{tolerance}^*$ |
|------|-----|-----|------------|------------------------|
| ۱    | ۲۰  | ۹   | $9^\circ$  | $\pm 4^\circ$          |
| ۲    | ۴۵  | ۲۲  | $2^\circ$  | $\pm 1/5^\circ$        |
| ۳    | ۹۰  | ۴۳  | $4^\circ$  | $\pm 0/5^\circ$        |

\* مقدار  $\theta_{tolerance}$  حداکثر انحراف قابل قبول پرتو از زاویه فرودی است که  
می‌توان آن را از شکل ۴ دریافت.

لازم به ذکر است برای محاسبات انتشار میدان الکترومغناطیسی  
پرتوی معرفی شده از روش متداول و شناخته شده پراش فرنل  
استفاده شده است [۷]. در این روش توزیع میدان الکترومغناطیسی  
با رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$E_{(x_2, y_2, z_2)} = \left[ \frac{e^{ikz}}{i\lambda\Delta z} \right] q_{(r_2, \Delta z)} \quad (4-f)$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{(x_1, y_1, z_1)} q_{(r_1, \Delta z)} e^{\frac{i2\pi}{\lambda\Delta z}(x_1x_2 + y_1y_2)} dx_1 dy_1$$

$$q_{(r, \Delta z)} = e^{(i\pi r^2)/(\lambda\Delta z)} \quad (4-b)$$

در این رابطه انتشار میدان در راستای  $z$  در نظر گرفته شده است.  $E$   
دامنه میدان الکتریکی،  $k$  عدد موج،  $\lambda$  طول موج بر حسب نانومتر،  
 $q$  فاکتور فاز درجه دوم است. دلیل انتخاب و نحوه بدست آوردن  
رابطه فوق در شبیه‌سازی، نحوه محاسبه بازتاب از سطوح  
لایه‌نشانی شده و در نظر گرفتن تأثیرات قطبش در مراجع [۷ و ۸]  
به تفصیل توضیح داده شده است.

## نتایج شبیه‌سازی

الف) بررسی پایداری اپتیکی: شکل ۴ پایداری اپتیکی طراحی هم-کانونی به ازای  $\pm 5^\circ$  انحراف پرتو ورودی در راستای صفحه اپتیکی و تأثیر آن بر نسبت شدت پرتو خروجی به شدت پرتوی ورودی را نمایش می‌دهد. با افزایش مقدار  $p$  (که بیانگر افزایش تعداد بازتاب است) حداکثر انحراف قابل قبول پرتو از زاویه ورودی ( $\theta_{\text{tolerance}}$  معرفی شده در جدول ۱) کاهش می‌یابد.

ب) بررسی تأثیر اندازه شعاع انحنای آینه‌ها: تأثیر تغییرات شعاع انحنای آینه‌ها در راستای عرضی (شکل ۱-ب  $R_y$ ) بر نسبت شدت پرتوی خروجی به شدت پرتوی ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی شدت پرتوی خروجی به شدت پرتوی ورودی و محور افقی تغییر میزان انحنای شعاع انحنای آینه در راستای عرضی است. پارامتر  $\alpha$  مقدار ضریب بزرگی شعاع انحنای آینه در راستای عرضی در مقایسه با شعاع انحنای آینه در صفحه اپتیکی (شکل ۱-ب  $R_x$ ) است.

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود کاهش شعاع انحنای آینه در راستای عرضی و نزدیک شدن به آرایه هم‌مرکز در این راستا موجب کاهش نسبت شدت پرتوی خروجی به شدت پرتوی ورودی شده است. در همین شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شعاع انحنای آینه در راستای عرضی و نزدیک شدن به آرایه هم‌کانونی، شدت پرتو خروجی به شدت پرتوی ورودی افزایش پیدا می‌کند. نکته دیگر ثبات نسبت شدت پرتوی خروجی به شدت پرتوی ورودی به ازای  $\alpha$  مشخص برای هر کدام از سه آرایه اپتیکی معرفی شده در جدول ۱ است.

## بحث و جمع‌بندی

با توجه به این که در ساختار هم-کانونی پرتوهای ورودی در مرکز سلول کانونی شده سپس بازتاب می‌شوند؛ پرتوهایی که دو بازتاب متوالی موفق داشته باشند می‌توانند ویژگی‌های خود از قبیل اندازه قطر لکه و همچنین واگرایی خود را حفظ کرده و بی‌نهایت مرتبه بازتاب شوند [۶]. این ویژگی نیاز به تنظیم نمایه پرتوی ورودی به کمک اجزای اپتیکی اضافی را حذف می‌کند؛ لذا پیچیدگی و ابعاد چیدمان اپتیکی کاهش می‌یابد.

در شکل ۴ انحراف زاویه پرتوی ورودی درون صفحه اپتیکی بررسی شده است؛ اما نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به ازای انحراف پرتو در راستای عرضی نیز نتایج مشابهی دارد. بنابراین تغییرات نسبت شدت پرتوی خروجی به شدت پرتوی ورودی به ازای انحراف زاویه ورودی، مستقل از راستا بوده و صرفاً به بزرگی آن وابسته است. این ویژگی موجب کاهش حساسیت تغییرات نسبت شدت پرتوی خروجی به شدت پرتوی ورودی طراحی کنونی نسبت به تنش‌های مکانیکی و لرزش‌های وارد شده خواهد بود.

با توجه به بررسی‌ها، نتایج و ویژگی‌های ارائه شده، سلول چندعبوری حلقوی هم‌کانونی غیر-یکپارچه گزینه مناسبی برای ساخت حسگرهای گاز قابل حمل خواهد بود.

## مرجع‌ها

- [1] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy 1*, 5<sup>th</sup> ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] Z. Du, S. Zhang, J. Li, N. Gao, and K. Tong, "Mid-Infrared Tunable Laser-Based Broadband Fingerprint Absorption Spectroscopy for Trace Gas Sensing: A Review," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 2, p. 338, Jan. 2019.
- [3] M. L. Thoma, R. Kaschow, and F. J. Hindelang, "A multiple-reflection cell suited for absorption measurements in shock tubes," *Shock Waves*, vol. 4, no. 1, pp. 51–53, 1994.
- [4] B. Tuzson, M. Mangold, H. Looser, A. Manninen, and L. Emmenegger, "Compact multipass optical cell for laser spectroscopy," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 3, pp. 257–259, 2013.
- [5] H. S. M. Coxeter, "Star Polygons" §2.8 in *Introduction to geometry*, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley New York, pp. 36–38, 1969.
- [6] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 10, pp. 1312–1329, 1966.
- [7] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [8] Radiant ZEMAX LLC, "ZEMAX ® Optical Design Program User's Manual" 2011.

[۹] آشفته اردکانی، پدرام؛ حداد، محمدعلی؛ «مطالعه و بهینه‌سازی نمایه پرتو

در سلول جذبی چندعبوری چندضلعی و حلقوی»؛ **بیست و پنجمین**

کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و

فناوری فوتونیک ایران، ۱۳۹۷، صفحه ۲۶۵ تا ۲۶۸.

[۱۰] صادقی فراز، امین؛ قوامی صبوری، سعید؛ خورسندی، علیرضا؛ «طراحی

سلول جذبی چند عبوری حلقوی برای بیناب نمایی لیزری»؛ **بیست و**

**یکمین** کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هفتمین کنفرانس مهندسی و

فناوری فوتونیک ایران، ۱۳۹۳، صفحه ۶۴۵ تا ۶۴۸.