



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و  
دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸



## تأثیر نحوه توزیع باریکه ها در میدان نزدیک بر توزیع شدت و توان در سبد در میدان دور در ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه های لیزری

ناصر سیاهوشی، مسلم همدمی، آتوسا سادات عربانیان، رضا مسعودی\*

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

n.siahvashi.r@gmail.com, moslem.hamdami@gmail.com, a\_arabaninan@sbu.ac.ir, \*r-massudi@sbu.ac.ir

چکیده - دستیابی به باریکه ای با توان بالا و کیفیت مناسب مهمترین هدف ترکیب باریکه های لیزری می باشد. آرایش هندسی و نحوه چینش باریکه ها در دهانه تابش، نقش بسیار اثر گذاری در کیفیت باریکه ترکیبی دارد. با قرارگیری باریکه ها در آرایش پهلو به پهلو ی تک خط، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی در دهانه تابش و برای فاصله ۲٫۵ کیلومتری صفحه مشاهده، تأثیر نحوه توزیع باریکه در دهانه تابش بر ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه ها بررسی شده است. برای این منظور توزیع شدت میدان نزدیک و دور برای هر دو حالت ارائه شده است. همچنین با ارائه نمودار توان در سبد، مقدار توان جایگزیده در مرکز صفحه مشاهده در میدان دور برای تمامی آرایش ها بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که با ثابت در نظر گرفتن اندازه کمره باریکه ها و نیز فاصله بین آن ها در دهانه تابش، و با تغییر توزیع باریکه ها به سمت آرایش مربعی، مقدار توان در سبد در میدان دور بیش از دو مرتبه افزایش و پهنای توزیع شدت برای قله مرکزی یک مرتبه کاهش می یابد. در نهایت نتایج نشان می دهد که پروفایل باریکه ترکیبی نهایی دارای تقارنی مشابه با چینش باریکه ها در دهانه تابش است.

کلید واژه- آرایش هندسی، ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه ها، توان در سبد، توزیع شدت، دهانه تابش

### The effect of beams distribution in the near field on the intensity distribution and power in the bucket in the far field in laser beams combination

Naser Siahvashi, Moslem Hamdami, Atosa Sadat Arabanian, \*Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C.Evin, Tehran, Iran

**Abstract-** Achieving a high power and high quality beam is the most important purpose of laser beam combination. The geometrical arrangement and the beam distribution in array aperture have effective role in beam combination quality. By applying the beams in the side-by-side arrangements of a single line, two parallel lines, three parallel lines, and six parallel lines in array aperture, and with 2.5 km distance of observing plane, the effect of the beam distribution at array aperture in coherent and incoherent combination has been examined. For this purpose, the distribution of near and far field intensities for two modes is presented. Also by presenting the power in the bucket diagram, the amount of power localized at the center of the far-field observing plane for all arrangements is investigated. The results show that for a constant beam waist and constant distance between beams in array aperture, the amount of power in the bucket increases more than two order of magnitude, and the intensity distribution width of central peak decreases more than one order by changing the beam distribution to the square arrangement. Finally, the results show that the profile of the combined beam has the same symmetry as the beams are arranged in the array aperture.

**Keywords:** Geometrical array, coherent and incoherent beam combining, power in bucket. Intensity distribution, array aperture

## مقدمه

پس از اختراع لیزر در دهه‌ی ۱۹۶۰ و کاربردهای فراوان آن در حوزه‌های مختلف، یکی از اهداف پژوهشگران این حوزه، دستیابی به باریکه‌های لیزری با کیفیت و توان بالاتر بوده است. امروزه باریکه‌های لیزری پر توان در بسیاری از صنایع مختلف همچون جوش کاری، برش کاری، سوراخ کاری، صنایع نظامی و حتی کاوش در پدیده‌های علوم بنیادی همچون همجواری هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. تلاش‌های زیادی نیز برای افزایش توان باریکه‌های لیزری صورت گرفته است و روش‌های متعددی نیز ارائه شده است که انتخاب ماده فعال مناسب با کارایی و بازدهی بیشتر و نیز استفاده از پیکربندی نوسان کننده‌ی اصلی-تقویت کننده‌ی توان (MOPA) از جمله مهمترین این روش‌ها می‌باشند. البته مشکلات و پیچیدگی‌هایی همچون محدودیت خنک‌سازی، ظهور اثرات گرمایی و بروز اثرات غیرخطی از جمله عوامل محدود کننده‌ی توان در این روش‌ها به شمار می‌روند. علاوه بر آن آستانه تخریب مواد، امکان ساخت لیزرهایی با توان مراتب بالا را غیرممکن می‌سازد. در نهایت روش ترکیب باریکه‌های لیزری، یعنی، طراحی و ساخت چند لیزر با توان پایین‌تر و سپس ترکیب آن‌ها به عنوان جدیدترین و کاربردی‌ترین روش دستیابی به باریکه‌ای با توان بالاتر ارائه شده است [۲-۴]. مطالعه بر روی ترکیب باریکه‌های لیزر از ابتدای دهه‌ی ۱۹۹۰ آغاز شد و سپس تلاش برای یافتن راهی به منظور افزایش بازده و کیفیت باریکه ترکیبی ادامه پیدا کرد. نحوه چینش باریکه‌ها یکی از مهمترین فاکتورها به منظور دست‌یابی به باریکه ترکیبی با توان و کیفیت مناسب می‌باشد. به این منظور در سال ۲۰۰۹ آنالیز تئوری و محاسبات عددی مربوط به آرایش حلقه‌های شش ضلعی برای ترکیب همدوس و غیر همدوس توسط یانگ زونگ لی و همکارانش، مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهایی همچون درخشندگی و کیفیت باریکه بررسی شده است [۵]. در سال ۲۰۱۰ فن و همکارانش با استفاده از ۷ باریکه لیزری در آرایش شش ضلعی به بررسی میزان جایگزیدگی انرژی در لوب مرکزی باریکه ترکیبی پرداخته‌اند [۶]. در ادامه در سال ۲۰۱۹ جابزینسکی و همکارانش به بررسی اثر نوع پروفایل و درجه همدوسی روی عملکرد ترکیب پهلوی به پهلوی باریکه‌های لیزری پرداخته‌اند [۷]. از جمله پارامترهای مهم در چینش هندسی باریکه‌ها در میدان نزدیک به روش پهلوی به پهلوی، تاثیر مکان قرار گیری هر باریکه در دهانه تابش است. در این مقاله با بررسی آرایش‌های پهلوی به پهلوی مختلف تک خط، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی تاثیر نحوه توزیع باریکه

ها در میدان نزدیک، بر ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه‌ها، بررسی شده است. برای این منظور توزیع شدت میدان نزدیک و دور برای هر آرایش ارائه شده تا بتوان با بررسی پهنای توزیع شدت، مقایسه‌ای بین آرایش‌های مختلف ارائه نمود. همچنین با ارائه نمودار توان در سبدها، مقدار توان جایگزیده در مرکز صفحه مشاهده در میدان دور برای تمامی آرایش‌ها بررسی شده است.

## اصول و تئوری

برای محاسبه توزیع شدت حاصل از ترکیب باریکه‌ها در صفحه مشاهده، میدان اپتیکی هر باریکه به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$E_n(x, y, z) = A_n(x, y, z) \times \exp[-ikz + i\phi_n(x, y, z)] \quad (1)$$

که  $A_n(r)$  توزیع دامنه میدان،  $\phi_n(r)$  توزیع فاز مربوط به هر باریکه پیرامحوری می‌باشد. برای باریکه‌های با پروفایل عرضی گاوسی داریم:

$$A_n(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{(x-x_{0n})^2 + (y-y_{0n})^2}{w(z)^2}\right) \quad (2)$$

$$\phi_n(x, y, z) = \exp\left[-i\left(k \frac{(x-x_{0n})^2 + (y-y_{0n})^2}{2R(z)} - \xi(z)\right)\right] \quad (3)$$

که  $(x_{0n}, y_{0n})$  مکان قرار گیری مرکز پروفایل باریکه گاوسی  $n$ ام در دهانه تابش است.

همچنین به منظور بررسی کیفیت باریکه ترکیبی و نیز میزان توان جایگزیده ناشی از هر آرایش در محل صفحه مشاهده در میدان دور از پارامتر توان در سبدها (PIB) استفاده شده است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$P = \iint_{00} 2\pi R_B I(x, y, z) dA \quad (4)$$

که در این جا  $R_B$  شعاع سبدها و  $I$  توزیع شدت باریکه در صفحه مشاهده است که به صورت زیر داده می‌شود:

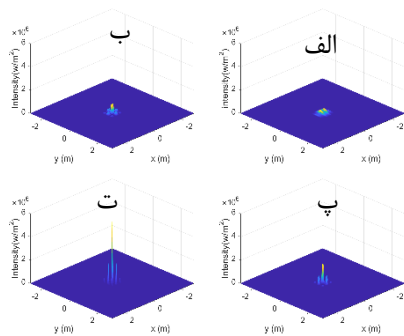
$$I(x, y, z) = (\sum E_n(x, y, z)) \times (\sum E_n(x, y, z))^* \quad (5)$$

## شبیه‌سازی و نتایج

همانطور که بیان شد، در ترکیب باریکه‌های لیزری به روش پهلوی به پهلوی، نحوه توزیع باریکه‌ها، فاصله بین آن‌ها و اندازه کمره هر باریکه در دهانه تابش (میدان نزدیک)، روی توزیع شدت و توان باریکه ترکیبی بسیار مؤثر است. دهانه تابش در واقع دایره‌ای است محیط بر آرایش هندسی که باریکه‌ها طبق آن آرایش چیده شده‌اند. به منظور بررسی تاثیر نحوه توزیع باریکه‌ها در دهانه تابش، ۳۶ باریکه لیزر فیبری ۱ کیلووات در آرایش‌های خطی، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای تمامی آرایش

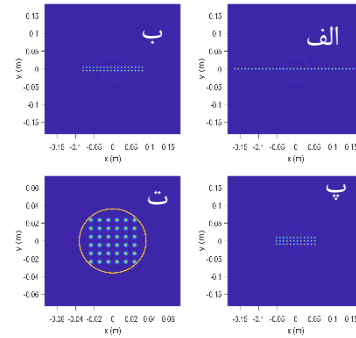
تغییر نحوه توزیع باریکه ها در دهانه تابش، پهنای توزیع شدت میدان دور، کاهش می یابد. در واقع، هرچه نحوه توزیع باریکه ها در دهانه تابش به گونه ای باشد که باریکه ها بخش بیشتری از دهانه تابش را پوشانده باشند، پهنای توزیع شدت باریکه ترکیبی کاهش می یابد، اما اندازه قله شدت برای کلیه آرایش ها در ترکیب ناهمدوس، تقریباً دارای مقدار مشابهی است و این طبیعی است زیرا با انتشار باریکه های غیر همدوس تا فاصله ۲٫۵ کیلومتری، فقط برهمنهی بین میدان باریکه ها وجود دارد و لذا قله شدتی مشابهی خواهند داشت.

شکل (۳) توزیع شدت میدان دور برای ترکیب همدوس این چهار آرایش را نشان می دهد. رفتار نمودارها برای این حالت، مشابه ترکیب ناهمدوس می باشد یعنی، برای آرایش های خطی، دو، سه و شش خط موازی (شکل های الف-ت) پهنای توزیع شدت رو به کاهش است اما برخلاف ترکیب ناهمدوس در این حالت قله شدتی رو به افزایش است. به گونه ای که در ترکیب همدوس، قله شدتی دو مرتبه بزرگتر از ترکیب ناهمدوس است. همچنین، توزیع شدت باریکه نهایی دارای یک قله مرکزی بلند و چندین قله کوچکتر کناری می باشد. این قله ها ناشی از تداخل سازنده باریکه ها و فضای خالی اطراف قله مرکزی نیز ناشی از تداخل ویرانگر آن هاست. همچنین برای آرایش شش خط موازی باریکه نهایی دارای تقارن ۹۰ درجه محوری است، بدین معنی که اگر ۹۰ درجه توزیع شدت حول محور انتشار (Z) چرخانده شود، توزیع شدت مجدداً تکرار می شود. اما سایر آرایش ها دارای تکرار پذیری ۱۸۰ درجه محوری می باشند. علت این امر نیز به نحوه چینش باریکه ها در دهانه تابش بر می گردد زیرا آرایش شش خط موازی به صورت مربع می باشد که دارای تقارن ۹۰ درجه محوری می باشد اما سایر آرایش ها مستطیل شکل هستند که دارای تقارن ۱۸۰ درجه است. بنابراین تاثیر تقارن در چینش باریکه ها در دهانه تابش، به وضوح بر باریکه نهایی حاصل از ترکیب مشخص است.



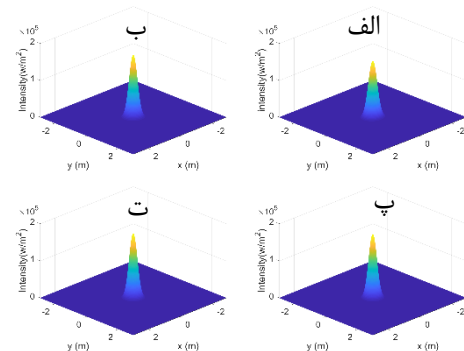
شکل ۳: توزیع شدت میدان دور برای ترکیب همدوس آرایش های الف: خطی، ب: دو خط موازی، پ: سه خط موازی، ت: شش خط موازی

ها، اندازه کمره و نیز فاصله بین باریکه ها، یکسان در نظر گرفته شده است. توزیع شدت میدان نزدیک برای این آرایش ها در شکل (۱) نشان داده شده است. در اینجا فاصله مرکز تا مرکز باریکه ها ۲ برابر اندازه کمره باریکه ها فرض شده است. همچنین اندازه کمره هر باریکه ۲٫۴ میلی متر، در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل مشخص است، باریکه ها در دهانه تابش هیچ همپوشانی با یکدیگر ندارند، لذا در میدان نزدیک تداخل و ترکیبی وجود ندارد.



شکل ۴: توزیع شدت میدان نزدیک برای آرایش های الف: خطی، ب: دو خط موازی، پ: سه خط موازی، ت: شش خط موازی

با استفاده از معادلات ارائه شده در بخش قبل، توزیع شدت میدان دور برای دو حالت ترکیب همدوس و ناهمدوس برای فاصله ۲٫۵ کیلومتری صفحه مشاهده از دهانه تابش و برای هر چهار آرایش شبیه سازی شده است. در شکل ۲ توزیع شدت میدان دور برای ترکیب ناهمدوس برای این چهار آرایش ارائه شده است.



شکل ۲: توزیع شدت میدان دور برای ترکیب ناهمدوس آرایش های الف: خطی، ب: دو خط موازی، پ: سه خط موازی، ت: شش خط موازی

همانطور که شکل ۲ نشان می دهد، توزیع شدت برای آرایش های خطی، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی، به ترتیب شکل های الف-ت) به صورت یک باریکه گاوسی می باشد. پهنای توزیع شدت برای این آرایش ها به ترتیب برابر ۴۹، ۴۵، ۴۲ و ۳۷ سانتیمتر می باشد. نتایج نشان می دهد که با ثابت در نظر گرفتن اندازه کمره باریکه ها و نیز فاصله بین آن ها، با

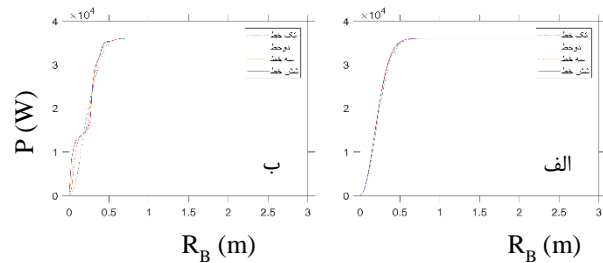
### نتیجه‌گیری

آرایش هندسی و نحوه چینش باریکه‌ها در دهانه تابش، به عنوان یکی از مهمترین فاکتورها در دست‌یابی به باریکه ترکیبی با توان و کیفیت بالا محسوب می‌شود. از جمله مهمترین پارامترها در نحوه چینش هندسی باریکه‌ها در میدان نزدیک، تاثیر اندازه کمره باریکه‌ها، فاصله بین آن‌ها و نیز مکان قرارگیری هر باریکه در دهانه تابش است. با بکارگیری باریکه‌ها در آرایش پهلو به پهلو ی تک خط، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی در دهانه تابش با اندازه کمره ثابت و نیز فاصله یکسان بین باریکه‌ها، تاثیر نحوه توزیع باریکه‌ها در میدان نزدیک بر ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه‌ها، بررسی شده است. برای این منظور توزیع شدت میدان نزدیک و دور برای هر آرایش ارائه شده تا بتوان با بررسی پهنای توزیع شدت، مقایسه‌ای بین آرایش‌های مختلف ارائه نمود. همچنین با ارائه نمودار توان در سید، مقدار توان جایگزیده در مرکز صفحه مشاهده در میدان دور برای تمامی آرایش‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با تغییر چینش باریکه‌ها به سمت شکل مربع، که در آن توزیع باریکه‌ها به گونه‌ای است که سطح بیشتری از دهانه تابش پوشانده شده است، مقدار توان در سید افزایش و نیز پهنای توزیع شده کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پروفایل باریکه ترکیبی نهایی دارای همان تقارنی است که باریکه‌ها در دهانه تابش طبق آن چیده شده‌اند.

### مرجع‌ها

- [1] S. Kobayashi and T. Kimura, "Injection locking characteristics of an algaas semi-conductor laser," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 16, no. 9, pp. 915–917, 1980.
- [2] J. M. Stuart, et al., "100-kw coherently combined nd:Yag mopa laser array," *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV*, 2009.
- [3] Z. Liu, et al "Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect," *Science China Technological Sciences*, vol. 56, no. 7, pp. 1597–1606, 2013.
- [4] N. R. Van et al "Comparison of coherent and incoherent laser beam combination for tactical engagements," *Optical Engineering*, vol. 51, no. 10, pp. 104301–104301, 2012.
- [5] Y. Li, et al, "Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution," *Optics & Laser Technology*, vol. 39, no. 5, pp. 957–963, 2007
- [6] X. Fan, et al, "Coherent combining of a seven-element hexagonal fiber array," *Optics & Laser Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 274–279, 2010.
- [7] Jan K. et al. Effect of beam profile and partial coherence on coherent beam combining performance *Optics Communications* 442 (2019) 40–45.
- [8] A. E. Siegman, "How to (maybe) measure laser beam quality," in *Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues*, p. MQ1, Optical Society of America, 1998

در ادامه به منظور بررسی تاثیر نحوه توزیع باریکه‌ها در دهانه تابش، بر میزان توان در سید، تغییرات توان باریکه ترکیبی بر حسب تغییرات شعاع سید برای آرایش‌های خطی، دو، سه و شش خط موازی و برای دو حالت همدوس و ناهمدوس در قسمت‌های (الف و ب) شکل (۳) رسم شده است.



شکل ۴: تغییرات توان بر حسب شعاع سید برای آرایش‌های خطی، دوخط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی برای الف: ترکیب ناهمدوس، ب: ترکیب همدوس در نمودارهای مربوط به حالت ناهمدوس (الف) مقدار توان با افزایش شعاع سید به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد تا نهایتاً به یک مقدار ثابت میل کنند، اما در نمودارهای مربوط به حالت همدوس (ب) با افزایش شعاع سید، ابتدا یک افزایش توان با شیب زیاد ناشی از قله مرکزی، در ادامه ثابت ماندن توان به علت ناحیه تهی از توان و مجدداً افزایش توان ناشی از قله‌های کناری مشاهده می‌شود. نکته مهم این است که شروع ناحیه تخت و ناحیه افزایش مجدد توان در آرایش شش خط موازی در شعاع کمتری نسبت به سایر نمودارها رخ می‌دهد و این نشان‌دهنده توزیع شدت با پهنای کمتر در آرایش شش خط موازی در مقایسه با سایر آرایش‌ها است. همچنین مقدار توان در سید در نمودارهای فوق به ازای سه شعاع سید ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول ۱: مقدار توان در سید برای سه شعاع سید و برای آرایش‌های خطی، دو، سه و شش خط موازی

آرایش هندسی	PIB (w) R <sub>B</sub> = ۲۰ cm	PIB (w) R <sub>B</sub> = ۱۰ cm	PIB (w) R <sub>B</sub> = ۵ cm
خطی	۹۶۲۰	۴۵۱۶	۱۱۷۴
دو خط موازی	۱۳۴۴۷	۱۱۸۹۶	۴۶۳۱
سه خط موازی	۱۴۱۲۵	۱۲۶۳۹	۸۷۷۳
شش خط موازی	۱۴۳۶۳	۱۲۹۴۷	۱۰۷۸۶

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با تغییر نحوه توزیع باریکه‌ها یا به بیان دیگر تغییر نوع چینش باریکه‌ها در دهانه تابش، مقدار توان در سید تغییر می‌نماید به گونه‌ای که هرچه شکل چینش باریکه‌ها به سمت مربع نزدیک‌تر می‌شود، مقدار توان در سید نیز بیشتر می‌گردد.