



Comparison of Combined Beam Quality Metrics in the Coherent Beam Combination of Lasers

N. Siahvashi^{*1}, S. Qaani Gholamhosseini²

Researcher , Imam Hossein University, Tehran, Iran.

(Received: 2024/02/23 revised: 2024/05/14 Accepted:2024/06/09 published: 2024/07/14)

Abstract

The performance of a laser system based on coherent beam combination (CBC) is evaluated by combined beam quality metrics. In this article, the comparison and analysis of these combined beam quality metrics, in the coherent combination of Gaussian beams, is presented. These metrics include $M2$ factor, Strehl ratio (SR), power and average intensity in the diffraction limited bucket (PIBdl and Idl), power in the bucket of 5 cm (PIB5cm) and 20 cm (PIB20cm). In this regard, arrays with hexagonal, ring, square and rectangular geometry have been used. Also, factors such as the waist radius of beams, separation distance among adjacent beams and the number of elements have been investigated and studied. The simulation results show that in all arrays, the beam quality increases by increasing the waist radius of beams and decreasing the distance between them. Also, with the increase in the number of elements, the power in the diffraction limited bucket and the Strehl ratio tend towards constant values; However, the $M2$ factor metric is associated with a decrease in the quality of the combined beam and the Idl, PIB5cm and PIB20cm metrics are associated with an increase. Although, to evaluate the quality of a single laser beam, the metric of $M2$ factor and Strehl ratio are used; But evaluating the combined beam quality with such metrics does not seem very proper. Therefore, in the applications that require the use of central lobe, the power in the diffraction limited bucket and in direct energy applications, the Idl, PIB5cm and PIB20cm metrics are suitable.

Keywords: Beam Waist, Combined Beam Quality Metric, Coherent Beam Combination, Distance Among Adjacent Elements, Geometric Array, Number of Elements

* Corresponding author E-mail: n.siahvashi.r@gmail.com

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



علمی - پژوهشی

مقایسه معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی در ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری

ناصر سیاهوشی^۱، سجاد قآنی غلامحسینی^{۲*}دانشجوی کارشناسی ارشد، دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴)
DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.1.6.4>

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons Attribution توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

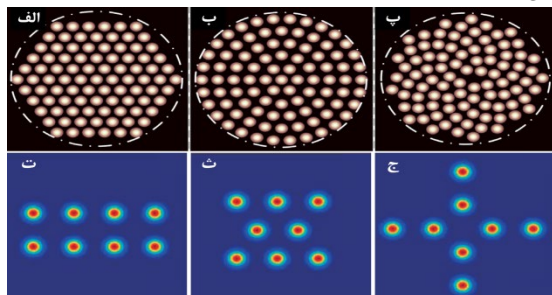
عملکرد یک سیستم لیزری مبتنی بر ترکیب همدوس باریکه‌ها (CBC) توسط معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی ارزیابی می‌شود. در این مقاله مقایسه و تحلیل معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی، در ترکیب همدوس باریکه‌های گاوسی ایده‌آل ارائه شده است. این معیارها شامل، ضریب M2، نسبت اشتراک (SR)، توان و شدت متوسط در سید حد پراش (PIBdl و Idl) و توان در سید با شعاع سید ۵ و ۲۰ سانتی‌متر (PIB5cm، PIB20cm) هستند. در این راستا، از آرایش‌هایی با هندسه شش‌ضلعی، دایروی، مربعی و مستطیلی استفاده شده است. همچنین، عواملی همچون شعاع کمره باریکه‌ها، فاصله مرکز به مرکز بین باریکه‌های مجاور و تعداد باریکه‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، در تمامی آرایش‌ها با افزایش شعاع کمره باریکه‌ها و کاهش فاصله بین آن‌ها، کیفیت باریکه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد باریکه، معیار توان در سید حد پراش و نسبت اشتراک به سمت مقادیر ثابتی میل می‌کنند؛ اما معیار ضریب M2 با کاهش کیفیت باریکه ترکیبی و معیارهای Idl، PIB5cm و PIB20cm با افزایش همراه هستند. گرچه برای ارزیابی کیفیت تک باریکه لیزری از معیارهای ضریب M2 و نسبت اشتراک استفاده می‌شود؛ اما ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی با چنین معیارهایی چندان مناسب به نظر نمی‌رسد؛ لذا در کاربردهای که نیازمند استفاده از ناحیه روشن مرکزی هستند، معیار توان در سید حد پراش و در کاربردهای انرژی مستقیم، معیارهای Idl، PIB5cm و PIB20cm مناسب هستند.

کلیدواژه‌ها: آرایش هندسی، ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری، تعداد باریکه، فاصله مرکز به مرکز باریکه‌ها، معیار کیفیت

باریکه ترکیبی، کمره باریکه

۱- مقدمه

برای غلبه بر این چالش‌ها معرفی شد و مطالعه این حوزه، به‌ویژه از اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. در ترکیب باریکه‌های لیزری، آرایه‌ای از چندین لیزر به‌گونه‌ای کنار هم قرار گرفته که با برهم‌نهی میدان‌های گسلی در محل صفحه مشاهده، توان جایگزیده در آن محل افزایش یابد. چند نمونه از نحوه قرارگیری باریکه‌های لیزرها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱). انواع آرایش‌های مختلف در چینش باریکه‌های لیزری.

الف: شش‌ضلعی، ب: دایروی، پ: مارپیچی فرما [۶]، ت: مستطیلی،

ث: درهم‌تنیده و ج: متقاطع [۷].

با توجه به پیشرفت بسیار چشم‌گیر حوزه لیزر در دهه‌های اخیر، امکان توسعه منابع لیزری توان بالا و با کیفیت باریکه مناسب فراهم شده است [۱، ۲]. باریکه‌های لیزری توان بالا، در حوزه‌های مختلف از جمله، صنعت، پزشکی، علوم و صنایع دفاعی-نظامی کاربردهای بسزایی از خود نشان داده‌اند [۱، ۳]. با این حال دستیابی به این لیزرها، به دلیل محدودیت‌های فیزیکی مانند اثرات غیرخطی (پراکندگی رامان و بریلوین القا شده)، اثرات حرارتی-پتیک و آسیب مواد در توان‌های بالا، با چالش‌های مهمی مواجه شده است [۲، ۴]؛ این محدودیت‌ها سبب شده است که توان خروجی تک لیزر از چند کیلووات فراتر نرود [۵].

ترکیب باریکه‌های لیزری اعم از روش‌های ترکیب همدوس (CBC^۱) و ترکیب ناهمدوس (ICBC^۲)، به‌عنوان یک راه‌حل مناسب* رایانامه نویسنده مسئول: n.siahvashi.r@gmail.com^۱ Coherent Beam Combination (CBC)^۲ InCoherent Beam Combination (ICBC)

برای این منظور با ارائه اصول و مبانی ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری و شبیه‌سازی عددی انتگرال هویگنس-فرنل^۴، اثر عوامل هندسی شعاع کمره باریکه، فاصله بین باریکه‌های مجاور و تعداد باریکه‌ها در آرایش‌های مذکور بررسی و معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی، تحلیل و مقایسه شدند.

۲- اصول و مبانی

در این بخش ابتدا به بررسی اصول و مبانی انتشار باریکه لیزر در خلأ پرداخته خواهد شد و با استفاده از آن توزیع شدت میدان دور ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری تعیین می‌شود. سپس معیارهای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی معرفی و در نهایت عوامل هندسی مؤثر بر آن که در این مقاله به آن‌ها پرداخته خواهد شد، ارائه می‌شود.

۲-۱- نظریه انتشار باریکه لیزر در خلأ

توزیع میدان الکتریکی تک باریکه در خلأ، عمدتاً توسط نظریه باریکه گاوسی [۸، ۱۰] یا نظریه پراش و انتگرال هویگنس-فرنل [۱۱، ۱۴، ۱۸] توصیف می‌شود. در روش دوم، میدان دور تک باریکه نام از تبدیل فوریه میدان نزدیک آن به دست می‌آید. بنابراین، میدان هر باریکه سوپرگاوسی با مرتبه p در هر نقطه (x, y, z) از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$E_i(x, y, z) = A_p \frac{w(0)}{w(z)} \exp\left(-\left(\frac{\rho}{w(z)}\right)^{2p}\right) \times \exp(-i[kz - \tan^{-1}(z/z_0)]) \times \exp\left(-i\frac{k\rho^2}{2R(z)}\right) \quad (1)$$

در اینجا A_p دامنه میدان سوپر گاوسی، $k=2\pi/\lambda$ عدد موج در راستای انتشار z و $\rho^2 = x^2 + y^2$ است. همچنین t_0 اندازه لکه و شعاع انحنای جبهه موج در مکان z و $w(z)$ و $R(z)$ در رابطه (۲) تعریف شده‌اند.

$$z_0 = kw^2(0)/2, \quad w^2(z) = w^2(0) \left[1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right], \quad R(z) = z_0 \left[\frac{z}{z_0} + \frac{z_0}{z}\right] \quad (2)$$

با استفاده از انتگرال هویگنس-فرنل و تبدیل فوریه میدان نزدیک در نظریه پراش فرائهوفر، برای میدان دور تک باریکه i ام در فاصله L خواهیم داشت:

$$E_i(x, y, z = L) = \frac{e^{ikr}}{i\lambda r} \int E_i(x, y, 0) e^{-\frac{ik}{r}(xx' + yy')} dx' dy' \quad (3)$$

با قراردادن معادله هر باریکه لیزری در دهانه تابش در رابطه (۳) و با تغییر متغیر $\rho'_0 = \rho/w(0)$ میدان دور از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$E_i(x, y, z = L) = \frac{e^{ikr}}{i\lambda r} A_p 2\pi w^2(0) \times \int_{\rho'_0=0}^1 e^{-\rho'^{2p}} J_0\left(\frac{k}{r}\rho w(0)\rho'_0\right) \rho'_0 d\rho'_0 \quad (4)$$

باید توجه داشت که چنین سامانه‌ای در عمل با پارامترهای هندسی و غیر هندسی جدیدی مواجه است که انحراف از آن‌ها در میزان جایگزیدگی توان و به عبارتی در کیفیت باریکه ترکیبی، مؤثر خواهند بود. نوع آرایش، شعاع کمره باریکه‌ها، فاصله بین باریکه‌های مجاور و تعداد باریکه‌ها از جمله این عوامل هندسی هستند.

در این راستا، فعالیت‌های متعددی انجام شده و معیارهای متفاوتی برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته است. لی و همکاران، به بررسی اثرات تعداد باریکه‌ها و فضای بین باریکه‌های مجاور بر کیفیت باریکه ترکیبی با معیار M^2 پرداختند [۸]. ژو و همکاران نیز، با معرفی معیار توان در سید^۳ حد پراش^۲، اثر برخی از پارامترها از جمله تعداد باریکه و فاصله بین باریکه‌های مجاور را در آرایش‌های دایروی و مربعی با این معیار بررسی نمودند [۹، ۱۰]. فن و همکاران، کیفیت باریکه ترکیبی حاصله از آرایش شش‌ضلعی را با نسبت اشتراک^۳ مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. علوی‌نژاد و همکاران به بررسی انتشار باریکه در اتمسفر متلاطم با معیار M^2 پرداختند [۱۲]. رن و همکاران نیز در بررسی زوایای قطبش غیریکنواخت باریکه‌ها، اثر تعداد و فاصله بین باریکه‌ها را بر روی کیفیت باریکه با معیار توان در سید حد پراش مطالعه کردند [۱۳]. جابزینسکی با مقایسه معیارهای نسب اشتراک، توان در سید حد پراش و شدت متوسط سید حد پراش دریافت معیارهای متناظر با سید حد پراش برای ارزیابی CBC مناسب هستند [۲، ۱۴]. سیاهوشی با استفاده از معیارهای توان در سید ۵، ۱۰ و ۲۰ cm، به بررسی تأثیر واگرایی و فاکتور فضای خالی در آرایش مربعی پرداخته است [۱۵، ۱۶]. قآنی و همکاران به بررسی اثر تعداد باریکه در ترکیب همدوس باریکه‌های لیزری پرداختند [۱۷].

در گزارش‌های ارائه شده، مقایسه کاملی بین معیارهای مختلف کیفیت باریکه ترکیبی با مقایسه آرایش‌های مختلف ارائه نشده است؛ همچنین تأثیر فاصله بین باریکه‌ها بر کیفیت باریکه، تنها برای آرایش‌هایی با تعداد باریکه مشخص گزارش شده است؛ لذا بررسی اینکه کدام معیار برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی مناسب است و چگونه هر یک از عوامل هندسی بر روی این معیارها تأثیر می‌گذارد، ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو در این مقاله مقایسه معیارهای مختلف کیفیت باریکه، برای ارزیابی مناسب باریکه ترکیبی و همچنین مقایسه آرایش‌های مختلف صورت گرفته است. معیارهای ضریب M^2 ، نسبت اشتراک (SR)، توان در سید حد پراش (PIB_{dl})، شدت سید حد پراش (I_{dl})، توان در سید ۵ سانتی‌متر (PIB_{5cm}) و ۲۰ سانتی‌متر (PIB_{20cm}) برای ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی در آرایش‌های شش‌ضلعی، دایروی، مربعی و مستطیلی بررسی شدند.

³ Power In the Bucket (PIB)

⁴ diffraction-limited bucket

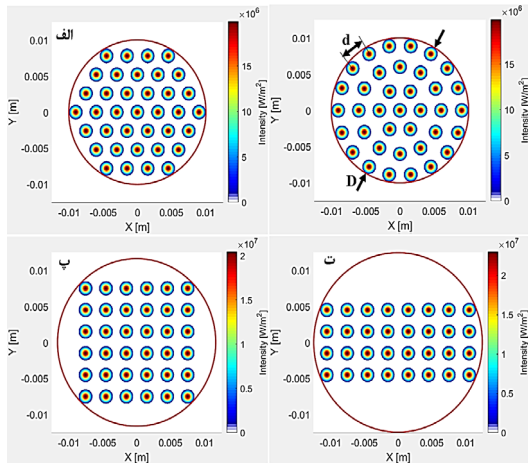
⁵ Strehl Ratio (SR)

⁶ Huygens-Fresnel integral

یکی دیگر از عوامل هندسی اثرگذار در چنین سامانه‌هایی است.

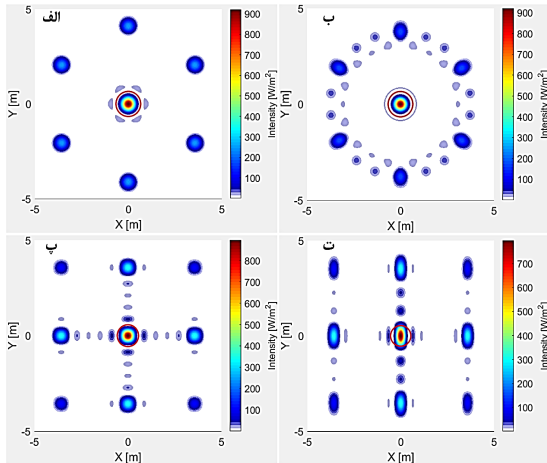
۳- شبیه‌سازی و نتایج

به‌منظور شبیه‌سازی ترکیب همدوس باریکه‌های گاوسی ایده‌آل ($M^2=1$)، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. آرایش‌های شش‌ضلعی و دایروی با تعداد ۳۷ باریکه، آرایش‌های مربعی با ۳۶ و آرایش مستطیلی با ۳۲ باریکه (با طولی دوبرابر عرض آن، یعنی ۸ در ۴) مدل‌سازی شدند. پارامترهای اولیه بکار رفته شامل، طول موج (λ)، شعاع کمره باریکه ($w(0)$) و فاصله مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور (d) به ترتیب برابر 1080 nm ، 1 mm و 3 mm در نظر گرفته شد. همچنین صفحه مشاهده در فاصله 10 km (ناحیه میدان دور) و توان کل در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت فرض شده است. توزیع شدت دهانه تابش و میدان دور برای آرایش‌های مذکور در شکل‌های (۲) و (۳) آمده است. دایره محاطی به دهانه تابش با قطر D در شکل (۲) و سبد حد پراش در شکل (۳) با دایره مشخص شده است. همچنین فاصله مرکز به مرکز بین دو باریکه مجاور با d نشان داده شده است.



شکل (۲). توزیع شدت دهانه تابش برای آرایش‌های الف: شش‌ضلعی،

ب: دایروی، پ: مربعی و ت: مستطیلی.



شکل ۱. توزیع شدت میدان دور برای آرایش‌های الف: شش‌ضلعی، ب:

دایروی، پ: مربعی و ت: مستطیلی.

انتگرال موجود در رابطه (۴) صورتی از تبدیل هنکل است و J_0 تابع بسل نوع اول مرتبه صفر است. حال با برهم‌نهی میدان باریکه‌ها، توزیع شدت میدان دور ترکیب همدوس از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$I_{CBC}(x, y, z) = E_{tot}(x, y, z)E_{tot}^*(x, y, z) \quad (5)$$

۲-۲- معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی

معیارهای متنوعی در بررسی کیفیت باریکه معرفی شده‌اند. نسبت اشترل به‌عنوان نسبت قله شدت میدان دور باریکه به یک باریکه سر تخت ($p=\infty$) با همان توان و دهانه تابش، تعریف می‌شود [۱]، [۱۹]. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی (۴) برای باریکه سر تخت، شدت روی محور میدان دور آن به دست می‌آید:

$$I_{p=\infty}(0, 0, L) = \left(\frac{Ap=\infty}{\lambda L} \pi D^2\right)^2, \quad SR = \frac{I_{CBC}(0, 0, L)}{I_{p=\infty}(0, 0, L)} \quad (6)$$

در اینجا، $Ap=\infty$ دامنه میدان باریکه سر تخت با قطر دهانه تابش D و توان کل $P_t = (Ap=\infty \pi w(0)^2)^2$ است. ضریب M^2 نیز نسبت واگرایی باریکه به باریکه گاوسی ایده‌آل بوده و همیشه $M^2 \geq 1$ است. در میدان دور، معیار M^2 را می‌توان با استفاده از تعریف گشتاور مرتبه دوم محاسبه کرد [۲۰-۲۲]:

$$W_q^2(z) = 4 \frac{\int (q-q_0)^2 I(x, y, z) dx dy}{\int I(x, y, z) dx dy} \quad (7)$$

$$M_q^2 = W_q(z)W_q(0) \frac{\pi}{\lambda z}, \quad M_r^2 = \sqrt{M_x^2 M_y^2}$$

که q_0 مرکز ثقل و $W_q(z)$ پهنای باریکه در راستای مختصه q است. همچنین معیارهای توان در سبد - مقدار توان جایگزیده شده در دایره‌ای (سبد) به شعاع R_B در صفحه مشاهده - و شدت متوسط در سبد از رابطه (۸) به دست می‌آیند [۲]:

$$PIB_{R_B} = \frac{\int_{\rho=0}^{R_B} \int_{\theta=0}^{2\pi} I(\rho, \theta, z) \rho d\theta d\rho}{P_t}, \quad I_{R_B} = \frac{PIB_{R_B}}{\pi R_B^2} \quad (8)$$

که P_t توان کل باریکه‌هاست. در برخی موارد اندیس dl به‌عنوان سبد حد پراش با شعاع سبد $R_{dl} = 1.22\lambda z/D$ به کار برده می‌شود.

۲-۳- عوامل هندسی مؤثر در ترکیب باریکه

عوامل هندسی یکی از انواع پارامترهای تأثیرگذار بر سامانه‌های مبتنی بر ترکیب باریکه بوده که انحراف آن‌ها می‌تواند باعث کاهش کیفیت باریکه ترکیبی شود. نوع آرایش و تعداد باریکه‌ها و شعاع کمره باریکه‌ها از دسته عوامل هندسی هستند که قبل از طراحی و ساخت باید مورد مطالعه قرار گیرند. علاوه بر این، در دهانه تابش چنین سامانه‌هایی به دلیل ماشین‌کاری یا استفاده از نگهدارنده‌های اپتومکانیکی بین باریکه‌های مجاور فاصله‌هایی وجود خواهد داشت؛ بنابراین، فاصله مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور، dl در صفحه تابش،

* Top-hat

آن‌ها نسبت به دو آرایش دیگر است و آرایش دایروی کم‌ترین مقدار I_{dl} را دارد که به دلیل توان در سبب حد پراش کم‌تر آن نسبت به آرایش شش‌ضلعی است.

۳-۱- اثر فاصله شعاع کمره باریکه‌ها (w_0)

در این بخش به بررسی تأثیر شعاع کمره باریکه‌ها بر کیفیت باریکه ترکیبی در آرایش‌های شش‌ضلعی، دایروی، مربعی و مستطیلی پرداخته خواهد شد. فاصله مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور، ۲ mm انتخاب شد و با تغییر شعاع کمره باریکه‌ها از ۰.۲ تا ۱ میلی‌متر، تأثیر این عامل بر روی تمامی معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی در آرایش‌های مذکور بررسی شد. شکل (۴) تغییرات معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی بر حسب تغییرات شعاع کمره را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۴) برای تمامی آرایش‌ها و نیز همه معیارها، با افزایش شعاع کمره باریکه، کیفیت باریکه ترکیبی بهبود یافته است. مطابق شکل (۴-الف) ضریب M^2 ، با افزایش شعاع کمره باریکه‌ها در تمامی آرایش‌ها به طور یکسان کاهش می‌یابد و به باریکه ایده‌آل گاوسی نزدیک می‌شود. تأثیر پارامتر $w(0)$ بر معیارهای SR ، PIB_{dl} ، PIB_{5cm} و PIB_{20cm} بسیار شبیه به هم است؛ به گونه‌ای که علاوه بر رفتار مشابه، ترتیب قرارگیری نمودارها نیز یکسان است. تنها تفاوت قابل‌مشاهده در این چهار نمودار، منطبق بودن نسبت اشتراک برای آرایش‌های شش‌ضلعی با دایروی است، درحالی‌که برای دیگر نمودارها این انطباق کامل رؤیت نمی‌شود. همچنین آرایش‌های شش‌ضلعی و مستطیلی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر کیفیت باریکه را دارند. مطابق شکل (۴-ت) معیار I_{dl} روند صعودی از خود نشان می‌دهد، ولی باید توجه کرد که این معیار به شعاع حد پراش بسیار وابسته است. آرایش‌های مستطیلی و مربعی به دلیل شعاع سبب حد پراش کم‌تر (دهانه تابش بزرگ‌تر) نسبت به آرایش شش‌ضلعی و دایروی شیب بیش‌تری دارند، درحالی‌که توان در سبب حد پراش آن‌ها کمتر از این دو آرایش است. برای بررسی اثر فاصله بین باریکه‌های مجاور در آرایه، شعاع کمره باریکه‌ها برابر ۱ mm فرض شد و با تغییر فاصله‌های مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور از کمترین مقدار ممکن خود یعنی ۲ تا ۱۰ mm، تأثیر این عامل بر روی کیفیت باریکه ترکیبی با در نظر گرفتن معیارهای مذکور بررسی شد. شکل (۵) وابستگی این معیارها به فاصله بین باریکه‌های مجاور را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۲)، باریکه‌ها هیچ‌گونه برهم‌نهی در دهانه تابش باهم ندارند. درحالی‌که در توزیع شدت میدان دور (شکل ۳) یک ناحیه روشن مرکزی با شدت زیاد و تعدادی نواحی روشن جانبی با شدت کم دیده می‌شود و بر اثر تداخل ویرانگر باریکه‌های لیزری، هیچ توانی در منطقه حدفاصل نواحی روشن دیده نمی‌شود. علی‌رغم برخی شباهت‌های ظاهری در توزیع شدت‌ها، آرایش شش‌ضلعی در مقایسه با دیگر آرایش‌ها نواحی روشن جانبی کم‌تری دارد.

با اطلاعات به‌دست‌آمده از توزیع شدت میدان دور (شکل ۳)، ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی با معیارهای ضریب M^2 ، نسبت اشتراک (SR)، توان در سبب حد پراش (PIB_{dl})، شدت سبب حد پراش (I_{dl})، توان در سبب حد پراش ۵ سانتی‌متر (PIB_{5cm}) و ۲۰ سانتی‌متر (PIB_{20cm}) انجام گرفت و نتایج آن در جدول (۱) آمده است.

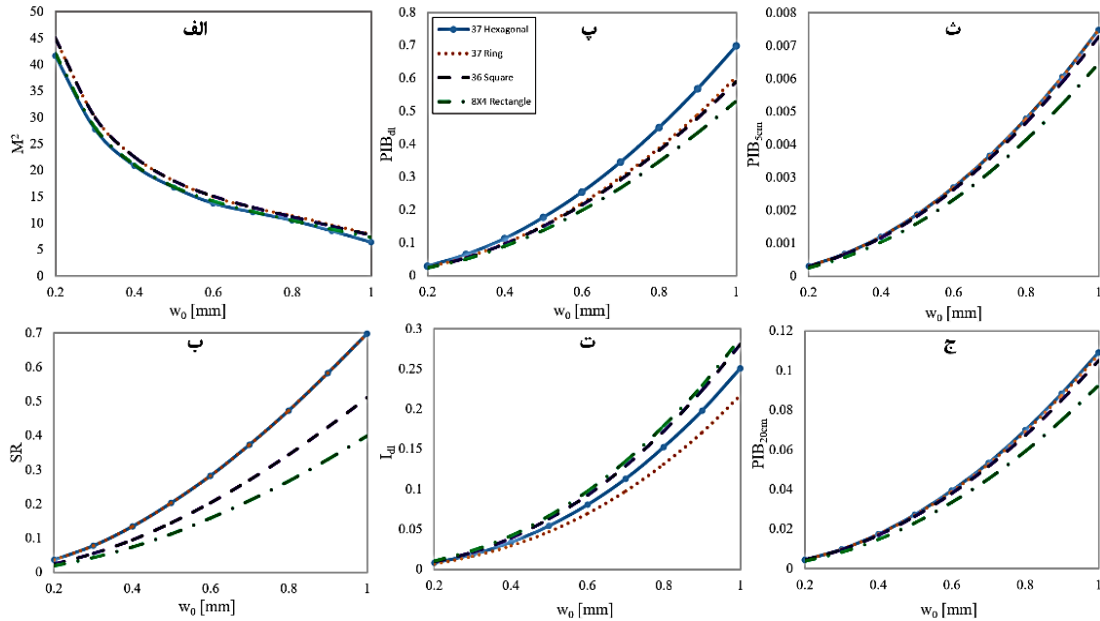
جدول (۱). مقادیر معیارهای مختلف ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی

برای آرایش‌های هندسی مختلف با پارامترهای شکل (۲).

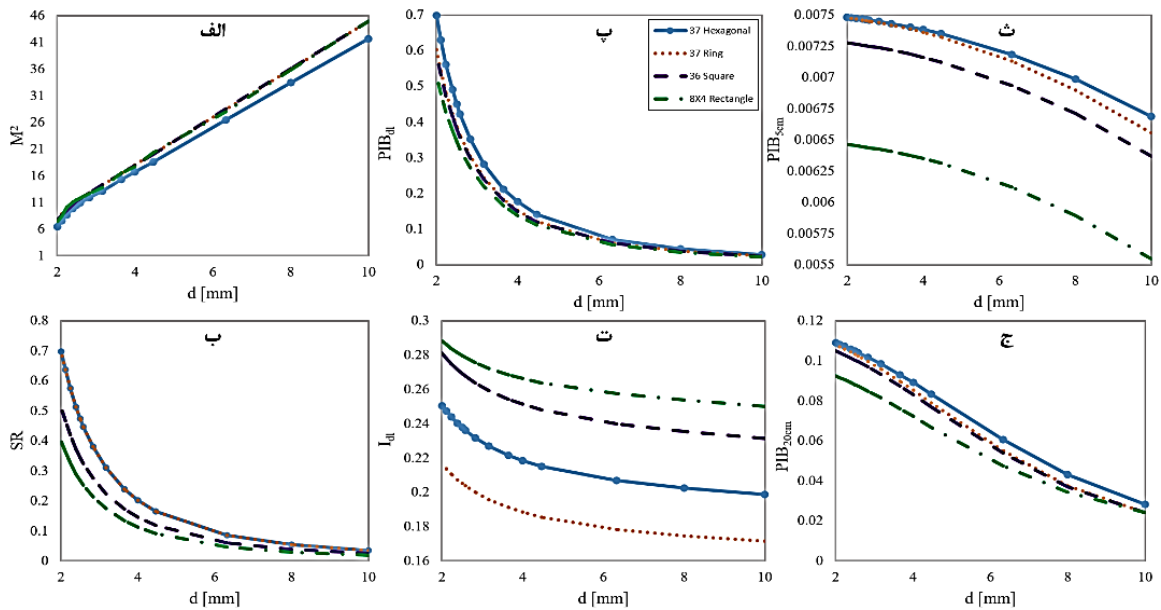
معیار آرایش	M^2	SR	PIB_{dl}	I_{dl}	PIB_{5cm}	PIB_{20cm}
شش‌ضلعی	۱۲٫۳۱	۰٫۳۴۲	۳۱٪٫۳۳	۰٫۲۲۹	۰٪٫۷۳	۹٪٫۹۸
دایروی	۱۲٫۸۲	۰٫۳۴۲	۲۷٪٫۰۱	۰٫۱۹۸	۰٪٫۷۳	۹٪٫۷۴
مربعی	۱۳٫۳۴	۰٫۲۴۷	۲۶٪٫۵۱	۰٫۲۶۱	۰٪٫۷۱	۹٪٫۴۸
مستطیلی	۱۲٫۵۲	۰٫۱۹۲	۲۴٪٫۲۳	۰٫۲۷۴	۰٪٫۶۳	۸٪٫۲۹

آرایش‌های شش‌ضلعی و مربعی به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین ضریب M^2 را دارند که ناشی از کم‌ترین و بیش‌ترین پراکندگی شدت از مرکز هستند. همچنین آرایش‌های شش‌ضلعی و مستطیلی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین کیفیت باریکه را از نظر معیارهای SR ، PIB_{dl} ، PIB_{5cm} و PIB_{20cm} دارند؛ ضمناً معیارهای SR و PIB_{5cm} برای آرایش‌های شش‌ضلعی و دایروی مقدار یکسانی دارند. اما بیش‌ترین مقدار معیار I_{dl} به ترتیب مربوط به آرایش‌های مستطیلی و مربعی است که به علت شعاع سبب حد پراش کم‌تر (دهانه تابش بزرگ‌تر)

۳-۲- اثر فاصله مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور (d)



شکل (۴). تغییرات معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی برحسب تغییرات شعاع کمره باریکه‌ها برای آرایش‌های شش ضلعی (خط توپر)، دایروی (نقطه‌چین)، مربعی (خط‌چین)، مستطیلی (خط-نقطه). الف: ضریب M^2 ، ب: نسبت اشتراک (SR)، پ: توان در سبب حد پراش (PIB_{dl})، ت: شدت متوسط سبب حد پراش (I_{dl})، ث: توان در سبب ۵ سانتی‌متر (PIB_{5cm}) و ج: توان در سبب ۲۰ سانتی‌متر (PIB_{20cm})



شکل (۵). تغییرات معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی برحسب تغییرات فاصله مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور برای آرایش‌های شش ضلعی (خط توپر)، دایروی (نقطه‌چین)، مربعی (خط‌چین)، مستطیلی (خط-نقطه). الف: ضریب M^2 ، ب: نسبت اشتراک (SR)، پ: توان در سبب حد پراش (PIB_{dl})، ت: شدت متوسط سبب حد پراش (I_{dl})، ث: توان در سبب ۵ سانتی‌متر (PIB_{5cm}) و ج: توان در سبب ۲۰ سانتی‌متر (PIB_{20cm})

و توان در سبب حد پراش (شکل ۵-ب) رفتار تقریباً مشابهی دارند و هرچه فاصله بین باریکه‌ها بیشتر می‌شود انطباق نمودارها نیز افزایش می‌یابد. به طور مثال مطابق شکل (۵-ب) اختلاف ۱۶٫۸۳٪ توان در سبب حد پراش بین دو آرایش شش ضلعی و مستطیلی در $d=2\text{ mm}$ به اختلاف حدود ۰٫۵۹٪ در فواصل زیاد $d=10\text{ mm}$ می‌رسد و عملاً

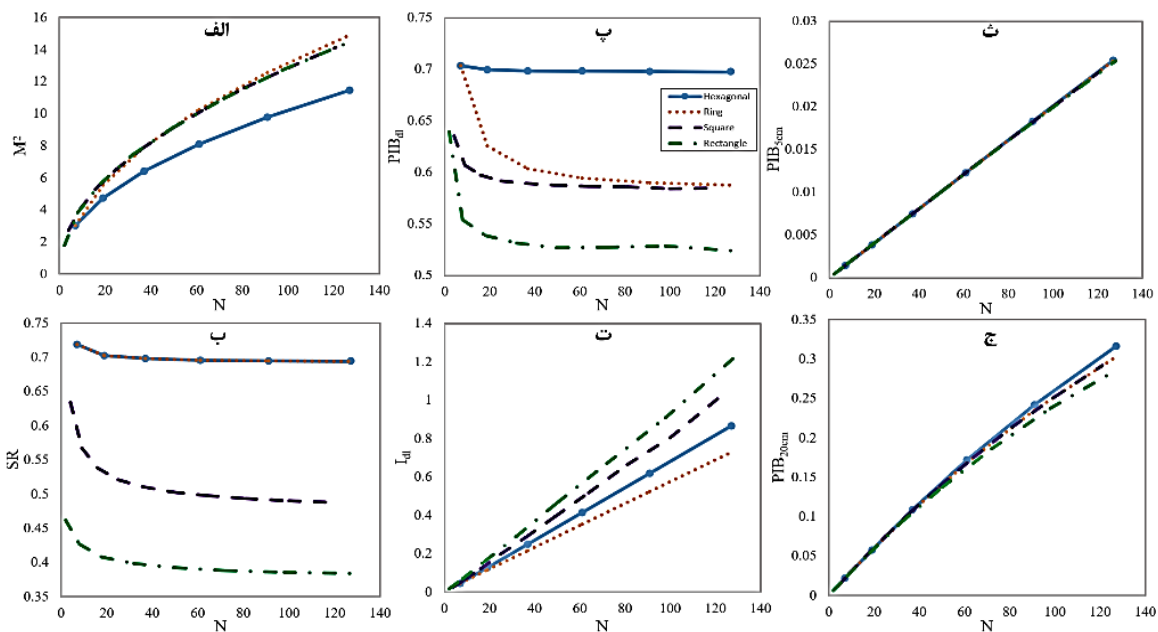
مطابق شکل (۵)، برای تمامی آرایش‌ها، با افزایش d کیفیت باریکه ترکیبی کاهش می‌یابد و این برای تمامی معیارها صادق است. با افزایش این پارامتر، معیار M^2 به طور تقریباً خطی و یکسانی افزایش می‌یابد (شکل ۵-الف)، اما باقی معیارها با کاهش غیرخطی کیفیت همراه هستند. همچنین دو معیار نسبت اشتراک (شکل ۵-ب)

معیار نسبت اشتراک (شکل ۶-ب) و توان در سبب حد پراش (شکل ۶-پ) در رفتاری مشابه و برای تمامی آرایش‌ها، تغییر محسوسی نمی‌کنند و ثابت باقی می‌مانند. البته برای آرایش‌های دایروی، مربعی و مستطیلی، یک روند کاهشی جزئی مشاهده می‌شود و همچنان نسبت اشتراک برای دو آرایه شش‌ضلعی و دایروی مقادیر یکسان می‌دهد. مطابق شکل (۶-پ) آرایش شش‌ضلعی با هر تعداد باریکه، بیش‌ترین توان در سبب حد پراش (۶۹٪) را دارد و با افزایش تعداد باریکه‌ها روند کاهشی کیفیت به خود نمی‌گیرد؛ اما آرایش مستطیلی با کم‌ترین مقدار PIB_{dl} و روندی کاهشی با افزایش تعداد باریکه روبرو است. برخلاف این روند کاهشی کیفیت، نتایج معیارهای توان در سبب ۵ و ۲۰ سانتی‌متر (شکل‌های ۶-ث و ۶-ج) و شدت متوسط حد پراش (شکل ۶-ت)، نشان از روند افزایشی اما کاملاً خطی دارد. به‌ویژه برای آرایش نامتقارن مستطیلی که ناحیه روشن مرکزی در یک راستا از سبب ۲۰ سانتی‌متر خارج می‌شود، روند PIB_{20cm} در تعداد باریکه زیاد از رفتار خطی خارج می‌شود و معیار توان در سبب ۵ سانتی‌متر هیچ‌گونه تمایزی بین کیفیت در آرایش‌های مختلف نشان نمی‌دهد که نشان‌دهنده وابستگی آن‌ها به شعاع سبب حد پراش است. همچنین با تأمل در معیار M^2 (شکل‌های ۴ تا ۶-الف) می‌توان دریافت، تأثیر عامل هندسی بر کیفیت باریکه در آرایش‌های دایروی، مربعی و مستطیلی یکسان است و هندسه آرایش در تغییرات این معیار چندان مؤثر نیست.

در این دو معیار هیچ تفاوتی بین آرایش‌ها باقی نمی‌ماند. اما معیارهای توان در سبدهای ۵ و ۲۰ سانتی‌متر به‌ویژه PIB_{5cm} ، اختلاف توان ناشی از آرایش‌های مختلف را با تغییر این عامل هندسی تا انتها حفظ کرده‌اند (شکل‌های ۵-ث و ۵-ج).

۳-۳- اثر تعداد باریکه بر کیفیت باریکه ترکیبی

در اینجا تأثیر تعداد باریکه بر کیفیت باریکه ترکیبی در آرایش‌های مختلف بررسی می‌شود و شعاع کمره باریکه‌ها و فاصله مرکز به مرکز باریکه‌های مجاور به ترتیب برابر ۱ mm و ۲ mm فرض شد. برای این منظور از آرایش‌های مختلف شش‌ضلعی، دایروی، مربعی و مستطیلی استفاده شده و تعداد باریکه‌ها از ۲ تا ۱۲۷ باریکه تغییر داده شده است. همچنین کیفیت باریکه ترکیبی با معیارهای ضریب M^2 ، نسبت اشتراک، PIB_{dl} ، PIB_{5cm} و PIB_{20cm} مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۶) نمودار تغییرات معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی برحسب تغییرات تعداد باریکه در آرایش‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. مشابه دو بخش قبل در اکثر معیارها به‌جز معیار I_{dl} آرایش شش‌ضلعی و مستطیلی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین کیفیت را دارند. مطابق شکل (۶-الف)، با افزایش تعداد باریکه، ضریب M^2 برای تمامی آرایش‌ها با افزایش همراه است که معنی آن کاهش کیفیت باریکه ترکیبی است. البته آرایش شش‌ضلعی با یک فاصله قابل‌ملاحظه از دیگر آرایش‌ها، کم‌ترین افزایش را نشان می‌دهد و آرایش دایروی با کمی فاصله از دو آرایش دیگر بیش‌ترین افزایش را دارد. همچنین دو



شکل (۶). تغییرات معیارهای کیفیت باریکه ترکیبی برحسب تغییرات تعداد باریکه‌ها برای آرایش‌های شش‌ضلعی (خط توپر)، دایروی (نقطه‌چین)، مربعی (خط چین)، مستطیلی (خط-نقطه). الف: ضریب M^2 ؛ ب: نسبت اشتراک (SR)؛ پ: توان در سبب حد پراش (PIB_{dl})؛ ت: شدت متوسط سبب حد پراش (I_{dl})؛ ث: توان در سبب ۵ سانتی‌متر (PIB_{5cm})؛ و ج: توان در سبب ۲۰ سانتی‌متر (PIB_{20cm})

- [4] M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE. J. Sel. Top. Quant.*, vol. 20, no. 5, pp. 219-241, 2014.
- [5] <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>.
- [6] W. Li *et al.*, "Coherent beam combining array arrangement with a large number of elements," *Opt. Commun.*, vol. 522, p. 128687, 2022.
- [7] H. K. Liu *et al.*, "The improved power of the central lobe in the beam combination and high power output," *Chinese. Phys. Lett.*, vol. 29, no. 4, p. 044204, 2012.
- [8] Y. Li, L. Qian, D. Lu, D. Fan, and S. Wen, "Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution," *Opt. Fiber. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 226-232, 2009.
- [9] P. Zhou, Z. Liu, X. Xu, and Z. Chen, "Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams," *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 18, pp. 3350-3359, 2008.
- [10] P. Zhou, Z. Liu, X. Xu, Z. Chen, and X. Wang, "Beam quality factor for coherently combined fiber laser beams," *Opt. Laser. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 268-271, 2009.
- [11] X. Fan, J. Liu, J. Liu, and J. Wu, "Coherent combining of a seven-element hexagonal fiber array," *Opt. Laser. Technol.*, vol. 42, no. 2, pp. 274-279, 2010.
- [12] M. Alavinejad, N. Hadilou, and G. Taherabadi, "The influence of phase aperture on Beam propagation factor of partially coherent flat-topped beams in a turbulent atmosphere," *Opt. Commun.*, vol. 311, pp. 275-281, 2013.
- [13] G. Ren, X. Xu, W. Wu, H. Ma, and Y. Ning, "Study on the effect of nonuniform polarization angles on coherently combined fiber lasers," *Opt. Commun.*, vol. 344, pp. 33-37, 2015.
- [14] P. Gontar and J. K. Jabczynski, "Influence of beam shape on piston and tilt error in coherent combined laser array," *Opt. Eng.*, vol. 58, no. 6, p. 066103, 2019.
- [15] N. Siahvashi, "Investigation the effect of vacancy factor in coherent and Incoherent laser beam combination with square arrangement," presented at the 29th ICOP, 2023. (In Persian)
- [16] N. Siahvashi, "Investigation the effect of beam waist and beam divergence in coherent and Incoherent laser beam combination with square arrangement," presented at the 29th ICOP, 2023. (In Persian)
- [17] S. Qaani and N. Siahvashi, "Comparison of Strehl ratio ratio, M^2 factor and BPF metrics to evaluate the quality of coherent beam combination in hexagonal, ring and square geometrical array," presented at the 29th ICOP, 2023. (In Persian)
- [18] P. Zhou, Z. Liu, X. Xu, and X. Chu, "Comparative study on the propagation performance of coherently combined and incoherently combined beams," *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 8, pp. 1640-1647, 2009.
- [19] V. N. Mahajan, "Strehl ratio of a Gaussian beam," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 22, no. 9, pp. 1824-1833, 2005.
- [20] A. E. Siegman, "How to (maybe) measure laser beam quality," in *Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues*, 1998: Optica Publishing Group, p. MQ1.
- [21] Y. Ke *et al.*, "Measurement system with high accuracy for laser beam quality," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 15, pp. 4876-4880, 2015.
- [22] T. S. Ross, "Laser beam quality metrics," 2013: *Soc. Photo-Opt. Instru.*

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای ارزیابی سامانه ترکیب همدوس باریکه‌های گاوسی در خلأ معیارهای مختلف کیفیت باریکه ترکیبی، از جمله ضریب M^2 نسبت اشتراک (SR)، توان و شدت متوسط در سبدها (پراش PIB_{dl} و PIB_{scm})، توان در سبدها با شعاع سبدها ۵ و ۲۰ سانتی‌متر (PIB_{scm} و PIB_{20cm}) مقایسه شدند. در این مقایسه‌ها، اثر عوامل هندسی مختلف از جمله شعاع کمره، تعداد و فاصله بین باریکه‌ها بر کیفیت باریکه ترکیبی بررسی شد. این بررسی‌ها بر بستر آرایش‌های هندسی شش‌ضلعی، دایروی، مربعی و مستطیلی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در تمامی آرایش‌ها با افزایش $w(0)$ و کاهش d کیفیت باریکه افزایش می‌یابد. اما اثر تعداد باریکه بر کیفیت باریکه پیچیده‌تر است و بر خلاف آنکه معیار توان در سبدها پراش و نسبت اشتراک با افزایش تعداد باریکه در تمامی آرایش‌ها مقداری تقریباً ثابتی دارند؛ معیار ضریب M^2 به دلیل توزیع غیرگاوسی شدت ترکیبی از کاهش کیفیت باریکه ترکیبی حکایت دارد. اما در مقابل معیارهای d_{dl} PIB_{20cm} و PIB_{scm} روند افزایشی به خود می‌گیرند و به شعاع حد پراش وابسته هستند؛ بنابراین نمی‌توانند ارزیابی خوبی از کیفیت باریکه ترکیبی داشته باشند. همچنین معیارهای ضریب M^2 و نسبت اشتراک گرچه برای ارزیابی کیفیت تک باریکه لیزری بکار می‌روند؛ اما ارزیابی کیفیت باریکه ترکیبی با چنین معیارهایی چندان مناسب به نظر نمی‌رسد. زیرا روند تغییرات آن‌ها در اثر تغییرات عوامل هندسی (در ضریب M^2 برای آرایش‌های دایروی، مربعی و مستطیلی و در نسبت اشتراک برای آرایش‌های شش‌ضلعی و دایروی) یکسان است؛ لذا معیار PIB_{dl} در کاربردهای که نیازمند استفاده از ناحیه روشن مرکزی هستند و معیارهای d_{dl} PIB_{scm} و PIB_{20cm} در کاربردهای انرژی مستقیم مناسب هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای دستیابی به بیشینه توان در سبدها ۵ یا ۲۰ سانتی‌متر و سبدها پراش، باید باریکه‌هایی با شعاع کمره باریکه زیاد را در آرایش شش‌ضلعی کنار هم قرارداد و حتی‌المقدور فاصله مرکز به مرکز بین باریکه‌های مجاور را باید به حداقل مقدار ممکن یعنی $d=2w(0)$ نزدیک کرد.

۵- مراجع

- [1] H. Injeyan and G. D. Goodno, *High power laser handbook*. McGraw-Hill Education, 2011.
- [2] J. K. Jabczynski and P. Gontar, "Effect of beam profile and partial coherence on coherent beam combining performance," *Opt. Commun.*, vol. 442, pp. 40-45, 2019.
- [3] E. Nouri and H. Voosouqian, "Investigation of Length Reduction and Radiation Power enhancement of the Short-Wavelength Free Electron Laser," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 10, no. 2, pp. 105-113, 2022. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1401.10.2.9.5>