



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran  
سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۱۷۱۰-۳

چاپ اول

۱۳۹۶

INSO  
11710-3  
1st. Edition  
2018

Identical with  
ISO/TR 11146-3:  
2004

لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر - روش‌های  
آزمون برای پهناهای باریکه لیزر، زاویه‌های  
واگرایی و نسبت‌های انتشار باریکه -  
قسمت ۳: طبقه‌بندی ذاتی و هندسی باریکه  
لیزر، انتشار و جزئیات روش‌های آزمون

**Lasers and laser-related equipment-  
Test methods for laser beam widths,  
divergence angles and beam propagation  
ratios-  
Part 3: Intrinsic and geometrical laser  
beam classification, propagation and details  
of test methods**

ICS: 31.260

استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۱۷۱۰: سال ۱۳۹۶

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران-ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۱-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۸۱۱۴-۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: [standard@isiri.gov.ir](mailto:standard@isiri.gov.ir)

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No. 2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: [standard@isiri.gov.ir](mailto:standard@isiri.gov.ir)

Website: <http://www.isiri.gov.ir>

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهی‌نامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای پهناهای باریکه لیزر، زاویه‌های واگرایی و نسبت‌های انتشار باریکه - قسمت ۳: طبقه‌بندی ذاتی و هندسی باریکه لیزر، انتشار و جزئیات روش‌های آزمون»

رئیس:

سازمان ملی استاندارد ایران- اداره کل نظارت بر اجرای استاندارد

حمید بهنام، غزال  
(کارشناسی ارشد پرتو پزشکی)

دبیر:

سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای-  
پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

ابوالحسینی، شهریار  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

دانشگاه پیام نور واحد تهران شرق

اکبریان، پریسا  
(کارشناسی فیزیک)

دانشگاه پیام نور واحد تهران شرق

بیابانی، نیلوفر  
(کارشناسی فیزیک)

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

پوزش، رضا  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای-  
پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

رجبی، زهره  
(کارشناسی فیزیک)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی (شرکت سهامی خاص)

سمیع‌پور، فرهاد  
(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای-  
پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

سیلاخوری، کاوه  
(کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای)

دانشگاه پیام نور واحد تهران شرق

صفاری، نسترن  
(کارشناسی فیزیک)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی (شرکت سهامی خاص)

عربلو، رضا  
(کارشناسی فیزیک)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

سمت و/یا محل اشتغال:

قزازی، مونا  
(کارشناسی فیزیک)

دانشگاه پیام نور واحد تهران شرق

محسنی، اعظم  
(کارشناسی فیزیک)

دانشگاه پیام نور واحد تهران شرق

ویسی، فاطمه  
(کارشناسی مترجمی زبان انگلیسی)

سازمان انرژی اتمی ایران - پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای -  
پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

ویراستار:

پاغنده، معصومه  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

کارشناس استاندارد

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ح	پیش‌گفتار
ط	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مشخصه‌یابی باریکه لیزر مرتبه دوم
۱	۱-۲ کلیات
۱	۲-۲ توزیع ویگنر
۲	۳-۲ گشتاورهای مرتبه اول و دوم توزیع ویگنر
۴	۴-۲ ماتریس باریکه
۴	۵-۲ انتشار از میان دستگاه‌های اپتیکی بدون ابیراهی
۴	۶-۲ رابطه گشتاورهای مرتبه دوم و کمیت‌های فیزیکی باریکه
۸	۷-۲ ناوردهای انتشار
۹	۸-۲ طبقه‌بندی هندسی
۱۰	۹-۲ طبقه‌بندی ذاتی
۱۱	۳ پس‌زمینه و تصحیح انحراف
۱۱	۱-۳ کلیات
۱۲	۲-۳ تصحیح زمخت با تفریق طرح پس‌زمینه
۱۳	۳-۳ تصحیح زمخت با تفریق پس‌زمینه میانگین
۱۳	۴-۳ تصحیح ظریف انحراف خط پایه
۱۳	۱-۴-۳ کلیات
۱۴	۲-۴-۳ روش آماری
۱۵	۳-۴-۳ روش تقریبی
۱۶	۴ روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری‌های پهنای باریکه
۱۶	۱-۴ کلیات
۱۷	۲-۴ روش روزنه متغیر
۱۷	۱-۲-۴ اصول آزمون
۱۷	۲-۲-۴ آشکارساز
۱۸	۳-۲-۴ دیافراگم‌ها/ روزنه‌ها
۱۸	۴-۲-۴ روش اجرای آزمون
۱۹	۵-۲-۴ ارزیابی

صفحه	عنوان
۱۹	۳-۴ روش لبه-تیز متحرک
۱۹	۱-۳-۴ اصول آزمون
۱۹	۲-۳-۴ دستگاه آشکارساز
۱۹	۳-۳-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک
۲۰	۴-۳-۴ ارزیابی
۲۰	۵-۳-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک ساده
۲۱	۴-۴ روش شکاف متحرک
۲۱	۱-۴-۴ اصول آزمون
۲۱	۲-۴-۴ دستگاه آشکارساز
۲۱	۳-۴-۴ شکاف
۲۲	۴-۴-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک
۲۲	۵-۴-۴ ارزیابی
۲۲	۶-۴-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک ساده
۲۳	پیوست الف (آگاهی دهنده) ماتریس‌های دستگاه اپتیکی
۲۵	کتابنامه

## پیش‌گفتار

استاندارد «لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای پهناهای باریکه لیزر، زاویه‌های واگرایی و نسبت‌های انتشار باریکه- قسمت ۳: طبقه‌بندی ذاتی و هندسی باریکه لیزر، انتشار و جزئیات روش‌های آزمون» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در ششصد و نود و نهمین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۱۳۹۶/۱۰/۱۹ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

ISO/TR 11146-3: 2004 + Cor 1: 2005, Lasers and laser-related equipment- Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios - Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods



## مقدمه

ویژگی‌های انتشاری هر باریکه لیزری را می‌توان به روش گشتاورهای مرتبه دوم<sup>۱</sup> با ده پارامتر مستقل تعیین کرد. با این حال، از دیدگاه کاربردی برای توصیف کامل بیشتر باریکه‌های لیزری، به دلیل تقارن بیشتر آن‌ها به پارامترهای کمتری نیاز است. این باریکه‌ها، برای مثال با توجه به طراحی تشدیدگر مورد استفاده، استیگماتیک<sup>۲</sup> یا آستیگماتیک ساده<sup>۳</sup> هستند.

در این استاندارد، توصیف نظری مشخصات و انتشار باریکه و همچنین طبقه‌بندی باریکه‌های لیزر بر اساس گشتاورهای مرتبه دوم «توزیع ویگنر»<sup>۴</sup> ارائه شده است.

روش‌های اجرایی اندازه‌گیری ارائه شده در استانداردهای ملی ۱-۱۱۷۱۰ و ۲-۱۱۷۱۰ اساساً مبتنی بر (و نه لزوماً محدود به) توزیع چگالی توان (انرژی) به دست آمده با استفاده از آشکارسازهای ماتریسی مانند دوربین‌های CCD<sup>۵</sup> هستند. درستی نتایج به دست آمده بر اساس این داده‌ها شدیداً به پیش‌پردازش مناسب داده‌ها مانند تفریق پس‌زمینه و تصحیح انحراف بستگی دارد. جزئیات این روش‌ها در این استاندارد آورده شده است.

در برخی شرایط، درستی قابل حصول با آشکارسازهای ماتریسی ممکن است رضایت‌بخش نبوده یا آشکارسازهای ماتریسی به سادگی در دسترس نباشند. در چنین مواردی، تا زمانی که نتایج قابل مقایسه‌ای به دست آید، روش‌های غیرمستقیم دیگر برای تعیین قطر یا پهنا باریکه، جایگزین‌های مناسبی هستند. برخی از روش‌های اندازه‌گیری جایگزین در این استاندارد ارائه شده‌اند.

این استاندارد یک قسمت از مجموعه استانداردهای ملی ایران به شماره ۱۱۷۱۰ است.

سایر قسمت‌های استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۷۱۰ به شرح زیر است:

- لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین پهنا، زوایای واگرایی و نسبت انتشار پرتو لیزر- قسمت ۱: پرتوهای استیگماتیک و آستیگماتیک ساده؛
- لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین پهنا، زوایای واگرایی و نسبت انتشار پرتو لیزر- قسمت ۲: پرتوهای آستیگماتیک عمومی.

---

1- Second-order moments  
 2- Stigmatic  
 3- Simple astigmatic  
 4- Wigner distribution  
 5- Charge-coupled device

# لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر - روش‌های آزمون برای پهناهای باریکه لیزر، زاویه‌های واگرایی و نسبت‌های انتشار باریکه - قسمت ۳: طبقه‌بندی ذاتی و هندسی باریکه لیزر، انتشار و جزئیات روش‌های آزمون

## ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه روش‌هایی برای اندازه‌گیری پهناها (قطر)، زاویه‌های واگرایی و نسبت‌های انتشار باریکه لیزری بر اساس استاندارد ملی ۱-۱۱۷۱۰ است. این استاندارد، توصیف نظری مشخصه‌یابی باریکه لیزری بر اساس گشتاورهای مرتبه دوم توزیع ویگنر، شامل مشخصه‌یابی هندسی و ذاتی<sup>۱</sup> باریکه را فراهم می‌سازد و جزئیات مهمی را برای روش‌های تفریق پس‌زمینه مناسب ارائه می‌کند، که برای آشکارسازهای ماتریسی مانند دوربین‌های CCD توصیه می‌شود. همچنین این استاندارد، روش‌های جایگزینی را برای مشخصه‌یابی باریکه‌های استیگماتیک و آستیگماتیک ساده ارائه می‌کند که در زمان در دسترس نبودن آشکارسازهای ماتریسی یا رضایت‌بخش نبودن نتایج آن‌ها قابل استفاده هستند.

## ۲ مشخصه‌یابی مرتبه دوم باریکه لیزر

### ۱-۲ کلیات

تقریباً هر باریکه لیزر همدوس یا «همدوس پاره‌ای»<sup>۲</sup> را می‌توان با حداکثر ده پارامتر مستقل یا همان گشتاورهای مرتبه دوم توزیع ویگنر مشخصه‌یابی کرد. باریکه‌های لیزر که دارای نوعی تقارن، استیگماتیسم یا آستیگماتیسم ساده هستند حتی به پارامترهای کمتری نیاز دارند. دانستن این پارامترها پیش‌بینی خواص باریکه بعد از دستگاه‌های اپتیکی بدون ابیراهی<sup>۳</sup> دلخواه را امکان‌پذیر می‌سازد.

در تمامی این استاندارد برای منابع موج پیوسته عبارت «توزیع چگالی توان  $E(x,y,z)$ » و برای منابع تپی عبارت «توزیع چگالی انرژی  $H(x,y,z)$ » استفاده می‌شود. علاوه بر این، دستگاه مختصات به نحوی در نظر گرفته می‌شود که محور  $z$  به موازات جهت باریکه لیزر و محورهای  $x$  و  $y$ ، به ترتیب افقی و عمودی باشند.

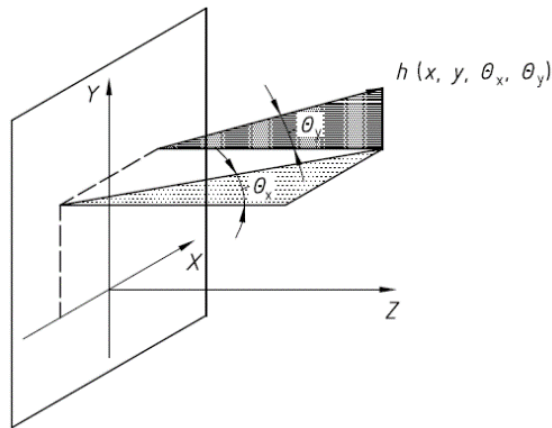
### ۲-۲ توزیع ویگنر

توزیع ویگنر  $h(x,y,\theta_x,\theta_y;z)$  توصیف عمومی و کاملی از باریکه‌های لیزر همدوس و همدوس پاره‌ای نوار-باریک<sup>۴</sup>، در صفحه اندازه‌گیری است. به‌طور کلی، این توزیع مقدار توان باریکه عبوری از صفحه

1- Intrinsic  
2- Partially coherent  
3- Aberration-free  
4- Narrow-band

اندازه‌گیری را در نقطه  $(x, y)$  با زاویه پیرامحوری افقی  $\theta_x$  و زاویه پیرامحوری عمودی  $\theta_y$  نسبت به محور  $z$  می‌دهد (همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است).

**یادآوری** - توزیع ویگنر تابعی از مکان محوری  $z$  است، به این معنی که توزیع ویگنر یک باریکه در مکان‌های مختلف  $z$  متفاوت است. از این رو، کمیت‌های استخراج شده از توزیع ویگنر عموماً تابعی از  $z$  هستند. در تمامی این استانداردها وابستگی  $z$  حذف شده است. بنابراین توزیع ویگنر به مکان  $z$  اختیاری بر روی صفحه اندازه‌گیری اشاره دارد.



راهنما:

$x, y$  مختصات فضایی

$\theta_x, \theta_y$  مختصات زاویه‌ای متناظر

شکل ۱ - مختصات توزیع ویگنر

رابطه توزیع چگالی توان  $E(x, y)$  در صفحه اندازه‌گیری و توزیع ویگنر به صورت زیر است.

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y, \theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y \quad (1)$$

**یادآوری** - حدود انتگرال‌گیری در فرمول بالا محدود هستند، که نشان می‌دهد در حالت پیرامحوری، بیشینه زاویه‌های پرتوها محدود به ابعاد باریکه هستند، گرچه به طور قراردادی به بی‌نهایت گسترش داده می‌شوند.

## ۳-۲ گشتاورهای مرتبه اول و دوم توزیع ویگنر

گشتاورهای مرتبه اول توزیع ویگنر به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{P} \int h(x, y, \theta_x, \theta_y) x dx dy d\theta_x d\theta_y \quad (2)$$

$$\langle y \rangle = \frac{1}{P} \int h(x, y, \theta_x, \theta_y) y dx dy d\theta_x d\theta_y \quad (3)$$

$$\langle \theta_x \rangle = \frac{1}{P} \int h(x, y, \theta_x, \theta_y) \theta_x dx dy d\theta_x d\theta_y \quad (4)$$

$$\langle \theta_y \rangle = \frac{1}{P} \int h(x, y, \theta_x, \theta_y) \theta_y dx dy d\theta_x d\theta_y \quad (5)$$

که در آن‌ها  $P$  توان باریکه است و به صورت:

$$P = \int h(x, y, \theta_x, \theta_y) dx dy d\theta_x d\theta_y \quad (6)$$

یا با استفاده از معادله (۱)،

$$P = \int E(x, y) dx dy \quad (7)$$

داده می‌شود.

گشتاورهای فضایی  $\langle x \rangle$  و  $\langle y \rangle$  موقعیت جانبی مرکز هندسی<sup>۱</sup> باریکه در صفحه اندازه‌گیری و گشتاورهای زاویه‌ای  $\langle \theta_x \rangle$  و  $\langle \theta_y \rangle$  جهت انتشار مرکز هندسی باریکه در صفحه اندازه‌گیری را مشخص می‌کنند.

گشتاورهای مرتبه دوم (مرکزیابی شده)<sup>۲</sup> با فرمول زیر داده می‌شوند:

$$\langle x^k y^l \theta_x^m \theta_y^n \rangle = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y, \theta_x, \theta_y) (x - \langle x \rangle)^k (y - \langle y \rangle)^l (\theta_x - \langle \theta_x \rangle)^m (\theta_y - \langle \theta_y \rangle)^n dx dy d\theta_x d\theta_y \quad (8)$$

که در آن  $k, l, m, n$  اعداد صحیح غیرمنفی و  $k + l + m + n = 2$  است. بنابراین ده گشتاور مرتبه دوم متفاوت وجود دارد.

سه گشتاور فضایی مرتبه دوم  $\langle x^2 \rangle$ ،  $\langle y^2 \rangle$  و  $\langle xy \rangle$  مربوط به محدوده عرضی توزیع چگالی توان، سه گشتاور زاویه‌ای  $\langle \theta_x^2 \rangle$ ،  $\langle \theta_y^2 \rangle$  و  $\langle \theta_x \theta_y \rangle$  مربوط به واگرایی باریکه و چهار گشتاور ترکیبی  $\langle x \theta_x \rangle$ ،  $\langle x \theta_y \rangle$ ،  $\langle y \theta_x \rangle$  و  $\langle y \theta_y \rangle$  مربوط به خواص فازی در صفحه اندازه‌گیری هستند. جزئیات بیشتر در خصوص ارتباط بین این ده گشتاور مرتبه دوم و خواص فیزیکی باریکه در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

گشتاورهای فضایی مرتبه اول و دوم به‌طور مستقیم از توزیع چگالی توان  $E(x, y)$  به‌دست می‌آیند. از معادله (۱) داریم:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{P} \int E(x, y) x dx dy \quad (9)$$

$$\langle y \rangle = \frac{1}{P} \int E(x, y) y dx dy \quad (10)$$

و

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{P} \int E(x, y) (x - \langle x \rangle)^2 dx dy \quad (11)$$

$$\langle xy \rangle = \frac{1}{P} \int E(x, y) (x - \langle x \rangle)(y - \langle y \rangle) dx dy \quad (12)$$

$$\langle y^2 \rangle = \frac{1}{P} \int E(x, y) (y - \langle y \rangle)^2 dx dy \quad (13)$$

1- Centroid  
2- Centred

گشتاورهای مرتبه دوم دیگر از اندازه‌گیری گشتاورهای فضایی در سایر صفحه‌ها و استفاده از قانون انتشار گشتاورهای مرتبه دوم به دست می‌آیند.

یادآوری- جزئیات اندازه‌گیری تمامی ده گشتاور مرتبه دوم در استاندارد ISO 11146-2 ارائه شده است.

#### ۴-۲ ماتریس باریکه

ده گشتاور مرتبه دوم در داخل ماتریس باریکه  $4 \times 4$  متقارن

$$P = \begin{pmatrix} W & M \\ M^T & U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xy \rangle & \langle x\theta_x \rangle & \langle x\theta_y \rangle \\ \langle xy \rangle & \langle y^2 \rangle & \langle y\theta_x \rangle & \langle y\theta_y \rangle \\ \langle x\theta_x \rangle & \langle y\theta_x \rangle & \langle \theta_x^2 \rangle & \langle \theta_x\theta_y \rangle \\ \langle x\theta_y \rangle & \langle y\theta_y \rangle & \langle \theta_x\theta_y \rangle & \langle \theta_y^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (14)$$

با زیرماتریس متقارن گشتاورهای فضایی

$$W = \begin{pmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xy \rangle \\ \langle xy \rangle & \langle y^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (15)$$

زیرماتریس متقارن گشتاورهای زاویه‌ای

$$U = \begin{pmatrix} \langle \theta_x^2 \rangle & \langle \theta_x\theta_y \rangle \\ \langle \theta_x\theta_y \rangle & \langle \theta_y^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (16)$$

و زیرماتریس متقارن گشتاورهای ترکیبی

$$M = \begin{pmatrix} \langle x\theta_x \rangle & \langle x\theta_y \rangle \\ \langle y\theta_x \rangle & \langle y\theta_y \rangle \end{pmatrix} \quad (17)$$

قرار می‌گیرند.

#### ۵-۲ انتشار از میان دستگاه‌های اپتیکی بدون ابیراهی

دستگاه‌های اپتیکی بدون ابیراهی به وسیله ماتریس‌های دستگاه  $4 \times 4$  با نام  $S$  که در اپتیک هندسی شناخته شده است، نشان داده می‌شوند. انتشار گشتاورهای مرتبه دوم از میان چنین دستگاهی با فرمول زیر داده می‌شود:

$$P_{out} = S \cdot P_{in} \cdot S^T \quad (18)$$

که در آن  $P_{in}$  و  $P_{out}$ ، به ترتیب، ماتریس‌های باریکه در صفحه ورودی و خروجی دستگاه اپتیکی هستند.

در پیوست الف مثال‌هایی برای ماتریس‌های دستگاه آورده شده است.

۲-۶ رابطه گشتاورهای مرتبه دوم و کمیت‌های فیزیکی باریکه

ده گشتاور مرتبه دوم ارتباط تنگاتنگی با کمیت‌های فیزیکی شناخته شده باریکه دارند.

سه گشتاور فضایی، گسترش عرضی توزیع چگالی توان باریکه را در صفحه اندازه‌گیری بیان می‌کنند. راستاهای گسترش کمینه و بیشینه، به نام محورهای اصلی، همیشه برهم عمودند. گسترش در راستای محورهای اصلی و چرخش این محورها، هر توزیع چگالی توان را مشخصه‌یابی می‌کند. پهنای باریکه در راستای محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $x$  دستگاه آزمایشگاه به صورت زیر داده می‌شود:

$$d_{\sigma x} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle) + \gamma [(\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle)^2 + 4(\langle xy \rangle)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

و پهنای باریکه در راستای محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $y$ ، به صورت زیر است:

$$d_{\sigma y} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle) - \gamma [(\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle)^2 + 4(\langle xy \rangle)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

که در آن:

$$\gamma = \text{sgn}(\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle) = \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{|\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle|} \quad (21)$$

اگر محورهای اصلی با محورهای  $x$  یا  $y$  زاویه‌های  $+\frac{\pi}{4}$  یا  $-\frac{\pi}{4}$  بسازند، وقتی که  $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle$  است، بنابر قرارداد  $d_{\sigma x}$  پهنای بزرگ‌تر باریکه است و

$$d_{\sigma x} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle) + 2|\langle xy \rangle| \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$d_{\sigma y} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle) - 2|\langle xy \rangle| \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

زاویه سمتی بین محور اصلی، نزدیک‌تر به محور  $x$ ، و محور  $x$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan(2\langle xy \rangle / (\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle)) \quad (24)$$

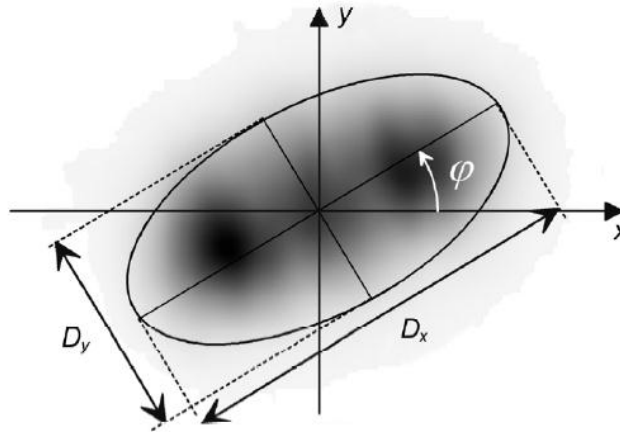
که برای  $\langle x^2 \rangle \neq \langle y^2 \rangle$  معتبر است؛ و برای  $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle$ ،  $\varphi(z)$  از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\varphi(z) = \text{sgn}(\langle xy \rangle) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (25)$$

که در آن:

$$\text{sgn}(\langle xy \rangle) = \frac{\langle xy \rangle}{|\langle xy \rangle|} \quad (26)$$

است (به شکل ۲ مراجعه شود).



شکل ۲- زاویه سمتی و پهناهای باریکه در راستای محورهای اصلی توزیع چگالی توان

به طور مشابه، سه گشتاور زاویه‌ای، واگرایی باریکه را که با راستاهای متعامد گسترش بیشینه و کمینه آن‌ها مشخصه‌یابی می‌شوند، توصیف می‌کند. این راستاها محورهای اصلی واگرایی باریکه نامیده می‌شوند که ممکن است با محورهای اصلی توزیع چگالی توان در صفحه اندازه‌گیری منطبق نباشند. واگرایی باریکه در راستای محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $x$  دستگاه آزمایشگاه با معادله زیر به دست می‌آید:

$$\theta_{\sigma x} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle \theta_x^2 \rangle + \langle \theta_y^2 \rangle) + \tau \left[ (\langle \theta_x^2 \rangle - \langle \theta_y^2 \rangle)^2 + 4(\langle \theta_x \theta_y \rangle)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

و واگرایی باریکه در راستای محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $y$  با معادله زیر به دست می‌آید:

$$\theta_{\sigma y} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle \theta_x^2 \rangle + \langle \theta_y^2 \rangle) - \tau \left[ (\langle \theta_x^2 \rangle - \langle \theta_y^2 \rangle)^2 + 4(\langle \theta_x \theta_y \rangle)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

که در آن‌ها:

$$\tau = \text{sgn}(\langle \theta_x^2 \rangle - \langle \theta_y^2 \rangle) = \frac{\langle \theta_x^2 \rangle - \langle \theta_y^2 \rangle}{|\langle \theta_x^2 \rangle - \langle \theta_y^2 \rangle|} \quad (29)$$

اگر محورهای اصلی واگرایی باریکه با محورهای  $x$  یا  $y$  زاویه‌های  $+\frac{\pi}{4}$  یا  $-\frac{\pi}{4}$  بسازند، هنگامی که  $\langle \theta_x^2 \rangle = \langle \theta_y^2 \rangle$  باشد، بنابر قرارداد  $\theta_{\sigma x}$  واگرایی بزرگ‌تر باریکه است، و

$$\theta_{\sigma x} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle \theta_x^2 \rangle + \langle \theta_y^2 \rangle) + 2|\langle \theta_x \theta_y \rangle| \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$\theta_{\sigma y} = 2\sqrt{2} \left\{ (\langle \theta_x^2 \rangle + \langle \theta_y^2 \rangle) - 2|\langle \theta_x \theta_y \rangle| \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

زاویه سمتی واگرایی بین محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $x$  و محور  $x$  با معادله زیر به دست می‌آید:

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \arctan(2\langle \theta_x \theta_y \rangle / (\langle \theta_x^2 \rangle - \langle \theta_y^2 \rangle)) \quad (32)$$

اگر  $\langle \theta_x^2 \rangle \neq \langle \theta_y^2 \rangle$  باشد؛ برای  $\langle \theta_x^2 \rangle = \langle \theta_y^2 \rangle$ ،  $\varphi_\theta(z)$  از معادله زیر به دست می آید:

$$\varphi_\theta(z) = \text{sgn}(\langle \theta_x \theta_y \rangle) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (33)$$

که در آن:

$$\text{sgn}(\langle \theta_x \theta_y \rangle) = \frac{\langle \theta_x \theta_y \rangle}{|\langle \theta_x \theta_y \rangle|} \quad (34)$$

چهار گشتاور ترکیبی، به خاصیت‌های فازی میانگین باریکه در صفحه اندازه‌گیری مرتبط هستند. «بهترین برازش سهمی وار فاز»<sup>۱</sup> با راستاهای متعامد کمینه و بیشینه انحنای مشخصه‌یابی می‌شود. این انحناها می‌توانند در جهت محورهای اصلی به‌طور مستقل مقادیر منفی و صفر نیز بگیرند. راستاهای کمینه و بیشینه انحنای، یا همان محورهای اصلی سهمی وار فازها ممکن است با محورهای اصلی توزیع چگالی توان در صفحه اندازه‌گیری و محورهای اصلی واگرایی باریکه منطبق نباشند. برای به دست آوردن زاویه سمتی این محورهای اصلی و شعاع‌های انحنای جبهه فاز میانگین در امتداد آن‌ها، ماتریس انحنای  $C$  باید با معادله زیر محاسبه شود:

$$C = \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{xy} & C_{yy} \end{pmatrix} = (A - A^T)^{-1} \cdot (B - B^T) \cdot A - B \quad (35)$$

که در آن:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot W^{-1} \quad (36)$$

و

$$B = M \cdot W^{-1} \quad (37)$$

شعاع انحنای جبهه فاز میانگین در جهت محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $x$  دستگاه آزمایشگاه با معادله زیر به دست می آید:

$$R_x = - \frac{2}{(C_{xx} + C_{yy}) + \mu \sqrt{(C_{xx} - C_{yy})^2 + 4C_{xy}^2}} \quad (38)$$

و به‌طور مشابه، شعاع انحنای جبهه فاز میانگین در جهت محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $y$  دستگاه آزمایشگاه با معادله زیر به دست می آید:

$$R_y = - \frac{2}{(C_{xx} + C_{yy}) - \mu \sqrt{(C_{xx} - C_{yy})^2 + 4C_{xy}^2}} \quad (39)$$

که در آن:

$$\mu = \text{sgn}(C_{xx} - C_{yy}) = \frac{(C_{xx} - C_{yy})}{|C_{xx} - C_{yy}|} \quad (40)$$



اگر محورهای اصلی انحنای فاز میانگین با محورهای  $x$  یا  $y$  زاویه‌های  $+\frac{\pi}{4}$  یا  $-\frac{\pi}{4}$  بسازند، یعنی هنگامی که  $C_{xx} = C_{yy}$ ، بنا بر قرارداد،  $R_x$  شعاع بزرگ‌تر (با در نظر گرفتن علامت) است و

$$R_x = -\frac{2}{(C_{xx}-C_{yy})+2|C_{xy}|} \quad (41)$$

$$R_y = -\frac{2}{(C_{xx}-C_{yy})-2|C_{xy}|} \quad (42)$$

زاویه سمتی انحنای فاز بین محور اصلی نزدیک‌تر به محور  $x$  و محور  $x$  با معادله زیر به دست می‌آید.

$$\varphi_P = \frac{1}{2} \arctan[2C_{xy}/(C_{xx} - C_{yy})] \quad (43)$$

اگر  $C_{xx} \neq C_{yy}$  باشد؛ برای  $C_{xx} = C_{yy}$ ، زاویه سمتی انحنای فاز با معادله زیر به دست می‌آید.

$$\varphi_P = \text{sgn}(C_{xy}) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (44)$$

که در آن:

$$\text{sgn}(C_{xy}) = \frac{C_{xy}}{|C_{xy}|} \quad (45)$$

پارامتر پیچش  $t$ ، پارامتر فیزیکی دیگر باریکه است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$t = \langle x\theta_y \rangle - \langle y\theta_x \rangle$$

پارامتر پیچش متناسب با اندازه حرکت زاویه‌ای مداری باریکه است و تحت انتشار از طریق دستگاه‌های اپتیکی استیگماتیک ناوردا<sup>۱</sup> است.

## ۲-۷ ناوردهای انتشار

ناوردایی دو کمیت مستقل زیر از قانون انتشار ماتریس باریکه حاصل می‌شود.

نسبت انتشار مؤثر باریکه به صورت

$$M_{\text{eff}}^2 = \frac{4\pi}{\lambda} [\det(\mathbf{P})]^{\frac{1}{4}} \boxtimes 1 \quad (46)$$

و آستیگماتیسم ذاتی به صورت

$$a = \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \left( (\langle x^2 \rangle \langle \theta_x^2 \rangle - \langle x\theta_x \rangle^2) + (\langle y^2 \rangle \langle \theta_y^2 \rangle - \langle y\theta_y \rangle^2) + 2(\langle xy \rangle \langle \theta_x \theta_y \rangle - \langle x\theta_y \rangle \langle y\theta_x \rangle) \right) - (M_{\text{eff}}^2)^2 \boxtimes 0 \quad (47)$$

تعریف می‌شود.

نسبت انتشار مؤثر باریکه با قابلیت کانونی شدن باریکه ارتباط دارد.

**یادآوری** - نسبت انتشار باریکه عمومی‌تر، معیاری برای پخش شدگی کلی باریکه، یا جایگزیدگی کلی میدان - نزدیک و میدان - دور است.

برای باریکه استیگماتیک (به معادله ۴۸ مراجعه شود) نسبت انتشار مؤثر باریکه برابر است با نسبت انتشار پرتو:

$$M_{\text{eff}}^2 = M^2 \quad (48)$$

برای باریکه‌های استیگماتیک ساده (به معادله ۴۹ مراجعه شود)، با فرض  $M_x^2 \neq M_y^2$ ، نسبت انتشار مؤثر باریکه برابر است با میانگین هندسی نسبت‌های انتشار باریکه در امتداد هر دو محور اصلی باریکه:

$$M_{\text{eff}}^2 = \sqrt{M_x^2 M_y^2} \quad (49)$$

استیگماتیسم ذاتی با استیگماتیسم آشکار و پنهان باریکه مرتبط است. در یک باریکه استیگماتیک، استیگماتیسم ذاتی  $a$  حذف می‌شود. برای یک باریکه استیگماتیک ساده، استیگماتیسم ذاتی  $a$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$a = \frac{1}{2}(M_x^2 - M_y^2)^2 \quad (50)$$

این کمیت‌ها تنها تحت انتشار در دستگاه‌های اپتیکی بدون اتلاف و ابیراهی، ناوردا هستند و ممکن است در سایر دستگاه‌ها تغییر کنند. هر ترکیبی از این کمیت‌های ناوردا، نیز ناوردا است.

## ۲-۸ طبقه‌بندی هندسی

باریکه‌ها بر اساس رفتار انتشار خود در دستگاه‌های اپتیکی استیگماتیک و استیگماتیک ساده می‌توانند طبقه‌بندی شوند. دستگاه استیگماتیک، دستگاه اپتیکی است که می‌تواند فقط با استفاده از عدسی‌های کروی ایده‌آل ساخته شود. دستگاه استیگماتیک ساده، دستگاه اپتیکی است که می‌تواند با استفاده از عدسی‌های استوانه‌ای ایده‌آل دارای جهت‌های مشابه ساخته شود.

طبقه‌بندی هندسی باریکه به تقارن توزیع‌های چگالی توان باریکه تحت انتشار اشاره می‌کند. عبارت «تقارن» به معنی وجود گشتاورهای مرتبه دوم است. اگر نسبت کمینه پهنای باریکه به بیشینه پهنای باریکه، در امتداد محورهای اصلی اندازه‌گیری، بزرگ‌تر از ۰٫۸۷ باشد، توزیع چگالی توان به عنوان دایره‌ای طبقه‌بندی می‌شود. در غیر این صورت به عنوان بیضوی طبقه‌بندی می‌شود.

یادآوری- از این دیدگاه، حتی توزیع چگالی توان سرتخت با دنباله<sup>۱</sup> مربعی شکل در طبقه‌بندی دایره‌ای قرار می‌گیرد.

توزیع‌های چگالی توان بیضوی با جهت‌گیری‌شان مشخصه‌یابی می‌شوند، که با زاویه سمتی  $\varphi$  مشخص می‌شود. در شرایط انتشار در فضای آزاد، توزیع‌های چگالی توان یک باریکه می‌توانند همگی دایره‌ای، همگی بیضوی یا برخی دایره‌ای و برخی بیضوی باشند.

اگر همه توزیع‌های چگالی توان در شرایط انتشار در فضای آزاد، دایره‌ای باشند و علاوه بر آن، هنگامی که باریکه از یک عدسی استوانه‌ای با جهت‌گیری دلخواه عبور کند، همه توزیع‌های چگالی توان بیضوی در

آن سوی عدسی جهت یکسان یا متعامد نسبت به محور موازی با سطح استوانه‌ای عدسی داشته باشند، آن باریکه استیگماتیک نامیده می‌شود.

اگر همه توزیع‌های چگالی توان بیضوی در شرایط انتشار در فضای آزاد دارای جهت سمتی یکسان (یا متعامد) باشند و علاوه بر آن، هنگامی که باریکه از یک عدسی استوانه‌ای با همان جهت عبور کند، همه توزیع‌های چگالی‌های توان بیضوی در پشت عدسی، جهت یکسان یا متعامد نسبت به عدسی استوانه‌ای داشته باشند، آن باریکه استیگماتیک ساده نامیده می‌شود.

سایر باریکه‌ها در طبقه‌بندی استیگماتیک عمومی قرار می‌گیرند.

طبقه‌بندی هندسی باریکه را می‌توان از ماتریس باریکه به دست آورد. اگر تمامی سه زیرماتریس  $W$ ،  $M$  و  $U$  تقریباً با ماتریس یک متناوب باشند، باریکه استیگماتیک است. اگر تمامی زیرماتریس‌های  $W$ ،  $M$  و  $U$  قطری باشند، باریکه استیگماتیک ساده و هم‌تراز با محورهای  $x$  و  $y$  است. اگر زیرماتریس  $M$  تقریباً متقارن باشد، باریکه استیگماتیک ساده است که به اندازه زاویه سمتی  $\varphi$  چرخیده است، یعنی پارامتر پیچش  $t$  حذف می‌شود و محورهای اصلی توزیع چگالی توان در صفحه اندازه‌گیری، محورهای اصلی واگرایی‌های باریکه و محورهای سهمی‌وار فاز تقریباً برهم منطبق می‌شوند:

$$\varphi \approx \varphi_\theta \approx \varphi_p \quad (51)$$

سایر باریکه‌ها به عنوان استیگماتیک عمومی طبقه‌بندی هندسی می‌شوند.

## ۲-۹ طبقه‌بندی ذاتی

طبقه‌بندی هندسی باریکه ممکن است پس از عبور از یک دستگاه اپتیکی تغییر کند. اما می‌توان نشان داد که هر باریکه‌ای نمی‌تواند به یک باریکه استیگماتیک تبدیل شود. قابلیت تبدیل یک باریکه به باریکه استیگماتیک را /استیگماتیک ذاتی می‌نامند. از این رو، باریکه استیگماتیک ساده یا حتی استیگماتیک عمومی می‌توانند در طبقه‌بندی استیگماتیک ذاتی قرار گیرند.

یک باریکه به عنوان استیگماتیک ذاتی طبقه‌بندی می‌شود اگر

$$\frac{a}{(M_{\text{eff}}^2)^2} < 0.039 \quad (52)$$

یادآوری - آستانه ۰٫۰۳۹ با مقدار آستانه ۰٫۸۷ برای توزیع‌های چگالی توان دایره‌ای هم‌خوانی دارد. این آستانه تضمین می‌کند که یک باریکه استیگماتیک هندسی، نیز استیگماتیک ذاتی است.

## ۳ پس‌زمینه و تصحیح انحراف

## ۳-۱ کلیات

علائم ثبت‌شده برای چگالی توزیع توان  $E_{\text{meas}}(x, y)$  یا  $H_{\text{meas}}(x, y)$  می‌توانند به دو بخش تقسیم شوند: توزیع چگالی توان واقعی  $E(x, y)$  یا  $H(x, y)$  به وسیله باریکه‌های تحت‌آزمون تولید می‌شود و طرح پس‌زمینه احتمالاً ناهمگن  $E_B(x, y)$  به وسیله سایر منابع تابشی خارجی یا محیطی یا خود حسگر دستگاه اندازه‌گیری (نوفه) تولید می‌شود:

$$E_{\text{meas}}(x, y) = E(x, y) + E_B(x, y) \quad (۵۳)$$

که در آن علائم ناشی از پس‌زمینه می‌تواند به بخش همگن  $E_{B, \text{offset}}$  (انحراف پایه)، بخش ناهمگن  $E_{B, \text{inh}}(x, y)$  (برای مثال انحراف پایه) و مؤلفه‌های نوفه‌ای پرسامد  $E_{B, \text{noise}}(x, y)$  تقسیم شوند.

$$E_B(x, y) = E_{B, \text{offset}}(x, y) + E_{B, \text{inh}}(x, y) + E_{B, \text{noise}}(x, y) \quad (۵۴)$$

یادآوری - معمولاً مؤلفه‌های نوفه‌ای پرسامد تصحیح نمی‌شوند و ضرورتی هم برای این کار وجود ندارد. به دلیل انتگرال‌گیری‌های مربوط به محاسبه پارامترهای باریکه، مؤلفه‌های نوفه‌ای پرسامد خطاهای آماری ذاتی را تعیین می‌کنند و از همین رو فقط بر تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها تأثیر می‌گذارند، درحالی‌که دیگر علائم پس‌زمینه‌ای «خطاهای دستگاهی»<sup>۱</sup> را در پی دارند.

توزیع پس‌زمینه به وسیله مقدار میانگین  $(E_{B, \text{offset}})$  و انحراف معیار  $(E_{B, \sigma})$  آن مشخصه‌یابی می‌شود. اگر تغییرات علائم پس‌زمینه در سطح آشکارساز، که با اختلاف‌های میان مقادیر میانگین موضعی و مقادیر میانگین کلی تعیین می‌شوند، کوچک‌تر از انحراف معیار  $E_{B, \sigma}$  باشد، پس‌زمینه آشکارساز را می‌توان همگن در نظر گرفت (به زیربند ۳-۴ مراجعه شود).

برای جلوگیری از غلبه علائم پس‌زمینه‌ای یال‌های توزیع بر انتگرال‌های مربوط، مراحل تصحیح پس‌زمینه باید پیش از برآورد پارامترهای باریکه انجام پذیرد. در مرحله اولیه، باید با تفریق یا طرح پس‌زمینه یا پس‌زمینه میانگین از توزیع چگالی توان اندازه‌گیری شده، «تصحیح زمخت»<sup>۲</sup> انجام شود. برای دستگاه‌های آشکارساز با تراز پس‌زمینه ثابت در کل سطح حسگر، می‌توان از تصحیح تفریقی تراز پس‌زمینه میانگین استفاده کرد. در همه موارد دیگر، تفریق طرح پس‌زمینه کامل ضروری است.

تفریق طرح پس‌زمینه یا پس‌زمینه میانگین به دست آمده از طرح پس‌زمینه (به زیربندهای ۳-۲ و ۳-۳ مراجعه شود) می‌تواند در بیشتر موارد [به ترتیب] خطاهای انحرافی از مرتبه ۰٫۱ را به همراه داشته باشد، اما همیشه به یک انحراف خط پایه صفر منجر نمی‌شود. به دلیل طبیعت آماری نوفه پس‌زمینه (انحراف پایه به صورت میانگین پیکسل‌های روشن‌نشده تعریف می‌شود) افت و خیزهای چشمه‌های تابشی محیطی، نور

1- Systematic errors  
2- Coarse correction

پراکنده یا دیگر گسیل‌های نوری ناهمدوس لیزری (مانند فلورسانس و/یا نور باقی‌مانده دمش)، انحراف خط پایه را تنها می‌توان از توزیع چگالی توان اندازه‌گیری شده به صورت دقیق تعیین کرد. حتی انحراف‌های خط پایه کوچک می‌توانند خطاهای بزرگی را در ارزیابی پارامترهای مشخصه‌یابی توزیع چگالی توان اندازه‌گیری شده به دنبال داشته باشند. بنابراین، به ویژه برای باریکه‌های کوچک (پهنای باریکه کمتر از ۰٫۲۵ برابر ابعاد آشکارساز) روش‌های اجرایی اضافی آورده‌شده در زیربند ۳-۴ باید به کار گرفته شوند.

در نتیجه تفریق صحیح پس‌زمینه، مقادیر منفی نوفه در توزیع چگالی توان تصحیح شده باید وجود داشته باشد. این مقادیر منفی باید در ارزیابی‌های بعدی وارد شوند تا امکان جبران دامنه‌های نوفه مثبت فراهم شود.

### ۲-۳ تصحیح زمخت با تفریق طرح<sup>۱</sup> پس‌زمینه

ثابت طرح پس‌زمینه «تصویر تاریک»<sup>۲</sup> باید درست پیش از به‌دست‌آوردن «طرح علامتی»<sup>۳</sup> توزیع چگالی توان با استفاده از یک چیدمان آزمایشی یکسان انجام شود. برای لیزرهای موج‌پیوسته باید باریکه را از دهانه خروجی لیزر مسدود کرد، برای لیزرهای تپی ثابت داده می‌تواند بدون شلیک لیزر انجام گیرد.

با ثبت و میانگین‌گیری از حداقل  $n > 10$  اندازه‌گیری جداگانه از توزیع پس‌زمینه، طرح پس‌زمینه میانگین آشکارساز به‌دست می‌آید:

$$\overline{E_B}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_B(x, y)_i \quad (55)$$

با تفریق طرح پس‌زمینه، توزیع تصحیح شده به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$E(x, y) = E_{\text{meas}}(x, y) - \overline{E_B}(x, y) \quad (56)$$

در مواردی که آشکارساز در معرض تابش‌های محیطی باقی‌مانده با افت و خیزهای گذرا قرار گیرد، که می‌تواند در نتایج اخلاص ایجاد کند، توصیه می‌شود اندازه‌گیری‌های پس‌زمینه و طرح علامتی با توالی مستقیم انجام شوند. برای لیزرهای موج‌پیوسته یا تپی با بستاور<sup>۴</sup> سریع، این اندازه‌گیری با استفاده از داده‌برداری‌های متوالی از دستگاه آشکارساز همراه با تفریق برخط پس‌زمینه انجام می‌شود. علاوه بر آن، شرایط زیربند ۳-۴ باید اعمال شود.

تفریق طرح پس‌زمینه همیشه به یک انحراف خط پایه صفر نمی‌انجامد. حتی انحراف‌های خط پایه کوچک می‌توانند خطاهای بزرگی را در ارزیابی پارامترهای مشخصه‌یابی توزیع چگالی توان اندازه‌گیری شده به دنبال داشته باشند. باید دقت شود تا این خطاهای انحراف خط مبنا کمینه شوند (به زیربند ۳-۴ مراجعه شود).

1 - Map  
2- Dark image  
3- Signal map  
4- Shutter

### ۳-۳ تصحیح زمخت با تفریق پس‌زمینه میانگین

در دستگاه‌های آشکارساز دارای تراز پس‌زمینه ثابت در تمامی سطح حس‌گر، می‌توان از تفریق تراز پس‌زمینه میانگین برای تصحیح توزیع‌های اندازه‌گیری شده استفاده کرد.

با ثبت و میانگین‌گیری از حداقل  $n > 10$  اندازه‌گیری جداگانه از توزیع پس‌زمینه، تراز پس‌زمینه میانگین  $E_{B,offset}$  آشکارساز در تمامی سطح حس‌گر به دست می‌آید.

$$\overline{E_B(x, y)} = \frac{1}{m.n} \sum_{i=1}^n \sum_{x,y=1}^m E_B(x, y)_i \quad (57)$$

که در آن  $m$  تعداد کل نقاط جداگانه ثبت شده  $(x, y)$  بر روی آشکارساز است. با استفاده از تفریق پس‌زمینه میانگین، توزیع تصحیح‌شده به صورت زیر است

$$E(x, y) = E_{meas}(x, y) - \overline{E_B(x, y)} \quad (58)$$

تفریق پس‌زمینه میانگین به دست آمده از طرح پس‌زمینه همیشه به یک انحراف خط پایه صفر نمی‌انجامد. حتی انحراف‌های خط پایه کوچک می‌توانند خطاهای بزرگی را در ارزیابی پارامترهای مشخصه‌یابی توزیع چگالی توان اندازه‌گیری شده به دنبال داشته باشند. باید دقت شود تا این خطاهای انحراف خط مبنا کمینه شوند (به زیربند ۳-۴ مراجعه شود).

در بیشتر موارد، روش‌های اجرایی ارائه شده در زیربندهای ۳-۲ و ۳-۳ خطاهای انحراف کمتر از ۰/۱ را فراهم می‌کند. به‌ویژه برای باریکه‌های کوچک (پهنای باریکه کمتر از ۰/۲۵ برابر ابعاد آشکارساز) روش‌های اجرایی اضافی آورده شده در ۳-۴ باید اعمال شوند.

### ۳-۴ تصحیح ظریف<sup>۱</sup> انحراف خط پایه

#### ۳-۴-۱ کلیات

به دلیل طبیعت آماری نوفه پس‌زمینه (انحراف پایه به صورت میانگین پیکسل‌های روشن نشده تعریف می‌شود)، افت و خیزهای چشمه‌های تابشی محیطی، نور پراکنده یا دیگر گسیل‌های نوری ناهمدوس لیزری (مانند فلورسانس و/یا نور باقی‌مانده دمش)، تفریق طرح پس‌زمینه یا پس‌زمینه میانگین به دست آمده از طرح پس‌زمینه همیشه به یک انحراف خط پایه برابر صفر نخواهد انجامید.

بنابراین، انحراف خط پایه می‌تواند تنها از روی اندازه‌گیری توزیع چگالی توان به صورت دقیق تعیین شود. تمامی روش‌های اجرایی که ممکن است یک اندازه‌گیری برای انحراف خط پایه بدهند، می‌توانند استفاده شوند. پیش از این، چندین روش اجرایی سودمند در این زمینه شناخته شده‌اند:

1- Fine correction

الف- روش‌های تبدیل فوریه؛

ب- روش‌های بافت‌نگاشت<sup>۱</sup>؛

پ- روش‌های آماری؛

ت- روش‌های تقریبی.

به‌علت سادگی ریاضیات آن‌ها، تنها دو روش آخر در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۳-۴-۲ روش آماری

توزیع پس‌زمینه می‌تواند با مقدار میانگین ( $E_{B,offset}$ ) و انحراف معیار آن ( $E_{B,\sigma}$ ) مشخص‌یابی شود. مقادیر تخمینی انحراف خط پایه  $E_{B,offset}$  و نوفه  $E_{B,\sigma}$  یا از تصویر تاریک روشن‌نشده یا از سطوح روشن‌نشده در توزیع اندازه‌گیری شده به‌دست می‌آیند (به زیربند ۳-۴-۳ مراجعه شود). تمامی پیکسل‌های که به‌ازای  $2 < n_T < 4$ ، مقادیر خاکستری<sup>۲</sup>  $E_{i,j}$  در آن‌ها بزرگ‌تر از

$$E_{i,j} > E_{B,offset} + n_T E_{B,\sigma} \quad (59)$$

است، فرض می‌شود که روشن شده‌اند و باید در محاسبات پهنای باریکه لحاظ شوند. فرض می‌شود که پیکسل‌های دیگر روشن نشده‌اند و میانگین آن‌ها مقدار انحراف خط مبنا را می‌دهد که باید از داده‌های اندازه‌گیری شده تفریق شوند. از آن‌جا که توزیع چگالی توان معمولاً رقومی است، این روش اجرایی نمی‌تواند مستقیماً روی داده‌های اندازه‌گیری شده اعمال شود. بنابراین، یک «هم‌پیچش دوبعدی»<sup>۳</sup> (میانگین‌گیری زیرآرایه‌های  $n \times m$  پیکسل) تصویر اندازه‌گیری شده باید محاسبه شود:

$$\tilde{E}_{i,j} = \frac{1}{(m+1).(n+1)} \sum_{r=i-\frac{n}{2}}^{r=i+\frac{n}{2}} \sum_{s=j-\frac{m}{2}}^{s=j+\frac{m}{2}} E_{r,s} \quad (60)$$

و برای تعیین پیکسل‌های روشن شرط زیر باید اعمال شود:

$$E_{i,j} > E_{B,offset} + n_T \frac{\tilde{E}_{B,\sigma}}{\sqrt{(n+1).(m+1)}} \quad (61)$$

با  $2 < n_T < 4$ .

بنابراین انحراف خط پایه که باید از تصویر اندازه‌گیری شده تفریق شود، از مقدار میانگین پیکسل‌های روشن‌نشده به‌دست می‌آید. مقادیر عملی  $m$  و  $n$  بین ۲٪ و ۵٪ اندازه تصویر هستند. تصویر هم‌پیچش فقط برای تعیین پیکسل‌های روشن‌نشده استفاده می‌شود، ارزیابی بعدی باید بر روی تصویر اندازه‌گیری شده با انحراف تصحیح‌شده انجام شود.

1- Histogram  
2- Grey values  
3- 2d-convolution

یادآوری - این روش اجرایی، اساساً مرتبط با آستانه‌سازی تصویر است. بر خلاف روش‌های متداول آستانه‌سازی، که در آن‌ها تنها «ارقام کامل» (ارقام صفر تا ۹) به مقدار آستانه تعلق می‌گیرد، در این روش هیچ خطای اندازه‌گیری اضافی وارد نمی‌شود و هیچ داده‌ای از بین نمی‌رود.

### ۳-۴-۳ روش تقریبی

این روش تنها مقادیر تخمینی را برای روش آماری فراهم نمی‌سازد. در بسیاری از موارد درستی این تصحیح ظریف انحراف، کافی خواهد بود.

یادآوری - توزیع چگالی توان یک پرتو لیزر ناپراشیده با دور شدن از مرکز آن به سرعت افت می‌کند. بنابراین هنگامی که پهنای باریکه از ۵۰٪ اندازه آشکارساز فراتر نمی‌رود معمولاً سطوحی، به احتمال زیاد کناره‌های تصویر، در توزیع اندازه‌گیری شده وجود دارند که تحت تابش باریکه لیزر قرار نمی‌گیرند.

تعیین انحراف خط پایه با میانگین‌گیری نمونه‌ای از  $N$  نقطه روشن نشده (مثلاً آرایه‌ای از  $n \times m$  پیکسل در هر یک از چهار گوشه) در تصویر مستقیماً انحرافی را به دست می‌دهد که باید از توزیع اندازه‌گیری شده تفریق شود. عدم قطعیت انحراف هم به این ترتیب مرتبط خواهد بود.

مثال - با استفاده از یک دوربین CCD استاندارد با نوفه یک رقمی و  $n = m = 50$ ، عدم قطعیت انحراف باقی‌مانده از مرتبه 1/100 است.

مقادیر عملی  $m$  و  $n$  بین ۲٪ و ۵٪ اندازه تصویر هستند.

توصیه می‌شود اعتبار این روش با مقایسه انحراف خط پایه توزیع اندازه‌گیری شده نسبت به آن چه برای یک تصویر تاریک، که در آن همان سطوح برای میانگین‌گیری استفاده شده‌اند، بررسی شود.

$$\frac{|E_{\text{offset, meas}} - E_{\text{offset, dark}}| \sqrt{N}}{E_{B, \sigma}} < n_t \quad (62)$$

که توصیه می‌شود  $n_t$  کمتر از چهار باشد.

عدم برقراری رابطه بالا نشان‌دهنده آن است که یا مقدار قابل توجهی از تابش اضافی علیرغم مسدود کردن باریکه وجود دارد یا اندازه باریکه نسبت به اندازه آشکارساز بسیار بزرگ است، به طوری که گوشه‌ها روشن هستند. در این حالت یکی از روش‌های اجرایی زیر باید انتخاب شود:

الف - استفاده از اپتیک شکل‌دهی باریکه با پراکندگی جمعیتی کلی کمتر؛

ب - تصویربرداری مجدد باریکه با بزرگ‌نمایی کمتر یا انتخاب آشکارساز بزرگ‌تر؛

پ - محافظت بهتر در برابر تابش محیطی و نور ناهمدوس تشدیدگر.



#### ۴ روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری‌های پهنای باریکه

##### ۱-۴ کلیات

اگر دستگاه اندازه‌گیری با نسبت علامت‌به‌نوفه<sup>۱</sup> به اندازه کافی بالا و همزمان با تفکیک فضایی بالا در دسترس نبود، روش‌های جایگزین توضیح داده شده در این بخش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. این روش‌ها اندازه‌گیری پهنای یا قطر باریکه را با استفاده از یک دستگاه نسبتاً ساده و با دقت قابل قبول در بیشتر موارد فراهم می‌آورند.

روش‌های ارزیابی توضیح داده شده در این بخش مبتنی بر تعیین گشتاورهای مرتبه دوم تابع توزیع فضایی چگالی توان، که برای فرمول‌بندی منسجم انتشار ضروری هستند، نیست.

ارتباط بین قطر مبتنی بر گشتاور مرتبه دوم و این تعریف جایگزین قطر، قویاً وابسته به شکل توزیع چگالی توان است (به منبع [۴] کتاب‌نامه مراجعه شود).

اگرچه، نشان داده شده است که حداقل در چند مورد (به جدول ۱ مراجعه شود) یک همبستگی بین نسبت‌های انتشار باریکه تعیین شده با یکی از روش‌های جایگزین و نتایج حاصل از روش استاندارد شرح داده شده در این استاندارد ملی وجود دارد. این همبستگی را می‌توان اینگونه نوشت:

$$\sqrt{M^2} = c_i \left( \sqrt{M_i^2} - 1 \right) + 1 \quad (۶۳)$$

که در آن:

$M_i^2$  نسبت انتشار باریکه بر اساس روش جایگزین  $i$ ،

$c_i$  ضریب همبستگی میان روش جایگزین  $i$  و روش استاندارد است.

##### جدول ۱- روش‌های جایگزین - ضرایب همبستگی

$c_i$	روش جایگزین
۱/۱۴	روزنه متغیر (به زیربند ۴-۲ مراجعه شود)
۰/۸۱	لبه تیز متحرک (زیربند ۴-۳)
۰/۹۵	شکاف متحرک (زیربند ۴-۴)
یادآوری - این $c_i$ ها برای باریکه لیزرهای گازی با هندسه‌های تشدیدگر پایدار و تا توان ۱۰ W (و باریکه‌های لیزر CO <sub>2</sub> تا توان ۱ kW)، و با ضریب $M^2$ تا $M^2=4$ ، برای باریکه‌های استیگماتیک معتبر هستند. برای مقادیر بالاتر $M^2$ و انواع دیگر لیزر، ضرایب همبستگی نیاز به تأیید دارند.	

بر اساس این ارتباط میان نسبت‌های انتشار باریکه، می‌توان یک ضریب همبستگی وابسته به  $M^2$  برای تعیین قطرهای (پهنای) باریکه به دست آورد:

$$d_{\sigma} = \frac{d_i}{M_i} \left[ c_i \left( \sqrt{M_i^2 - 1} \right) + 1 \right] \quad (64)$$

که در آن  $d_i$  قطر یا پهنای باریکه بر اساس روش جایگزین  $i$  است. هر یک از سه روش جایگزین در ادامه شرح داده شده‌اند.

#### ۲-۴ روش روزنه متغیر

##### ۱-۲-۴ اصول آزمون

یک دیافراگم متغیر که در صفحه اندازه‌گیری قرار دارد برای تعیین کسر توان عبوری به صورت تابعی از قطر روزنه استفاده می‌شود (به شکل ۳ مراجعه شود). قطر تصحیح نشده باریکه به صورت کمینه قطر روزنه‌ای که ۸۶/۵٪ از توان کل باریکه را عبور می‌دهد، تعریف می‌شود. قطر باریکه می‌تواند با معادله داده شده در زیربند ۴-۲-۵ محاسبه شود.

این روش فقط می‌تواند برای باریکه‌هایی که نسبت محورهای اصلی‌شان از ۱:۱/۱۵ بیشتر نباشد، مورد استفاده قرار گیرد.

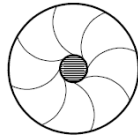
##### ۲-۲-۴ آشکارساز

توصیه می‌شود آشکارساز تابش مطابق با استاندارد IEC 61040: 1990 به‌ویژه بندهای ۳ و ۴ آن باشد. علاوه بر آن، توصیه می‌شود نکات زیر هم مورد توجه قرار گیرند:

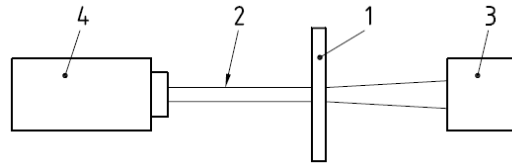
- از اطلاعات سازنده یا توسط اندازه‌گیری اطمینان حاصل شود که مقدار خروجی دستگاه آشکارساز (مانند ولتاژ) به مقدار ورودی (توان لیزر) وابستگی خطی دارد. هر گونه وابستگی به طول‌موج، غیرخطی بودن<sup>۱</sup> یا نایکنواختی<sup>۲</sup> آشکارساز یا ابزار الکترونیکی باید با استفاده از روش‌های اجرایی کالیبراسیون کمینه یا تصحیح شود.
- باید آستانه‌های تخریب (برای برتابیدگی، پرتوگیری تابشی، توان و انرژی) سطح آشکارساز با دقت تعیین شوند تا باریکه لیزری از آن‌ها بیشتر نباشد.
- حساسیت در سطح آشکارساز باید یکنواخت باشد و آشکارساز نباید نسبت به مکان باریکه در محدوده روزنه باز اندازه‌گیری حساس باشد.
- اندازه آشکارساز باید به نحوی انتخاب شود که بیش از ۹۹٪ توان کل لیزر را بپوشاند.

<sup>1</sup> Non-linearity

<sup>2</sup> Non-uniformity



الف- نمای (برش) محوری (از سمت آشکارساز)



ب- نما از بالا

راهنما:

- |   |                |
|---|----------------|
| 1 | دیافراگم متغیر |
| 2 | باریکه         |
| 3 | آشکارساز       |
| 4 | لیزر           |

شکل ۳- پیکربندی اندازه‌گیری پهنای باریکه با روزنه متغیر

#### ۳-۲-۴ دیافراگم‌ها/ روزنه‌ها

دیافراگم‌هایی دایره‌ای با گام‌هایی از قطر انتخاب کنید که با رفتن از یک گام به گام بعدی توان عبوری را کمتر از ۵٪ تغییر دهند.

به‌عنوان جایگزین، می‌توان از دیافراگم متغیر (قطر داخلی) با دهانه کالیبره‌شده نیز استفاده کرد.

دیافراگم‌ها باید به‌گونه‌ای ساخته شده باشند که شکل هندسی خود را در حین کار و جذب انرژی باریکه حفظ کنند (می‌توانند آب-خنک، بازتابی، یا دارای کاهندگی مشخص شده در استاندارد ملی ۱-۱۱۷۱۰ باشند). برای آگاهی از پیکربندی مورد استفاده، به شکل ۳ مراجعه شود.

#### ۴-۲-۴ روش اجرای آزمون

مطمئن شوید که روزنه بر محور اپتیکی عمود است. آشکارساز را به گونه‌ای تنظیم کنید که روزنه اندازه‌گیری آن با دقت حداقل ۰/۱ برابر قطر اندازه‌گیری با محور اپتیکی هم‌مرکز باشد. روش اجرایی هم‌مرکزسازی: روزنه را آن قدر کوچک کنید تا توان عبوری به ۸۰٪ برسد؛ سپس آن را جابه‌جا کنید تا توان عبوری بیشینه شود.

اطمینان حاصل شود که همه توان باریکه روی سطح آشکارساز فرود می‌آید. برای این کار، یک دیافراگم هم‌محور با باریکه را روی سطح آشکارساز قرار دهید به گونه‌ای که ۳۰٪ از سطح بیرونی آن را بپوشاند یا ببندد. در این صورت، تغییر قابل اندازه‌گیری نباید در توان آشکارسازی شده روی دهد.

توان کل ( $P_0$ ) را ثبت کنید.

اندازه روزنه را با گام‌هایی کاهش دهید که توان اندازه‌گیری شده را ۵٪ یا کمتر تغییر دهد. قطری از روزنه که توان عبوری را تا ۸۶/۵٪ توان ثبت شده اولیه کاهش می‌دهد در نظر بگیرید و دست‌کم قطر روزنه را

برای نقطه بزرگ‌تر کناری ( $d_1$ ) و کوچک‌تر کناری ( $d_2$ ) ثبت کنید. در هر یک از این نقاط، توان‌ها ( $P_2, P_1$ ) یا انرژی‌های ( $Q_2, Q_1$ ) مربوطه را ثبت کنید.

#### ۵-۲-۴ ارزیابی

با درون‌یابی خطی بین اندازه مشخص روزه‌ها در نقاط متناظر تراز توان بالا و پایین  $\% ۸۶/۵$  توان کل، قطر باریکه تصحیح نشده  $d_{86.5}$  را محاسبه کنید.

$$d_{86.5} = d_1 + [(P_{86.5} - P_1) \cdot (d_2 - d_1) / (P_2 - P_1)] \quad (۶۵)$$

قطر متناظر  $d_\sigma$  را با معادله زیر محاسبه کنید:

$$d_\sigma = d_{86.5} \frac{1}{\sqrt{M_{86.5}^2}} \left[ 1.14 \left( \sqrt{M_{86.5}^2 - 1} \right) + 1 \right] \quad (۶۶)$$

برای محدودیت‌های کاربرد، به زیربند ۴-۱ مراجعه شود.

#### ۳-۴ روش لبه-تیز متحرک<sup>۱</sup>

##### ۱-۳-۴ اصول آزمون

از یک لبه-تیز متحرک برای قطع باریکه در جلوی یک آشکارساز ثابت با سطح بزرگ استفاده می‌شود تا آشکارساز توان عبوری را به صورت تابعی از مکان لبه اندازه‌گیری کند (به شکل ۴ مراجعه شود). دو برابر فاصله مکان‌های دو نقطه لبه-تیز که  $\% ۸۴$  و  $\% ۱۶$  توان را عبور می‌دهند، عرض باریکه تصحیح نشده را تعیین می‌کند. پهنای باریکه با استفاده از معادلات (۶۷) و (۶۸) محاسبه می‌شود.

هنگام کار با باریکه‌های بیضوی، جهت حرکت لبه-تیز باید منطبق بر دو محور اصلی باریکه انتخاب شود.

##### ۲-۳-۴ دستگاه آشکارساز

الزامات آورده شده در زیربند ۴-۲-۲ باید رعایت شوند. طول لبه-تیز باید به نحوی انتخاب شود که دست‌کم قطر سطح حساس آشکارساز را پوشش دهد.

##### ۳-۳-۴ روش اجرایی آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک

توان باریکه را در حالتی که لبه-تیز کاملاً خارج از مسیر پرتو است، ثبت کنید.

پایه متحرک را حرکت داده تا محور  $x$  لبه-تیز توان عبوری را تا  $\% ۸۴$  توان اولیه بر روی توان‌سنج کاهش دهد، سپس مکان پایه ( $x_1$ ) را ثبت کنید.

حرکت پایه را ادامه دهید تا فقط ۱۶٪ توان اولیه باریکه به توان سنج برسد، سپس مکان پایه ( $x_2$ ) را ثبت کنید.

#### ۴-۳-۴ ارزیابی

پهنای باریکه تصحیح نشده  $d_k$  در این مکان را مطابق فرمول زیر محاسبه کنید

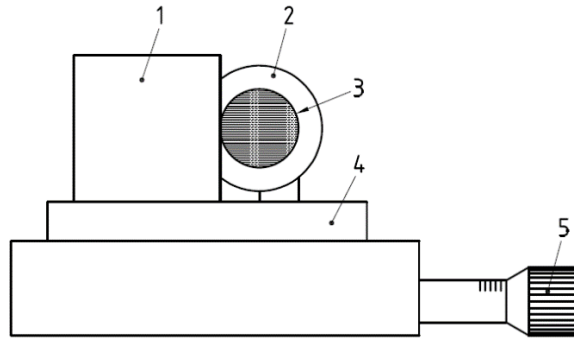
$$d_k = (x_2 - x_1) \quad (۶۷)$$

که در آن  $(x_2 - x_1)$  قدر مطلق اختلاف مکان‌های ثبت شده پایه متحرک است.

$d_\sigma$  مربوطه را مطابق فرمول زیر به دست آورید

$$d_\sigma = d_k \frac{1}{\sqrt{M_k^2}} \left[ 0.81 \left( \sqrt{M_k^2 - 1} \right) + 1 \right] \quad (۶۸)$$

برای محدودیت‌های کاربرد به زیربند ۴-۱ مراجعه شود.



راهنما:

- |   |               |
|---|---------------|
| ۱ | لبه-تیز       |
| ۲ | کلکتور فوتوسل |
| ۳ | باریکه        |
| ۴ | پایه متحرک    |
| ۵ | ریزنسج        |

شکل ۴ - پیکربندی اندازه‌گیری پهنای باریکه با لبه-تیز متحرک

#### ۵-۳-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های آستیگماتیک ساده

برای به دست آوردن پهنای باریکه  $d_{\sigma x}$  و  $d_{\sigma y}$  دو اندازه‌گیری لبه-تیز متحرک در راستای محورهای اصلی ضروری است. روش اجرایی و ارزیابی همانند زیربندهای ۴-۳-۳ و ۴-۳-۴ هستند.

محورهای اصلی می‌توانند به صورت زیر تعیین شوند:

الف - دو راستای حرکت متعامد را که پهنای تصحیح نشده باریکه برای آن‌ها برابرند، تعیین کنید.

ب- این راستاها را به اندازه  $45^\circ$  بچرخانید تا به محورهای اصلی برسید.

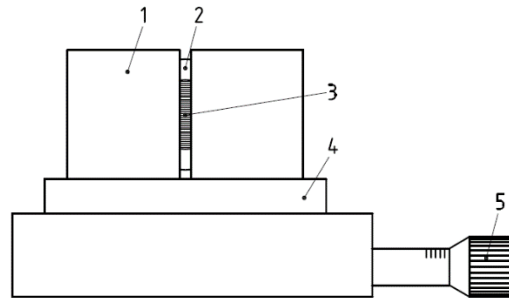
#### ۴-۴ روش شکاف متحرک<sup>۱</sup>

##### ۱-۴-۴ اصول آزمون

برای قطع باریکه در جلوی آشکارساز با سطح بزرگ یک شکاف بر روی پایه متحرک قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که آشکارساز توان عبوری را به صورت تابعی از مکان شکاف اندازه‌گیری کند (به شکل ۵ مراجعه شود). پهنای باریکه تصحیح نشده به وسیله فاصله مکان دو شکافی که  $13/5\%$  بیشینه توان عبوری را عبور می‌دهند، به دست می‌آید. پهنای باریکه با استفاده از معادله (۶۹) محاسبه می‌شود.

هنگام کار با باریکه‌های بیضوی، جهت حرکت شکاف باید منطبق بر دو محور اصلی باریکه انتخاب شود.

یادآوری- با استفاده از آشکارساز نواری، و حرکت شکاف و آشکارساز با همدیگر، نتایج بسیار خوبی برای باریکه‌های با قطر بزرگتر به دست می‌آید.



راهنما:

- |   |               |
|---|---------------|
| ۱ | شکاف متحرک    |
| ۲ | کلکتور فوتوسل |
| ۳ | باریکه        |
| ۴ | پایه متحرک    |
| ۵ | ریزسنج        |

شکل ۵- چیدمان اندازه‌گیری پهنای باریکه با شکاف متحرک

##### ۲-۴-۴ دستگاه آشکارساز

به زیربند ۲-۲-۴ مراجعه شود. طول شکاف باید به اندازه‌ای باشد تا دست کم قطر حساس سطح آشکارساز را بپوشاند.

##### ۳-۴-۴ شکاف

طول شکاف مورد استفاده نباید کمتر از دو برابر پهنای تقریبی باریکه تحت اندازه‌گیری باشد.

پهنای شکاف مورد استفاده نباید بیشتر از یک‌بیستم پهنای تقریبی باریکه تحت اندازه‌گیری باشد.

#### ۴-۴-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک

شکاف را به نحوی جلوی (عمود بر محور انتشار) باریکه قرار دهید تا بیشینه توان کل از دریچه به آشکارساز برسد. این داده را به عنوان خوانش ۱ ثبت کنید.

شکاف را به صورت عرضی در یک کناره باریکه جابه‌جا کنید تا فقط ۱۳٫۵٪ توان کل (خوانش ۱) را عبور دهد. مکان شکاف ( $x_1$ ) را ثبت کنید.

شکاف را به صورت عرضی در جهت مخالف حرکت دهید تا فقط ۱۳٫۵٪ توان کل عبوری را در کناره دیگر عبور دهد. مکان شکاف ( $x_2$ ) را ثبت کنید.

#### ۵-۴-۴ ارزیابی

فاصله بین مکان‌ها ( $x_2 - x_1$ ) برابر پهنای باریکه تصحیح نشده  $d_s$  است.

$d_\sigma$  مربوطه را به وسیله فرمول زیر محاسبه کنید

$$d_\sigma = d_s \frac{1}{\sqrt{M_s^2}} \left[ 0.95 \left( \sqrt{M_s^2} - 1 \right) + 1 \right] \quad (69)$$

برای محدودیت‌های کاربرد به زیربند ۴-۱ مراجعه شود.

#### ۶-۴-۴ روش اجرای آزمون برای باریکه‌های استیگماتیک ساده

برای به دست آوردن پهنای باریکه  $d_{\sigma x}$  و  $d_{\sigma y}$  دو اندازه‌گیری لبه-تیز متحرک در راستای محورهای اصلی ضروری است. روش اجرایی و ارزیابی همانند زیربندهای ۴-۴-۴ و ۵-۴-۴ هستند.

محورهای اصلی می‌توانند به صورت زیر تعیین شوند:

الف- دو راستای حرکت متعامد را که پهنای تصحیح نشده باریکه برای آن‌ها برابرند، تعیین کنید.

ب- دوراستا را به اندازه  $45^\circ$  بچرخانید تا به محورهای اصلی برسید.

## پیوست الف

### (آگاهی دهنده)

### ماتریس‌های دستگاه اپتیکی

دستگاه‌های اپتیکی بدون ابیراهی با ماتریس‌های  $4 \times 4$  نمایش داده می‌شوند. قانون انتشار ارائه شده در زیربند ۲-۵ مبتنی بر این ماتریس‌ها است و می‌تواند به آسانی برای پیش‌بینی خواص باریکه مورد استفاده قرار گیرد. ماتریس‌های مهم‌ترین قطعات اپتیکی در این پیوست آورده شده‌اند و در آن روش اجرایی محاسبه ماتریس دستگاه اپتیکی ترکیبی ارائه شده است.

ماتریس انتشار آزاد در مسافت  $L$  به صورت زیر داده می‌شود

$$S_P(L) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۱})$$

ماتریس عدسی‌های کروی نازک با فاصله کانونی  $f$  عبارت است از:

$$S_{SL}(L) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۲})$$

ماتریس عدسی‌های استوانه‌ای نازک هم‌راستا شده عبارت است از:

$$S_{CL}(L) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_x} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f_y} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۳})$$

که در آن  $f_x$  و  $f_y$  به ترتیب فاصله‌های کانونی در جهت‌های افقی و عمودی هستند.

ماتریس عدسی‌های استوانه‌ای با زاویه چرخش  $\alpha$  نسبت به محورهای افقی به صورت زیر داده می‌شود

$$S_{RCL}(f_x, f_y, \alpha) = R(\alpha)^T \cdot S_{CL}(f_x, f_y) \cdot R(\alpha) \quad (\text{الف-۴})$$

که در آن:

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۵})$$

و  $R(\alpha)^T$  ماتریس ترانپوز شده  $R(\alpha)$  است.



ماتریس یک دستگاه اپتیکی متشکل از ترکیب قطعات اپتیکی متعدد از طریق ضرب ماتریس‌ها به دست می‌آید. برای مثال، ماتریس دستگاه شامل یک عدسی کروی با فاصله کانونی  $f$  در فاصله  $L_1$  از صفحه ورودی و فاصله  $L_2$  از صفحه خروجی به صورت زیر است.

$$S = S_P(L_2) \cdot S_{SL}(f) \cdot S_P(L_1) \quad (\text{الف-۶})$$

## کتابنامه

- [1] ISO 11146-1, Lasers and laser-related equipment- Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios- Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams
- یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۷۱۰: سال ۱۳۸۷، لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین پهنا، زوایای واگرایی و نسبت انتشار پرتو لیزر - قسمت ۱: پرتوهای استیگماتیک و آستیگماتیک ساده، با استفاده از استاندارد ISO 11146-1: 2005 تدوین شده است.
- [2] ISO 11146-2, Lasers and laser-related equipment- Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios- Part 2: General astigmatic beams
- یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۱۷۱۰: سال ۱۳۸۷، لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین پهنا، زوایای واگرایی و نسبت انتشار پرتو لیزر- قسمت ۲: پرتوهای آستیگماتیک عمومی، با استفاده از استاندارد ISO 11146-2: 2005 تدوین شده است.
- [3] IEC 61040<sup>1</sup>:1990, Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation
- [4] SIEGMAN, A.E. et al., “Choice of clip levels for beam width measurements using knife edge techniques”, IEEE Journal of Quantum Electronics Vol. 27 p. 1098-1104 (1991)
- [5] SIEGMAN, A.E., “Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam”, IEEE Journal of Quantum Electronics Vol. 27 p. 1146-1148 (1991)
- [6] NEMES, G., “Synthesis of general astigmatic optical systems, the detwisting procedure, and the beam quality factors for general astigmatic laser beams”, Laser Beam Characterization, H. Weber, N. Reng, J. Lüdtke, and P.M. Mejias, eds., Technical University Berlin, Institutes of Optics, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Germany, p. 93-104 (1994)
- [7] NEMES, G., Intrinsic and geometrical beam classification and the beam identification after measurement, SPIE Proc. 4932, p. 624-636 (2003)

---

۱- این استاندارد منسوخ شده است.