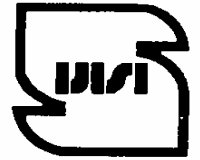




جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

Institute of Standards and Industrial Research of Iran



استاندارد ملی ایران

۹۵۱۴-۲

چاپ اول

ISIRI

9514-2

1st.Edition

لیزرها و تجهیزات مربوط به لیزر - روش های  
آزمون برای تعیین شکل جبهه موج پرتو لیزر -  
قسمت دوم : حس گرهای شاک - هارتمن

**Lasers and laser-related equipment -  
Test methods for determination of the shape of  
a laser beam wave front -  
Part 2: Shack-Hartmann sensors**

### آشنایی با مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب قانون، تنها مرجع رسمی کشور است که عهده دار وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) میباشد.

تدوین استاندارد در رشته های مختلف توسط کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان مؤسسه، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط با موضوع صورت میگیرد. سعی بر این است که استانداردهای ملی، در جهت مطلوبیت ها و مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فنی و فن آوری حاصل از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع شامل: تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، بازرگانان، مراکز علمی و تخصصی و نهادها و سازمانهای دولتی باشد. پیش نویس استانداردهای ملی جهت نظرخواهی برای مراجع ذینفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال میشود و پس از دریافت نظرات و پیشنهادها در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که توسط مؤسسات و سازمانهای علاقمند و ذیصلاح و با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می شود نیز پس از طرح و بررسی در کمیته ملی مربوط و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی چاپ و منتشر می گردد. بدین ترتیب استانداردهایی ملی تلقی می شود که بر اساس مفاد مندرج در استاندارد ملی شماره (۵) تدوین و در کمیته ملی مربوط که توسط مؤسسه تشکیل میگردد به تصویب رسیده باشد.

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد میباشد که در تدوین استانداردهای ملی ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندیهای خاص کشور، از آخرین پیشرفتهای علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی استفاده می نماید.

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون به منظور حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردها را با تصویب شورای عالی استاندارد اجباری نماید. مؤسسه می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آنرا اجباری نماید.

همچنین بمنظور اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمانها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و گواهی کنندگان سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاهها و کالیبره کنندگان وسایل سنجش، مؤسسه استاندارد اینگونه سازمانها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران مورد ارزیابی قرار داده و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آنها اعطا نموده و بر عملکرد آنها نظارت می نماید. ترویج سیستم بین المللی یکاها، کالیبراسیون وسایل سنجش تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی از دیگر وظایف این مؤسسه می باشد.

نشانی مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران : کرج - شهر صنعتی، صندوق پستی ۱۶۳-۳۱۵۸۵

دفتر مرکزی : تهران - ضلع جنوبی میدان ونک - صندوق پستی : ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵

تلفن مؤسسه در کرج: ۰۲۶۱-۲۸۰۶۰۳۱-۸

تلفن مؤسسه در تهران: ۰۲۱-۸۸۷۹۴۶۱-۵

دورنگار: کرج ۰۲۶۱-۲۸۰۸۱۱۴ - تهران ۰۲۱-۸۸۸۷۰۸۰-۸۸۸۷۱۰۳

بخش فروش - تلفن: ۰۲۶۱-۲۸۰۷۰۴۵ - دورنگار: ۰۲۶۱-۲۸۰۷۰۴۵

پیام نگار: [Standard @ isiri.or.ir](mailto:Standard@isiri.or.ir)

بهاء ۲۶۲۵ ریال

- Headquarters: Institute Of Standards And Industrial Research Of Iran  
P.O.Box : 31585-163 Karaj - IRAN
- Tel (Karaj): 0098 (261) 2806031-8
- Fax (Karaj): 0098 (261) 2808114
- Central Office: Southern corner of Vanak square, Tehran  
P.O.Box : 14155-6139 Tehran-IRAN
- Tel (Tehran): 0098 21 8879461-5
- Fax (Tehran): 0098 21 8887080, 8887103
- Email: [Standard @ isiri.or.ir](mailto:Standard@isiri.or.ir)
- Price: 2625 RLS

## کمیسیون فنی تدوین استاندارد

" لیزرها و تجهیزات مربوط به لیزر - روش های آزمون برای تعیین شکل جبهه موج پرتو لیزر -  
قسمت دوم: حس گرهای شاک - هارتمن "

رئیس	سمت یا نمایندگی
نوری خراسانی، سعید (دکترای مواد پلیمری)	عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان
<u>دبیر</u> پاک نژاد، صدیقه (لیسانس مهندسی برق)	کارشناس مهندسی پزشکی موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران
<u>اعضاء</u> پوری رحیم، حسین (فوق لیسانس مهندسی پزشکی)	کارشناس مسئول اداره کل استاندارد و تحقیقات صنعتی استان اصفهان
موسویان، سعید (دکترای تخصصی ارتوپدی)	متخصص جراحی ارتوپدی بیمارستان امین اصفهان
موسوی، سید مهدی (فوق لیسانس مهندسی الکترواپتیک)	مدیر گروه لیزر شرکت اپتیک اصفهان
خادم حسینی، بابک (لیسانس مهندسی پزشکی)	مدیر فنی شرکت biotech
تولایی، حمید رضا (فوق لیسانس مدیریت بازرگانی)	مدیریت صفهان
مرادی پولادی، محمود (فوق لیسانس مکانیک)	مدیر سامانه های دیده وری شرکت اپتیک اصفهان
زری باف، حامد (فوق لیسانس مکانیک)	شرکت ساخت تجهیزات پزشکی

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ج	آشنایی با موسسه استاندارد
د	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
ز	پیش گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۳	۴ نمادها و یکها
۴	۵ اصول آزمون حس گرهای جبهه موج هارتمن یا شاک - هارتمن
۵	۶ آرایش اندازه گیری و روش آزمون
۵	۱-۶ کلیات
۵	۲-۶ سیستم آشکار ساز
۷	۳-۶ اندازه گیری
۸	۴-۶ کالیبراسیون
۹	۷ ارزیابی گرادیان های جبهه موج
۹	۱-۷ کسر زمینه
۱۰	۲-۷ ارزیابی
۱۱	۸ بازسازی جبهه موج
۱۱	۱-۸ کلیات
۱۱	۲-۸ انتگرال گیری عددی مستقیم (روش منطقه ای
۱۲	۳-۸ بازسازی جبهه موج کیفیتی (مودال)
۱۲	۹ نمایش جبهه موج
۱۳	۱۰ عدم اطمینان

## پیش‌گفتار

استاندارد " لیزرها و تجهیزات مربوط به لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین شکل جبهه موج پرتو لیزر- قسمت دوم: حس‌گرهای شاک - هارتمن " که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران/ سازمان....) تهیه و تدوین شده و در یکصد و چهل و نهمین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۱۳۸۶/۹/۲۷ مورد تصویب قرار گرفته است. اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن‌ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و مأخذی که برای تهیه این استاندارد به کار رفته به شرح زیر است:

ISO15367-2:2005, Lasers and laser related equipment –Test methods for determination of the shape of a laser beam wavefront- part 2:Shack-Hartmann sensors.

# لیزرها و تجهیزات مربوط به لیزر - روش‌های آزمون برای تعیین شکل

## جبهه موج پرتو لیزر -

### قسمت دوم: حس‌گرهای شاک - هارتمن<sup>۱</sup>

#### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد تعیین روش‌های اندازه‌گیری و ارزیابی تابع توزیع جبهه موج در سطح عرضی پرتو لیزر با استفاده از حس‌گرهای هارتمن یا شاک - هارتمن جبهه موج است. این قسمت از استاندارد برای پرتوهای لیزر همدوس کامل، نسبتاً همدوس، استیگماتیسم کلی، و برای عمل‌کرد پالسی و پیوسته قابل کاربرد می‌باشد.

علاوه بر این، روش‌های عددی قابل اطمینان برای بازسازی منطقه‌ای و مودال<sup>۲</sup> توزیع دو بعدی جبهه موج، به همراه عدم اطمینان آن‌ها شرح داده شده است. دانش توزیع جبهه موج، تعیین پارامترهای جبهه موج که در قسمت اول این استاندارد تعریف شده‌اند را ممکن می‌سازد.

#### ۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است. استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است :

2-1 ISO11145, Optics and optical instruments- laser and laser – related equipment-vocabulary and symbols

2-2 ISO13694, Optics and optical instruments- Lasers and laser-related equipment- Test methods for laser beam power ( energy ) density distribution

2-3 ISO15367-1:2003, Lasers and laser related equipment – Test methods for determination of the shape of a laser beam wave front- part 1: Terminology and fundamental aspects.

---

<sup>1</sup> -Shack-Hartman

<sup>2</sup> -Modal

### ۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف زیر همراه تعاریف ارایه شده در استاندارد ISO11145 و قسمت اول این استاندارد به کار می‌رود:

#### ۱-۳ فاصله اجزاء آرایه $d_x, d_y$

فاصله بین مراکز روزنه‌ها یا عدسی‌های کوچک مجاور در جهت  $x, y$  می‌باشد.

#### ۲-۳ فاصله سطح نمایش زیرروزنه تا آشکارساز $L_H$

فاصله بین سطح نمایش زیرروزنه (آرایه عدسی‌های کوچک یا سطح نمایش هارتمن) تا آرایه آشکارساز می‌باشد.

یادآوری - برای حس‌گرهای شاک - هارتمن این فاصله اغلب به اندازه طول کانون عدسی کوچک تنظیم می‌گردد.

#### ۳-۳ طول کانونی عدسی کوچک $f$

طول کانونی عدسی‌های کوچک برای حس‌گر شاک - هارتمن تعریف شده است.

#### ۴-۳ پهنای زیرروزنه $d_s$

پهنای زیرروزنه سوراخ‌های سطح نمایش هارتمن یا عدسی‌های کوچک آرایه شاک - هارتمن می‌باشد.

#### ۵-۳ دامنه دینامیکی زاویه‌ای $\beta_{max}$

بیشینه دامنه زاویه‌ای قابل استفاده حس‌گرهای هارتمن یا شاک - هارتمن می‌باشد.

یادآوری - برای روزنه‌های مربعی، دامنه دینامیکی زاویه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\beta_{max} = \frac{d_x}{2L_H} - \frac{\lambda}{d_x}$$

#### ۶-۳ قابلیت تکرار اندازه‌گیری جبهه موج $w_{r,rms}$

جذر میانگین مربع ( $r.m.s$ ) اختلاف بین اندازه‌گیری‌های مجزای بعدی همان جبهه موج  $w_n(x, y)$  و جبهه موج میانگین  $\bar{w}(x, y)$  را تعریف می‌کند.

$$w_{r,rms} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y E_n(x, y) [w_n(x, y) - \bar{w}(x, y)]^2}{\sum_x \sum_y E_n(x, y)} - \left[ \frac{\sum_x \sum_y E_n(x, y) [w_n(x, y) - \bar{w}(x, y)]}{\sum_x \sum_y E_n(x, y)} \right]^2}$$

که در آن:

$n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها؛

$k$  تعداد نمونه‌های گرفته شده است.

$$\bar{w}(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^k E_n(x, y) \times w_n(x, y)}{\sum_{n=1}^k E_n(x, y)}$$



### ۷-۳ دقت اندازه‌گیری جبهه موج $w_{a,rms}$

میانگین جذرمیانگین مربع اختلاف بین جبهه موج مرجع  $w_r$  و جبهه موج با انحراف تصحیح شده  $w_{ic,n}$  ، پس از اعمال مقادیر مختلف انحراف  $\theta_n$  به جبهه موج مرجع را تعریف می‌کند

$$w_{a,rms} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y E_n(x,y) [w_{ic,n}(x,y) - w_r(x,y)]^2}{\sum_x \sum_y E_n(x,y)}}$$

که در آن :

$n$  اندازه‌گیری  $n$  ام جبهه موج با اعمال انحراف  $\theta_{x,n}, \theta_{y,n}$  ؛

$k$  تعداد نمونه‌های گرفته شده؛

$w_{ic,n}$  جبهه موج با انحراف تصحیح شده به صورت زیر:

$$w_{ic,n}(x,y) = w_n(x,y) - \theta_{x,n}x - \theta_{y,n}y$$

یادآوری - به بند ۷-۴-۳ از قسمت اول این استاندارد مراجعه شود.

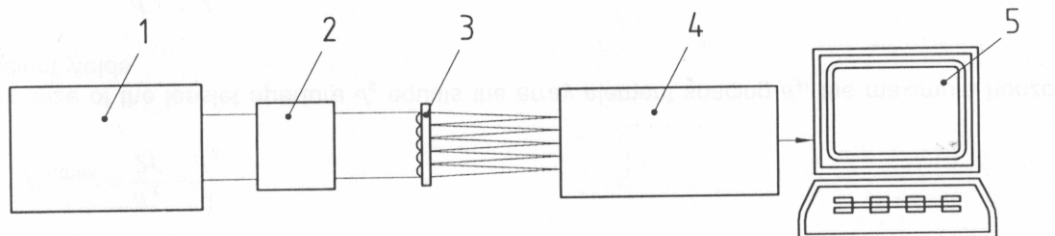
### ۴ نمادها و یکاها

تعریف شده در	یکا	پارامتر	نماد
ISO 13694	$W/cm^2, J/cm^2$	توزیع شدت ( انرژی )	$E(x,y), H(x,y)$
ISO 15367-1:2003,3.1.5	$mm$	محورهای مکانیکی (مختصات کارتزین)	$x, y, z$
ISO 15367-1:2003,3.1.5	$mm$	محور پرتو	$z$
	$nm$	طول موج	$\lambda$
ISO 15367-1:2003,3.1.4	$mm$	مکان سطح اندازه‌گیری	$z_m$
ISO 15367-1:2003,3.1.1	$nm$	شکل جبهه موج میانگین	$w(x,y)$
ISO 15367-1:2003,3.1.1Note	$rad$	توزیع فاز	$\varphi(x,y)$
ISO 15367-1:2003,3.4.2	$nm$	جبهه موج تصحیح شده	$w_c(x,y)$
ISO 15367-1:2003,3.4.3	-	سطح تقریب کروی	$s(x,y)$
ISO 15367-1:2003,3.4.5	$mm$	عدم تمرکز یا شعاع بهترین کره	$R_{ss}$
ISO 15367-1:2003,3.4.6	$nm$	تابع انحراف جبهه موج	$w_{AF}(x,y)$
	$nm$	استیگماتیسم جبهه موج	$w_{PV}$
ISO 15367-1:2003,3.4.7	$nm$	تغییر شکل وزن دار	$w_{rms}$
3.1	$mm$	فاصله اجزاء آرایه	$d_x, d_y$
3.2	$mm$	فاصله سطح نمایش زیر روزنه تا آشکار ساز	$L_H$
3.3	$mm$	طول کانونی عدسی کوچک	$f$
	$\mu m$	اندازه نقطه	$d_p$
3.4	$\mu m$	پهنای زیر روزنه	$d_s$
3.5	$mrad$	دامنه دینامیکی زاویه‌ای	$\beta_{max}$

تعریف شده در	یکا	پارامتر	نماد
ISO 11146-1	mm	مختصات مرکز پرتودرزیروزنه $ij$ یعنی ممان های اول توزیع شدت درزیروزنه $ij$	$(x_c, y_c)_{ij}$
	mm	مختصات پرتو مرجع در زیروزنه $ij$	$(x_r, y_r)_{ij}$
ISO 15367-1:2003,3.5.1,3.5.3	-	اجزاء گرادیان جبهه موج موضعی (شیب،سر)	$(\beta_x, \beta_y)_{ij}$
3.6	nm	قابلیت تکرار اندازه گیری جبهه موج	$w_{r,rms}$
3.7	nm	دقت اندازه گیری جبهه موج	$w_{a,rms}$
	-	ماتریس هندسی در الگوریتم های بازسازی جبهه موج	$B$
	-	ماتریس کوواریانس	$C$

## ۵ اصول آزمون حس گرهای جبهه موج هارتمن یا شاک - هارتمن

اصل هارتمن برمبنای تقسیم پرتو به تعدادی پرتو کوچک استوار است. این امر به وسیله سطح نمایش با سوراخ های قرار گرفته بریک شبکه عادی (حس گر هارتمن)، یا بوسیله آرایه ای از عدسی های کوچک یا میکرو عدسی ها (حس گر شاک - هارتمن) محقق می شود که حاصل آن نمونه برداری از گرادیان جبهه موج میانگین (به شکل ۱ مراجعه شود) و بازده بهتر جمع آوری تابشی است. توزیع شدت (انرژی) زیر آرایه و بوسیله یک آشکار ساز حساس به موقعیت، که اغلب یک حس گر CCD یا آرایه ای از آشکار سازهای چهار ضلعی (سلول های چهار تایی) است، ثبت می گردد. سیگنال های آشکار ساز را می توان با یک سیستم جمع آوری و تحلیل داده کامپیوتری به دست آورد.



راهنما

- ۱- لیزر
- ۲- تضعیف کننده
- ۳- آرایه عدسی های کوچک
- ۴- آشکار ساز حساس به موقعیت
- ۵- سیستم جمع آوری و تحلیل داده

شکل ۱- آرایش عملی اندازه گیری جبهه موج با استفاده از روش شاک - هارتمن

موقعیت مرکز سطح پرتوهای کوچک باید در هر سطح زیروزنه، برای پرتو تحت آزمون و نیز منبع مرجع، ترجیحاً پرتو لیزر تنظیم شده، تعیین شود. جابه جایی های مراکز سطح نسبت مرجع بیانگر گرادیان های محلی

جبهه موج است، که از آن جبهه موج  $w(x, y)$  بوسیله انتگرال گیری مستقیم یا روش های انطباق مودال بازسازی می شود (به بند هشت مراجعه شود).  
 نوع، هویت سازنده و مدل تجهیزات به کاررفته برای اندازه گیری جبهه موج هارتمن یا شک-هارتمن، به همراه اندازه آرایه و فاصله عدسی ها/سوراخ ها باید در گزارش آزمون ثبت شوند.

## ۶ آرایش اندازه گیری و روش آزمون

### ۱-۶ کلیات

پرسش های مربوط به انواع مختلف لیزر، ایمنی، محیط آزمون، اصلاح پرتو (شامل نمونه برداری یا تضعیف و تجهیزات نوری کار با پرتو) و نیز الزامات کلی آشکارسازهای به کار رفته برای اندازه گیری های گرادیان فاز در قسمت اول این استاندارد مورد بحث قرار گرفته است.  
 تمام جزئیات در مورد تجهیزات نوری نمونه برداری و تضعیف پرتو باید در گزارش آزمون ثبت شود.

### ۲-۶ سیستم آشکارساز

سیستم آشکارساز به کار رفته برای اندازه گیری های هارتمن یا شک-هارتمن جبهه موج باید شامل دو جزء زیر باشد:

الف) وسیله ای برای تقسیم کردن پرتو تحت آزمون به چندین دسته پرتو (سطح زیر روزنه)، برای مثال در آرایه عدسی های کوچک (انکسار یا متفرق کننده) شک - هارتمن یا آرایه در سوراخ ها (هارتمن).  
 ب) آشکارساز حساس به موقعیت (برای مثال دوربین CCD) در فاصله  $L_H$  پشت آرایه قسمت کننده قرار می گیرد (در آشکارساز شک-هارتمن ممکن است  $L$  برابر با  $f$  تنظیم شود، یا از تصحیح مناسبی برخوردار شود)

ناحیه آشکارساز باید به زیرروزنه های مربوط به آرایه تقسیم کننده که برای قسمت کردن پرتو به کار می رود، تقسیم شود. اغلب اوقات، آرایه قائم عدسی های کوچک/روزنه ها با فاصله ثابت  $dx, dy$  (به ترتیب در جهت  $x, y$ ) استفاده می شود. در این مورد آرایه آشکارساز باید به  $n \times m$  زیرروزنه مستطیلی با فواصل  $dx, dy$  و اندیس های  $ij$  تقسیم شود.

دامنه دینامیکی زاویه ای حس گر جبهه موج به تغییرات جبهه موج، مستقیماً با نسبت اندازه نقاط ایجاد شده بر روی آشکارساز به اندازه زیر روزنه ها وابسته است. به منظور جلوگیری از روی هم افتادگی، اندازه نقطه باید کوچک تر از اندازه زیرروزنه باشد. مطابق با گرادیان محلی جبهه موج، نقطه زیرروزنه به طرف مرز ناحیه مشخص شده خود بر روی آشکارساز حرکت می کند. اگر نقطه از مرز عبور کند، موقعیت آن ممکن است دیگر به طور صحیح به دست نیاید، این اثر، دامنه دینامیکی زاویه ای حس گر را محدود می سازد.

برای حس گرهای شک-هارتمن، اندازه نقطه،  $d_p$  به طور تقریبی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$d_p = 2 \frac{\lambda f}{d_s} \quad (1)$$

که در آن:

$f$  طول کانونی عدسی های کوچک؛

$d_s$  پهناى روزنه هاى عدسى كوچك مربعى است.

و در جايى استفاده مى شود كه فرض شود فاصله سطح نمايش زير روزنه تا آشكارساز برابر با طول كانونى است. جابه جايى  $\Delta x$  نقطه بواسطه گراديان افقى محلى جبهه موج  $\beta_x$  در زيرروزنه متناظرش به صورت زير محاسبه مى شود.

$$\Delta x = \beta_x \times f \quad (2)$$

بيشينه جابه جايى مجاز  $\Delta x_{\max}$  براى جلوگيرى از عبور نقطه از مرز تعيين شده آن برابر است با:

$$\Delta x_{\max} = \frac{1}{2}(d_x - d_p) \quad (3)$$

و بيشينه گراديان افقى جبهه موج به صورت زير است :

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2f} - \frac{\lambda}{d_s} \quad (4)$$

چنانچه اندازه روزنه ،  $d_s$  برابر با فاصله اجزاء آرايه ،  $d_x$  ، باشد بيشينه گراديان افقى جبهه موج به صورت زير به دست مى آيد:

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2f} - \frac{\lambda}{d_x} \quad (5)$$

بنا براين براى جلوگيرى از روى هم افتادگى، طول كانونى عدسى هاى كوچك بايد كمتر از  $\frac{d_x^2}{2\lambda}$  باشد. براى دست يابى به يك دامنه ديناميكى سودمند و كمينه كردن تداخل، طول كانونى بايد كمتر از  $\frac{2d_x}{5\lambda}$  باشد. طول كانونى كمتر منجر به دامنه ديناميكى زاويه اى بزرگ ترى خواهد شد، ولى ممكن است باعث بيشتر شدن عدم اطمينان اندازه گيرى شود. براى جهت عمودى ، عبارات مشابهى به كار مى رود. در مورد قطر روزنه هاى ديره اى عدسى هاى كوچك ،  $d_s$  ، بيشينه گراديان جبهه موج به صورت زير به دست مى آيد .

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2f} - 1.22 \frac{\lambda}{d_s} \quad (6)$$

چنانچه اندازه  $d_s$  روزنه عدسى كوچك برابر فاصله اجزاء آرايه  $d_x$  باشد بيشينه گراديان افقى جبهه موج به شكل زير به دست مى آيد.

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2f} - 1.22 \frac{\lambda}{d_x} \quad (7)$$

بنابراين براى دست يابى به دامنه ديناميكى مفيد ، طول كانونى بايد كمتر از  $\frac{d_x^2}{2\lambda}$  باشد.

براى حس گر هاى هارتمن اندازه نقطه ،  $d_p$  به طور تقريبى به صورت زير محاسبه مى شود:

$$d_p = 2 \frac{\lambda L_H}{d_s} \quad (8)$$

كه در آن:

$d_s$  پهناى روزنه هاى مربعى سطح نمايش ،

$L_H$  فاصله سطح نمایش زیر روزنه تا آشکارساز است.

این تقریباً تنها برای  $L_H \gg \frac{d_x^2}{\lambda}$  معتبر است. جابه‌جایی  $\Delta x$  نقطه بواسطه گرادیان افقی محلی جبهه موج  $\beta_x$  در زیر روزنه مربوط به آن عبارتست از:

$$\Delta x = \beta_x \times L_H \quad (9)$$

بیشینه گرادیان افقی جبهه موج متناظر می‌شود:

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2L_H} - \frac{\lambda}{d_s} \quad (10)$$

بنابراین برای جلوگیری از روی هم افتادن نقطه بر نسبت، باید  $\frac{L_H}{d_s}$  کمتر از  $\frac{d_x}{2\lambda}$  باشد. برای دستیابی به دامنه دینامیکی مفید و کمینه کردن تداخل، نسبت  $\frac{L_H}{d_s}$  باید کمتر از  $\frac{2d_x}{5\lambda}$  باشد. نسبت کوچک‌تر منجر به دامنه دینامیکی زاویه‌ای بزرگ‌تری خواهد شد، اما ممکن است هم چنین باعث بیشتر شدن عدم اطمینان اندازه‌گیری شود. برای جهت عمودی، عبارات مشابهی به کار می‌رود.

در مورد قطر روزنه‌های دایره‌ای سطح نمایش  $d_s$  بیشینه گرادیان جبهه موج به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2L_H} - 1.22 \frac{\lambda}{d_s} \quad (11)$$

و بنابراین، برای دستیابی به دامنه دینامیکی مفید، نسبت  $\frac{L_H}{d_s}$  باید کمتر از  $\frac{d_x}{2\lambda}$  باشد.

**یادآوری** - دامنه دینامیکی را می‌توان بوسیله برخی الگوریتم‌های نرم‌افزاری، از این تعریف گسترده‌تر کرد. این الگوریتم‌ها می‌توانند از بزرگ‌نمایی نقشه شبکه زیر روزنه‌ها یا دیگر روش‌های پردازش تصویر نشأت گرفته باشند.

عدم اطمینان اندازه‌گیری به نسبت سیگنال به نویز آشکارساز (SNR) و به تعداد اجزاء آشکارساز که بوسیله نقاط پوشیده شده است بستگی دارد. عدم اطمینان به ویژگی‌های آشکارساز (اندازه اجزاء آشکارساز و نسبت سیگنال به نویز) و پارامترهای هندسی سطح نمایش (فاصله تا آشکارساز، فاصله اجزاء آرایه، اندازه زیر روزنه‌ها، و برای حس‌گرهای شاک-هارتمن، طول کانونی) وابسته است. برای اندازه‌گیری دقیق، لازم است نقاط سوراخ یا عدسی‌های کوچک کمینه دو جزء از آشکارساز را در هر جهت روشن کنند. از آن جایی که عدم اطمینان در اندازه‌گیری‌ها مستقیماً به نسبت سیگنال به نویز بستگی دارد، دامنه دینامیکی آشکارساز باید باتوجه به شدت (انرژی) کمینه ۱:۱۰۰ باشد. برای ارزیابی مناسب موقعیت نقاط، روش پذیری فضایی آشکارساز باید کمینه دو برابر بیشتر از فاصله آرایه روزنه‌ها یا عدسی‌های کوچک  $d_x, d_y$  باشد.

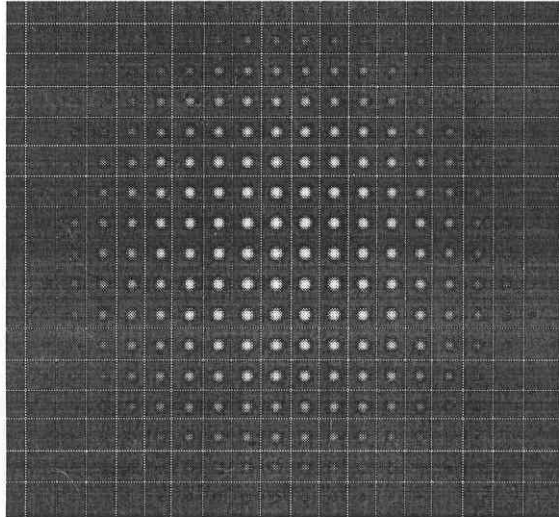
### ۳-۶ اندازه‌گیری

#### ۱-۳-۶ هم محوری

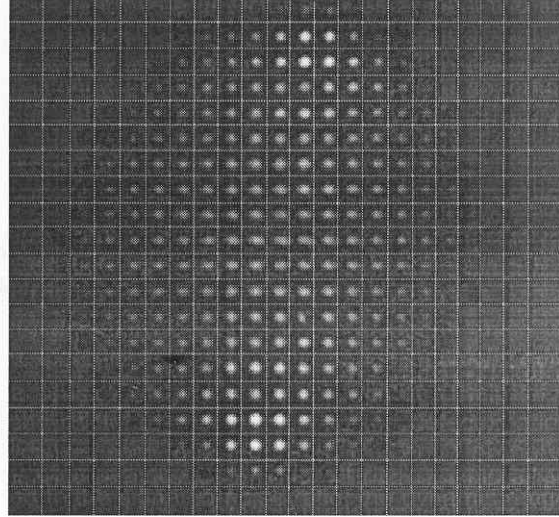
پرتو لیزری که مورد تحلیل قرار می‌گیرد و تجهیزات نوری به کار رفته برای کار با پرتو باید با تجهیزات اندازه‌گیری فاز، که در سطح اندازه‌گیری  $z_m$  قرار می‌گیرد، به صورت هم محور تنظیم گردند.

### ۶-۳-۲ تنظیم زیر روزنه ها

در حالی که بر توزیع نقاط ایجاد شده بوسیله آرایه سوراخ‌ها یا سوراخ‌های عدسی<sup>۱</sup> به کمک آرایه آشکارساز دو بعدی نظارت می‌کنید، نقاط باید نسبت به شبکه آشکارساز کاملاً در وسط قرارگیرند. به ویژه، هر زیر ناحیه آشکارساز باید حاوی تنها یک نقطه مجزا باشد (به شکل ۲ مراجعه شود). توزیع نقاط در مرکز، بوسیله حرکت عرضی شبکه آشکارساز یا کج کردن کل سیستم آشکارساز، انجام می‌شود.



الف) لیزر هلیوم-نئون



ب) لیزر دیود

شبکه های زیرروزنه آشکارساز متناظر نشان داده شده است.

شکل ۲- توزیع نقاط به دست آمده با آشکارساز شاک- هارتمن از لیزر هلیوم-نئون (چپ) و لیزر دیود (راست)

در مورد انحراف‌های قوی جبهه موج، ممکن است نقاط به خارج از زیرروزنه‌های مربوطه پخش شده که منجر به ارزیابی اشتباه از جبهه موج گردد. برای جلوگیری از این اثر باید برای مثال بوسیله بزرگ‌نمایی دینامیکی شبکه زیرروزنه، اندازه‌گیری انجام شود.

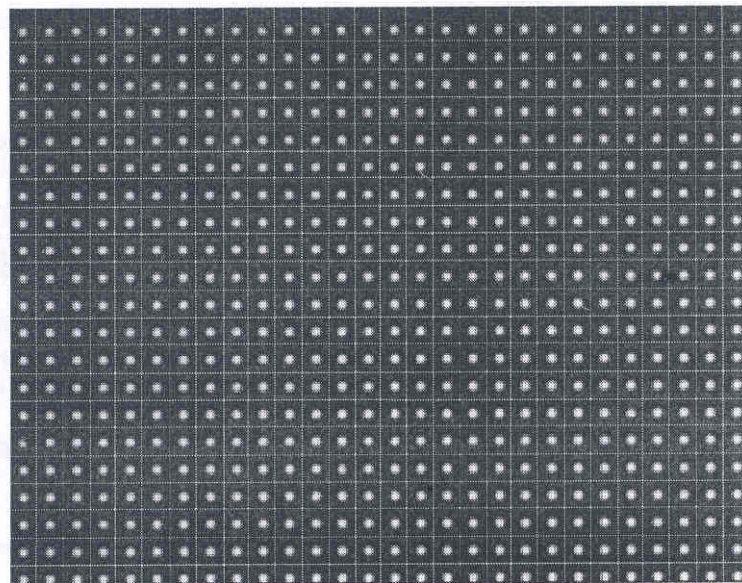
توزیع نقطه  $E(x, y)$  برای پرتوهای لیزر پالسی] باید در سیستم الکترونیکی تحلیل ثبت و ذخیره شود. مثال‌هایی از توزیع اندازه‌گیری شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۶-۴ کالیبراسیون

کالیبراسیون حس‌گر جبهه موج هارتمن یا شاک- هارتمن به کار رفته باید به صورت زیر انجام گیرد: فاصله نمایش زیرروزنه تا آشکار  $L_H$  باید بوسیله اندازه‌گیری مکانیکی یا از طریق مقایسه نتایج حس‌گر جبهه موج با جبهه موج‌های معلوم، تعیین شود. روش کالیبراسیون باید در گزارش آزمون ذکر شود. جبهه موج معلوم باید ثبت شود و مرجعی را چه به صورت مرجع کروی یا موج سطحی فراهم کند. ویژگی و روش فراهم کردن این جبهه موج مرجع را در گزارش آزمون قید کنید.

<sup>1</sup>-Lenslet

توزیع نقطه مرجع  $E_r(x, y)$  [ برای پرتوهای لیزر پالسی ] باید به روش مشابه شرح داده شده در بند ۶-۲ به دست آمده و در سیستم ارزیابی الکترونیکی ذخیره گردد (به شکل ۳ مراجعه شود) برای حسگر شاک- هارتمن به کارگیری پرتو مرجع با طول موج یکسان از اهمیت برخوردار است، زیرا انحرافات در آرایه عدسی کوچک ممکن است منجر به القای جابه‌جایی‌های پراکنده نقاط کانونی گردد. برای پیش‌گیری از چنین اثراتی باید توجه لازم انجام شود. پرتو مرجع و سیگنال نیز ممکن است به طور هم‌زمان روی یکدیگر قرار داده شده و ثبت گردند که امکان تصحیح عدم هم‌ترازی‌های دینامیکی را میسر می‌سازد. پیش‌بینی لازم باید صورت گیرد تا تجهیزات الکترونیکی آشکارساز، از طریق مدولاسیون پرتو مرجع بتوانند بین سیگنال و مرجع تمایز قائل شوند.



شکل ۳ - توزیع نقاط مرجع ( از لیزر هلیوم-نئون تنظیم شده ) به دست آمده با آشکارساز شاک - هارتمن و شبکه زیر روزه متناظر

نوع و طول موج پرتو تنظیم شده که برای کالیبراسیون به کاررفته است، باید در گزارش آزمون ثبت شود.

## ۷ ارزیابی گرادیان‌های جبهه موج

### ۱-۷ کسر زمینه<sup>۱</sup>

پیش از ارزیابی جبهه موج، توزیع نقاط بدست آمده  $E(x, y)[H(x, y)]$  باید کاملاً برای اثرات زمینه و نویز تصحیح شود. مقررات ISO 13694 به کار گرفته می‌شود و نقشه‌ای از زمینه یا کسر میانگین زمینه یا برشی از توزیع به دست آمده در آستانه شدت (انرژی)  $E_{\eta T}(H_{\eta T})$  فراهم می‌شود. برای کاربردهای استاندارد، برش توزیع، تصحیح مناسبی برای زمینه فراهم می‌کند. مقدار  $\eta$  انتخاب شده به نحوی است که  $E_{\eta T}$  یا  $H_{\eta T}$  اندکی بیش از بیشینه نویز آشکار باشد. اگر پروفیل نقطه ایجاد شده از طریق

<sup>1</sup> -Background subtraction

آرایه تقسیم کننده، ساختارهایی را در بال‌های خارجی (به صورتی که اغلب در مورد اجزاء عدسی متفرق کننده مشاهده می‌شود) نشان دهد، به کارگیری افست‌های<sup>۱</sup> بزرگتر به منظور جبران تداخل با زیر روزنه‌های مجاور لازم است.

روش به کاررفته برای تصحیح زمینه و مقدار افست انتخاب شده  $E_{\eta\Gamma}(H_{\eta\Gamma})$  باید در گزارش آزمون مشخص شود.

## ۲-۷ ارزیابی

ارزیابی جبهه موج از توزیع تصحیح شده نقطه‌ای زمینه  $E'(x, y)$  مختصات مرکز سطح هر پرتو کوچک یعنی ممان اول نقطه مجزا، باید در زیر روزنه متناظر و مطابق با روابط زیر تعیین گردد:

$$x_{c,ij} = \frac{\iint_{subap,ij} xE'(x, y)dxdy}{\iint_{subap,ij} E'(x, y)dxdy} \quad (12)$$

$$y_{c,ij} = \frac{\iint_{subap,ij} yE'(x, y)dxdy}{\iint_{subap,ij} E'(x, y)dxdy}$$

موقعیت نقاط محاسبه شده  $(x_c, y_c)_{ij}$  باید در حافظه ذخیره شود. به طریق مشابه، توزیع نقطه  $E_{r(x,y)}[H_r(x, y)]$  به دست‌آمده از پرتو مرجع باید ارزیابی شده، و موقعیت‌های مرجع  $(x_r, y_r)_{ij}$  را برای هر زیرروزنه به دست دهد. این مقادیر باید برای مقایسه با نقاط پرتو لیزر تحت آزمون در حافظه ثبت گردد.

گرادین‌های محلی جبهه موج  $(\beta_x, \beta_y)_{ij}$  باید از مختصات مرکز سطح پرتوهای کوچک  $(x_c, y_c)_{ij}$  تحت آزمون و با توجه به موقعیت‌های مرجع آن‌ها  $(x_r, y_r)_{ij}$  مطابق زیر محاسبه شود:

$$\begin{pmatrix} \partial w / \partial x \\ \partial w / \partial y \end{pmatrix}_{ij} = (\beta_x, \beta_y)_{ij} \approx \frac{1}{L_H} \begin{pmatrix} x_c - x_r \\ y_c - y_r \end{pmatrix}_{ij} \quad (13)$$

**یادآوری** - برای تعیین جبهه موج با دقتی بالا، شاید تصحیح موقعیت‌های تعیین شده مرکز سطح، با توجه به تمایل سیستماتیک شدت (انرژی) به سمت ناحیه زیر روزنه لازم باشد (به بند نه مراجعه شود) چنان‌چه فاصله  $L_H$  دقیقاً برابر با طول کانونی  $f$  آرایه عدسی کوچک، تنظیم نشده باشد، عبارات مشابه (برای حس‌گرهای شاک-هارتمن) به کار می‌رود.

<sup>1</sup> -Offsets



۱-۸ کلیات

از داده‌های گرادیان اندازه‌گیری شده رابطه (۱۳) می‌توان جبهه موج  $w(x, y)$  را با روش‌های عددی مختلف بازسازی کرد. روش‌های انتگرال‌گیری عددی مستقیم، تکرار ماتریسی و انطباق مودال از معمول‌ترین روش‌ها هستند.

روش به‌کاررفته برای بازسازی جبهه موج شامل پارامترهای مناسب و درجه (میزان) انطباق باید در گزارش آزمون مشخص گردد.

۲-۸ انتگرال‌گیری عددی مستقیم (روش منطقه‌ای)

با استفاده از قالب اختلاف مناسب، باید گرادیان‌های جبهه موج  $(\beta_x, \beta_y)_{ij}$  در موقعیت  $(i, j)$  تقریب زده شود. مناسب‌ترین قالب اختلاف بستگی به کاربرد خاص داشته و باید در گزارش آزمون ثبت گردد. برخی رویکردها در پیوست الف-۱ پیشنهاد شده است.

چنانچه مجموعه‌ای از شیب‌های جبهه موج با جبهه موج پایدار  $(\frac{\partial \beta_y}{\partial x} \neq \frac{\partial \beta_x}{\partial y})$  ناسازگار یافت شود، پس نمایش از طریق سطح واحد تنها در روش کمینه مربعات ممکن است.

رویکرد کمینه مربعات منجر به معادلات عمودی زیر می‌گردد:

$$B^T C^{-1} B \vec{W} - B^T C^{-1} \vec{\beta} = 0 \quad (14)$$

که در آن:

$\vec{w}$  بردار جبهه موج، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{w} = (w^1, \dots, w^{N \times M})^T$$

$\vec{\beta}$  بردار گرادیان جبهه موج  $2N \times M$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{\beta} = (\beta_x^1, \dots, \beta_x^{N \times M}, \beta_y^1, \dots, \beta_y^{N \times M})^T$$

$B$  ماتریسی هندسی (به پیوست الف-۲ مراجعه شود)؛

$C$  ماتریس کوواریانس نویز می‌باشند.

در نویز ناهمبسته،  $C$  یک ماتریس قطری می‌شود که بیانگر خطای آماری اندازه‌گیری  $\vec{\beta}$  است. مورد آخر از ریشه مربع معکوس توزیع شدت (انرژی) تخمین زده می‌شود.

اطلاعات گرادیان،  $w(x, y)$  را تنها با استثنای یک ثابت، تعیین می‌کند، بنابراین  $B^T C^{-1} B$  تکین شده و حل‌کننده‌های معادلات خطی استاندارد نمی‌توانند آن را مستقیماً حل کنند. استراتژی پیشنهاد شده برای حل معادله ۱۴، استفاده از تجزیه مقدار تکین ماتریس  $B$  است. ماتریس  $B$  تنها به هندسه آرایه وابسته بوده و از قالب‌های متفاوتی استفاده می‌کند، بنابراین برای شرایطی رضایت بخش باید تجزیه مقدار تکین تنها یک بار صورت گیرد، و بازسازی بعدی جبهه موج را می‌توان با بازدهی بیشتری انجام داد.

روش دیگر، استفاده از رویکرد تکرار ماتریس برای حل مستقیم بردار جبهه موج است. این روش نیاز به تجزیه مقدار تکین را حذف کرده و وزن‌دار کردن اندازه‌گیری‌ها با مقادیر درخشندگی تابش را تسهیل می‌کند.

### ۳-۸ بازسازی جبهه موج کیفیتی (مودال)

نمایش مودال، جبهه موج را با بسط چند جمله‌ای به شکل زیر توصیف می‌کند.

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^k a_k \times p_k(x, y) \quad (15)$$

که در آن:

$a_k$  ضرایب؛

$p_k$  توابع مبنا چند جمله‌ای هستند.

از مرسوم‌ترین مجموعه‌های مبنا، چند جمله‌ای زرنایک<sup>۱</sup> (به پیوست ب مراجعه شود) برای طرح‌های دایره‌ای حس‌گر و چندجمله‌ای لجندر<sup>۲</sup>، هرمیت<sup>۳</sup>، و یا تچبی شوف<sup>۴</sup> برای طرح‌های مستطیلی حس‌گر به کار می‌روند. مجموعه‌های مختلف برای هندسه‌های خاص سودمند هستند. توابع عضو باید بطور خطی مستقل بوده اما نباید لزوماً قائم باشند. مجموعه مبنای به کاررفته باید در گزارش آزمون مشخص شود.

گرادیان‌های محلی جبهه موج به صورت زیر تقریب زده می‌شوند:

$$\left. \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \right|_{ij} = \sum_{k=1}^k a_k \times \left. \frac{\partial p_x(x, y)}{\partial y} \right|_{ij} \quad \text{و} \quad \left. \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \right|_{ij} = \sum_{k=0}^k a_k \times \left. \frac{\partial p_x(x, y)}{\partial x} \right|_{ij} \quad (16)$$

ضرایب باید به وسیله رویکرد کمینه مربعات تعیین شود که منجر به معادلات نرمال زیر می‌شود:

$$B^T C^{-1} B \vec{a} - B^T C^{-1} \vec{\beta} = 0 \quad (17)$$

که در آن:

$$a = (a_1, \dots, a_k)^T \quad \text{و} \quad B \text{ به صورت داده شده در پیوست الف-۲}$$

در حل معادله ۱۷، اگر پدیده تحت نمونه‌گیری رخ دهد مسئله‌ای که می‌تواند مطرح گردد، یعنی آن که تعداد مدهای تصویر شده از داده‌ها فراتر از تعداد نقاط داده باشد. پس مدهای مرتبه بالاتر، ممکن است حل را دچار اغتشاش نموده و باعث بدنمایی جبهه موج گردد. در این موارد، تعداد نقاط داده بیشتری باید نمونه‌گیری شود یا اینکه تعداد و شکل چند جمله‌ای به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

### ۹ نمایش جبهه موج

انحراف و حد بالایی میانگین باید از جبهه موج بازسازی شده  $w(x, y)$  کسر شود تا جبهه موج تصحیح شده  $w_c(x, y)$  حاصل شود (به قسمت اول این استاندارد بند ۳-۴-۲ مراجعه شود). جبهه موج تصحیح شده یا توزیع فاز مرتبط  $\varphi_c(x, y)$  باید در گزارش آزمون به صورت جدول داده، نمونه‌برداری، توزیع سه بعدی، رسم کانتور یا نمایش طول موج نشان داده شود (به شکل ۴ مراجعه شود).

چنانچه قابلیت تمرکز پرتو لیزر تحت آزمون از اهمیت برخوردار باشد، سطح تقریب کروی  $S(x, y)$  (به بند ۳-۴-۳ قسمت اول این استاندارد مراجعه شود) باید از  $w(x, y)$  کسر شود تا تابع انحراف جبهه موج  $w_{AF}(x, y)$  نمایش داده شود. (به شکل پنج مراجعه شود)

<sup>1</sup> - Zernike

<sup>2</sup> - Legendre

<sup>3</sup> - Hermite

<sup>4</sup> - Tchebyshev

## ۱۰ عدم اطمینان

### ۱-۱۰ کلیات

ملاحظات کلی در مورد منابع، الزامات تخمین، و مستند سازی عدم اطمینان مربوط به اندازه‌گیری جبهه موج در قسمت اول این استاندارد آمده است در بند های ۱۰-۲ تا ۱۰-۵ تنها آن منابعی از عدم اطمینان در نظر گرفته شده که در ارتباط با حس‌گرهای شاک- هارتمن باشند.

### ۲-۱۰ خطاهای آماری اندازه‌گیری

خطاهای آماری اندازه‌گیری به طور عمده شامل نوسانات منبع کوتاه مدت و نویز آشکارساز است. واریانس جبهه موج باید بواسطه انتشار خطای استاندارد از توزیع شدت (انرژی) به کار رفته برای ارزیابی جبهه موج محاسبه شود. نوسانات آماری ممکن است با افزایش بازه‌های نمونه‌برداری یا بوسیله میانگین‌گیری تعدادی از اندازه‌گیری‌ها کاهش یابد، به شرط آنکه پرتو افکنی لیزری را بتوان به صورت ثابت در نظر گرفت. دو عامل عمده سهمیم در عدم اطمینان آماری وجود دارند:

الف) نویز یا اثرات صرفاً تخمینی که ممکن است برای زیر روزه معین روی هم رفته به صفر می‌رسد.

ب) با پاس یا اثرات سیستماتیکی که باعث خروجی اشتباه روزه معین می‌شود.

مورد اول (الف) مربوط به دقت اندازه‌گیری است در حالی که مورد دوم (ب) مربوط به درستی است. این دو عامل می‌تواند برای حس‌گرهای شاک- هارتمن (هارتمن) بواسطه تعداد محدود اجراء آشکارساز به کاررفته برای اندازه‌گیری موقعیت نقاط، کاملاً متفاوت باشد.

قابلیت تکرار اندازه‌گیری،  $w_{r,rms}$  باید مطابق با بند ۳-۶ و به صورت میانگین اختلاف  $r.m.s$  بین اندازه‌گیری مجزا و میانگین همان جبهه موج تعیین گردد. بازه زمانی  $\Delta t$  بین این اندازه‌گیری‌ها باید به طریقی انتخاب شود تا از خطاهای بلند مدت حس‌گر، منبع و محیط بتوان با اطمینان صرف نظر کرد. تعداد نمونه‌های گرفته شده باید کمینه ۱۰ باشد.

برای اندازه‌گیری قابلیت تکرار جبهه موج از جبهه موج کروی یا سطحی استفاده کنید.

دقت اندازه‌گیری جبهه موج  $w_{a,rms}$  باید مطابق بند ۳-۷ و به عنوان میانگین اختلاف  $r.m.s$  بین جبهه موج مرجع  $w_r$  و جبهه موج با انحراف تصحیح شده  $w_{tc,n}$  پس از اعمال مقدار معینی انحراف  $\vartheta_n$  به جبهه موج مرجع تعیین گردد. بازه زمانی  $\Delta t$  بین این اندازه‌گیری‌ها باید به طریقی انتخاب شود که از خطاهای بلند مدت حس‌گر، منبع و محیط زیست بتوان با اطمینان صرف نظر کرد. تعداد نمونه‌های گرفته شده باید کمینه ۱۰ عدد در دو راستا بوده، و با سیستم مرجع آشکارساز هم محور باشد، هم‌چنین انحراف آن باید به صورت تعریف شده در بند ۳-۵ بین  $\beta_{max}$  و  $-\beta_{max}$  قرار گیرد.

صورت پیشنهاد شده برای اندازه‌گیری  $w_{a,rms}$  شامل جبهه موج کروی تابانده شده از حد بالای فیبر یکنواخت می‌باشد که در مرحله انتقال  $x-y$  در سطح کانونی جلویی عدسی به شدت تصحیح شده قرار می‌گیرد. سپس انحراف  $\vartheta_n$  موج سطحی پشت عدسی به میزان انتقال فیبر در جهت  $x$  و طول کانونی

عدسی  $f$  بوسیله رابطه  $\vartheta_n = \frac{x}{f}$  مرتبط می‌گردد.

### ۱۰-۳ اثرات محیطی

تغییرات در پارامترهای اندازه‌گیری شده می‌تواند با تغییر دما یا ارتعاش مکانیکی و نیز نورهای سرگردان یا محیطی ایجاد گردد. تغییرات دمایی باعث آهسته شدن انحرافات سیستماتیک، برای مثال خطاها می‌شوند، و باید با حس گر تکمیلی نظارت شود، و چنانچه ممکن باشد، درنتایج نهایی تصحیح شوند. خطاهای گرمایی باید با استفاده از زمان‌های مناسب برای گرم کردن منبع پرتو و حس گر کمینه شود. نورهای محیطی و سرگردان سیگنال زمینه را تقویت می‌کنند که باعث بروز خطاهای سیستماتیک در تخمین مرکز سطح حس‌گرشاک-هارتمن می‌شود. زمینه باید به دقت بررسی و از سیگنال اندازه‌گیری شده کم شود.

### ۱۰-۴ کمبودها در جمع‌آوری داده

نسبت سیگنال به نویز و عدم اطمینان در اندازه‌گیری‌ها، مستقیماً به تفکیک‌پذیری فضایی حس‌گر شاک-هارتمن قطر کوچک زیر روزنه، فرآیند کمی‌سازی، و غیرخطی بودن تقویت سیگنال بستگی دارد. خطای زمان‌بندی الکترونیکی مربوط به حس‌گرهای CCD در خطای جمع‌شونده سهمیم است زیرا می‌تواند منجر به عدم اطمینان در موقعیت پیکسل گردد. از این اثر می‌توان با هم زمان کردن زمان سنج پیکسل CCD و گزینه قاب، یا بوسیله یک دوربین CCD دیجیتال جلوگیری کرد.

**یادآوری ۱-** خطای کمی‌سازی، حتی برای ADC هشت بیتی و در صورت وجود دامنه دینامیکی کامل، سهم کوچکی در خطای جمع‌شونده دارد در صورت وجود زمینه قابل ملاحظه یا قطع نامطلوب دنباله پرتو، استفاده از ADC ۱۰ بیتی یا حتی ۱۲ بیتی ممکن است لازم شود.

**یادآوری ۲-** حس‌گرهای جبهه موج هارتمن می‌توانند بواسطه تغییر شدت در ناحیه‌ای از سوراخ واحد از آرایه تقسیم‌کننده باعث بروز عدم اطمینان در تعیین گرادیان جبهه موج شوند. این اثر در اغلب کاربردهای معمول کوچک است برای مثال، چنانچه شدت در سوراخی با قطر  $100 \mu m$  و در فاصله  $L_H = 10mm$  از آشکارساز به میزان ۱ درصد تغییر کند، خطای گرادیان جبهه موج تنها از مرتبه  $10 \mu rad$  تخمین زده می‌شود.

**یادآوری ۳-** تعداد محدود اجزاء آشکارساز که با نقاط پوشیده شده‌اند اغلب منبع غالب عدم اطمینان است.

### ۱۰-۵ عدم اطمینان بواسطه عدم هم‌محوری هندسی

سهم اثرات عدم هم‌محوری در عدم اطمینان جمع‌شونده، بویژه برای حس‌گرهای شاک-هارتمن به صورت شوک مکانیکی، ناپایا پیداری گرمایی، یا کاهش ماده می‌باشد. در صورت صحیح قرار نگرفتن حس‌گرشاک-هارتمن در سطح کانونی آرایه عدسی کوچک، ارزیابی نادرستی از موقعیت مراکز سطح به دست خواهد آمد. یک جابه‌جایی محوری باعث بروز مقدار مثبت یا منفی اضافی تری از عدم تمرکز می‌شود. جابه‌جایی عرضی آشکارساز یا آرایه فقط انحرافی مصنوعی از کل پرتو ایجاد می‌کند. هر دوی این عوامل هیچ اثری بر تابع انحراف جبهه موج ندارد.

خطاهای سیستماتیک بسیار شدید ممکن است برای هر دوران اضافی بین آشکارساز و آرایه رخ دهد. خطای جبهه موج حاصله قابل انتگرال‌گیری نیست و به الگوریتم عددی بازسازی جبهه موج و نیز میزان دوران

بستگی دارد. چنانچه هرگونه شکی در مورد بروز عدم هم‌محوری مکانیکی ایجاد شود باید سریعاً کالیبراسیون مجدد انجام شود.  
انحراف پرتو مرجع از جبهه موج مدنظر، مستقیماً در افزایش عدم اطمینان اندازه‌گیری سهیم است.

## ۱۱ گزارش آزمون

گزارش آزمون باید حاوی اطلاعات زیر باشد :

الف) اطلاعات کلی:

(۱) ارجاع به این قسمت از استاندارد

(۲) تاریخ آزمون

(۳) نام و نشانی سازمانی که آزمون را انجام داده است.

(۴) نام شخصی که آزمون را انجام داده است.

ب) اطلاعات مربوط به لیزر آزمون شده:

(۱) نوع لیزر

(۲) سازنده

(۳) معرفی مدل سازنده

(۴) شماره سریال

پ) شرایط آزمون:

(۱) طول موج‌های لیزر که در آن‌ها آزمون انجام شده است.

(۲) دما، برحسب کلومین ( سیال خنک کننده لیزر دیود تنها برای لیزر دیودها )

(۳) حالت عملکرد ( موج پیوسته (cw) یا پالسی )

(۴) تنظیمات پارامتری لیزر

(- توان یا انرژی خروجی

(- جریان یا انرژی ورودی

(- انرژی پالسی

(- مدت زمان پالس

(- نرخ تکرار پالس

(۵) ساختار مود

(۶) پولاریزاسیون

(۷) شرایط محیط

ت) اطلاعات مربوط به آزمون و ارزیابی:

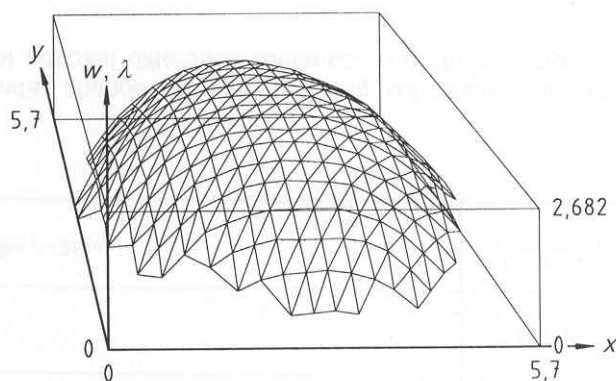
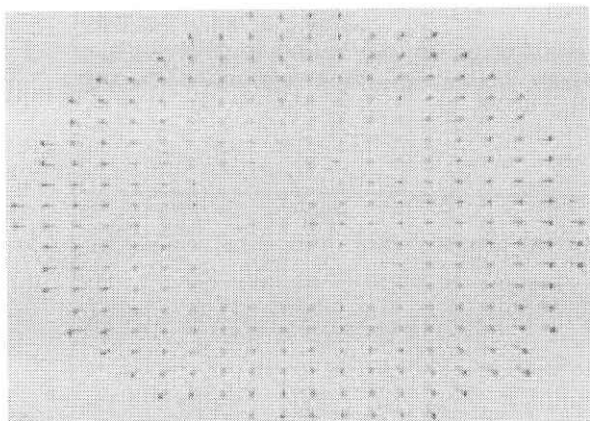
(۱) روش آزمون به کار رفته:

- هارتمن

- شاک-هارتمن

- (۲) سیستم آشکارساز و نمونه‌گیری
- سازنده
  - هویت مدل
  - اندازه آرایه سوراخ یا عدسی کوچک
  - هندسه آرایه
  - فاصله آرایه تا آشکارساز  $L_H$
  - نوع هارتمن
  - فاصله سوراخ  $d_x, d_y$
  - قطر سوراخ  $d_p$
  - نوع شاک-هارتمن
  - فاصله عدسی  $d_x, d_y$
  - طول کانونی  $f$
- (۳) نوع آشکارساز حساس به موقعیت
- فاصله پیکسلی
  - اندازه پیکسلی
  - دامنه دینامیکی
  - زمان پاسخ‌دهی
  - تأخیردهی در شروع نمونه‌گیری ( برای لیزرهای پالسی)
  - بازه اندازه‌گیری زمان ( برای لیزرهای پالسی )
- (۴) مکان سطح اندازه‌گیری
- (۵) تجهیزات اپتیکی شکل‌دهنده پرتو و روش تضعیف :
- نوع تضعیف
  - نوع شکننده پرتو
  - نوع اجزاء تمرکزکننده
- (۶) دیگر قطعات و وسایل اپتیکی استفاده شده برای آزمون ( قطعی کننده ، تک فام ساز ، و غیره )
- (۷) کالیبراسیون آشکارساز شاک - هارتمن
- نوع و طول موج و پرتو تنظیم شده مرجع
  - تخمین تغییر شکل  $r.m.s$  جبهه موج پرتو مرجع
  - تاریخ کالیبراسیون
- (۸) کسر زمینه
- نوع روش کسرکردن
  - مقدار انتخاب شده  $(H_{\eta T})E_{\eta T}$
- (۹) روش عددی به کار رفته برای بازسازی جبهه موج ( منطقه‌ای یا مودال )

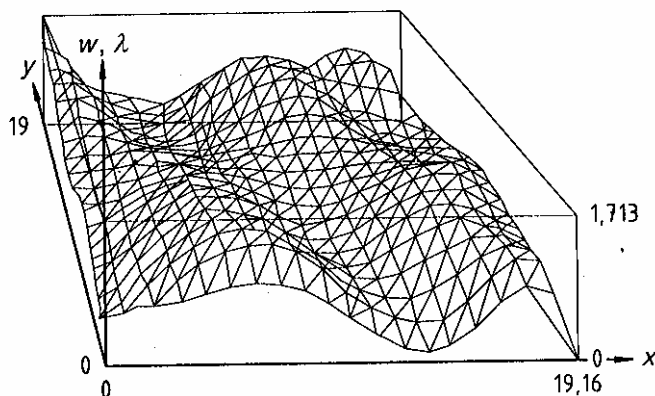
- روش منطقه‌ای : قالب اختلاف استفاده شده برای انتگرال گیری عددی از  $w(x, y)$
- روش مودال :
- مجموعه مبنا (برای مثال، چندجمله‌ای‌های Legendre, Hermite Zernike یا Tchebyshev)
- میزان (درجه) انطباق
- ث) نتایج آزمون
- (۱) داده‌های خام : ارائه گرادیان‌های اندازه‌گیری شده جبهه موج  $(\beta_x, \beta_y)_{ij}$  بوسیله نمونه‌برداری (اختیاری ، به شکل الف ۴ مراجعه شود).
- (۲) جبهه موج : جبهه موج ارزیابی شده پس از تصحیح  $w_c(x, y)$  یا تابع انحراف جبهه موج  $w_{AF}(x, y)$  باید به یکی از روش‌های زیر به نمایش درآید:
  - جدول داده
  - توزیع سه بعدی ( مثال در شکل ۴ و ۵ را ببینید )
  - رسم شمارنده
  - اینترفروگرام
- (۳) کمیت‌های ارزیابی شده مربوط به جبهه موج :
  - عدم تمرکز یا شعاع بهترین کره  $R_{ss}$
  - استیگماتیسم جبهه موج  $w_{pv}$
  - تغییر شکل وزن دار  $w_{rms}, r.m.s$
  - ضرایب چند جمله‌ای ( بازسازی مودال جبهه موج )
- (۴) عدم اطمینان آماری جبهه موج  $w_{s,rms}$



(الف) گرادیان‌های اندازه‌گیری شده جبهه موج (ب) نمایش سه بعدی

شکل ۴- مثالی برای نمودار برداری گرادیان‌های اندازه‌گیری شده جبهه موج و نمایش سه بعدی جبهه موج بازسازی شده پس از تصحیح  $w_c(x, y)$  برای یک لیزر دیود  $650\text{nm}$  که از اندازه‌گیری شاک - هارتمن به دست آمده است.

ابعاد بر حسب میلیمتر



بر روی محور عمودی استیگماتیسم جبهه موج از قله تا دره،  $w_{pv}$  مشخص شده است.

شکل ۵- مثالی برای نمایش سه بعدی تابع انحراف جبهه موج  $w_{AF}(x, y)$  برای لیزر اکسایمر کوادریلیوم‌تانیه ( $248\text{nm}$ ) که از اندازه‌گیری هارتمن بدست آمده است.



## پیوست الف

### (اطلاعاتی)

### بازسازی جبهه موج

#### الف-۱ قالب‌های اختلاف

از داده‌های گرادیان اندازه‌گیری شده  $\beta_{x,y}^{ij}$  می‌توان جبهه موج را به وسیله انتگرال‌گیری عددی بر روی شبکه گسسته نقطه‌ای، بازسازی کرد. برای ساده‌سازی در نوشتن معادلات، تقسیم‌بندی ناحیه آشکارساز به  $N \times M$  زیر روزه مستطیلی با اندیس  $(ij)$  در نظر گرفته می‌شود. با این حال در صورتی که قید نگردد، دیدگاه‌های ارائه شده در زیر، بر هندسه‌های پیچیده‌تر آشکارساز نیز اعمال می‌گردد.

اولین گام، به کارگیری قالب اختلاف مناسب به منظور دستیابی به تقریبی از  $\beta_{x,y}^{ij}$  می‌باشد

$$\beta_x^{ij} = \frac{\partial w}{\partial x_{ij}} \approx \frac{1}{d_x} \sum_{k=-n}^{k=m} a_{i \times M+J}^{i \times M+J+K} w^{kj} \quad \text{و} \quad \beta_y^{ij} = \frac{\partial w}{\partial x_{ij}} \approx \frac{1}{d_y} \sum_{k=-n}^{k=m} b_{i \times M+J}^{i \times M+J+K} w^{ik} \quad (\text{الف-۱})$$

در اینجا ممکن است، مرتبه  $n+m$  تقریب و نیز فواصل زیر روزه شاک - هارتمن  $d_x$  و  $d_y$  و نقاط واقعاً درگیر  $w^{kj}$ ،  $w^{ik}$  از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر کنند، علاوه بر این، امکان تعریف  $w$  و  $\beta$  بر روی زیرشبکه‌های متفاوت وجود دارد. برخی فرمول‌های اختلافی سودمند برای آشکار سازهایی با هندسه مستطیلی در جدول الف-۱ آورده شده است.

#### جدول الف - قالب‌های اختلافی انتخاب شده برای بازسازی جبهه موج

خطا	تقریب	گرادیان
$-\frac{1}{6}d_x^2 w'''(x_o)$	$\frac{1}{2d_x}[w(x_o+d_x)-w(x_o-d_x)] = \frac{1}{2d_x}(w_1-w_{-1})$	$w'(x_o) = \beta_o \approx$
$\frac{1}{30}d_x^4 w^{(5)}(x_o)$	$\frac{1}{12d_x}(w_2-8w_1+8w_{-1}-w_{-2})$	$w'(x_o) = \beta_o^x \approx$
$\frac{1}{72}d_x^6 w^{(7)}(x_o)$	$\frac{1}{60d_x}(w_3-9w_2+45w_1-45w_{-1}+9w_{-2}-w_{-3})$	$w'(x_o) = \beta_o^x \approx$
$\frac{1}{3}d_x^2 w'''(x_o)$	$\frac{1}{2d_x}(-w_2+4w_1-3w_o)$	$w'(x_o) = \beta_o^x \approx$
$-\frac{1}{2}d_x^2 w'''(x_o)$	$\frac{1}{d_x}(w_1-w_o)$	$w'(x_o) = \beta_o^x \approx$
$-\frac{1}{60}d_x^4 w^{(5)}(x_o)$	$\frac{1}{12d_x}(-3w_4+16w_3-36w_2+48w_1-25w_o)$	$w'(x_o) = \beta_o^x \approx$

قالب‌های نامتقارن با تغییر علامت (شامل زیرنویس‌ها) همچنان معتبر باقی می‌مانند. هندسه‌های غیر مستطیلی آشکارساز، نیازمند به کارگیری قالب‌های اختلافی تنظیم شده هستند قالب به کار گرفته شده باید در گزارش آزمون مشخص شود.

## الف-۲ معادلات عمودی

از آن جا که اندازه گیری گرادیان جبهه موج تحت تاثیر نویز و دیگر منابع عدم اطمینان قرار می گیرد، بازسازی جبهه موج را تنها می توان با روش های کمینه مربعات انجام داد که منجر به معادله زیر می شود.

$$x^2 = \frac{1}{\beta_{rms,ij}^2} \sum_{i,j=0}^{N,M} \left[ \left( \beta_{ij}^x - \frac{\sum_{k=-n}^{k=m} a_{i \times M + j}^{i \times M + j + k} w^{kj}}{d_x} \right)^2 + \left( \beta_{ij}^y - \frac{\sum_{k=-n}^{k=m} b_{i \times M + j}^{i \times M + j + k} w^{ik}}{d_y} \right)^2 \right] = \min \quad (\text{الف-۲})$$

برای بازسازی مستقیم (به بند ۸-۱ مراجعه شود) شرط لازم برای حل معادله (الف-۲) به صورت زیر است:

$$\bar{\nabla}_w(x^2) - 0 \quad (\text{الف-۳})$$

که به نوبه خود منجر به معادلات عمودی می گردد:

$$B^T B \cdot \bar{w} - B^T \bar{\beta} = 0 \quad (\text{الف-۴})$$

با سیستم  $2NM \times NM$  ماتریس  $B$  می شود:

$$B = N \times M \begin{pmatrix} a_1^1 \dots a_1^2 \dots \dots \dots a_1^{NM} \\ a_2^1 \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \\ \dots a_i^{i-n} \dots a_i^{ii} \dots \dots a_i^{i+m} \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots a_{NM}^{NM} \\ b_1^1 \dots \dots \dots b_1^{NM} \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \\ \dots b_i^{i-n} \dots b_i^{i-n} \dots \dots b_i^{i+m} \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots b_{NM}^{NM} \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۵})$$

با این حال اگر آمارهای جبهه موج معلوم باشد، بدون مزیتی بهترین تخمین  $w$  باید به صورت زیر محاسبه گردد:

$$B^T C^{-1} B \cdot \bar{w} - B^T C^{-1} \bar{\beta} = 0 \quad (\text{الف-۶})$$

که  $C$  ماتریس  $2NM \times 2NM$  کوواریانس جبهه موج است. در مورد همراهی هرگونه آشکارساز اضافی یا نویز محیط با ماتریس کوواریانس  $C_n$ ، تخمین وینر<sup>۱</sup> ممکن است حتی منجر به خطای مربع میانگین کوچکتری گردد.

$$\left[ B^T C^{-1} B + C_n^{-1} \right] \bar{w} - B^T C^{-1} \bar{\beta} = 0 \quad (\text{الف-۷})$$

<sup>۱</sup> - wiener

## پیوست ب

### (اطلاعاتی)

#### چند جمله‌ای‌های زرناک برای نمایش جبهه‌های موج

چند جمله‌ای‌های زرناک  $Z_{nl}(\rho, \varphi)$  مجموعه کاملاً قائمی را برای دایره واحد داخلی در سطح حقیقی شکل می‌دهند. بنابراین، این چند جمله‌ای‌ها برای مسائلی با روزه‌های دایره‌ای از اهمیت برخوردار بوده و به شکل مختلط زیر نوشته می‌شوند:

$$Z_{nl}(\rho, \varphi) = R_{nl}(\rho) \times e^{\pm il\varphi} \quad (ب-۱)$$

که در آن:

$n \geq l \geq 0$  و  $n-l$  زوج است، معادله (ب-۱) را می‌توان با معرفی توابع زوج ( $e$ ) و فرد ( $o$ ) از تابع  $Z^{e,o}$ ، برای هر جفت  $(n, l)$  به شکلی حقیقی نوشت:

$$Z_{nl}^{e,o}(\rho, \varphi) = R_{nl}(\rho) \times \begin{cases} \cos(l\varphi) \\ \sin(l\varphi) \end{cases} \quad (ب-۲)$$

بیان پیچیده چند جمله‌ای‌های شعاعی  $R_{nl}$  به صورت زیر است،

(ب-۳)

$$R_{nl}(\rho) = \sqrt{2(n+1)} \sum_{m=0}^{(n-l)/2} \frac{(-1)^m (n-m)!}{m! \times [0.5(n+l)-m]! \times [0.5(n-l)-m]!} \rho^{n-2m}$$

جدول ب-۱ بیان صریحی برای برخی چند جمله‌ای‌های اول زرناک ارائه می‌دهد.

جدول ب-۱ چند جمله‌ای‌های اول زرناک و نوع متناظر انحراف

نوع انحراف	عبارت	چند جمله‌ای
پیستون	1	$Z_{0,0}$ ( $Z_0$ )
حد بالا	$\rho \cos(\varphi)$	$Z_{1,1}^e$ ( $Z_1$ )
انحراف	$\rho \sin(\varphi)$	$Z_{1,1}^o$ ( $Z_2$ )
عدم تمرکز	$2\rho^2 - 1$	$Z_{2,0}$ ( $Z_3$ )
استیگماتیسم	$\rho^2 \cos(2\varphi)$	$Z_{2,2}^e$ ( $Z_4$ )
Coma	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos(\varphi)$	$Z_{3,1}^e$ ( $Z_6$ )
انحراف کروی	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	$Z_{4,0}$ ( $Z_8$ )

یاد آوری- اسامی داخل براکت، متناظر با ISO 10110-5 است

بنابراین نمایش زرناک جبهه موج  $w(\rho, \varphi)$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$w(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^n [a_{nl}^e \times \cos(l\varphi) + a_{nl}^o \times \sin(l\varphi)] \times R_{nl}(\rho) \quad (ب-۴)$$

---

---

**ICS: 31.260**

صفحه : ۲۱

---

---