

بررسی عددی کیفیت پرتویی لیزر قرص نازک با تشدیدگر ناپایدار

رضا بیرامی و مهدی شایگان منش

گروه فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

پست الکترونیکی: r_beirami@iustalumni.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۸/۲۶)

چکیده

در این مقاله کیفیت پرتویی لیزر قرص در تشدیدگر ناپایدار به صورت عددی و در دو حالت محاسبه شده است. در حالت اول اثر حرارتی در نظر گرفته نشده است و با استفاده از روابط باریکه تعمیم یافته کمیت‌های پهنای باریکه، و اگرایی زاویه‌ای، شعاع انحنای جبه موج و در نهایت ضریب کیفیت پرتوی لیزر قرص محاسبه شده است. این محاسبات نحوه وابستگی کیفیت پرتو به کمیت بزرگ‌نمایی را در لیزر قرص نشان می‌دهند. در حالت دوم اثرات حرارتی در نظر گرفته شده است. در این حالت نیز با استفاده از روابط تحلیلی توزیع دمای بلور و عوامل ایجاد کننده OPD، ضریب کیفیت پرتوی لیزر قرص نازک به صورت عددی محاسبه شده است. وقتی که اثر حرارتی در نظر گرفته می‌شود، محاسبات نشان می‌دهند کیفیت لیزر قرص نازک نسبت به حالتی که اثر حرارتی در نظر گرفته نشده بود، بدتر شده است و توان خروجی نیز به شدت کاهش یافته است.

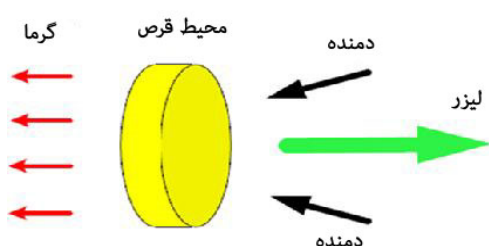
واژه‌های کلیدی: ضریب کیفیت پرتو، تشدیدگر ناپایدار، لیزر قرص نازک، روابط تعمیم یافته، OPD

۱. مقدمه

تقریب زده شود. به منظور انتخاب بهترین اپتیک برای یک کاربرد خاص لیزری، شناختن ویژگی‌های اصلی باریکه گاوسی مهم است اما متأسفانه باریکه خروجی لیزرها معمولاً به خوبی باریکه گاوسی نیست. برای معین نمودن میزان این اختلاف، ضریب کیفیت پرتوی M^2 برای توصیف انحراف باریکه لیزر از باریکه گاوسی تعریف شده است. ضریب کیفیت باریکه بر اساس استاندارد ISO 11146^۱ قابل محاسبه و اندازه‌گیری است [۲]. ویژگی‌های هندسی تشدیدگر، بر مشخصات باریکه لیزر اثرگذار است. برای تشدیدگرهای پایدار نظریه باریکه گاوسی

با مطرح شدن لیزر قرص نازک، این نوع لیزر به عنوان رقیبی جدی برای سایر لیزرهای پرتوان به حساب آمد. در استفاده از لیزر در صنعت، علاوه بر توان، کمیت بسیار مهم دیگری به نام کیفیت پرتو نیز اهمیت به سزایی دارد. این کمیت به عنوان یک ویژگی ذاتی باریکه لیزر به شمار می‌رود. لیزر قرص نازک علاوه بر داشتن توان بالا، به واسطه کیفیت پرتوی مناسب، جایگاه ویژه‌ای در میان لیزرهای حالت جامد دارد [۱]. به طور کلی انتشار باریکه لیزر با فرض این که باریکه لیزر یک توزیع شدت گاوسی ایده‌آل دارد می‌تواند مطابق نظریه مد TEM_{۰۰}

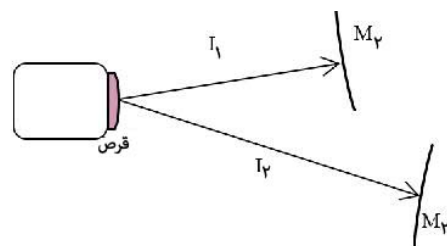
۱. International Organization for Standardization



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایی از فرآیند دمش و انتقال حرارت ایجاد شده در قرص [۶].

به ترتیب روی توزیع دما و نرخ گرم شدن محیط بهره ایجاد می‌کنند. به علاوه، بسته به ساختار محیط بهره و هندسه خنک‌کننده، حرارت ایجاد شده ممکن است از میان یک جهت مرجح در داخل محیط بهره جریان پیدا کند [۵]. فرآیند دمش و انتقال حرارت لیزر قرص در شکل ۲ به طور نمادین نشان داده شده است [۶].

با توجه به شکل، لیزرهای قرص نازک یک گرادیان دمایی در جهت محور قرص تجربه می‌کنند. این گرادیان دمایی توزیع‌های ناهمگنی از تنش و کشش ایجاد می‌کند. مقطع‌های ناهمگن دما، تنش و کشش باعث ایجاد چندین اثر مضر در عمل لیزر می‌شوند. این اثرات عبارت‌اند از: شکست، کشش شامل دوشکستی و عدسی حرارتی. مدیریت مناسب حرارت شامل اعوجاج‌های اپتیکی و مکانیکی به منظور دستیابی به توان خروجی بالای لیزر و کیفیت پرتوی خوب در لیزرهای قرص Yb:YAG حیاتی است. گرادیان دمایی، کشش حرارتی محوری (محدب^۴)، کشش حرارتی ناشی از دوشکستی^۵، اثر عدسی الکترونی و تغییر شکل قرص، عوامل اصلی OPD^۶ و عدسی حرارتی در لیزرهای قرص نازک هستند. هر یک از عوامل اصلی OPD، در نهایت منجر به تغییر ضریب شکست می‌شوند. در حقیقت این پدیده‌ها منجر به تغییر فاز در باریکه عبوری از میان بلور شده و OPD را ایجاد می‌کنند [۵]. به طور کلی



شکل ۱. تشدیدگر ناپایدار V شکل لیزر قرص نازک. در این شکل M_1 و M_2 آینه‌ها می‌باشند [۳].

(مد پایه و یا مدهای بالاتر) معتبر است. تشدیدگر ناپایدار که در شکل ۱ نشان داده شده است [۳] یک توزیع دامنه بسیار پیچیده‌تر از توزیع دامنه تشدیدگر پایدار تولید می‌کنند. از طرف دیگر در هر رفت و برگشت بخشی از انرژی تشدیدگر نشت می‌کند. در چنین مواردی لازم است در تعریف کمیت‌های مشخص‌کننده باریکه (پهنا، واگرایی، شعاع انحنای جبهه موج و ضریب کیفیت پرتو) تجدید نظر کنیم. برای مثال، تعریف پهنای باریکه تولید شده توسط ضریب $\frac{1}{e}$ شدت بیشینه تابش، دیگر ممکن است معتبر نباشد. به طور کلی دو روش مختلف برای رفع این مشکل وجود دارد. یکی از این دو روش می‌تواند در باریکه‌های همدوس کامل لیزر استفاده شود که این روش بر پایه آگاهی از طرح دامنه و بر اساس محاسبه ممان‌های^۱ توزیع شدت باریکه است. دومین روش می‌تواند در باریکه همدوس جزئی لیزر استفاده شود.

این روش نیز بر پایه ویژگی‌های چگالی مقطع طیفی^۲ و توزیع ویگنر^۳ است. در این مقاله از روش محاسبه ممان‌های توزیع شدت باریکه استفاده شده است و به علت حجم زیاد محاسبات، برای راحتی محاسبات در یک بعد انجام شده است [۴]. در لیزرهای حالت جامد بخشی از انرژی دمش به حرارت تبدیل می‌شود که به عنوان منبع گرمای داخل ماده لیزر عمل می‌کند. وابستگی فضایی و زمانی منبع حرارت اثرات مهمی را

۴. Bulging

۵. Birefringence

۶. Optical path difference

۱. Moment

۲. Cross-spectral density

۳. Wigner distribution

شکل قرص نازک را حساب کرد. در این مدل تحلیلی نیز همانند مدل تحلیلی ارائه شده توسط گوانگ ژی زو برای محاسبه OPD کل فرمولی ارائه شده است با این تفاوت که علاوه بر گرادیان دمایی، فشار، کشش، تغییر شکل قرص بلوری نازک، عامل دیگری به نام اثر عدسی الکترونی نیز در نظر گرفته شده است. از دیگر کارهای انجام شده در این حوزه، بررسی مقیاس پذیری توان لیزر قرص نازک در رژیم کیلووات و در مد اصلی است که با در نظر گرفتن اثرات حرارتی و با تشدیدگر پایدار توسط منده^۵ و همکارانش به صورت عددی بررسی شده است [۹]. در این مقاله با استفاده از روابط تحلیلی، OPD قرص ناشی از اثرات حرارتی محاسبه شده و سپس با استفاده از روش‌های عددی تأثیر گرم شدن قرص بر مد لیزر، کیفیت باریکه و توان خروجی لیزر برای تشدیدگر ناپایدار محاسبه شده است.

۲. نظریه محاسبات

به طور کلی محاسبات در دو بخش انجام می‌شود. در بخش اول اثرات حرارتی در نظر گرفته نشده است اما در بخش دوم محاسبات، اثرات حرارتی لحاظ شده است.

۱.۲. بدون در نظر گرفتن اثرات حرارتی

در این بخش اثرات حرارتی در نظر گرفته نشده است و مد عرضی تشدیدگر با استفاده از حل تکراری انتگرال کولینز و به روش فاکس ولی محاسبه شده است [۱۰]. رابطه انتگرال کولینز برای یک رفت و برگشت به صورت زیر می‌باشد:

$$E_2(x_2, y_2) = \frac{-ik \exp(-ikL)}{\sqrt{\pi B}} \iint E_1(x_1, y_1) \exp \left\{ \frac{-ik}{\sqrt{\pi B}} [A(x_1^2 + y_1^2) - 2(x_1 x_2 + y_1 y_2) + D(x_2^2 + y_2^2)] \right\} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

در این رابطه A ، B و D عناصر ماتریس $ABCD$ تشدیدگر هستند و E_1 نیز میدان اولیه و تخت می‌باشد [۱۱]. بعد از این

ضریب انتشار باریکه به کمیت‌های واگرایی، پهنای باریکه و شعاع انحنای جبهه موج وابسته است و برای باریکه گاوسی مقدار ضریب انتشار باریکه برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. خواص آلد^۱ انتشار و انتقال باریکه گاوسی را بررسی کرده است [۳] و با استفاده از مفاهیم کمیت‌های پهنای، واگرایی باریکه، شعاع انحنای جبهه موج باریکه گاوسی و همچنین روابط تعمیم‌یافته گردآوری کرده است. با استفاده از روابط تعمیم یافته معرفی شده می‌توان هر یک از کمیت‌های پهنای، واگرایی باریکه، شعاع انحنای جبهه موج و ضریب کیفیت پرتو را محاسبه نمود. در این مقاله از روابط تعمیم یافته برای محاسبه ضریب کیفیت پرتو استفاده شده است. در حالتی که اثرات حرارتی در نظر گرفته نمی‌شود اعوجاجات حرارتی وجود نخواهد داشت. ولی وقتی که اثرات حرارتی و OPD ناشی از آن در لیزر قرص نظر گرفته می‌شود، این اثرات مانند یک عدسی حرارتی عمل می‌کنند و باید سهم اعوجاجات حرارتی نیز محاسبه شود. سپس با استفاده از روابط تعمیم یافته کیفیت پرتو لیزر قرص محاسبه شود. اثرات حرارتی و OPD یک قرص بلوری نازک با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی و روش عددی رایج FEA^۲ توسط گوانگ ژی زو^۳ و همکارانش بررسی شده است. بر پایه این مدل تحلیلی توزیع دما، فشار، کشش و OPD ناشی از گرادیان دمایی و تغییر شکل قرص بلوری نازک می‌تواند محاسبه شود. نتایج حاصل از این مقاله محاسبه OPD کل قرص بلوری نازک را نشان می‌دهد که شامل بخش کروی و غیر کروی می‌باشد و بخش غیر کروی علت اصلی کاهش کیفیت پرتو است [۷]. مدل تحلیلی دیگری نیز برای تقریب تحلیلی عدسی حرارتی و دمش از انتهای لیزر قرص نازک Yb:YAG وجود دارد که توسط جیان لی شانگ^۴ و همکارانش ارائه شده است [۸]. در این مدل علاوه بر فرمول کلی توزیع دمای بلور Yb:YAG، شعاع انحنای ایجاد شده در قرص و عدسی حرارتی شامل OPD نیز محاسبه شده است. از شعاع به دست آمده می‌توان OPD حاصل از تغییر

۱. Javier Alda

۲. Finite Element Analysis

۳. Guangzhi Zhu

۴. Jianli Shang

$$\frac{1}{R(E)} = \frac{i\lambda}{\pi \mathbf{w} \omega(E)} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx \times \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\partial E(x)}{\partial x} E^*(x) - E(x) \frac{\partial E^*(x)}{\partial x} \right\} \times (x - x(E)) dx \quad (7)$$

در نهایت ضریب کیفیت پرتو به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه است [۳]

$$M^2 = \frac{\pi \mathbf{w} \omega(E)}{\lambda} \sqrt{\frac{[\theta_0(\phi)]^2 - [\mathbf{w}(E)]^2}{[R(E)]^2}} \quad (8)$$

این کمیت برای باریکه گاوسی ایده‌آل طبق استاندارد ISO 11146 برابر یک و برای سایر باریکه‌ها مقدار M^2 بزرگ‌تر از یک به دست می‌آید.

۲.۲. با در نظر گرفتن اثرات حرارتی

وقتی که رابطه توزیع دمای بلور لیزر قرص موجود باشد، آنگاه می‌توان OPD حاصل از گرادیان دمایی، کشش حرارتی محوری (برآمدگی)، کشش حرارتی ناشی از دوشکستی، عدسی الکترونی و تغییر شکل وجه قرص با پوشش HR را محاسبه نمود. جمع سهم تک تک عوامل ذکر شده، OPD کل را تشکیل می‌دهند. OPD به دست آمده را می‌توان به صورت یک عامل فازی به میدان درحال نوسان تشدیدگر اضافه نمود. در نتیجه همانند قسمت اول محاسبات که اثرات حرارتی در نظر گرفته نشده بود، محاسبات این قسمت نیز با اضافه کردن عامل فاز خرابی جبهه موج انجام می‌شود. معادله انتقال حرارت بلور لیزر قرص در مختصات استوانه‌ای برای ۳ بعد می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۸]

$$\frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right) = -\frac{Q}{k} \text{circ}(r_0) \quad (9)$$

در این معادله تابع $\text{circ}(r_0)$ تابعی است که به ازای مقادیر r کوچکتر از شعاع دمش (r_0) یک و به ازای سایر r ها صفر می‌شود. Q چگالی تولید حرارت است و طبق رابطه (۱۰) با توان دمش جذب شده رابطه مستقیم دارد

$$Q = \frac{P_{abs}}{\pi r_0^2} \eta, \quad (10)$$

در این رابطه η بخشی از توان دمنده ایجاد شده است که در

که اعتبار محاسبات روابط باریکه تعمیم یافته به اثبات رسید، از مد عرضی به دست آمده از انتگرال کولینز به روش فاکس و لی و روابط باریکه تعمیم یافته برای محاسبه ضریب کیفیت پرتوی لیزر قرص استفاده شده است. وقتی که طرح دامنه میدان باریکه یک منبع لیزر در دسترس باشد، امکان تعریف پهنای باریکه توسط ممان توزیع شدت موجود به صورت رابطه (۲) وجود دارد [۳]:

$$\omega(E) = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 (x - x(E))^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx}} \quad (2)$$

در این رابطه مخرج کسر متناسب با توان کل باریکه است و $E(x)$ نیز مکان مرکز شدت باریکه است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E(x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 x dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx} \quad (3)$$

کمیت واگرایی تعمیم یافته نیز طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود، این کمیت (واگرایی باریکه) برای باریکه‌های گاوسی مفهوم گسترش باریکه در امتداد انتشار را دارد و به صورت تحلیلی توسط تبدیل فوریه توزیع دامنه توصیف می‌شود، یعنی واگرایی باریکه به عنوان طیف زاویه‌ای نیز در نظر گرفته می‌شود [۳].

$$\theta_0(\phi) = 2\lambda \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(\xi)|^2 (\xi - \xi(\phi))^2 d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(\xi)|^2 d\xi}} \quad (4)$$

در این رابطه $\phi(\xi)$ تبدیل فوریه $E(x)$ است و به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود، همچنین $\phi(\xi)$ نیز با رابطه (۶) داده می‌شود:

$$\phi(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) \exp(-i\pi \xi x) dx \quad (5)$$

$$\xi(\phi) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(\xi)|^2 \xi d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(\xi)|^2 d\xi} \quad (6)$$

کمیت دیگری که به عنوان مشخصه پرتو شناخته می‌شود، شعاع انحنا جبهه موج تعمیم یافته است که به صورت رابطه (۷) فرمول بندی می‌شود [۳]:

$$A_0 = -\frac{lQr_0^\gamma}{hr_1^\gamma}, \quad B_0 = \frac{lQr_0^\gamma}{hr_1^\gamma}, \quad C_0 = \frac{Qr_0^\gamma}{kr_1^\gamma}, \quad (14)$$

$$A_n = \frac{J_1\left(\frac{x_n^{(c)}}{r_1}\right) \times \left(h + k \frac{x_n^{(c)}}{r_1}\right) \times lQr_0}{\left(k\left(x_n^{(c)}\right)^\gamma \left(J_0\left(x_n^{(c)}\right)\right)^\gamma \times \left(h \cosh\left(\frac{x_n^{(c)}l}{r_1}\right) + k \frac{x_n^{(c)}}{r_1} \sinh\left(\frac{x_n^{(c)}l}{r_1}\right)\right)} \quad (15)$$

$$B_n = \frac{J_1\left(\frac{x_n^{(c)}}{r_1}\right) \times \left(h - k \frac{x_n^{(c)}}{r_1}\right) \times lQr_0}{\left(k\left(x_n^{(c)}\right)^\gamma \left(J_0\left(x_n^{(c)}\right)\right)^\gamma \times \left(h \cosh\left(\frac{x_n^{(c)}l}{r_1}\right) + k \frac{x_n^{(c)}}{r_1} \sinh\left(\frac{x_n^{(c)}l}{r_1}\right)\right)} \quad (16)$$

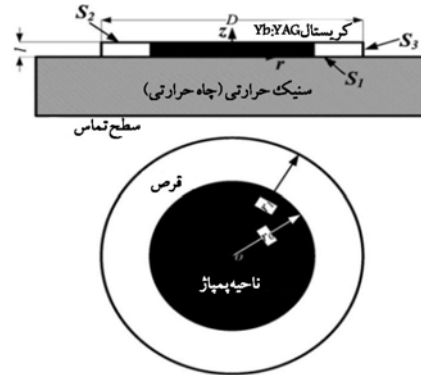
به خاطر این که ضخامت قرص بلوری خیلی کوچکتر از بعد عرضی است و انتشار لیزر در امتداد محور z است، در برخی محاسبات مربوط به مدل سازی توزیع دما از دمای میانگین استفاده می شود و به صورت زیر تعریف می شود [۸]

$$T(r)_{Av} = \langle T(r)_{YAG} \rangle = \frac{1}{l} \int_0^l T_{YAG}(r, z) dz, \quad (18)$$

در این رابطه l ضخامت قرص بلوری می باشد. با استفاده از رابطه توزیع دمای بلور، OPD حاصل از گرادیان دمایی توسط رابطه زیر انجام می شود و ضریب ۲ نیز به خاطر مسیر رفت و برگشت در بلور در نظر گرفته می شود [۸]

$$\Delta_t(r) = 2 \int_0^l [T(r, z) - T_c] \frac{\partial n}{\partial T} dz, \quad (19)$$

در این رابطه $\frac{\partial n}{\partial T}$ ضریب ترمو-اپتیکی است که شامل تغییر ضریب شکست ناشی از دما و اثرات فوتوالاستیک است، اما در معادله (۱۹) ضریب ترمو-اپتیکی تحت فشار ثابت یک بلور کاملاً سفت و سخت، ثابت تعریف می شود و به عنوان مشتق جزئی ضریب شکست نشان داده می شود. هر دو عامل تنش و کشش ایجاد شده در قرص، ضریب شکست را به وسیله اثر فوتوالاستیک^۱ تغییر می دهند و منجر به ایجاد OPD در قرص می شوند [۸]. کشش ناشی از تغییرات ضریب شکست در قرص بلوری با ملاحظه اثر فوتوالاستیک در بلور مکعبی همسانگرد و بر اساس نظریه نیومن-کوری بررسی می شود و از رابطه (۲۰) برای مسیرهای رفت و برگشت قابل محاسبه است [۸].



شکل ۳. نمایی از نمودار تبادل حرارتی برای مدل سازی لیزر قرص نازک [۸].

بلور به حرارت تبدیل می شود. مدل سازی تبادل حرارتی در لیزر قرص نازک که در شکل ۳ نشان داده شده است، با شرایط مرزی زیر انجام می شود

$$\frac{\partial T(r_1, z)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T(r, l)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T(r, 0)}{\partial z} = \frac{h}{k} [T(r, 0) - T_c] \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، T_c دمای مایع خنک کننده، $T(r, z)$ دما در محیط بهره، r_1 شعاع قرص، r_0 شعاع لکه دمش، h ضریب تبادل حرارتی مؤثر و k نیز رسانایی حرارتی Yb:YAG می باشد که به غلظت ایتربیوم ۳ ظرفیتی وابسته است. معادله انتقال حرارت (۹) یک معادله پواسون است و حل این معادله شامل جواب های عمومی و خصوصی است. جواب خصوصی از شرایط مرزی ذکر شده و معادله تولید حرارت به دست می آید. جواب عمومی نیز از بسط فوریه-بسل در معادله لاپلاس قابل محاسبه است. بنابراین دما در محیط بهره به صورت معادله (۱۲) به دست می آید [۸]

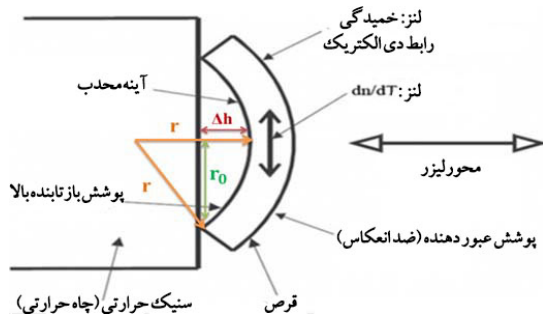
$$T(r, z) = T_c + A_0 + B_0 z + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \exp\left(\frac{x_n^{(c)}}{r_1} z\right) + B_n \exp\left(-\frac{x_n^{(c)}}{r_1} z\right) \right] \times \left(J_0\left(\frac{x_n^{(c)}}{r_1} r\right) \right) - \frac{1}{2} z^2 \left[C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n J_0\left(\frac{x_n^{(c)}}{r_1} r\right) \right], \quad (12)$$

در این رابطه $x_n^{(c)}$ ریشه های معادله بسل

$$J_1(x) = 0 \quad (13)$$

برای n های از ۱ تا بی نهایت است و ضرایب A ، B ، C مطابق زیر داده می شوند [۸]

۱. Photoelastic effect



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمادینی از اثرات عدسی حرارتی و تغییر شکل بلور دمش از انتهای لیزر قرص نازک. خم شدگی قرص برای وضوح اغراق آمیز کشیده شده است [۵].

صورت زیر توصیف شود [۸]:

$$\Delta n_e = \frac{\gamma \pi F_L^2}{n} \Delta p \frac{n_r}{f_b} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، n ضریب شکست بلور Δp اختلاف در قطبش پذیری حالت‌های پایه و برانگیخته ماده فعال است [۸] و F_L نیز عامل لورنتز است و به صورت رابطه (۲۳) بیان می‌شود

$$F_L = (n^2 + 2) / 3n_r \quad (23)$$

نیز توزیع چگالی جمعیت تراز بالایی لیزر است و توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود

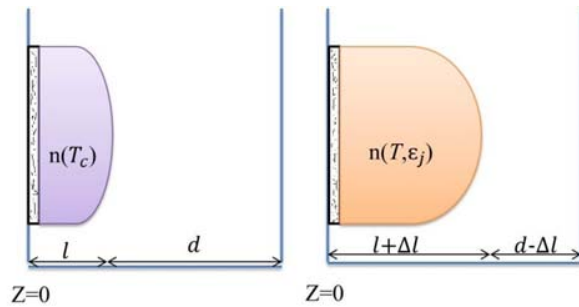
$$n_r = \frac{f_b}{f_a + f_b} \left\{ f_a n_{yb} - \frac{\ln[R(1-L)]}{\gamma l \sigma^{(e)}} \right\} \quad (24)$$

در این رابطه n_{yb} چگالی جمعیت کل، L اتلاف در هر رفت و برگشت، R بازتاب پذیری آینه خروجی، $\sigma^{(e)}$ سطح مقطع گسیل القایی، l ضخامت قرص، f_a و f_b نیز کسری از جمعیت‌های بولتزمن هستند [۸]. در نهایت OPD ایجاد شده توسط عدسی الکترونی مطابق رابطه (۲۵) به دست می‌آید که در این رابطه r شعاع دمش است [۸].

$$\Delta_e = 2 \Delta n_e l \text{ circ}(r) \quad (25)$$

تغییر شکل قرص بلوری نیز یکی از عوامل مهم OPD است. در اثر دمش، قرص دچار انبساط خواهد شد و خنک‌سازی قرص نیز منجر به انقباض وجه عقبی آن می‌شود در نتیجه وجه‌های قرص خمیده خواهند شد. تغییر شکل قرص به صورت نمادین در شکل ۵ نشان داده شده است [۵] و [۸].

برای محاسبه OPD حاصل تغییر شکل قرص به صورت



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمادینی از OPD ناشی از انبساط حرارتی. در این شکل، مستطیل‌های نقطه چین سینک حرارت (چاه حرارت) را نشان می‌دهند.

شکل ۵ فارسی شود

$$\Delta_s = 2 \int_0^l (\Delta n_r) \times (1 + \epsilon_z) dz + 2 \int_0^l (\Delta n_\theta) \times (1 + \epsilon_z) dz \quad (20)$$

بنابراین رابطه (۲۰) از جمع سهم OPD شعاعی و مماسی اثر فوتوالاستیک به دست می‌آید [۵]. سازوکار چگونگی تولید OPD توسط انبساط شعاعی نیز به این صورت است که تحت شرایط غیر انبساط مسیر اپتیکی $nL+d$ است، وقتی که تحت شرایط انبساط باشیم مسیر اپتیکی برای باریکه عبوری به صورت $L - n(L + \Delta L) + d$ (در اینجا L ضخامت قرص، n ضریب شکست بلور و d مسیر آزاد است). بنابراین گرایان دمایی در راستای محوری (موازی با محور لیزر) کشش ایجاد می‌کند، که به طور نمادین در شکل ۴ نشان داده شده است و از رابطه (۲۱) برای مسیرهای رفت و برگشت قابل محاسبه می‌باشد [۸]:

$$\Delta_{\text{exp}} = 2 \times (n-1) \times \Delta z = 2 \times (n-1) \times \int_0^l \epsilon_z(r) dz \quad (21)$$

عدسی الکترونی، عامل دیگر OPD است. بر اثر دمش لیزر قرص، جمعیت ترازهای حالت پایه و برانگیخته با قابلیت قطبش‌های مختلف Δp همواره تغییر می‌کنند و تغییرات جمعیت ترازها نیز منجر به تغییر پاسخ جمعی الکترون‌های ماده به امواج فرودی می‌شوند و چون این اثر بر روی ضریب شکست تأثیر دارد، بنابراین ضریب شکست نیز دچار تغییراتی می‌شود که این تغییرات باعث ایجاد اثرات عدسی الکترونی همراه با عدسی حرارتی می‌شوند. مؤلفه الکترونیک تغییر ضریب شکست برای بلور مکعب مانند YAG می‌تواند به

مثال برای دمش $2 \frac{\text{kw}}{\text{cm}^2}$ ، OPD که از روی شکل ۶ به دست می‌آید، تقریباً $1/3$ - میکرون است و مقدار OPD که از بدون در نظر گرفتن اثر نصب قرص روی حرارت به دست می‌آید، $4/4$ - میکرون می‌باشد. حال اگر مقدار OPD داده شده در شکل ۶ را بر مقدار به دست آمده از محاسبات تقسیم کنیم، ضریب β تقریباً $0/3$ به دست می‌آید. اگر این روش را برای دمش‌های دیگر انجام دهیم با میانگین‌گیری، ضریب β مقداری برابر $0/2$ خواهد داشت. بنابراین از رابطه (۲۷) سهم OPD ناشی از تغییر شکل قرص به دست می‌آید. سرانجام OPD کل، از مجموع موارد ذکر شده به دست می‌آید که به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]

$$\text{OPD}_{\Sigma} = \Delta_t + \Delta_{\text{exp}} + \Delta_s + \Delta_e + \Delta h, \quad (28)$$

اعوجاج فاز اپتیکی در قرص بلوری نازک به دو بخش کروی و غیرکروی به صورت زیر قابل جداسازی است:

$$\Phi(r) = \frac{\gamma\pi}{\lambda} \times \text{OPD}_{\Sigma}(r) = \frac{\gamma\pi r^2}{\lambda R_L} + \Delta\Phi(r), \quad (29)$$

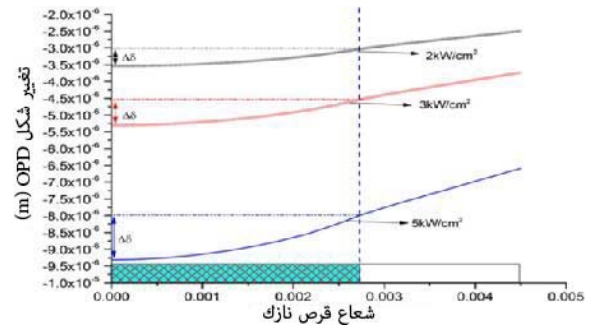
که R_L شعاع بخش کروی می‌باشد. بخش کروی اعوجاج فاز اپتیکی می‌تواند توسط طراحی مناسب تشدیدگر به آسانی جبران شود. در واقع سهم عمده خرابی کیفیت پرتو در قرص ناشی از بخش غیر کروی آن است [۸]. بنابراین از سهم بخش کروی اعوجاج فازی در محاسبات صرف نظر می‌کنیم. در نتیجه رابطه فاز کل به صورت زیر خواهد شد

$$\Phi_{\Sigma}(x) = \frac{\gamma\pi}{\lambda} \times \Delta_{\text{Aspherical}\Sigma}(x) \quad (30)$$

در این رابطه $\Delta_{\text{Aspherical}\Sigma}$ اعوجاج فازی بخش غیر کروی است. حال باید این اعوجاج فازی را در میدان عبوری از بلور لیزر در جریان محاسبات مربوط به مد لیزر (با استفاده از انتگرال کولینز و روش فاکس و لی) به صورت زیر ضرب کنیم

$$E = E(x) \times e^{i\Phi_{\Sigma}(x)} = E(x) \times e^{i \frac{\gamma\pi}{\lambda} \times \Delta_{\text{Aspherical}\Sigma}(x)} \quad (31)$$

با استفاده از میدان به دست آمده و روابط تعمیم‌یافته که در بخش ۱.۲ توضیح داده شد، کیفیت پرتوی کل لیزر قرص نازک قابل محاسبه خواهد بود.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) OPD ناشی از تغییر شکل قرص برای دمش‌های مختلف [۱۳].

تحلیلی ابتدا باید خمیدگی قرص بلوری محاسبه شود. انحنای یک بلور با استفاده از نظریه خمیدگی صفحه‌های نازک محاسبه می‌شود. این خمیدگی آینه در $r=0$ و $z=0$ به صورت زیر توصیف می‌شود

$$k_{\text{mirror}} = \frac{6\alpha(1+\nu)}{l^3} \int_0^l T(0, z) dz, \quad (26)$$

در این معادله α ضریب انبساط حرارتی، l ضخامت قرص و ν نسبت پواسون می‌باشد [۸، ۱۲]. حال برای محاسبه تغییر شکل قرص از رابطه (۲۶) و شکل ۵ استفاده می‌کنیم. با توجه به شکل ۵ می‌توان Δh که همان تغییر شکل است را محاسبه نمود. توجه شود که r داده شده در این شکل برابر با عکس k_{mirror} می‌باشد. با استفاده از قضیه فیثاغورث داریم

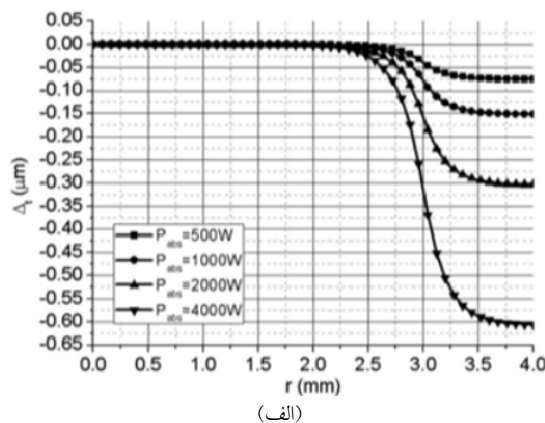
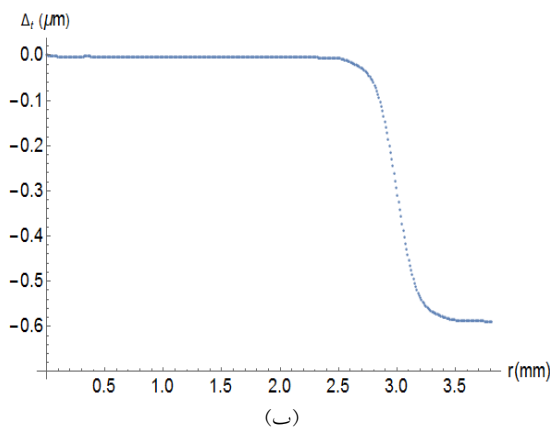
$$\Delta h = \beta \times \left(\frac{1}{k_{\text{mirror}}} - \sqrt{\left(\frac{1}{k_{\text{mirror}}} \right)^2 - r_0^2} \right) \quad (27)$$

که در این رابطه r_0 شعاع قرص می‌باشد. این محاسبه برای قرص آزاد انجام شده است اما در عمل قرص بر روی حرارتی نصب می‌شود و آزاد نمی‌باشد [۸]. بنابراین در رابطه (۲۷) ضریب تصحیح β وارد شده است. با ضرب این ضریب اثر حرارت هم در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۶ خمیدگی قرص غیر آزاد نشان داده شده است [۱۳].

ضریب β از مقایسه مقدار OPD ناشی از تغییر شکل قرص با در نظر گرفتن اثر حرارتی در شکل ۶، با نتایج به دست آمده از محاسبات مربوط به قرص آزاد، قابل محاسبه است. به عنوان

جدول ۱. مقادیر به دست آمده از روش تحلیلی و محاسبات عددی برای مد TEM_۲.

پهنای باریکه (ω) (متر)	واگرایی باریکه (θ) (رادیان)	شعاع انحنای جبهه موج (R) (متر)	کیفیت پرتوی (M^2)
۰٫۰۱۱۱۸	۰٫۰۰۰۱۴۷	∞	۵
۰٫۰۱۱۱۸۲۷	۰٫۰۰۰۱۴۷	∞	۵٫۰۰۰۸



شکل ۷. الف) نتایج OPD حاصل از گرادیان دمایی برای دمش‌های مختلف ارائه شده در مرجع [۸]، ب) نتیجه محاسبه OPD حاصل از گرادیان دمایی برای دمش ۴۰۰۰ وات.

از گرادیان دمایی است که از محاسبات انجام شده توسط رابطه (۱۹) و در دمش ۴۰۰۰ وات به دست آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل شده از محاسبات و نتایج ارائه شده در مرجع [۸]، خیلی به هم نزدیک هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت محاسبات انجام شده مربوط به این قسمت از OPD صحیح می‌باشد.

۲.۳. مقایسه OPD حاصل از انبساط حرارتی

شکل ۸ الف) OPD حاصل از انبساط حرارتی ارائه شده در مرجع [۸] است و شکل ۸ ب) نیز OPD حاصل از انبساط حرارتی است که با استفاده از رابطه (۲۱) و در دمش ۴۰۰۰ وات محاسبه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که نتیجه حاصل از محاسبات انجام شده توسط رابطه (۲۱) با نتیجه موجود در مقالات تطابق نسبتاً خوبی دارد.

یک تفاوت حدوداً ۲۰ درصدی بین نتایج نتایج حاصل از محاسبات این مقاله شکل ۸ ب) با نتایج مرجع [۸] شکل ۸ الف) وجود دارد. ما حدس می‌زنیم که این تفاوت ناشی از

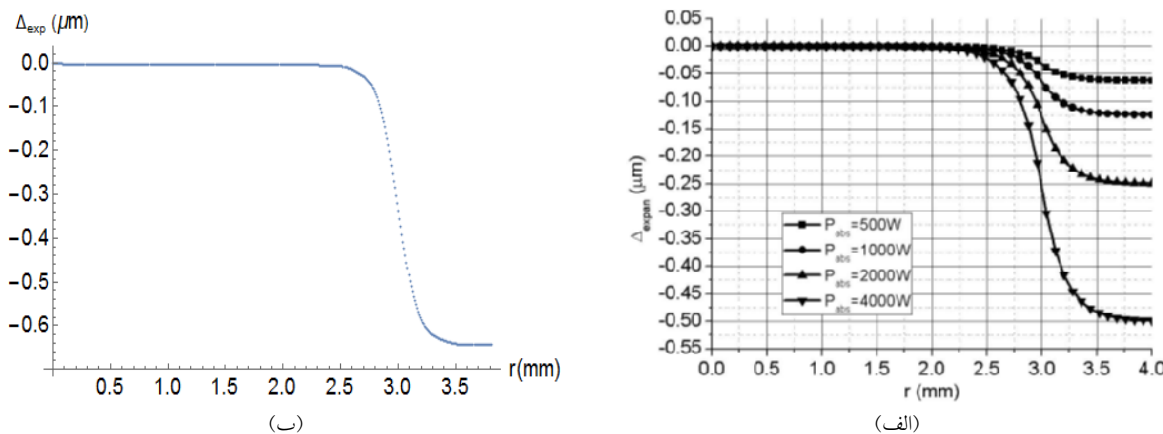
۳. بررسی اعتبار محاسبات

برای اطمینان از صحت محاسبات انجام شده بر اساس روابط مربوط به کمیت‌های باریکه تعمیم‌یافته، نتایج حاصل از محاسبات عددی برای مدهای هرمیت گاوسی به عنوان مثال برای مد TEM_۲ در جدول ۱-۱ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از محاسبات عددی که با استفاده از روابط تعمیم‌یافته به دست آمده است تطبیق خوبی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی دارد. این نتایج بیانگر صحت محاسبات انجام شده به روش عددی می‌باشند.

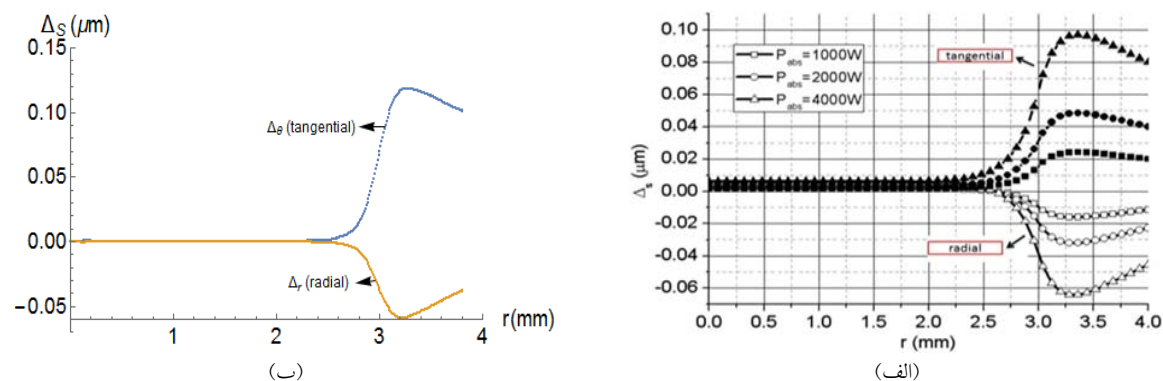
حال برای اطمینان از صحت و درستی نتایج مدل‌سازی حرارتی، نتایج حاصل از محاسبات انجام شده را با نتایج ارائه شده در مقالات، مقایسه می‌کنیم.

۱.۳. مقایسه OPD حاصل از گرادیان دمایی

شکل ۷ الف)، OPD حاصل از گرادیان دمایی ارائه شده در مرجع [۸] است که برای دمش‌های مختلف از جمله برای دمش ۴۰۰۰ وات، انجام شده است و شکل ۷ ب) نیز OPD حاصل



شکل ۸. (الف) نتایج OPD حاصل از انبساط حرارتی برای دمش‌های مختلف ارائه شده در مرجع [۸]، (ب) نتیجه محاسبه OPD حاصل از انبساط حرارتی برای دمش ۴۰۰۰ وات.



شکل ۹. (الف) نتایج OPD حاصل از کشش (اثر فوتوکشسان) برای دمش‌های مختلف ارائه شده در مرجع [۸]، (ب) نتیجه محاسبه OPD حاصل از کشش (اثر فوتوکشسان) برای دمش ۴۰۰۰ وات.

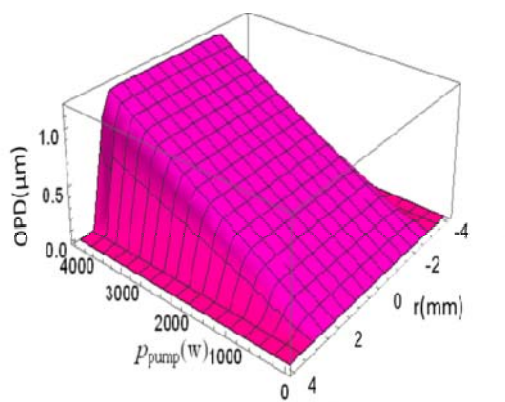
مقالات را با نتیجه موجود در مقالات مقایسه می‌کنیم. شکل‌های ۹ (الف) و (ب) به ترتیب بیانگر نتایج موجود در مرجع [۸] و محاسبات انجام شده با استفاده از رابطه (۲۰) می‌باشند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود محاسبات انجام شده در این مقاله بر اساس رابطه (۲۰)، نتیجه‌ای تقریباً برابر با نتیجه نمودار ۹ (الف) دارد. مقدار به دست آمده بر اساس محاسبات این مقاله برای $\Delta_0(\text{tangential})$ در دمش ۴۰۰۰ وات در شعاع ۳/۲۵ میلی‌متری کمتر از ۰/۱۲ میکرون است. که باز هم همان خطای حدود ۲۰٪ را دارد. لازم به توضیح است که در مقاله مرجع [۸] روابط تحلیلی مربوط به محاسبه $\Delta_0(\text{tangential})$ ارائه نشده است و ما برای محاسبه $\Delta_0(\text{tangential})$ از روابط مرجع [۷]

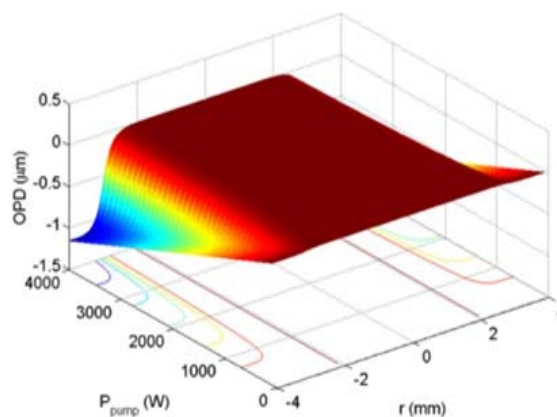
خطا و یا عدم دقتی در مقاله مرجع باشد و توضیح فیزیکی برای آن نداریم. تطبیقی که در مقایسه نتایج بعدی نظیر OPD کل وجود دارد اطمینان ما را از صحت محاسبات انجام شده بالا می‌برد. زیرا (Δ_{exp}) خود بخشی از OPD کل است. از طرف دیگر برای اطمینان از درستی محاسبات، کمیت‌های دیگری نیز محاسبه و با مراجع مقایسه شده اند که به علت حجم زیاد مطالب در مقاله ارائه نشده‌اند.

۳.۳. مقایسه OPD ناشی از اثر فوتوالاستیک

برای اطمینان از صحت و اعتبار روابط اثر فوتوالاستیک نیز نتیجه حاصل از محاسبات انجام شده با استفاده از روابط داده شده در



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. (الف) (رنگی در نسخه الکترونیکی) OPD کل ارائه شده برای دمش های مختلف در مرجع [۸]، (ب) OPD کل محاسبه شده برای دمش های مختلف.

اعتبار نتایج به دست آمده را نشان می دهد. در شکل ۱۰، تفاوت ظاهری دیده شده در شکل ها و مقادیر منفی OPD به خاطر انتخاب نوع مبدأ است. به این صورت که در شکل حاصل از محاسبات انجام شده در مقاله کمترین مقدار OPD به عنوان مبدأ رسم نمودار انتخاب شده است ولی در نمودار ارائه شده در مقاله مرجع [۸]، مبدأ را در بالاترین نقطه نمودار در نظر گرفته اند. نکته ای که باید به آن توجه شود این است که چون OPD اختلاف راه نوری است، مقدار نسبی اختلاف راه نوری اهمیت دارد نه مقدار مطلق آن. در واقع OPD ای که هر نقطه از قرص در مقایسه با یک نقطه اختیاری دیگر آن (مثلاً لبه قرص) احساس می کند در هر دو شکل یکسان است. لذا ممکن است شکل ها در نگاه اولیه متفاوت به نظر برسند اما با توجه به مفهوم OPD متوجه می شویم که نتایج یکسان هستند. نکته قابل توجه برای انجام صحیح محاسبات انتخاب محل مبدأ برای محاسبه OPD کل به هنگام جمع تک تک عوامل OPD است که در این مقاله در محاسبات، مبدأ یکسانی برای همه عوامل OPD در نظر گرفته شده است.

۴. نتایج

نتایج حاصل از محاسبات نیز در دو بخش، با در نظر گرفتن اثرات حرارتی و بدون در نظر گرفتن آن در ادامه آورده شده است.

استفاده نموده ایم. همچنین لازم به ذکر است که سهم این قسمت از OPD آنقدر ناچیز است که در محاسبات نهایی تأثیر زیادی نخواهد داشت.

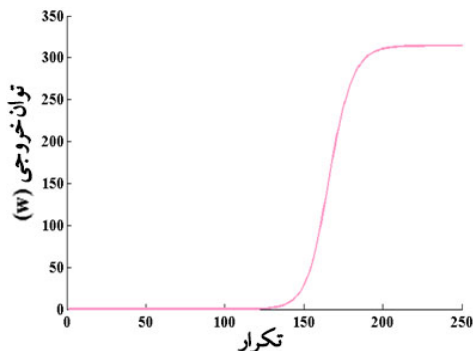
۳.۴. مقایسه OPD کل لیزر قرص نازک

سرانجام OPD کل حاصل شده برای لیزر قرص نازک را مقایسه می کنیم. در مرجع [۸] چون OPD کل بدون در نظر گرفتن سهم تغییر شکل قرص نوشته شده است، بنابراین در محاسبات انجام شده ابتدا برای مقایسه صحیح و قابل اعتماد از سهم تغییر شکل قرص چشم پوشی کرده ایم اما در محاسبات نهایی سهم تغییر شکل نیز در نظر گرفته شده است [۸]. شکل ۱۰ (الف) OPD کل لیزر قرص است که در دمش های مختلف مقادیر آن داده شده است.

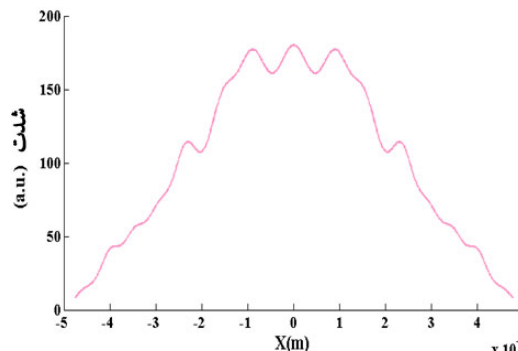
همان طور که ملاحظه می شود با افزایش دمش، مقدار OPD کل هم افزایش یافته است. شکل ۱۰ (ب) نیز OPD کل لیزر قرص را نشان می دهد که با استفاده از رابطه (۲۸) (در این رابطه از سهم تغییر شکل قرص صرف نظر شده است) محاسبه شده است. در این شکل هم دیده می شود OPD کل با افزایش دمش، زیاد می شود و رفتاری شبیه رفتار OPD کل شکل شکل ۱۰ (الف) دارد. علاوه بر این، از لحاظ مقداری هم تطبیق خوبی دارند. بنابراین مقایسه مقادیر و رفتار کلی OPD کل، صحت و

جدول ۲. کمیت‌های ورودی لازم برای محاسبات عددی.

M	b(m)	$(M)^{(L_r)}$	N_{eq}	کمیت‌ها مقادیر
۱٫۵-۲٫۵	۰٫۰۰۵	۰٫۵	۰٫۵	



شکل ۱۲. توان خروجی لیزر قرص با ضخامت ۴۰۰۰ میکرون و بزرگ‌نمایی $M=2$.



شکل ۱۱. مقطع شدت لیزر قرص با ضخامت ۴۰۰۰ میکرون و بزرگ‌نمایی $M=2$.

کمیت‌های واگرایی باریکه، شعاع انحنای جبهه موج، پهنا و کیفیت پرتوی لیزر قرص با ضخامت‌ها و بزرگ‌نمایی‌های ذکر شده به صورت شکل‌های زیر به دست آمده‌اند. شکل ۱۳ شعاع انحنای جبهه موج و واگرایی باریکه محاسبه شده را بر حسب بزرگ‌نمایی‌های مختلف برای لیزر قرص نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش بزرگ‌نمایی، شعاع انحنای جبهه موج روند کلی افزایشی دارد و واگرایی پرتو نیز کاهش می‌یابد.

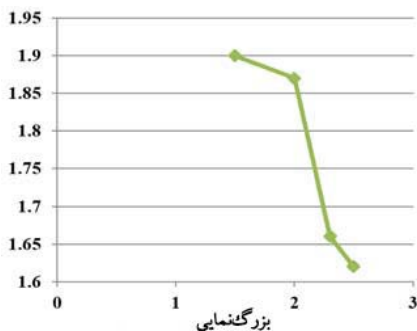
شکل (۱۴) کیفیت پرتوی لیزر قرص در بزرگ‌نمایی‌های مختلف نشان می‌دهد که به صورت عددی و برای لیزر قرص در شرایط بدون تأثیر اثرات حرارتی محاسبه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش بزرگ‌نمایی تشدیدگر، ضریب کیفیت پرتو بهتر می‌شود. اگر چه با افزایش بزرگ‌نمایی کیفیت پرتو بهتر می‌شود ولی از آنجایی که تشدیدگرهای با بزرگ‌نمایی بیشتر مستلزم استفاده از قرص ضخیم‌تر هستند تا اتلاف انرژی کاهش یابد بنابراین، چنانچه مسائل حرارتی لحاظ شوند با افزایش ضخامت، گرادیان دمایی زیادی در قرص ایجاد می‌شود که به نوبه خود باعث افت کیفیت پرتو خواهد شد. بنابراین حتی الامکان از قرص با ضخامت کمتر و بزرگ‌نمایی کمتر استفاده می‌شود.

۴.۱. نتایج حاصل شده برای لیزر قرص بدون در نظر گرفتن اثرات حرارتی

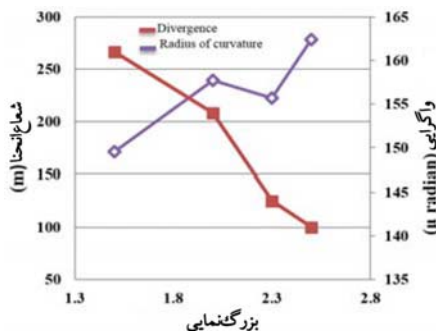
با استفاده از مد عرضی محاسبه شده از انتگرال کولینز (۱) و نمایی‌های ۱٫۵، ۲، ۲٫۳ و ۲٫۵ به ترتیب برای قرص‌هایی با ضخامت‌های ۱۵۰۰، ۴۵۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ میکرون به صورت عددی محاسبه شده‌اند. از آنجایی که در تشدیدگر ناپایدار افزایش بزرگ‌نمایی باعث افزایش اتلاف در تشدیدگر می‌شود، بنابراین به منظور جبران اتلاف و افزایش بهره لیزر برای ضخامت قرص مقادیر بزرگتری در نظر گرفته شده است. ضرایب‌های عدد فرنل معادل (N_{eq})، فاصله بین قرص و آینه (L_r)، شعاع لکه دمش (b) و بزرگ‌نمایی (M) که به عنوان کمیت‌های ورودی محاسبات در نظر گرفته شده‌اند و مشخصات تشدیدگر را تعیین می‌کنند، در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

مقطع‌های شدت و توان لیزر قرص برای یک نمونه از محاسبات انجام شده به صورت شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌باشد. این شکل‌ها از حل عددی انتگرال کولینز و با استفاده از روش تکرار فاکس و لی به دست آمده‌اند.

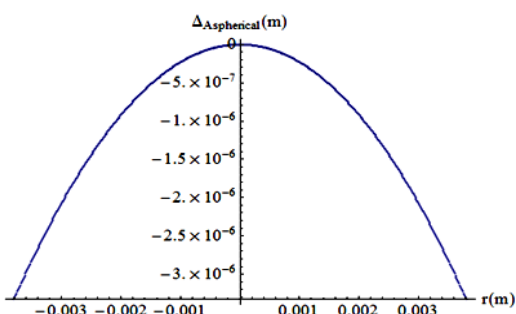
همچنین با استفاده از روابط باریکه تعمیم‌یافته مقادیر



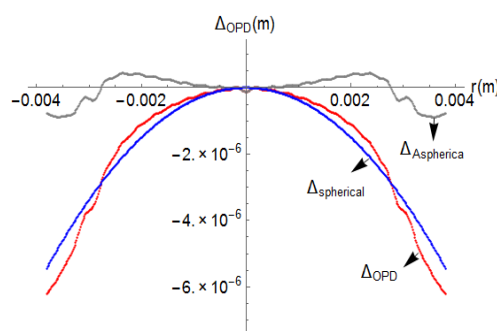
شکل ۱۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کیفیت پرتوی محاسبه شده به صورت عددی برای لیزر در بزرگنمایی های ۱٫۵، ۲، ۲٫۳ و ۲٫۵.



شکل ۱۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شعاع انحنا و واگرایی باریکه محاسبه شده برای لیزر قرص در بزرگنمایی های ۱٫۵، ۲، ۲٫۳ و ۲٫۵.



شکل ۱۶. نمودار OPD بخش غیرکروی تغییر بخش غیرکروی شکل قرص.



شکل ۱۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار حاصل از OPD کل ناشی از جمع همه عوامل OPD، نمودارهای بخش کروی و بخش غیرکروی.

جدول ۳. ضرایب‌های تشدیدگر به منظور بررسی اثرات حرارتی.

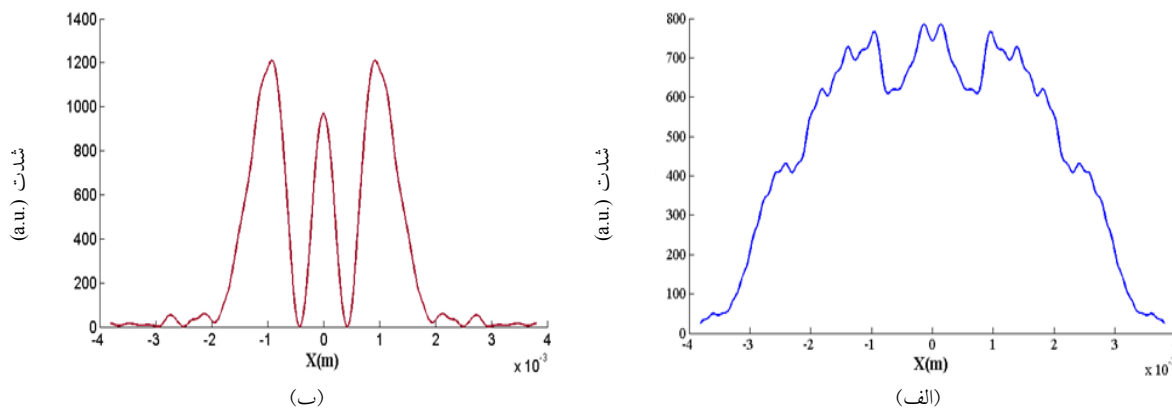
G (1/m)	F (m)	Pabs (w)	r _p (m)	L _{th} (m)	M	b (m)	(M) ^(L_r)	N _{eq}	ضرایب
بهره محیط	فاصله کانونی	دمش	شعاع دمنده	ضخامت قرص	بزرگنمایی	شعاع قرص	فاصله بین قرص و آینه عقبی	عدد فرنل	مقادیر
۵۸۰	۱٫۳	۱۴۱۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۰۴	۱٫۲	۰٫۰۰۴	۰٫۵	۰٫۵	

مقادیر OPD حاصل شده از جمع سهم همه عوامل ایجاد کننده اعوجاجات فازی، از مرتبه میکرون است. خرابی کیفیت پرتوی ناشی از بخش غیرکروی OPD در لیزر قرص است. این بخش از اختلاف مقادیر OPD کل و بخش کروی در شکل ۱۵ نشان داده شده است و همان طور که دیده می‌شود، اختلاف مقادیر OPD کل و OPD بخش کروی خیلی ناچیز است. در بین همه عوامل OPD، اعوجاجات فازی ناشی از تغییر شکل قرص، سهم بیشتری دارد و در شکل ۱۶ نشان داده شده است. از مقایسه شکل های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود، OPD بخش غیرکروی در

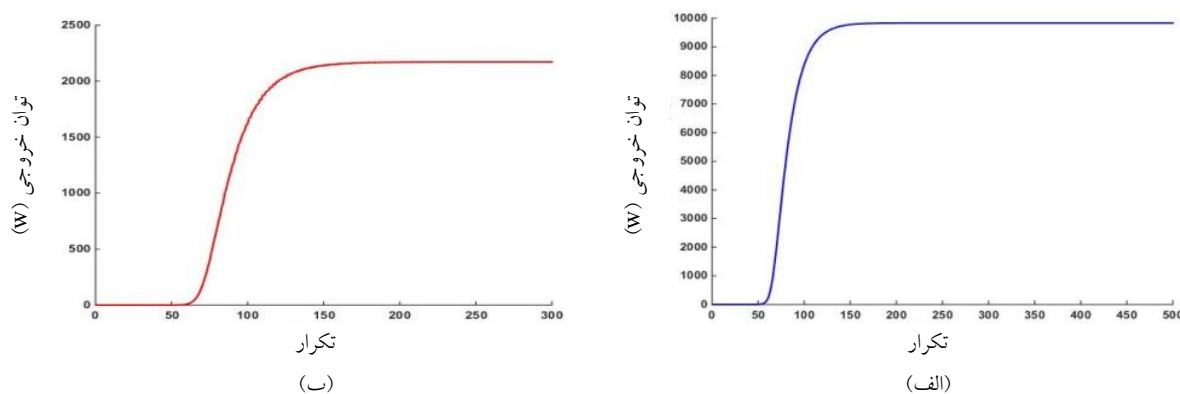
۲.۴. نتایج حاصل شده برای لیزر قرص با در نظر گرفتن اثرات حرارتی

بعد از اطمینان از صحت محاسبات مربوط به اثرات مسائل حرارتی، تأثیر مسائل حرارتی بر کیفیت پرتوی لیزر قرص با مشخصات نشان داده شده در جدول زیر مورد محاسبه قرار گرفته است.

شکل ۱۵، OPD کل و همچنین بخش کروی و بخش غیرکروی OPD لیزر قرص را نشان می‌دهد که OPD کل لیزر قرص از جمع همه عوامل ایجاد کننده OPD حاصل شده است.



شکل ۱۷. (الف) مقطع شدت لیزر قرص نازک بدون لحاظ نمودن اثرات حرارتی، (ب) مقطع شدت لیزر قرص نازک با لحاظ نمودن اثرات حرارتی.



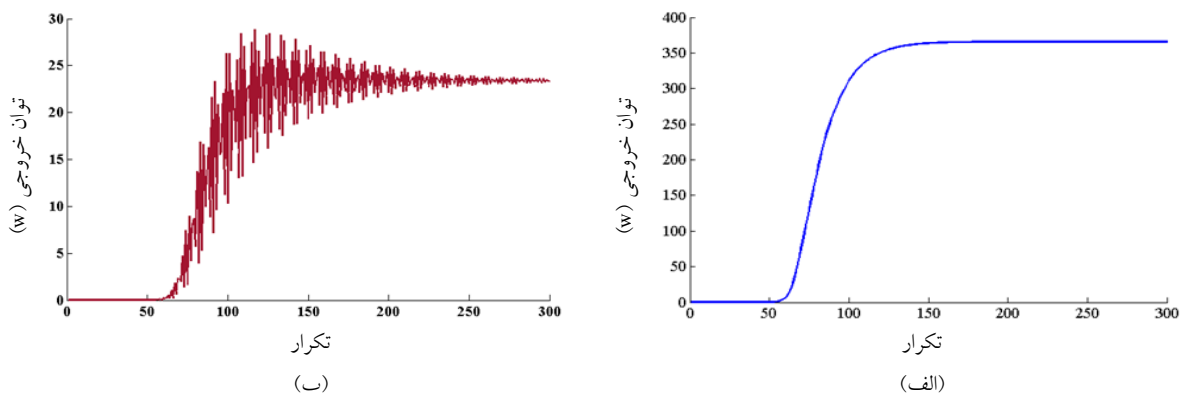
شکل ۱۸. (الف) نمودار توان کل داخل تشدیدگر لیزر قرص نازک بدون لحاظ نمودن اثرات حرارتی، (ب) نمودار توان کل داخل تشدیدگر لیزر قرص نازک با لحاظ نمودن اثرات حرارتی.

با دقت در شکل‌های ۱۸ (الف) و (ب)، تأثیر اثرات حرارتی بر روی توان کل داخل تشدیدگر لیزر قرص به خوبی مشهود است. به طوری که توان کل در شرایط بدون تأثیر اثرات حرارتی حدوداً ۱۰۰۰۰ وات می‌باشد و با لحاظ نمودن اثرات حرارتی به ۲۲۵۰ وات کاهش یافته است. نمودارهای توان خروجی لیزر قرص در دو حالت ذکر شده نیز در شکل‌های ۱۹ (الف) و (ب) رسم شده‌اند.

از مقایسه مقطع‌های توان خروجی در دو حالت با تأثیر دادن اثرات حرارتی و بدون تأثیر دادن آن، ملاحظه می‌شود وقتی که اثرات حرارتی در نظر گرفته نشده است، بازده توان خروجی لیزر قرص با توجه به توان دمش ارائه شده در جدول ۳، تقریباً ۳۰٪ است. این در حالی است که وقتی اثرات

اعوجاجات فازی ناشی از تغییر شکل قرص از جمع همه عوامل OPD نیز بیشتر است. بنابراین انتظار داریم کیفیت پرتوی ناشی از اعوجاجات فازی تغییر شکل قرص از کیفیت پرتوی ناشی از جمع همه عوامل OPD بدتر باشد.

نمودارهای مقطع شدت و توان کل داخل تشدیدگر و همچنین توان خروجی با تأثیر دادن اثرات حرارتی و بدون تأثیر آن به ترتیب مطابق مشخصه‌های داده شده در جدول ۳ به صورت زیر از محاسبات به دست آمده‌اند. از مقایسه مقطع شدت کل داخل قرص در دو حالت اشاره شده، شکل ۱۷ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود در حالتی که اثرات حرارتی در نظر گرفته شده است، نمودار مقطع شدت به صورت قله‌های تیز مانند در آمده است و از حالت یکنواختی خارج شده است.



شکل ۱۹. (الف) نمودار توان خروجی لیزر قرص بدون در نظر گرفتن اثرات حرارتی، (ب) نمودار توان خروجی لیزر قرص با در نظر گرفتن اثرات حرارتی.

جدول ۴. مقادیر کیفیت پرتوی محاسبه شده برای هر یک از عوامل OPD و جمع همه آنها و همچنین کیفیت پرتوی لیزر قرص بدون در نظر گرفتن مسائل حرارتی.

Δ	OPD_{Σ}	$\Delta_t + \Delta_{exp} + \Delta_s + \Delta_e$	Δh	Δ_e	Δ_s	Δ_{exp}	Δ_t	عوامل OPD
بدون لحاظ نمودن اثرات حرارتی	جمع سهم کل عوامل OPD	جمع سهم همه عوامل OPD به جز تغییر شکل قرص	تغییر شکل قرص	اثر عدسی الکترونی	اثر فوتو کشسان	انبساط حرارتی	گرادیان دمایی	
۱،۵۶	۴،۶	۴،۷	۸،۸۹	۱،۷۵	۲،۹۹	۲،۶	۱،۵۶	M^2

نظر می‌گیریم عدد ۸،۸۹ برای M^2 به دست می‌آید. حال آن که با در نظر گرفتن همه عوامل مخرب عدد ۴،۶ برای M^2 به دست آمده است. برای توضیح این نتیجه باید توجه شود که همه عوامل مؤثر بر OPD به صورت هم‌افزایی OPD را افزایش نمی‌دهند بلکه چون جهت انحراف و اعوجاج‌های ایجاد شده در قرص ناشی از عوامل مختلف ممکن است متفاوت باشد. بنابراین اثر OPD کل بر کیفیت پرتو کمتر از اثر OPD ناشی از تغییر شکل است.

۵. نتیجه و بحث

نتایج به دست آمده برای لیزر قرص که با تشدیدگر ناپایدار انجام شده است، نشان می‌دهد وقتی که اثرات حرارتی در نظر گرفته نمی‌شود، با افزایش بزرگ‌نمایی، کیفیت باریکه بهتر می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن اثرات حرارتی در لیزر قرص، ضریب کیفیت باریکه زیاد می‌شود و توان خروجی نیز

حرارتی لحاظ شده است، بازده لیزر به طور چشمگیری دچار افت شده است. در عمل، کیفیت پرتوی ناشی از جمع همه عوامل OPD است، اما برای بررسی این که کدام عامل OPD سهم بیشتری در تخریب کیفیت پرتو دارد، مقدار کیفیت پرتوی هر یک از عوامل OPD به همراه کیفیت پرتوی OPD کل با تأثیر دادن اثرات حرارتی و بدون تأثیر دادن اثرات حرارتی به صورت عددی محاسبه شده و در جدول ۴ جمع آوری شده است.

جدول ۱ تا ۴ نشان می‌دهد کیفیت پرتوی به دست آمده برای لیزر قرص در حالتی که اثر حرارتی در نظر گرفته نشده است بهتر از زمانی است که اثر حرارتی در نظر گرفته شده است. نتیجه دیگری که از جدول ۴ می‌توان استنباط کرد این است که در میان همه عوامل OPD، OPD ناشی از تغییر شکل قرص سهم زیادی در خراب شدن کیفیت پرتو دارد. باید توجه شود که اگر فقط سهم تغییر شکل قرص در کیفیت پرتو را در

اعوجاجات فازی ناشی از تغییر شکل قرص نسبت به OPD بخش غیر کروی هریک از عوامل OPD و همچنین نسبت به OPD بخش غیرکروی جمع کل عوامل OPD است که تغییر فاز شدیدتری ایجاد می‌کند و این تغییر فاز زیاد نیز مخرب اصلی کیفیت پرتو در لیزر قرص است. بنابراین اعوجاجات فازی ناشی از تغییر شکل قرص را می‌توان یکی از عوامل مهم کاهش کیفیت باریکه در لیزر قرص نازک دانست.

کاهش می‌یابد. نتیجه مهم دیگر، تأثیر OPD ناشی از تغییر شکل قرص بر روی کیفیت پرتو است. همان طور که در جدول ۴ نیز ملاحظه می‌شود، مقدار کیفیت باریکه حاصل شده از اعوجاج‌های فازی ناشی از سهم تغییر شکل قرص نه تنها از هر یک از عوامل OPD در لیزر قرص بیشتر است، بلکه از مقدار کیفیت باریکه به دست آمده برای جمع تمام عوامل OPD نیز بیشتر است. علت این امر بزرگ بودن OPD بخش غیرکروی در

مراجع

- Publisher, chapter 12 (2012) 342.
- G Zhu *et al.*, *Appl. Optics* **54**, 10 (2015) 3025.
- J Shang *et al.*, *Appl. Optics* **50**, 32 (2011) 6103.
- J Mende *et al.*, "Thin-disk laser Power scaling to the kW regime in fundamental mode operation", SPIE: lasers and applications in Science and Engineering **7193**, 71931v, (2009) v1-v12.
- M Shayganmanesh and R Saeedizadeh, *Opt. Quant. Electron* **21**, 7 (2014) 197.
- H Weber, "Laser Resonators and Beam Propagation", 2nd edition, Springer (2004) 57.
- E Anashkina and O Antipov, *J. Opt. Soc. Am. B* **27**, 3 (2010) 363.
- G Zhu *et al.*, *Appl. Optics* **53**, 29 (2014) 6756.
- H Injeyan and G D Goodno, "High Power Laser Handbook: Thin-Disk Lasers", 1st edition, McGraw-Hill (2011) 225.
- C Nelson and J Crist, *Laser Technik Journal* **9**, 1 (2012) 36.
- M Shayganmanesh, M H Daemi, Z h Osgoui, S Radmard, *et al.*, *Optics & Laser Technology* **44**, 7 (2012) 2292.
- J Alda, "Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation", Encyclopedia of Optical Engineering, Madrid (2001) 999.
- V Sazegari, M R Jafari Milani and A K. Jafari, *Appl Optics* **49**, 36 (2010) 6910.
- V Ashooriand *et al.*, "Heat Generation and Removal in Solid State Lasers", INTECH Open Access