

تحلیل ترمومکانیکی لیزرهای فیبری Yb:YAG تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی تحت دمش طولی

Original Article

احسان امیری (کارشناس ارشد)

مهدی مجاهدی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه گلباگان

هدف این نوشتار بررسی رفتار ترمومکانیکی یک فیبر لیزر تک‌غلافه‌ی ایتریم:یاگ (Yb:YAG) تحت دمش طولی پیوسته است. بدین منظور فیبر به دو صورت تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی مدل‌سازی شده و در محیط نرم‌افزاری المان محدود شبیه‌سازی می‌شود. برای تعیین توزیع دما و تنش در بلور، به دلیل تقارن در بار حرارتی و هندسه، مدل یک‌چهارم به کار رفته است. از آنالیز میدان‌های کوپله‌ی حرارت - سازه در محیط نرم‌افزاری بهره گرفته شده و ابتدا توزیع دما در بلور محاسبه و سپس میدان تنش در دو فیبر تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در یک توان مشخص، فیبر چهارهسته‌یی نسبت به فیبر تک‌هسته‌یی بیشینه تنش کوچک‌تری دارد و توان دمشی شکست آن به مراتب بزرگ‌تر از فیبر تک‌هسته‌یی است. در نهایت، آثار حرارتی دمش شامل عدسی شدگی در دو بلور چهارهسته‌یی و تک‌هسته‌یی با هم مقایسه شده و نشان داده می‌شود که از نظر ترمومکانیکی فیبر چهارهسته‌یی عملکرد مناسب‌تری دارد.

واژگان کلیدی: فیبر لیزر، بلور ایتریم:یاگ، چهارهسته، دمش طولی، آنالیز حرارت - سازه.

ehsanamiri.ea1369@gmail.com
mojahedi@gut.ac.ir

۱. مقدمه

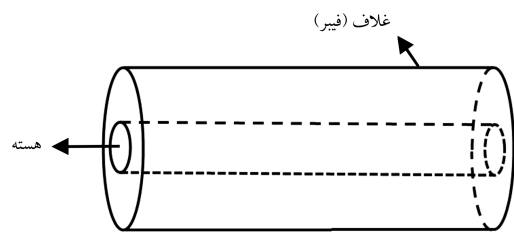
دارد و بعد از آن توان مشخص، دچار شکست می‌شود. در مطالعات پیشین ظرفیت توانی و اثرگذاری حرارت روی کیفیت پرتو مورد مطالعه قرار گرفته است؛ در این زمینه، فعالیت‌هایی روی لیزرهای بره‌یی، استوانه‌یی، دیسکی و فیبر انجام شده است. زی ما و همکاران^[۱] توزیع دما و تنش در بلور بره‌یی Nd:YLF را که تحت دمش پیوسته و پالسی طولی قرار دارد، محاسبه کردند و نشان دادند که در حالت پالسی، آثار گرمایی ایجاد شده در بلور بسیار مخرب‌تر از حالت دمش پیوسته است. بابایی و همکاران^[۲] توزیع تنش و حرارت بلور بره‌یی Nd:YAG را که تحت دمش طولی پیوسته و پالسی قرار دارد، به روش المان محدود تعیین کردند. روش المان محدود در محیط نرم‌افزاری انسیس به کار گرفته شده است. بیشترین مقدار مجاز توان دمش با استفاده از معیار فون میسس^۱ در دو حالت دمش پیوسته و دمش پالسی به دست آمده و با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت دمش پیوسته دما در کمتر از ۱ ثانیه به حالت پایا می‌رسد. همچنین دمش پالسی نسبت به دمش پیوسته، بیشینه توان مجاز بزرگ‌تری دارد. شرما و همکاران^[۳] استفاده از لیزر دیسک Yb:YAG در جوشکاری فلزات پیشرفته با استحکام بالا را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از لیزر Yb:YAG هیچ‌گونه نقصی، از جمله تضعیف^۲ و سوختگی^۳، در فرایند جوشکاری به وجود نمی‌آورد. رفیعی و همکاران^[۴] مدل‌سازی سه‌بعدی حرارتی - مکانیکی یک دیسک مرکب Yb:YAG را که تحت دمش از لبه^۴ قرار گرفته، به روش المان محدود بررسی کردند. در دمش، از پرتوهای سوپرگوسی استفاده شده است. آنها از روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس برای بررسی توزیع

حوزه‌ی فیبر لیزر در سال ۱۹۶۱، تقریباً در زمان پیشرفت اولین لیزر حالت جامد یا همان لیزر یاقوت، به وجود آمد.^[۱] چند سال بعد از آن، اسنیتزر در سال ۱۹۶۴ توانست آزمایش‌هایی بر روی نوسان‌کننده‌ی لیزر فیبر انجام دهد. امروزه لیزرهای فیبری به دلیل کیفیت بالای پرتو خروجی، حجم کم و توان بالا، کاربرد گسترده‌یی در فعالیت‌های پزشکی، صنایع نظامی و تجاری از جمله جوشکاری، حکاکی، نشان‌گر سه‌بعدی و سنجش از راه دور دارند.^[۲] این‌گونه لیزرها از یک هسته‌ی آلاییده با عناصر خاکی - مانند ایتریم، نتودیم و اربیم که توسط یک فیبر پوشانیده شده - تشکیل می‌شود. از میان این عناصر خاکی، ایتریم به دلیل ساختار ترموفیزیکی مناسب مانند نقص کوانتومی کوچک، طول عمر زیاد و تراز آلاییده‌ی بالا (ناشی از ساختار تراز ساده) بسیار مورد توجه قرار گرفته است.^[۳] برای ایجاد لیزر در فیبر، یکی از راه‌های تحریک ام‌های هسته، استفاده از دمش است. در فرایند دمش، مقداری از انرژی دمشی در هنگام گسیل تبدیل به گرما شده و سبب بالا رفتن درجه حرارت و ایجاد گردان دمایی در بلور می‌شود. این گردان می‌تواند ضمن ایجاد تنش‌های حرارتی، بر کیفیت پرتو خروجی اثر بگذارد و حتی منجر به شکست بلور شود. پژوهش‌های فراوانی روی رفتار ترمومکانیکی لیزرهای حالت جامد، با هدف دستیابی به لیزرهایی با توان بالا و کیفیت مناسب انجام شده است. بلور لیزر قابلیت تحمل توان مشخصی

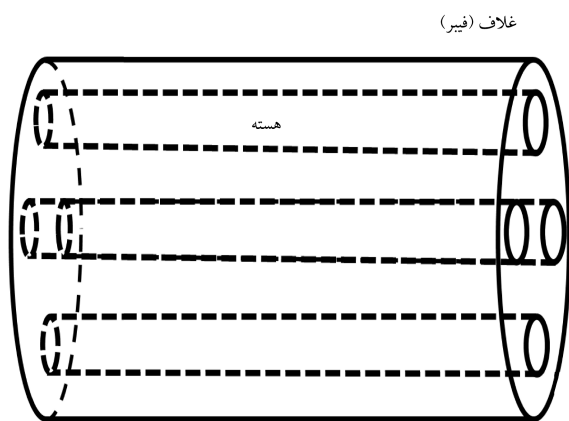
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۱۰/۱۳۹۷، اصلاحیه ۱۹/۵/۱۳۹۸، پذیرش ۱۶/۵/۱۳۹۸.

DOI:10.24200/J40.2019.52516.1497



شکل ۱. فیبر لیزر Yb:YAG تک غلافه با یک هسته.



شکل ۲. فیبر لیزر Yb:YAG تک غلافه با چهار هسته.

فیبر می‌توان به جای مدل کامل، از مدل یک‌چهارم استفاده کرد. در نتیجه، آنالیز حرارتی و تنش‌ی نیز روی مدل یک‌چهارم و با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری متقارن انجام می‌پذیرد. در این شرایط روی صفحات تقارنی شار حرارتی و جابه‌جایی عمود بر صفحه‌ی صفر در نظر گرفته می‌شود. دمشی که به بلور داده می‌شود از جنس طولی بوده و در راستای محور اپتیکی بلور (طولی)، توسط لیزر دیودی پیوسته اعمال می‌شود. در دمشی انجام شده توزیع شدت پرتوهای وارد شده به صورت گوسی‌اند. به منظور کاهش اثرات حرارتی، سطح جانبی غلاف توسط سیالی با دمای $291K$ و ضریب همرفت بسیار بالا خنک می‌شود. از این رو دمای سطح جانبی استوانه‌ی غلاف، همان دمای سیال فرض می‌شود. همچنین با توجه به کوچک بودن سطوح ورودی و خروجی دمشی، از انتقال حرارت در این سطوح صرف‌نظر شده و شرط مرزی جابه‌جایی گیردار، برای صفحه‌ی ورودی بلور در نظر گرفته می‌شود.^[۱۴]

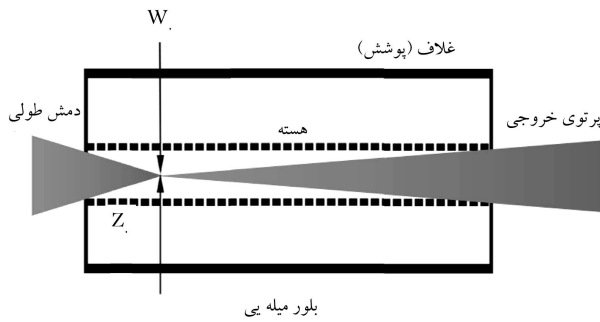
در شکل ۲ نمایی شماتیک از فیبر لیزر چهارهسته‌ی نشان داده شده است. برای مدل‌سازی و تحلیل حرارتی بلور فیبر لیزر Yb:YAG با چهار هسته، تعیین مواردی از قبیل محل قرار گرفتن هسته‌ها، دمشی اعمال شده روی آنها، نوع پرتو و معادله‌ی توزیع حرارت ضروری است.

در مورد قرار گرفتن محل هسته در بلور، مرکز چهارهسته روی چهار نقطه به فواصل مساوی از مرکز غلاف قرار می‌گیرد. همچنین محورهای مختصات اصلی روی مرکز هسته‌ها فرض می‌شود. در این شرایط صفحات واقع شده روی محورها همان صفحات تقارنی هندسی‌اند. چنانچه هسته‌ها مشابه و دمشی روی آنها یکسان باشد، با توجه به تقارن در بارگذاری و هندسه، می‌توان از مدل یک‌چهارم در تحلیل‌های ترمومکانیکی بهره برد، در این وضعیت، تنها دمشی روی دو نیمه‌هسته در مدل‌سازی بررسی می‌شود و شرایط مرزی تقارنی مشابه با حالت تک‌هسته‌ی برای آن لحاظ می‌شود. فاصله‌ی مکان مرکز هسته (مختصات محلی) تا مرکز محور مختصات اصلی بر روی توزیع دما تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین باید مناسب‌ترین فاصله را

تنش و حرارت استفاده کرده و در تحلیل حرارتی معادله‌ی گرما را در حالت پایا با فرض ثابت بودن ضریب هدایت حرارتی، در مختصات استوانه‌ی حل کردند. شیب و همکاران^[۸] توزیع حرارت و تنش در لیزر میله‌ی Nd:YAG تحت دو نوع مدل دمشی گوسی و سرکلاهی^۵ (یکنواخت) را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند و نشان دادند که در حالت دمشی طولی پرتوهای گوسی تنش بزرگ‌تری در بلور ایجاد می‌شود. یانگ و همکاران^[۹] انتشار پرتو در لیزرهای میله‌ی تحت دمشی را بررسی کردند. آنها با بررسی معادله‌ی عدسی‌شدگی نشان دادند که این پدیده به سه عامل گرادیان دمایی، تغییرات تنش و انحراف بستگی دارد. چنانچه بلور میله‌ی به π قسمت تقسیم شود، اثر عدسی‌شدگی در π میله برابر است. آنان در نهایت به این نتیجه رسیدند که با تقسیم یک میله به چند میله می‌توان میزان عدسی‌شدگی را به دست آورد. کورتسو و همکاران^[۱۰] استفاده از فیبر لیزر در جوشکاری دو فلز فولاد ضدزنگ و مس خالص در اتصال لب به لب بدون هیچ‌گونه پرکننده یا مواد میانی را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از لیزر فیبری می‌تواند بر محدودیت جوشکاری مس خالص غلبه کند. لیو و همکاران^[۱۱] اثرات گرمایی را در طول کوچکی از فیبر لیزر تحت دمشی طولی تپی بررسی کردند. تحلیل و مدل‌سازی فیبر لیزر در فضای سه‌بعدی انجام شده است. توزیع حرارت و گرادیان دما به صورت گذرا مدل‌سازی و تحلیل شده است، در نهایت با توجه به گذرا بودن توزیع حرارت، تنش و دما به صورت توابعی از زمان به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مناسب دوره‌ی پالس، باعث کاهش تنش حرارتی و بهینه‌سازی در توان‌های بالا می‌شود و از این رو مدت زمان و دوره‌ی پالس از عوامل بسیار مهم در طراحی هستند. وانگ و همکاران^[۱۲] یک لیزر تمام فیبری را، که با ایتربیوم (Yb) آلیاژ شده و تحت توان دمشی پیوسته نزدیک به $2KW$ قرار دارد، بررسی کردند. در این آزمایش آنها از دمشی طولی پیوسته با ساختار MOPA^۶ که یک سیستم لیزری متشکل از یک لیزر و یک آمپلی‌فایر لیزری برای افزایش قدرت خروجی است، استفاده کردند. در این ساختار توان لیزر ورودی $13W$ است. در دمشی انجام شده از لیزر دیودی با آرایش $1 \times (1 + 6)$ استفاده شده و اثرات گرمایی و غیریکنواختی پرتو ارزیابی شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، در توان بالا هیچ‌گونه عیبی در بلور مشاهده نشده است و مشخصات توان خروجی آزمایشگاهی با توان خروجی نظری یکسان است. واندارا^۷ و همکاران^[۱۳] استفاده از لیزر فیبر و لیزر دیسک در برشکاری فولاد ضدزنگ را مورد بررسی قرار دادند و داده‌های به دست آمده را با نتایج برش به وسیله‌ی لیزر کربن‌دی‌اکسید^۸ مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از لیزر فیبر در برشکاری فولاد ضدزنگ با ضخامت‌های مختلف سریع‌تر انجام می‌گیرد. در این پژوهش، رفتار ترمومکانیکی یک فیبر لیزر تک‌غلافه‌ی Yb:YAG تحت دمشی طولی پیوسته بررسی می‌شود. فیبر تک‌غلافه به دو صورت تک‌هسته‌ی و چهارهسته‌ی مدل‌سازی شده و توزیع حرارت و تنش آن در محیط نرم‌افزاری المان محدود (انسیس) شبیه‌سازی می‌شود. دما و تنش به دست آمده در دو حالت تک‌هسته‌ی و چهارهسته‌ی، با یکدیگر مقایسه شده و لیزر حرارتی هر دو مدل محاسبه و از منظر ترمومکانیکی کارایی هر یک بررسی می‌شود.

۲. مدل نظری

مطابق شکل ۱ در مدل‌سازی فیبر لیزر تک‌غلافه، ابتدا فیبر به صورت تک‌هسته‌ی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، طول بلور فیبر لیزر 10 cm ، قطر هسته‌ی $20\ \mu\text{m}$ و قطر غلاف $200\ \mu\text{m}$ لحاظ می‌شود. به دلیل تقارن در بارگذاری و هندسه‌ی



شکل ۴. مدل شماتیک دمش در بلور فیبر لیزر تک غلافه‌ی Yb:YAG.

دمش طولی در صفحه‌ی $z = 0$ توسط لیزر دیودی با طول موج 974nm به صورت پیوسته انجام می‌شود. در دمش طولی، جهت پرتوی خروجی در جهت پرتوی دمیده شده (راستای محور بلور) یکسان است.^[۱۳] شعاع پرتوی دمش به صورت تابعی از شعاع کمر باریکه‌ی پرتو w_0 است به صورت رابطه‌ی ۳ داده شده است.^[۱۴] شایان ذکر است کمر باریکه‌ی پرتو در موقعیت z نزدیک به صفحه‌ی ورودی دمش قرار گرفته است.

برای تعیین فاکتور M^2 در لیزرهای ساخته شده با طول موج λ ، می‌توان از تساوی شعاع پرتو و شعاع هسته با غلاف فیبر استفاده کرد. شعاع پرتو دمش از طریق رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود:

$$w(z) = w_0 \times \sqrt{1 + \frac{M^2 \times \lambda_p^2 \times (z - z_0)^2}{n^2 \times \pi^2 \times w_0^2}} \quad (3)$$

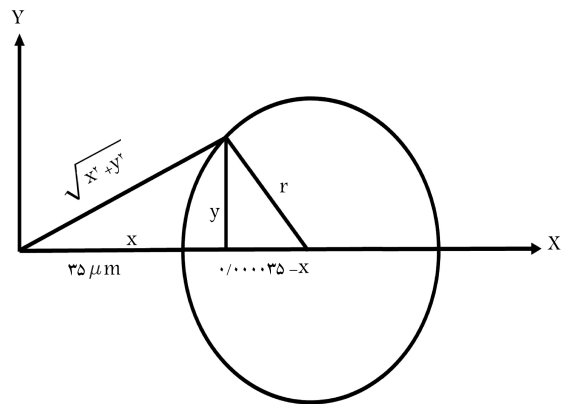
$w(z)$ شعاع لکه‌ی (باریکه‌ی) دمش در فاصله‌ی z از صفحه ورودی، w_0 شعاع کمر باریکه، λ_p طول موج دمش، n ضریب شکست دمش و M^2 کیفیت پرتو است. چنان که پیش‌تر گفته شد، پرتوی دمیده شده به صورت گوسی در نظر گرفته می‌شود.^[۱۴]

در این پژوهش فاصله‌ی بین کمر باریکه ($w_0 = 5\mu\text{m}$) تا صفحه‌ی ورودی دمش 1cm لحاظ می‌شود. پرتوی خروجی طوری تنظیم می‌شود که شعاع آن در صفحه‌ی خروجی، برابر با شعاع هسته ($\frac{25}{4}$) باشد. با توجه به داده‌های بالا، کیفیت پرتو دمش را می‌توان از رابطه‌ی ۳ به دست آورد. در دمش فیبر لیزر، توان ورودی پرتو برای برانگیختگی الکترون‌ها تنها به اتم‌های هسته اعمال می‌شود. بنابراین منبع حرارتی در هسته شکل می‌گیرد. در لیزر چهارهسته‌ی نیز منابع حرارتی در هسته‌ها موجود است، در غلاف هیچ‌گونه تولید انرژی گرمایی نداریم و گرما از طریق سیال خنک‌کننده روی سطح جانبی آن منتقل می‌شود. در جدول ۲ مشخصات فیزیکی بلور فیبر لیزر Yb:YAG بیان شده است. با توجه به مشخصات جدول مربوطه تحلیل حرارتی و تنش بلور انجام می‌گیرد.

فیبر لیزر حالت جامد تک غلافه‌ی Yb:YAG به صورت طولی توسط لیزر دیودی پیوسته پمپاژ می‌شود. در دمش انجام شده، به دلیل عواملی مانند نقص کوانتومی و فرایند غیر تابشی بین ترازهای لیزر، حرارت در هسته‌ی بلور تولید می‌شود. برای ایجاد نور لیزر، لازم است به محیط فعال (YAG) که یک محیط پیوسته است، یون (Yb^{3+}) اضافه شود که این فرایند را آرایش بلور می‌نامند. از آن‌جا که یون‌های اضافه شده درصد کمی از کل بلور را تشکیل می‌دهند، بلور به صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. همچنین نور تابیده شده به بلور، تغییر در خواص فیزیکی بلور ایجاد نمی‌کند و تحت دمش نوری، تنها الکترون‌های یون‌های فعال با دریافت انرژی از تراز پایین‌تر به تراز بالاتر حرکت می‌کنند و در نهایت الکترون‌ها

جدول ۱. فاصله‌ی هسته‌ها تا مرکز محور مختصات کلی و تأثیر آن بر تغییرات دما.

دما (K°)	فاصله‌ی مرکز هسته تا مرکز غلاف (μm)
۳۸۹٫۱	۲۵
۳۶۶٫۳	۳۵



شکل ۳. نمای شماتیک تبدیل مختصات محلی به مختصات کلی.

تا مرکز محور مختصات مشخص کرد. در مدل‌سازی فیبر چهارهسته‌ی، دو موقعیت (فاصله‌ی مرکز هسته تا مرکز غلاف) ۲۵ و ۳۵ میکرومتری برای محل قرارگیری مراکز هسته‌ها پیشنهاد شده است. مکان قرارگیری مختصات محلی می‌تواند بر میزان بیشینه دما مؤثر باشد که این مورد در جدول ۱ برای دو موقعیت مذکور بررسی شده است. مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن موقعیت ۳۵ میکرومتری از مرکز مختصات بیشینه دمای کوچک‌تری دارد. لذا این موقعیت برای محل قرارگیری هسته‌ها انتخاب می‌شود.

در مورد اعمال دمش و نوع آن، هر هسته به صورت مجزا تحت دمش مشابه با حالت تک‌هسته‌ی قرار می‌گیرد و توزیع دمش و حرارت روی هسته مطابق با دمش طولی (با پرتو گوسی) اعمال شده روی میله‌ها لحاظ می‌شود. بنابراین لازم است موقعیت شعاعی در مختصات محلی برحسب موقعیت دکارتی نسبت به مختصات اصلی بیان شود.

با توجه به شکل ۳ برای هسته‌ی که روی محور افقی قرار گرفته، این موقعیت محلی برابر است با:

$$r = \sqrt{y^2 + (0.000035 - x)^2} \quad (1)$$

برای هسته‌ی که روی محور قائم قرار گرفته است این موقعیت برابر است با:

$$r = \sqrt{x^2 + (0.000035 - y)^2} \quad (2)$$

حال با توجه به مختصات محلی شعاعی به دست آمده، از روابط توزیع دمش و حرارت فیبر تک‌هسته‌ی برای توصیف اعمال دمش و توزیع حرارت روی تک‌تک هسته‌های فیبر چهارهسته‌ی استفاده می‌شود.

۱.۲. مدل دمش

هندسه‌ی بلور میله‌ی فیبر لیزر تک غلافه‌ی Yb:YAG و چگونگی دمش آن در شکل ۴ آمده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، طول میله‌ی فیبر لیزر 10cm شعاع هسته‌ی $10\mu\text{m}$ و شعاع غلاف $100\mu\text{m}$ است.

جدول ۲. مشخصات بلور فیبر لیزر Yb:YAG تک غلافه.

واحد	مقدار	پارامتر
Kg/m^3	۴۵۶۰	چگالی
GPa	۳۱۰	مدول یانگ
-	۰/۳	ضریب پوسون
K^{-1}	$۷/۵ \times ۱۰^{-۶}$	ضریب انبساط حرارتی
Nm	۹۷۴	طول موج دمش
$Ws/Kg.K$	۵۹۰	ظرفیت گرمایی ویژه
$W/m.k$	۱۴	ضریب هدایت حرارتی
K	۲۹۱	دمای خنک کاری
$D(\mu m)$	$D = ۲۰ L = ۰/۱$	ابعاد هسته
$L(m)$		
$D(\mu m)$	$D = ۲۰ L = ۰/۱$	ابعاد غلاف
$L(m)$		
-	۱/۲۹	ضریب شکست
-	۴/۱	ضریب جذب
MPa	۲۶۰-۲۰۰	تنش گسیختگی
-	%۴۲	ضریب اتلاف حرارتی
-	$Yb : ۰/۵ \sim ۲/۵ at$	میزان آلاینده با Yb
K^{-1}	$۹/۱ \times ۱۰^{-۶}$	ضریب حرارت نوری (dn/dt)
(Pa^{-1})	$B_{\perp} = ۳/۳۳ \times ۱۰^{-۱۲}$ $B_{\parallel} = ۸/۹۲ \times ۱۰^{-۱۲}$	عناصر تانسور تنش

- شار گرمایی: با توجه به این که دو طرف فیبر عایق است، باید شار گرمایی در صفحات ورودی و خروجی نور برابر صفر باشد.
- تولید حرارت: بخشی از توان دمیده شده توسط منبع حرارتی، جذب شده و به صورت منبع چگالی گرمایی ($Q(x, y)$) در هسته فیبر ظاهر می‌شود.
- با توجه به گیردار بودن ابتدای فیبر، جابه‌جایی‌ها در صفحه‌ی ورودی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.
- توزیع دمای به دست آمده از تحلیل گرمایی، به عنوان بار حرارتی روی فیبر اعمال می‌شود.

به دلیل بارگذاری حرارتی در بلور و خنک‌کاری در سطح غلاف، گرادیان گرمایی در طول و شعاع میله پدید می‌آید که این خود باعث به وجود آمدن تنش‌های کششی و فشاری می‌شود. با توجه به قانون هوک، کرنش‌های حرارتی باعث ایجاد تنش‌های حرارتی عمودی می‌شود. رابطه‌ی بین تنش و کرنش کل با در نظر گرفتن کرنش حرارتی مطابق رابطه‌ی ۷ در مختصات دکارتی قابل بیان است:^[۱۵]

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] + \alpha' T \\ \epsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha' T \\ \epsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{xx})] + \alpha' T \end{aligned} \quad (۷)$$

که در رابطه بالا E مدول یانگ ν ضریب پوسون و α' ضریب انبساط گرمایی $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ تنش‌های عمودی و $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$ کرنش‌های عمودی هستند. همچنین روابط تنش و کرنش در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:^[۱۵]

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr} &= \frac{1}{E} [\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})] + \alpha' T \\ \epsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{rr})] + \alpha' T \\ \epsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})] + \alpha' T \end{aligned} \quad (۸)$$

در ادامه با توجه به روابط تنش و کرنش و تعیین توابع شکل المان‌ها، ماتریس‌های سختی و بردار نیروی حرارتی به دست آمده و توزیع تنش در بلور تعیین می‌شود. با توجه به روابط بیان شده در بخش‌های قبلی، پس از تغییر متغیر از مختصات کلی به طبیعی، انتگرال‌های مربوط به ماتریس سختی برای تحلیل انتقال حرارت تبدیل می‌شود به:^[۱۶]

$$[K]^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [k] [B] j d\xi d\eta d\gamma \quad (۹)$$

که در آن ماتریس B ، حاوی مشتقات توابع شکل و ماتریس قطری k حاوی ضرایب هدایت گرمایی است. ξ, η, γ مختصات محلی هستند. همچنین بردار بار حرارتی ناشی از منبع گرمایی چنین بیان می‌شود:

$$\{P\}^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 Q [N]^T j d\xi d\eta d\gamma \quad (۱۰)$$

با تعیین ماتریس سختی و بردار بار حرارتی کل، دمای تک‌تک نودها قابل محاسبه است. همچنین برای تحلیل تنش و جابه‌جایی، ماتریس سختی و بردار نیروی ناشی

برای رسیدن به حالت پایدار خود، انرژی دریافت شده‌شان را آزاد کرده و این انرژی آزاد شده باعث تولید نور لیزر می‌شود.

توزیع دما در حالت کلی در مختصات دکارتی از معادله‌ی دیفرانسیل رابطه‌ی ۴ پیروی می‌کند:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(x, y, z) = 0 \quad (۴)$$

که در آن k_x, k_y, k_z به ترتیب ضرایب هدایتی حرارتی در راستای x, y, z هستند. با توجه به همسان‌گرد بودن بلور، مقدار k در هر سه جهت ثابت و برابر در نظر گرفته شده است و $Q(x, y, z)$ منبع چگالی گرما در تمامی هسته‌ها است؛ این منبع در میله وابسته به شعاع و طول میله است و برای هر هسته چنین بیان می‌شود:^[۴]

$$Q(r, z) = Q_0 \exp \left[-\frac{2r^2}{w^2(z)} - \alpha z \right] \quad (۵)$$

که در آن α ضریب جذب در توان دمشی است و مقدار ثابت Q_0 از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$Q_0 = \frac{\eta P}{2\pi \int_0^r \int_0^L \exp \left(-\frac{2r^2}{w^2(z)} - \alpha z \right) r dr dz} \quad (۶)$$

که در آن η بازده تولید حرارت ماده و P توان کل جذب شده در دمش است. شرایط مرزی حرارتی و بار ناشی از منبع حرارتی، نیز چنین اعمال شده است:

- دما: برای اعمال دما، سطح روی غلاف انتخاب شده است. دمای روی سطح غلاف انتخاب شده، همان دمای سیال خنک‌کاری است که برابر با ۲۹۱K است.

از گرادبان حرارتی نیز از روابط ۱۱ پیروی می‌کند:

$$[K]^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [k] [B] j d\xi d\eta d\gamma$$

$$\{F^T\}^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 Q [N]^T j d\xi d\eta d\gamma \quad (11)$$

که در آن ε کرنش گرمایی و $[D]$ ماتریسی است که به خواص ماده وابسته است و عبارت است از:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن E و ν به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون هستند.

در فیبر لیزر، تغییرات ضریب شکست در بلور در راستای شعاعی و محیطی در نتیجه اعمال حرارت و تنش است که این تغییرات در جهات مختلف متفاوت است و منجر به پدیده‌ی دوشکستی می‌شود. باریکه‌ی نوری که از یک محیط عبور می‌کند، به دو مؤلفه‌ی عمود بر هم تجزیه می‌شود که در راستای محورهای اپتیکی تجزیه می‌شود. با توجه به اثرات گرمایی ایجاد شده در بلور، این دو مؤلفه می‌تواند دارای ضریب شکست‌های متفاوتی باشد. اختلاف بین ضریب شکست در پرتوهای هدایت شده‌ی داخل هسته، در جهت محورهای اپتیکی را دوشکستی می‌گویند. وقتی باریکه‌ی نور دمیده شده به بلورهای دارای دوشکستی می‌تابد، دو باریکه‌ی خروجی ایجاد می‌شود. از رابطه‌ی ۱۳ که نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضریب شکست است، برای مطالعه‌ی پدیده‌ی دوشکستی استفاده می‌شود: [۱۷]

$$n'_{rr} = \left(n + \frac{dn}{dT} T'(r) \right) + (B_{\perp} [\sigma_{zz}(r) + \sigma_{\theta\theta}(r)] + B_{\parallel} \sigma_{rr}(r))$$

$$n'_{\theta\theta} = \left(n + \frac{dn}{dT} T'(r) \right) + (B_{\perp} [\sigma_{zz}(r) + \sigma_{rr}(r)] + B_{\parallel} \sigma_{\theta\theta}(r)) \quad (13)$$

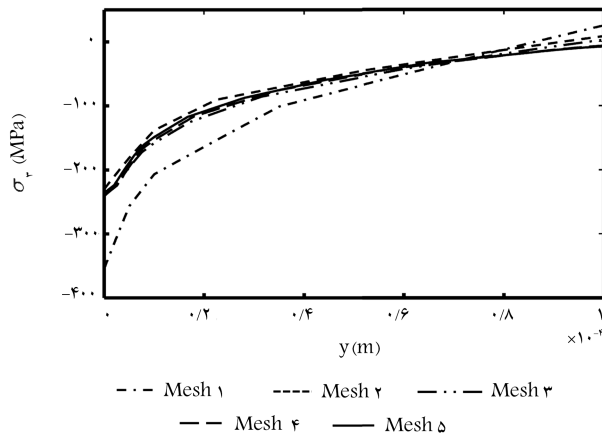
در این رابطه n'_{rr} و $n'_{\theta\theta}$ تغییرات ضریب شکست در بلور در راستای محیطی و شعاعی، n ضریب شکست، $\frac{dn}{dT}$ ضریب حرارت نوری و B_{\perp} ، B_{\parallel} عناصر نانسور الاستوایتنیک هستند که مقادیر آن در جدول ۲ داده شده است.

۳. نتایج

در این بخش با در نظر گرفتن روابط بخش قبل، به بررسی نتایج حرارتی و سازه‌یی دمش طولی در فیبر لیزر تک‌غلافه می‌پردازیم. تحلیل گرمایی و تنش، برای دو فیبر تک‌هسته‌یی و چندهسته‌یی در محیط نرم‌افزاری المان محدود انسیس انجام می‌پذیرد. در این بخش، توزیع دما و تنش در بلور تک‌هسته‌یی و چندهسته‌یی فیبر لیزر تک‌غلافه در راستاهای مختلف محاسبه شده و مقایسه می‌شود. در شکل ۵، بیشینه تنش اصلی در لحظه‌ی شکست، برای مش‌های داده شده‌ی جدول ۳ در راستاهای شعاعی (راستای y) محاسبه شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد تقسیمات، تنش اصلی بیشینه در هر نقطه به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود. پس از آن هر قدر تعداد تقسیمات بیشتر شود، تغییری در میزان تنش‌ها مشاهده نمی‌شود. نتایج در راستای شعاعی نشان می‌دهد که بیشینه تنش در مدل مش شماره ۴ و ۵ اختلافی ناچیز دارند ($-239MPa$ ، $-236MPa$) بنابراین در راستای شعاعی، انتخاب مش ۵ برای آنالیز تنش فیبر مناسب است.

در ادامه، نتایج به دست آمده از روش المان محدود، با روش تحلیلی ارائه شده توسط براوان و همکاران [۱] برای فیبر تک‌غلافه مقایسه می‌شوند. بدین منظور، توزیع دما در یک توان ورودی مشخص از دو روش تحلیلی و روش المان محدود محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که توزیع دمای به دست آمده از دو روش، با تقریب بسیار خوبی برهم منطبق‌اند.

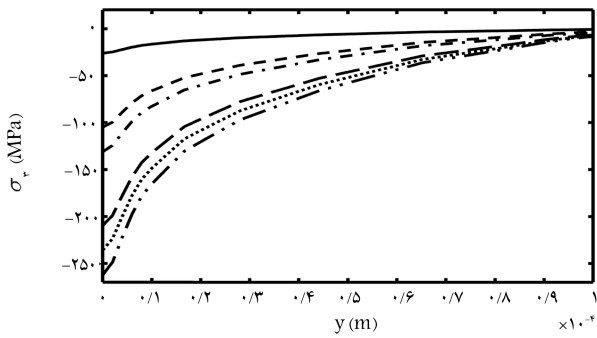
در شکل ۷ تغییرات دما در توان‌های مختلف یک فیبر لیزر تک‌هسته‌یی در راستای شعاعی و طولی نشان داده شده است. در توان‌های دمشی مورد مطالعه، تغییرات دمای بلور در بازه $[291K, 360K]$ قرار دارد. به دلیل تمرکز شدت دمشی در مرکز بلور و خشک‌کاری سطحی غلاف، بیشینه دمای بلور در تمامی توان‌ها در مرکز



شکل ۵. توزیع بیشینه تنش (σ_r) در راستای شعاعی، برای توان ورودی ۹ وات در مش‌های متفاوت.

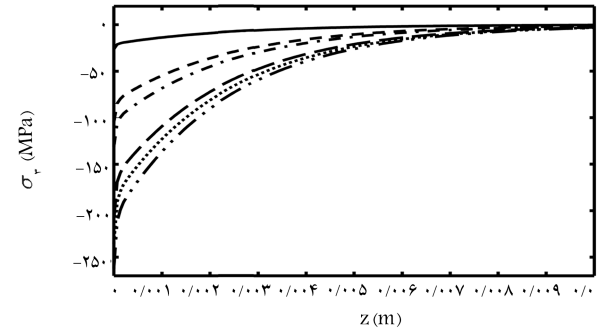
جدول ۳. تقسیمات مش در مدل.

مدل مش	تعداد گره	تعداد المان	دما (K)	تنش اصلی سوم (MPa)
۱	۵۵۴۵۶	۳۴۶۵۰	۳۸,۲۲۱	-۴۹۴
۲	۹۴۲۵۰	۶۵۳۲۳	۳۴,۹۹۸	-۳۱۰
۳	۲۲۱۰۸۸	۱۶۳۱۵۳	۳۵,۵۷۲	-۳۳۲
۴	۳۷۹۹۰۴	۲۹۱۶۶۹	۳۵۳,۲	-۲۳۹
۵	۶۲۲۷۴۴	۴۹۹۷۳۳	۳۵۳,۲	-۲۳۶



الف) راستای شعاعی؛

— P=1 W - - - - P=4 W - · - · - P=5 W
 - - - - P=8 W ······· P=9 W - · - · - P=10 W



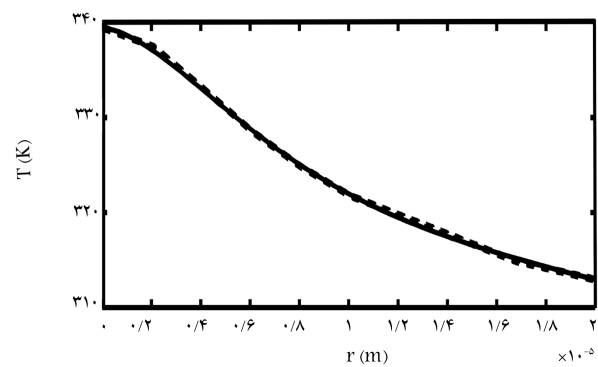
ب) راستای طولی.

— P=1 W - - - - P=4 W - · - · - P=5 W
 - - - - P=8 W ······· P=9 W - · - · - P=10 W

شکل ۸. توزیع تنش سوم (σ_z) فیبر تک هسته‌یی.

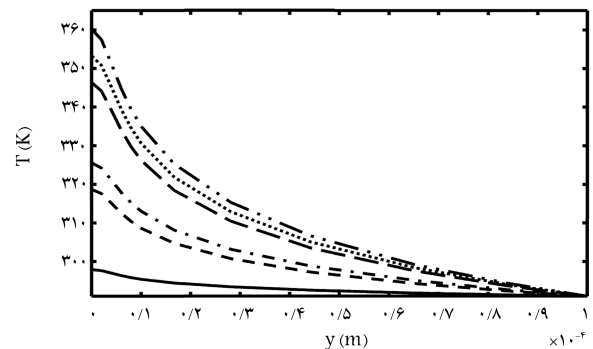
به صورت فشاری است)، تنش اصلی سوم بلور است که در این بخش این بیشینه تنش اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای توان‌های مختلف این تنش اصلی در دو راستای عرضی در (صفحه‌ی ورودی دمش) در شکل ۸ الف و راستای طولی در شکل ۸ ب (در مرکز فیبر یا هسته) محاسبه شده است. همان طور که در جدول ۲ آمده است، تنش شکست ماده بلور (YAG)، در حدود ۲۰۰ تا ۲۶۰ مگاپاسکال است و اندازه تنش اصلی بیشینه در بازه $[-262MPa, 76/5MPa]$ برای توان‌های ۱ تا ۱۰ وات قرار گرفته است. بنابراین مشاهده می‌شود که طبق معیار بیشینه تنش عمودی، تحت توان ورودی ۱۰ وات، بلور دچار شکست می‌شود. لذا این توان، همان توان شکست بلور است. به دلیل تمرکز گرادیان دما در مرکز فیبر و صفحه‌ی ورودی دمش، چنان که در تغییرات تنش در راستای شعاعی و طولی نشان داده شده است، بیشینه تنش اصلی در مرکز فیبر در صفحه‌ی ورودی دمش رخ می‌دهد و با فاصله گرفتن از صفحه‌ی ورودی دمش یا مرکز هسته، اندازه تنش‌ها کاهش می‌یابد.

چنان که در بخش قبل توضیح داده شد، مکان هسته‌ها (فاصله‌ی هسته‌ها تا مرکز مختصات اصلی) بر توزیع دما در بلور تأثیرگذار است. از طرفی هر قدر فاصله‌ی هسته‌ها از یکدیگر کم‌تر شود فشردگی پرتو خروجی بیشتر و کیفیت لیزر مناسب‌تر می‌شود. در این پژوهش برای دو فیبر چهار هسته‌یی (که هسته‌ها روی محورهای x و y به فواصل مساوی از مرکز فیبر قرار گرفته‌اند)، دو موقعیت ۳۵ میکرومتری و ۲۵ میکرومتری برای هسته‌ها (نسبت به مرکز فیبر) پیشنهاد شده است. در شکل ۹ برای هر دو فیبر، میزان تغییرات دمای نسبی (دما نسبت به دمای سطح) برای توان دمشی ۲۸ وات، در راستای محور y محاسبه شده است. میزان بیشینه دما



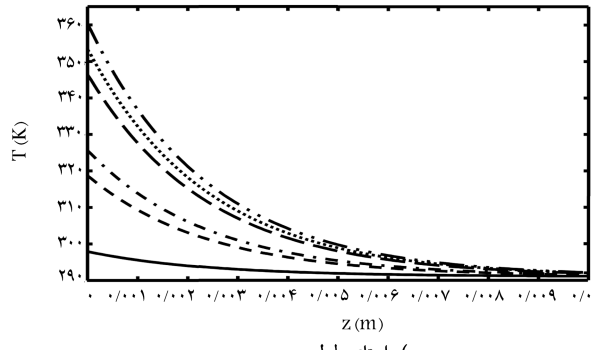
روش تحلیلی روش المان محدود

شکل ۶. تغییرات دما فیبر تک هسته‌یی در راستای شعاعی، برای توان ورودی ۷ وات.



الف) راستای شعاعی؛

— P=1 W - - - - P=4 W - · - · - P=5 W
 - - - - P=8 W ······· P=9 W - · - · - P=10 W

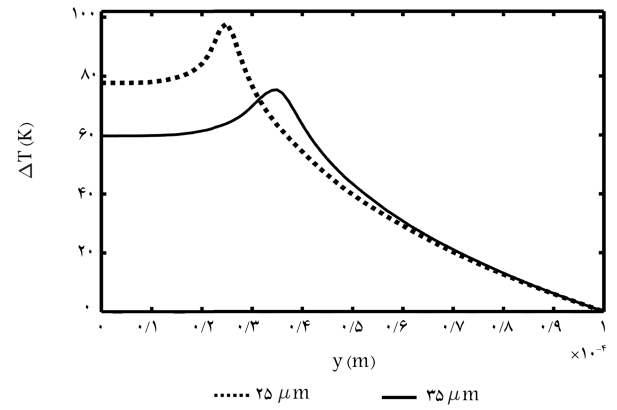
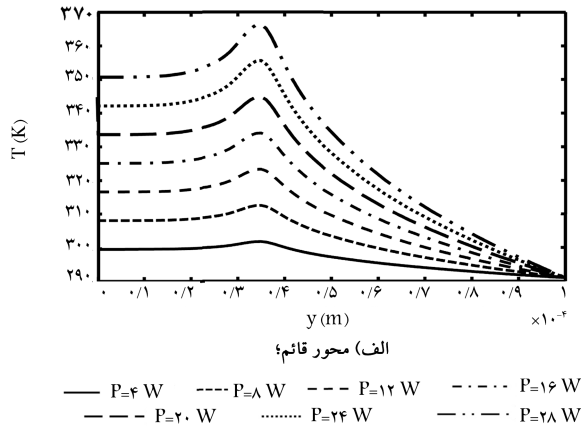


ب) راستای طولی.

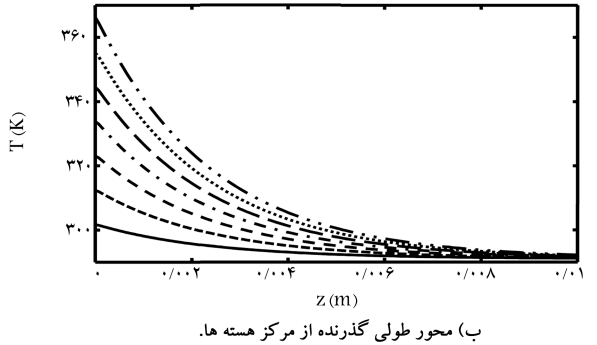
— P=1 W - - - - P=4 W - · - · - P=5 W
 - - - - P=8 W ······· P=9 W - · - · - P=10 W

شکل ۷. تغییرات دما در فیبر تک هسته‌یی.

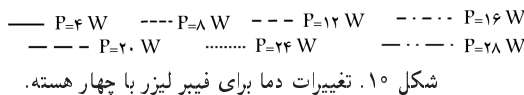
هسته اتفاق می‌افتد که این نتیجه در شکل ۷ الف نشان داده شده است. با توجه به دلایل بیان شده، تغییرات دما، با افزایش فاصله از مرکز هسته به سمت سطح غلاف، سیر نزولی خواهد داشت. در شکل ۷ ب توزیع دما در راستای طولی (روی محور هسته) محاسبه شده و ملاحظه می‌شود که بیشینه دما در صفحه ورودی دمش به وجود می‌آید و با افزایش فاصله از صفحه ورودی میزان دما، کاهش می‌یابد، به گونه‌یی که بعد از موقعیت $z = 0/1m$ تغییرات دما جزئی بوده و میزان دما تقریباً برابر با دمای سطح خنک‌کننده می‌شود. در محاسبه‌ی تنش‌های اصلی مشاهده شده است که بیشینه تنش اصلی (که



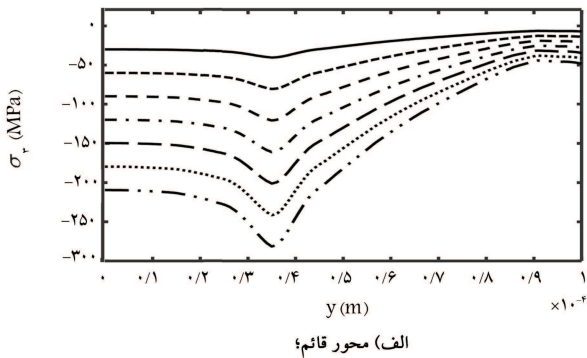
شکل ۹. توزیع دما در راستای شعاعی برای فیبر چهارهسته‌یی اول و دوم.



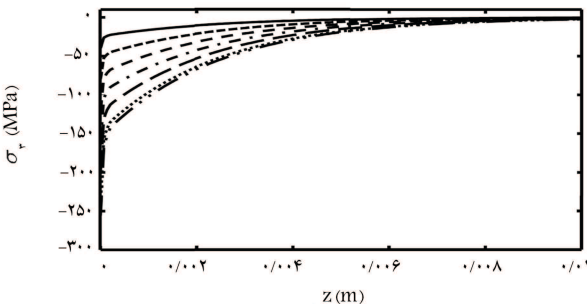
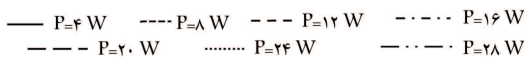
ب) محور طولی گذرنده از مرکز هسته‌ها.



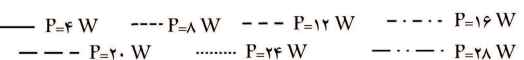
شکل ۱۰. تغییرات دما برای فیبر لیزر با چهار هسته.



الف) محور قائم؛



ب) محور طولی گذرنده از مرکز هسته‌ها.



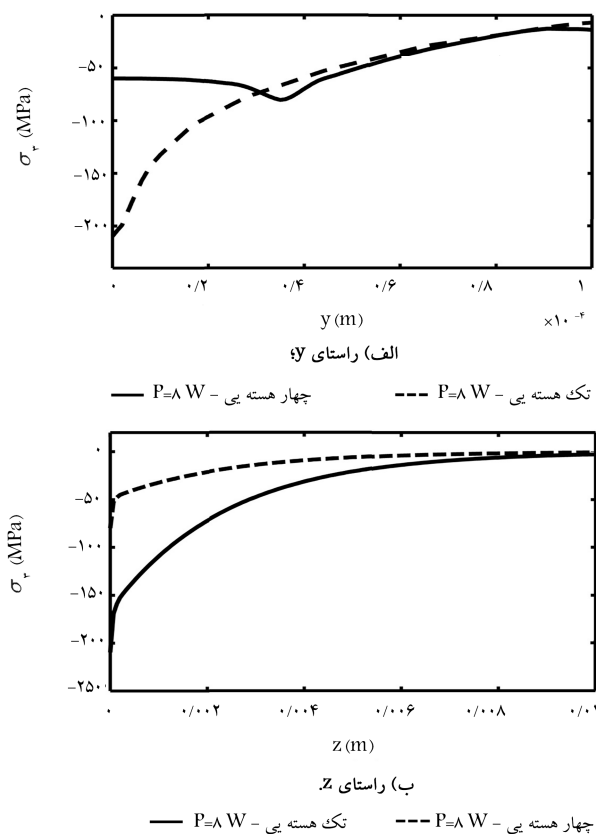
شکل ۱۱. توزیع تنش اصلی سوم σ_z برای فیبر لیزر با چهار هسته.

(۳۶۶ درجه کلون) در فیبر اول (با فواصل هسته‌ی ۳۵ میکرومتری)، کوچک‌تر از بیشینه دما (۳۸۹ درجه کلون) در فیبر دوم است. بنابراین انتخاب فیبر اول از نظر ترمومکانیکی دارای توان شکست بالاتری است هرچند که از نظر اپتیکی فیبر دوم مناسب‌تر به نظر می‌رسد. در ادامه‌ی این پژوهش رفتار ترمومکانیکی و ترموآپتیکی فیبر اول بررسی می‌شود. چنان که در شکل ۹ نشان داده شده است، برخلاف فیبر تک‌هسته‌یی، در فیبر چهارهسته‌یی بیشینه دما در مرکز فیبر اتفاق نمی‌افتد و منحنی دما برحسب موقعیت قائم، یک قله در موقعیت مرکز هسته دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که بیشینه دمای فیبر در مرکز هسته‌ها رخ می‌دهد.

در شکل ۱۰ الف تغییرات دمای فیبر لیزر چهارهسته‌یی در راستای محور y یا x برای توان‌های مختلف نشان داده شده است. دمای بیشینه در این فیبر برخلاف فیبر تک‌هسته‌یی در مرکز اتفاق نمی‌افتد و منحنی دارای یک مقدار بیشینه در موقعیت هسته‌هاست. در این نمودار، دما ابتدا با افزایش شعاع، افزایش می‌یابد و در موقعیت مرکز هسته به بیشینه مقدار خود می‌رسد، سپس کاهش یافته تا روی سطح، دمای آن برابر با دمای سیال خنک‌کننده شود. در شکل ۱۰ ب روی محور طولی گذرنده از هسته‌ها، توزیع دما محاسبه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله از صفحه‌ی ورودی دمشی، دما به طور کاملاً نزولی کاهش می‌یابد تا این که پس از موقعیت طولی ۱/۰۵ متر، میزان دما تقریباً برابر با دمای سیال خنک‌کننده می‌شود. برای توان‌های ۴ تا ۲۸ وات، تغییرات دما در بازه ۲۹۱ تا ۳۶۶ کلون قرار می‌گیرد که کمی کم‌تر از بازه دمای فیبر تک‌هسته‌یی است، با این تفاوت که اندازه توان‌های دمشی افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده است. بنابراین در توان‌های بالاتر دمای فیبر چهارهسته‌یی به مراتب کم‌تر از فیبر تک‌هسته‌یی می‌شود.

محاسبات نشان می‌دهد که بیشینه تنش اصلی در فیبر چهارهسته‌یی، مربوط به تنش اصلی سوم (σ_z) است که به صورت فشاری اعمال شده است. در شکل ۱۱ الف توزیع تنش اصلی سوم روی محور قائم یا افقی واقع در صفحه‌ی ورودی دمشی محاسبه شده است. نتایج بیان می‌کند که همانند توزیع دما، اندازه تنش اصلی سوم نیز با فاصله گرفتن از مرکز فیبر ابتدا افزایش یافته، سپس کاهش می‌یابد. بنابراین در فیبر چهارهسته‌یی بیشینه تنش که به صورت فشاری است، در مرکز هسته‌ها رخ می‌دهد. تغییرات تنش اصلی سوم روی محور طولی گذرنده از مراکز هسته‌ها در شکل ۱۱ ب بررسی شده و نشان داده شده است که با افزایش فاصله از صفحه‌ی ورودی، این تنش اصلی به صورت یکنوا کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده، در ادامه دماها، تنش‌ها و توان‌های شکست دو فیبر لیزر تک‌هسته‌یی و چندهسته‌یی مقایسه می‌شود؛ در شکل ۱۲ الف که



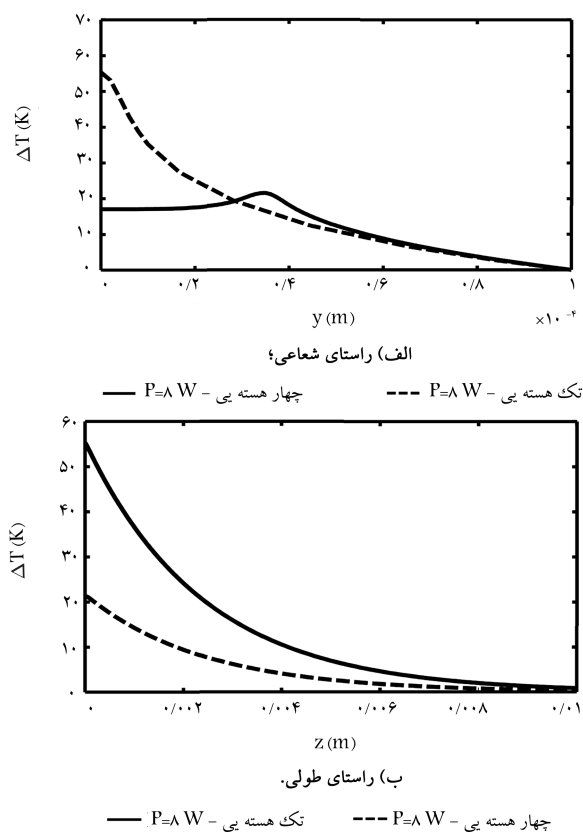
شکل ۱۳. مقایسه‌ی توزیع تنش (σ_r) در حالت چهارهسته‌یی و تک‌هسته‌یی.

جدول ۴. فواصل کانونی بر حسب توان‌های مختلف تا لحظه‌ی شکست در فیبر تک‌هسته‌یی.

$f (mm)$	$P (W)$
۰٫۹۷	۱
۰٫۴۸	۲
۰٫۳۲	۳
۰٫۲۴	۴
۰٫۱۹	۵
۰٫۱۶	۶
۰٫۱۳۹	۷
۰٫۱۲	۸
۰٫۱	۹
۰٫۰۹۷	۱۰

می‌شود با افزایش توان ورودی این فاصله کاهش می‌یابد. در جدول ۵ نیز برای فیبر چهارهسته‌یی بر حسب توان دمشی تا توان ۲۸ وات (توان شکست بلور) فاصله‌ی کانونی تعیین شده است.

از مقایسه‌ی فواصل کانونی در دو فیبر مشاهده می‌شود که در توان برابر، میزان فاصله‌ی کانونی در فیبر چهارهسته‌یی تقریباً چهار برابر فیبر تک‌هسته‌یی است. بنابراین استفاده از فیبر چهارهسته‌یی در یک توان ثابت با لنز گرمایی کوچک‌تری همراه است. تغییرات ضریب شکست دو جهت عمود برهم در راستای طولی در شکل ۱۴ ب و در راستای عرضی در شکل ۱۴ الف برای فیبر چهارهسته‌یی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای راستای عرضی اختلافی در ضرایب



شکل ۱۴. مقایسه‌ی تغییرات دما در حالت چهارهسته‌یی و تک‌هسته‌یی.

مقایسه بین دمای نسبی فیبر تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی روی یکی از محورهای صفحه ورودی دمش (y) را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که تغییرات دما در فیبر چهارهسته‌یی تقریباً یک‌نواخت و تنها روی هسته با یک قله کوچک همراه است، در حالی که شیب تغییرات دما برای فیبر تک‌هسته‌یی شدید است. در شکل ۱۲ ب نشان داده شده است که در صفحه‌ی ورودی دمش، اختلاف دمای دو فیبر بیشینه (۳۴ کلوین) بوده و با افزایش بعد طولی (مختصه روی محور هسته‌ها) این اختلاف کاهش می‌یابد.

تنش اصلی سوم در دو فیبر تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی برای راستای داخل صفحه‌ی دمش (راستای y) در شکل ۱۳ الف و برای راستای طولی گذرنده از مرکز هسته‌ها (راستای z) در شکل ۱۳ ب نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود تغییرات تنش در راستای داخل صفحه برای فیبر تک‌هسته‌یی شدید، اما برای فیبر چهارهسته‌یی تقریباً یک‌نواخت است. در توان دمشی ۸ وات، برای فیبر تک‌هسته‌یی، بیشینه تنش در صفحه‌ی ورودی دمش و در مرکز فیبر ایجاد شده است و اندازه‌ی آن برابر 21° مگاپاسکال است که نزدیک به تنش شکست بلور است، در حالی که در فیبر چهارهسته‌یی این میزان کم‌تر از 8° مگاپاسکال است و در مرکز هسته‌ها شکل می‌گیرد. بنابراین فیبر چهارهسته‌یی در توان بسیار بزرگ‌تری دچار شکست می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اختلاف تنش اصلی سوم در دو فیبر، در صفحه‌ی ورودی بیشینه است.

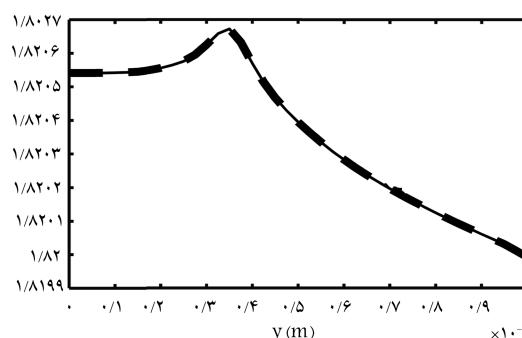
فاصله‌ی کانونی ناشی از دمش، معرف میزان عدسی‌شدگی در بلور است؛ هرچه میزان این فاصله بیشتر باشد عدسی‌شدگی نیز کمتر و کیفیت پرتو خروجی مناسب‌تر می‌شود. این فاصله‌ی کانونی در جدول ۴ برای فیبر تک‌هسته‌یی بر حسب توان دمشی تا توان 10° وات (توان شکست بلور) محاسبه شده است. چنان‌که مشاهده

جدول ۵. فواصل کانونی بر حسب توان‌های مختلف تا لحظه‌ی شکست لیزر فیبر در حالت چهارهسته‌یی.

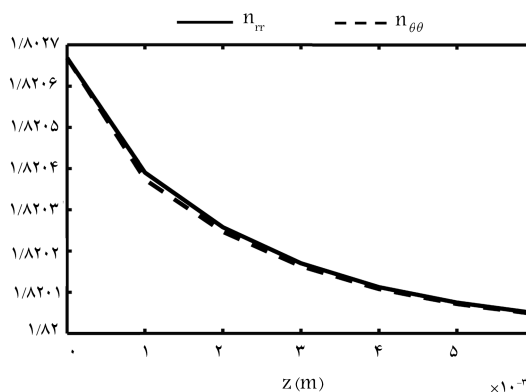
$P(W)$	$f(mm)$
۴	۰٫۹۷
۸	۰٫۴۸
۱۲	۰٫۳۲
۱۶	۰٫۲۴
۲۰	۰٫۱۹
۲۴	۰٫۱۶
۲۸	۰٫۱۳۹

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آثار حرارتی و تنش‌ی دمشی، در فیبرهای تک‌غلافی تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی بررسی شد. دمشی به صورت دیودی بوده و از طریق سطح ورودی فیبر به شکل طولی اعمال شده است. از آن‌جا که بارگذاری و هندسه‌ی فیبر متقارن است، از مدل یک‌چهارم برای شبیه‌سازی آثار حرارتی دمشی در محیط نرم‌افزاری المان محدود بهره گرفته شد و در تحلیل ترمومکانیکی از آنالیز میدان‌های کوپله استفاده شد. در بررسی دمایی و تنش‌ی فیبر تک‌هسته‌یی با توجه به خنک‌کاری سطحی مشاهده شد که با افزایش فاصله از مرکز هسته به سمت سطح غلاف، دما سیر نزولی دارد و در راستای طولی نیز با دور شدن از صفحه‌ی ورودی دمشی، تغییرات دما کاهش یافته و میزان دمای بلور به دمای سیال خنک‌کننده نزدیک می‌شود. در بخش توزیع تنش اصلی ملاحظه شد که مقدار تنش‌ها در مرکز فیبر روی صفحه‌ی ورودی، بیشینه است و بیشترین تنش فیبر، همان تنش اصلی سوم است. همچنین شکست بلور نیز با در نظر گرفتن تنش اصلی سوم و طبق معیار بیشینه تنش عمودی ارزیابی شده است. در این راستا میزان توان شکست بلور با توجه به مقاومت شکست آن، ۱۰ وات محاسبه شده است. در تحلیل حرارت و تنش در فیبر چهارهسته‌یی، برخلاف توزیع حرارت و تنش در فیبر تک‌هسته‌یی، بیشینه دما و بیشینه تنش (تنش اصلی سوم) در مرکز فیبر اتفاق نمی‌افتد، بلکه در مرکز هسته‌ها رخ می‌دهد. بر همین اساس مشاهده شده است که در توزیع حرارت و تنش در صفحه ورودی دمشی، مقادیر دما و تنش دارای یک مقدار بیشینه (قله) هستند. همچنین مقایسه‌ی بین فیبر تک‌هسته‌یی و چهارهسته‌یی نشان می‌دهد که در یک توان مشخص، میزان دما و تنش بیشینه فیبر چهارهسته‌یی به مراتب کوچک‌تر از فیبر تک‌هسته‌یی بوده و توان شکست آن در حدود سه برابر فیبر تک‌هسته‌یی است. بنابراین از لحاظ مقاومت ترمومکانیکی فیبر چهارهسته‌یی مناسب‌تر از فیبر تک‌هسته‌یی است. در بخش عدسی‌شدگی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان ورودی، فاصله‌ی کانونی در دو فیبر کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شده است که میزان فاصله‌ی کانونی در فیبر چهارهسته‌یی تقریباً چهار برابر فیبر تک‌هسته‌یی است. بنابراین در یک توان ثابت، استفاده از فیبر چهارهسته‌یی با لنز گرمایی کوچک‌تری همراه است.



الف) بعد عرضی (راستای داخل صفحه ورودی)؛



ب) بعد طولی.

شکل ۱۴. ضریب شکست‌های بلور فیبر لیزر چهارهسته‌یی.

پانویس‌ها

1. von misses
2. undercut
3. burn

4. edge
5. top hat
6. master oscillator power-amplifier
7. Wandera
8. CO2-laser

(References) منابع

1. Maiman, T. H., *Stimulated optical radiation in ruby*. Nature 187(06 August), pp. 493-494 (1960).
2. Brown, D. C. and Hoffman, H. J. "Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers", *IEEE Journal of quantum electronics*, **37**(2), pp. 207-217 (2001).
3. Fan, Y. X., Lu, F. Y., Hu, S. L. and et al. "Narrow-linewidth widely tunable hybrid Q-switched double-clad fiber laser", *Optics letters*, **28**(7), pp. 537-539 (2003).
4. Ma, Z., Gao, J., Li, D. and et al. "Thermal stress effects of the diode-end-pumped Nd: YLF slab", *Optics Communications*, **281**(13), pp. 3522-3526 (2008).
5. Babil, M. B. and Safari, E. "Thermal and stress analyses in an end-pumped Nd: YAG slab laser using finite element method", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **28**(8), pp. 3231-3236 (2014).
6. Sharma, R. S. and Molian, P. "Weldability of advanced high strength steels using an Yb: YAG disk laser", *Journal of Materials Processing Technology*, **211**(11), pp. 1888-1897 (2011).
7. Rafiei, J., Sabbaghzadeh, J., Asl, I. M. and et al. "Three-dimensional modeling of thermo-mechanical finite element analysis in edge-pumped composite Yb: YAG/YAG thin-disk laser", *Optics Communications*, **283**(18), pp. 3469-3474 (2010).
8. Shibib, K. S., Minshid, M. A. and Alattar, N. E., *Thermal and stress analysis in Nd: YAG laser rod with different double end pumping methods*, *Thermal Science*, **15**, pp.399-407 (2011).
9. Yang, X., Geng, A., Tan, J. and et al. "Investigation of the beam propagation in a pumped laser rod", *Optics Communications*, **283**(14), pp. 2896-2899 (2010).
10. Kuryntsev, S. V., Morushkin, A. E., and Gilmutdinov, A. K. "Fiber laser welding of austenitic steel and commercially pure copper butt joint", *Optics and Lasers in Engineering*, **90**, pp. 101-109 (2017).
11. Liu, T., Yang, Z. M., and Xu, S. H. "Analytical investigation on transient thermal effects in pulse end-pumped short-length fiber laser", *Optics express*, **17**(15), pp. 12875-12890 (2009).
12. Wang, W., Huang, L., Leng, J. and et al. "2kW CW near single mode all-fiber Ytterbium-doped fiber laser", *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, **126**(18), pp. 1712-1715 (2015).
13. Wandera, C., Salminen, A., Olsen, F. O. and et al. "Cutting of stainless steel with fiber and disk laser", *In International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, **2006**(1), pp. 404. Laser Institute of America (2018 September).
14. Koechner, W. "Transient thermal profile in optically pumped laser rods", *Journal of Applied Physics*, **44**(7), pp. 3162-3170 (1973).
15. Kaynak, I., Sen, F., and Sayman, O. "Thermo-elastic stress analysis of injection molding short glass fiber filled polymer composite disc with holes", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **27**(11), pp. 1117-1134 (2008).
16. Wang, B. L., and Han, J. C. "A finite element method for non-Fourier heat conduction in strong thermal shock environments", *Frontiers of Materials Science in China*, **4**(3), pp. 226-233 (2010).
17. Eggleston, J., Kane, T., Kuhn, K. and et al. "The slab geometry laser-part I: theory", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **20**(3), pp. 289-301 (1984).