



## Design and Analysis of the Parameters of Anend Pumped Nd:YVO4 Laser at Near Infrared Electromagnetic Spectrum

M. Babaie Tooski<sup>1</sup>  H.Ebadian<sup>\*2</sup>, A. Maleki<sup>3</sup>

\*Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Shahinshahr, Iran.

(Received: 2024/04/20 revised: 2024/06/11 Accepted:2024/07/10 published: 2024/07/24)

### Abstract


*This research presents the design and analysis of a solid-state laser tailing based on an Nd:YVO4 diode. Simulations predict a 43% optical-to-optical conversion efficiency, generating 25W of power at 1064nm with a 50W pumping power. Using LASCAD software, the analysis confirms the accuracy of the calculations for extractable power and laser intensifier stability. Additionally, COMSOL physical analysis software simulates the temperature of the laser crystal under optical pumping, indicating a maximum temperature increase of 300K at the crystal center. Our findings closely match the simulations conducted using Abaqus mechanical analysis software. The peak thermal stress, approximately 25 MPa, reaches only 50% of the Nd:YVO4 crystal's tolerable limit. This lies well within the safe operating range for optical pumping, ensuring the active material remains intact.*

**Keywords:** Nd:YVO4 Laser, End Pumping, Temperature and Stress Distribution, Laser Diode, Temperature Analysis, LASCAD

\* Corresponding author E-mail: morebody@yahoo.com

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

**Publisher:** Imam Hussein University

 Authors



طراحی و تحلیل پارامترهای یک لیزر دمش از انتهای Nd:YVO<sub>4</sub> واقع در

## باند مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیسی

مجید بابایی توسکی<sup>۱</sup>، حسن عبادیان<sup>۲\*</sup>، عباس ملکی<sup>۳</sup>

۱- پژوهشگر، ۲-۳ استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳)



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

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## چکیده

در این تحقیق نتایج طراحی و تحلیل یک لیزر حالت جامد دمش از انتهای دیودی Nd:YVO<sub>4</sub> ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی برای تولید توان ۲۵W در طول موج ۱۰۶۴nm با توان دمشی ۵۰W حاکی از بازده تبدیل نوری به نوری ۴۳٪ می‌باشد. مقایسه نتایج روش تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار LASCAD نشان دهنده توافق نتایج دو روش و دقت محاسبات در زمینه توان قابل استخراج و پایداری مشد لیزری می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی دمایی بلور لیزری تحت دمش نوری با نرم‌افزار تحلیل فیزیکی COMSOL، نشان دهنده افزایش دمای مرکز بلور تا حدود ۳۰۰K می‌باشد. نتایج به دست آمده در توافق خوبی با نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار تحلیل مکانیکی Abaqus می‌باشند. تنش مکانیکی القایی گرمایی در بیشترین مقدار حدود ۲۵Mpa بوده که حدود ۵۰٪ مقدار قابل تحمل برای بلور Nd:YVO<sub>4</sub> می‌باشد که در ناحیه امن دمش نوری بدون شکست ماده فعال قرار دارد.

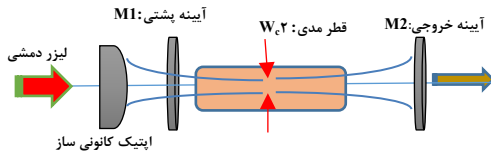
کلیدواژه‌ها: لیزر Nd:YVO<sub>4</sub>، دمش از انتها، توزیع دما و تنش، دیود لیزر، تحلیل دمایی، LASCAD.

## ۱- مقدمه

محیط‌های بهره تاحال حاضر مطالعات متنوعی انجام شده است [۱-۵]. در این میان، منابع لیزری دیسکی و میله‌ای دارای جایگاه خاصی بوده و به تفصیل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند [۶].

بلورهای Nd:YVO<sub>4</sub> به دلیل باند جذب وسیع و نیز سطح مقطع جذب بالا (۷ برابر بیشتر از Nd:YAG) و زمان فلوئورسانس کوتاه حدود ۹۰ میکروثانیه‌ای، باعث شده که این ماده در عملکرد فرکانس بالا و تولید پالس‌های کوتاه‌تر بر Nd:YAG ترجیح داده شود. این بلور دارای طول موج جذب ۸۰۸ نانومتر و دارای طول موج خروجی ۱۰۶۴ نانومتر می‌باشد (شکل ۱). همچنین این لیزر از لحاظ خواص ترمومکانیکی نسبت به YAG ضعیف‌تر بوده و برای توان‌های خروجی بالاتر از ۱۰۰W بایستی به دنبال محیط‌های بهره‌ای مانند YAG بود. توان بیش از ۲۵ وات از ساختارهای دمش از دواتها در نرخ تکرار ۱۰۰KHz و پهنای پالس ۱۰ns در پالس، به دست آمده است [۷].

لیزر Nd:YVO<sub>4</sub> یکی از لیزرهای حالت جامد با نرخ تکرار پالس بالا از مرتبه چند ده کیلوهرتز محسوب می‌شود. بلور Nd:YVO<sub>4</sub> دارای ساختار چهارترازه است و از بهره لیزری بالا برخوردار می‌باشد. جهت تولید طول موج چشم ایمن با نرخ تکرار بالا از این لیزر به عنوان منبع دمش ساختار نوسانگر پارامتریک نوری (OPO) استفاده می‌شود که ساختار OPO طول موج دمشی ۱۰۶۴ nm را به طول موج سیگنال ۱۵۳۰ nm با ضریب بهره از مرتبه حدود ۴۰ درصد تبدیل می‌نماید. به‌طور معمول لیزر اصلی Nd:YVO<sub>4</sub>، با ساختار دمش از انتها توسط دیود لیزرهای پیوسته فیبرکوپل استفاده می‌شود که منبع دمشی مناسبی برای این نوع لیزرها بحساب می‌آید. طول موج گسیلی دیودلیزرهای دمشی ۸۰۸ nm است که با جذب بلور Nd:YVO<sub>4</sub> منطبق است و بیشترین کارایی جذب را دارد. در این تحقیق ابتدا با توجه به نتایج مطالعات انجام شده، با محاسبه ضرایب بهره لیزری در مراحل مختلف تبدیل طول موج می‌توان توان دمشی مورد نیاز دیود لیزرهای دمشی را محاسبه نمود. در خصوص این نوع از

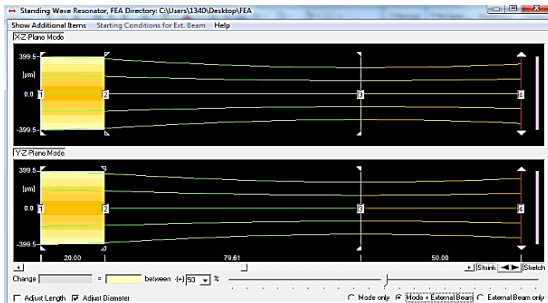


شکل (۲). طرح واره‌ای از مشدد لیزری دمش دیودی از انتها

## ۲-۱- فاصله کانونی القایی گرمایی

نرم‌افزار LASCAD یکی از نرم‌افزارهای طراحی لیزری می‌باشد که اخیراً مورد توجه طراحان لیزر واقع شده است [۹]. این سیستم بر مبنای انتشار پرتو پیرامحوری کار می‌کند و دارای قابلیت تعریف قطعات لیزری در مشدد می‌باشد. طرح‌واره‌ای از نرم‌افزار مذکور که شامل چیدمان قطعات لیزری می‌باشد، در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل (۳). مشخصات مشدد لیزر به همراه عدسی گرمایی و انتشار پرتو

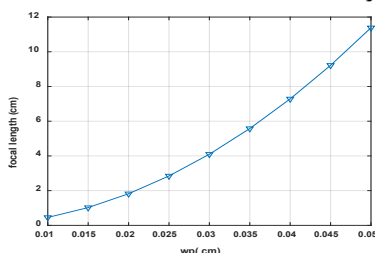


بیرون از مشدد اصلی

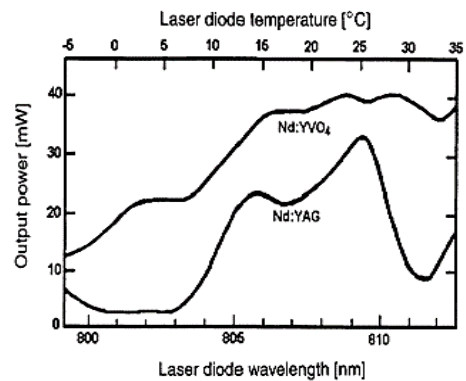
باتوجه به اینکه سامانه موردنظر از انواع لیزرهای دمش انتهایی می‌باشد، لذا رابطه موجود برای محاسبه عدسی گرمایی القایی به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$f = \frac{\pi k w_p^2}{p_n \left( \frac{dn}{dT} \right)} \left( \frac{1}{-\exp(-\alpha_0 l)} \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $W_p$  شعاع لکه دمشی لیزر دیود در صفحه فرودی محیط بهره،  $K$  رسانش گرمایی،  $dn/dT$  ضریب تغییرات دمایی ضریب شکست،  $P$  توان دمشی نوری در طول موج  $808 \text{ nm}$  و  $\alpha_0$  ضریب جذب و  $l$  طول محیط بهره می‌باشند [۱۰]. نمودار فاصله کانونی گرمایی برای سیستم لیزری مورد نظر بر اساس رابطه ۱، به ازای توان‌های نوری دمشی مختلف و برای درصد داپ  $0.5\%$  در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل (۴). فاصله کانونی گرمایی القایی بر حسب مقادیر مختلف لکه دمشی



شکل (۱). مقایسه بین عملکرد لیزر Nd:YVO4 و Nd:YAG [۸]

در شکل (۱) مقایسه‌ای بین بازده لیزر متداول دمش دیودی Nd:YVO4 و Nd:YAG انجام شده است [۸]. به‌طور کلی بازده این لیزر در توان‌های متوسط کم، از نوع لیزر Nd:YAG بالاتر می‌باشد.

در این تحقیق به بررسی یک نوع لیزر حالت جامد پالسی دمش دیودی با قابلیت تولید پالس‌های پراثرژی در نرخ تکرار پالس از مرتبه صد کیلوهرتز پرداخته خواهد شد. گرچه در مقالات مختلفی به این موضوع پرداخته شده است، اما تحقیق و مطالعه برخی از جنبه‌های طراحی که کمتر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته ضروری است. به‌عنوان مثال استفاده از نرم‌افزارهای طراحی جدید و مقایسه با روش‌های قبل، نکات آموزنده‌ای را در پی خواهد داشت و موجب ارتقای دانش علاقه‌مندان در این زمینه خواهد بود.

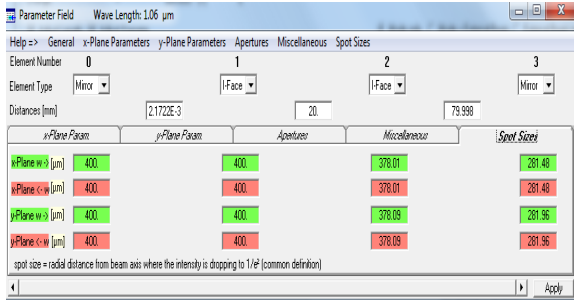
در این تحقیق علمی، ابتدا نتایج شبیه‌سازی توان و مسائل گرمایی توسط نرم‌افزار LASCAD ارائه شده است [۹]. در ادامه به محاسبات و بهینه‌سازی برخی پارامترهای طراحی مانند توان دمشی قابل تحمل و طول مشدد بهره لیزر پرداخته خواهد شد. در نهایت توزیع دمش با نرم‌افزارهای تحلیل فیزیکی مانند COMSOL پرداخته شده و با نتایج حاصل از نرم‌افزار شبیه‌ساز و تحلیل مکانیکی Abaqus مقایسه می‌شود.

## ۲- شبیه‌سازی‌ها

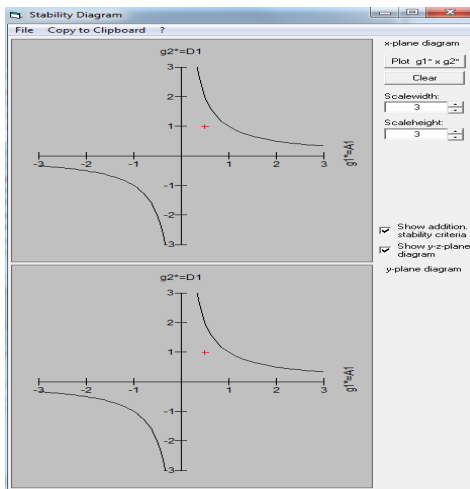
در این تحقیق، از نرم‌افزارهای طراحی لیزر LASCAD به‌منظور انجام محاسبات بازده و بررسی مسائل گرمایی در محیط بهره استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج روش تحلیلی مقایسه می‌شود و مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.

منبع لیزری مورد تحقیق یک نوع لیزر حالت جامد موج-پیوسته می‌باشد که با استفاده از منبع دمشی دیودی از انتها، تحت دمش نوری قرار گرفته است. طرح‌واره‌ای از مشدد لیزر دمش انتهایی Nd:YVO4 در شکل (۲) نشان داده شده است.

حدود ۰/۴۹۸ می‌باشد.



شکل (۷). اندازه لکه لیزر اصلی درون مشدد و روی قطعات اپتیکی و محیط فعال لیزری (عدد روی سطح ۳، Mirror حدود 281 μm می‌باشد.



شکل (۸). نمودار پایداری مشدد لیزر در دو محور X و Y

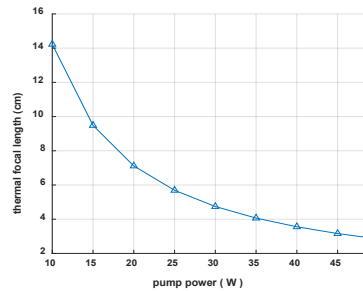
## ۲-۲- محاسبات تحلیلی توان خروجی و بهینه سازی برخی پارامترهای طراحی لیزر

در این طرح از بلور Nd:YVO<sub>4</sub> که دارای بازده بالایی در ساختار دمش از انتها دارد و همچنین برای نرخ تکرار بالا مناسب است، انتخاب شده است. معمولاً بازده این لیزرها در دمش دیود لیزر دارای بازده حدود ۴۰ درصد می‌باشند. بر اساس آنالیزهای موجود در زمینه معادلات نرخ، توان آستانه و خروجی و بازده شیب لیزر بر اساس رابطه ۲ قابل محاسبه می‌باشد [۱۰ و ۱۱]:

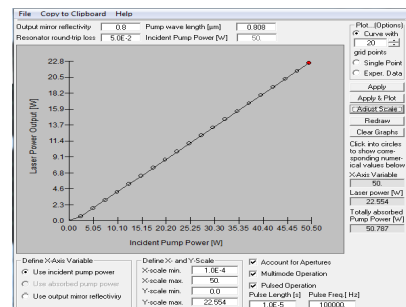
$$P_{out} = \frac{T}{\delta} \eta (P_{in} - P_{th}) = \frac{T}{\delta} \eta \left( P_{in} - \frac{I_{th} \delta V}{2 \eta_p l} \right) \quad (2)$$

در این رابطه،  $\eta = \eta_p \eta_m$  و  $\eta = \eta_{abs} \eta_t \eta_{st} \eta_Q$  و  $\eta_m$  و  $\eta_p$  بازده تطبیق مدی می‌باشد. پارامترهای بازده در جدول (۱) شرح داده شده اند. در این روابط T ضریب عبور آینه خروجی لیزر،  $\delta$  اتلاف رفت و برگشت مشدد  $P_{in}$  توان نوری فرودی،  $\eta_p = \eta_t \eta_a \eta_Q$  که به ترتیب برابر حاصلضرب بازده انتقال، بازده جذب و بازده کوانتومی می‌باشد. V و  $\eta_0$  به ترتیب حجم مدی موثر و بازده

همچنین مقدار فاصله کانونی القایی گرمایی برای قطر لکه دمشی ۴۰۰ μm بازای مقادیر مختلف توان دمشی در شکل (۵) رسم شده است. با افزایش توان دمش، می‌توان مشاهده نمود که فاصله کانونی القایی دمشی رفتار کاهش از خود نشان می‌دهد.



شکل (۵). مقدار فاصله کانونی القایی گرمایی برای قطر لکه ۴۰۰ μm مقدار فاصله کانونی القایی گرمایی محاسبه شده با نرم افزار LASCAD با شرایط موجود در روش تحلیلی برای لکه ۴۰۰ μm حدود ۱۰cm به دست آمد که اختلاف اندکی با مقدار پیش‌بینی شده در شکل (۴) دارد. در ادامه شبیه‌سازی‌ها به محاسبه مقدار توان قابل استخراج از سامانه لیزری پرداخته خواهد شد. ابتدا به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی داده‌های اولیه در نرم‌افزارهای اولیه در نرم‌افزار LASCAD خواهیم پرداخت. در شکل (۶) نمودار توان خروجی لیزر برحسب توان دمشی ۵۰ وات، بر اساس نتایج شبیه‌سازی با LASCAD نشان داده شده است که نشان‌دهنده بازده نوری به نوری حدود ۴۵ درصد بوده و توان خروجی پیوسته ۲۲/۵ وات را پیش‌بینی می‌نماید. همچنین بر اساس نتایج شکل (۶)، نمودار توان خروجی لیزر برحسب ضریب بازتاب آینه خروجی لیزر در بهترین بازده حدود ۸۰٪ پیش‌بینی شده است.

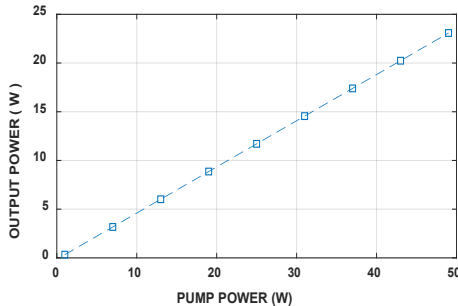


شکل (۶). نمودار توان خروجی لیزر برحسب توان دمشی بیشینه ۵۰ وات نشان داده شده است

نتایج محاسبات این نرم‌افزار نشان می‌دهد که کمر پرتو در حداقل مقدار که حدود ۲۸۱ میکرومتر می‌باشد، بر روی آینه خروجی لیزر قرار خواهد گرفت.

در شکل (۷) مشخصات اندازه لکه لیزر درون مشدد به همراه طول مشدد آورده شده است. همچنین در شکل (۸) نمودار پایداری مشدد لیزر در دو محور X و Y نمایش داده شده است. پایداری این مشدد در نزدیکی نقطه پایداری ۰/۵ و

می‌کنند. این نتایج شبیه سازی با استفاده از کدنویسی معادلات نرخ لیزر با نتایج شبیه سازی نرم افزار LASCAD تطابق بسیار بالایی دارد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.



شکل (۹). پیش‌بینی توان خروجی لیزر برحسب توان ورودی دمشی

به‌منظور محاسبه حجم مدی، نیاز است که کمر پرتو در مشدد لیزری محاسبه شود. شعاع مدی لیزر بر اساس روابط موجود در زمینه مشددهای لیزری پایدار به‌صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود. این رابطه اثر عدسی گرمایی را در محاسبه کمر پرتو لحاظ می‌نماید. در این رابطه پارامترهای پایداری مشدد شامل محیط بهره،  $g^*$  ها به‌عنوان پارامترهای هندسی مشدد فعال، نیز وارد شده‌اند.

$W_c$

(۳)

در این رابطه، مقادیر پارامترها عبارت‌اند از:

$$g_i^* = g_i - Dd_i \left(1 - \frac{d_i}{R_i}\right) \quad \text{و} \quad L^* = d_1 + d_2 - Dd_1d_2$$

می‌باشد که کمیت  $g_i = 1 - \left(\frac{d_1+d_2}{R_i}\right)$  است. در روابط بالا،  $d$  فاصله صفحات اصلی محیط بهره تا آینه‌های خروجی،  $R$  شعاع انحنای آینه‌های مشدد و  $g$  ها پارامترهای پایداری مشدد هستند. در این رابطه  $W_{p0}$  شعاع در کمر پرتو دمشی می‌باشد و  $Z_0$  صفحه کانونی باریکه دمش در محیط فعال لیزری می‌باشد.

با محاسبه حاصل ضرب پارامترهای پایداری مشدد لیزری به‌صورت  $g_1^*g_2^*$  می‌توان دریافت که به ازای طول‌های مختلف مشدد لیزری، این مشدد به ازای توان جذب شده در چه طولی از مشدد در ناحیه پایداری قرار دارد. با قرار دادن مقادیر محاسباتی اولیه مانند توان نوری  $D$  محیط بهره مورد دمش نوری، و پارامترهای شعاع انحنای  $R_1 = \infty$  و  $R_2 = 100 \text{ cm}$  نتایج در شکل (۹) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، مشددهای لیزری به طول ۹۰ mm و ۱۰۰ در ناحیه پایداری واقع هستند و تا توان جذب شده بیش از ۳۰ W در این ناحیه باقی خواهند ماند. تحلیل نواحی پایداری مشدد لیزری نشان‌دهنده این موضوع است که می‌توان مشدد لیزری با ابعاد کوتاه را با حضور در ناحیه پایداری مشدد لیزری طراحی و تولید نمود.

همپوشانی می‌باشند. به منظور محاسبه پارامترهای مورد نیاز در طراحی لیزر دمش انتهایی  $\text{Nd:YVO}_4$  لازم است مقادیر اولیه و برخی پارامترها تعریف شوند. در جدول ۲ این مقادیر خلاصه شده‌اند.

جدول (۱). پارامترهای اولیه طراحی لیزر

عنوان پارامتر	نشان	مقدار پارامتر
ضریب جذب	$\alpha$ (1/cm)	۱۰
پارامتر گرم‌کنندگی	$\xi$	۰/۲۴
میزان داپ	Dop level	٪ ۰/۵
ابعاد محیط فعال	$l \times w \times h$ (mm <sup>3</sup> )	$4 \times 4 \times 10$
پارامتر کیفیت	$M^2$	۵
ضریب شکست $\text{Nd:YVO}_4$	$n$	۲/۱۶۵
طول محیط بهره	$l$	۱۰
توان نوری دمشی در $808 \text{ nm}$	$P_{in}(w)$	۵۰
چگالی انرژی اشباع	$(w/\text{cm}^2) I_s$	$2/3 \times 10^4$
بازده کوانتومی	$\eta_Q$	۱~
بازده استوکس	$\eta_S$	۰/۷۶
بازده جذب	$\eta_{abs}$	۰/۸۰
بازده انتقال	$\eta_t$	۰/۷۵

جدول (۲). پارامترهای خروجی در شبیه‌سازی تحلیلی

عنوان پارامتر	نشان	مقدار پارامتر
عدسی گرمایی القایی	$f_{th}$	وابسته به توان دمشی
کمر پرتو دمشی (میکرون)	$W_{p0}$	۳۰۰
اتلاف رفت و برگشت	$\delta$	۰/۰۶
بازتابندگی آینه خروجی	$R$	۰/۹۵
بازده کل	$\eta = \eta_t \eta_S \eta_Q \eta_{abs} \eta_B$	۰/۲۲
ضریب بهره سیگنال کوچک	$g_0 = \sigma \tau_f \eta P_{in} / h\nu_l V$	۰/۰۱۵~

به‌منظور محاسبه توان خروجی لیزر و توان آستانه، می‌توان از رابطه ۲ استفاده نمود. سایر پارامترهای مورد نظر شبیه‌سازی‌ها از جدول (۲) استخراج شده است. پیش‌بینی توان خروجی بر حسب توان ورودی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. پارامترهای طراحی از جدول (۱) استخراج شده‌اند. به ازای توان دمشی ۵۰ W، توان خروجی حدود  $23/5 \text{ W}$  بدست خواهد آمد که حاکی از بازده ۴۷٪ نوری  $808 \text{ nm}$  به  $1064 \text{ nm}$  نانومتر می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها مقدار توان دمشی آستانه را حدود  $5/5$  وات پیش‌بینی

مقدار بیشینه تنش القایی گرمایی یکی از عوامل محدودکننده در استخراج توان از محیطهای بهره حالت جامد می‌باشد. این مقدار توسط پارامتر  $\sigma_{max}$  تعیین می‌شود [۱۳ و ۱۴]:

$$\sigma_{max} = \alpha_T E \frac{\xi P_{abs}}{4\pi K_c} \frac{\alpha}{1-e^{-\alpha l}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{W(Z)}{r_b} \right)^2 \right] \quad (6)$$

در این رابطه  $\alpha_T$  ضریب انبساط حرارتی،  $E$  ماژول یانگ،  $P_{abs}$  توان نوری جذب شده و  $K_c$  ضریب انتقال حرارت می‌باشند. همچنین در این رابطه فرض می‌شود که برای بیشترین جذب مقدار  $1 \gg \alpha l$  باشد و نیز  $\frac{\omega_p}{r_b} \leq 1/2$  فرض میشود تا از تلفات دهانه جلوگیری شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که توان دمشی واقع در محدوده شکست برای یک لیزر دمش انتهایی، به طور معکوس متناسب است با ضریب جذب ماده که به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود [۱۳]:

$$P_{lim} = \frac{1}{\alpha} \frac{4\pi R_T}{\xi} \quad (7)$$

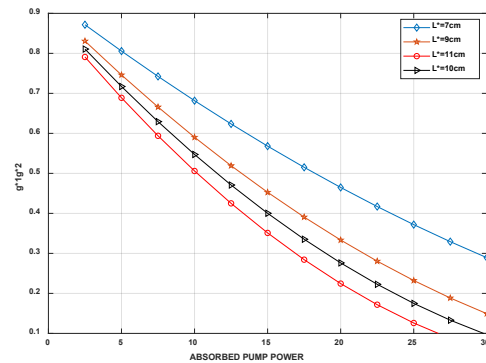
در این رابطه  $\xi$  پارامتر گرم‌کنندگی،  $\alpha$  ضریب جذب طول موج دمشی و  $R_T$  پارامتر شوک گرمایی بلور است که به خواص گرمایی و مکانیکی ماده میزبان لیزری وابسته می‌باشد. مقدار پارامتر گرم‌کنندگی یا  $\xi$  برای حالت‌های مختلف با لیزر و بدون لیزر به صورت تجربی بررسی شده‌است. این بررسی نشان می‌دهد که برای حالت داپ ۰/۵٪ مقدار پارامتر  $\xi$  برای حالت بدون لیزر و با لیزر به ترتیب حدود ۰/۳۶ و ۰/۲۴ می‌باشد. با افزایش مقدار داپ، این کمیت رفتار افزایشی از خود نشان می‌دهد. بر اساس این داده‌ها و برای مقادیر مختلف، مقدار توان قابل اعمال با رابطه ۷ قابل محاسبه می‌باشد.

**جدول (۳).** مشخصات گرمایی و محاسبه مقدار محدوده توان

Nd:YVO<sub>4</sub> برای بلور

مقدار عددی	پارامتر
۷	$\alpha$ (1/cm)
۴/۸	$R_T$ (w/cm)
۰/۵٪	Dop level
۱۰	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )

ضریب جذب کریستال لیزری با افزایش غلظت داپ افزایش خطی دارد. به عبارت دیگر درصد آلاینش پایین یون Nd<sup>3+</sup> باعث گسترش محدوده توان دمشی بدون شکست، خواهد شد. از طرفی کاهش غلظت یون فعال، گرچه محدوده شکستی را بهبود می‌بخشد، اما بازده عملکرد مد اصلی TEM<sub>00</sub> را به دلیل بازده همپوشانی کمتر، کاهش خواهد داد؛ بنابراین در طراحی لیزرهای



شکل (۱۰). بستگی پایداری مشدد به توان جذب شده برای طول‌های مختلف مشدد لیزری

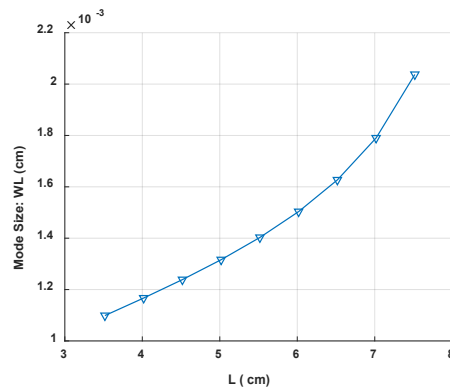
اندازه باریکه دمشی با استفاده از روابط انتشاری و مفاهیم پارامتر کیفیت پرتو،  $M^2_p$ ، بر اساس رابطه ۴-۱ قابل محاسبه می‌باشد [۱۴]:

$$w_p^4(z) = w_{p0}^4 \left\{ 1 + \left[ \frac{\lambda p M_p^2}{\pi \pi w_{p0}^2} (z - z_0) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن اثر عدسی گرمایی، اندازه مد در وجه ورودی بلور لیزر، با رابطه ۵-۱ تعیین می‌شود:

$$L = L^* + l \left[ \left( \frac{1}{n} \right) - 1 \right]; W_l = \left( \frac{\lambda f_{th}}{\pi} \sqrt{\frac{L}{2f_{th} - L}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

در این روابط  $L^*$  طول رزوناتور،  $l$  طول بلور فعال،  $n$  ضریب شکست محیط فعال می‌باشد. با استفاده از داده‌های اولیه جدول (۱) و رابطه ۵، مقدار شعاع مدی لیزر به‌ازای مقادیر مختلف طول مشدد قابل محاسبه می‌باشد. نتایج در شکل (۱۱) ارائه شده‌است.



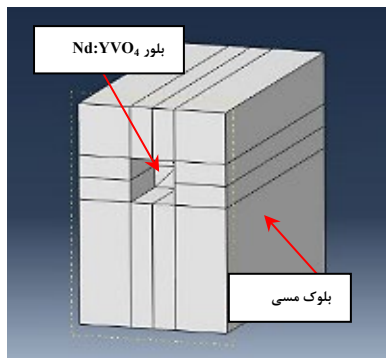
شکل (۱۱). شعاع مدی لیزر به‌ازای مقادیر مختلف طول مشدد

در یک لیزر دمش انتهایی عدسی، گرمایی القایی یک لنز کامل نیست و یک لنز ابیراهیده خواهد بود. بررسی‌ها نشان داده که اتلاف پراشی القایی گرمایی در یک توان دمشی مشخص، یک تابع سریع - افزایشی از نسبت اندازه دمش به‌اندازه مد می‌باشد. در عمل، تعامل بین بازده همپوشانی و اتلاف القایی گرمایی نسبت اندازه مد به‌اندازه لکه دمش، را به حدود ۱-۱/۶ محدود می‌سازد [۱۲ و ۱۳].

داخل محیط بهره کوپل می‌شود. مقدار قطر لکه در وجه ورودی Nd:YVO<sub>4</sub> حدود ۴۰۰ μm می‌باشد. در ادامه به بررسی نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار Abaqus و COMSOL پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- نتایج شبیه‌سازی گرمایی با نرم‌افزار Abaqus

در این نرم‌افزار طراحی براین اساس می‌باشد که ماده فعال لیزری درون یک کاواک مسی قرار دارد و یک سمت کاواک توسط TEC در دمای ۲۵ درجه نگه داشته می‌شود (شکل ۱۳). همچنین پارامترهای انتقال حرارت برای کاواک مسی و همچنین ماده فعال لیزری در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۳). طرح‌واره‌ای از کاواک به همراه ماده فعال لیزری درون کاواک

جدول (۴). پارامترهای گرمایی بستریه خنک ساز مسی و محیط بهره Nd:YVO<sub>4</sub>

پارامتر	Nd:YVO <sub>4</sub>	مس	ماده
$K$	5.1	400	رسانش گرمایی ( $W/m.k$ )
$\rho$	4220	8900	چگالی ( $kg/m^3$ )
$C_p$	550	385	ظرفیت گرمایی ( $J/kg.K$ )

در اینجا فرض بر آن می‌باشد که تماس اتصالی بین محیط بهره لیزر و کاواک مسی به صورت کاملاً ایده‌آل می‌باشد. یعنی انتقال حرارت بین محیط بهره لیزر و مس به صورت کاملاً انجام می‌شود.

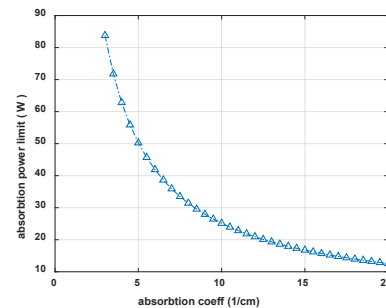
باتوجه به نمایه دمشی لیزر دیود با نمایه سوپر گوسی  $n=6$ ، توان  $P(x, y, z)$  در محل بلور Nd:YVO<sub>4</sub> و بار گرمایی موجود  $Q(x, y, z)$ ، به صورت رابطه‌های ۸ و ۹ بیان می‌شود:

$$P(x, y, z) = \frac{2}{\pi \omega_p^2} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega_p^2}} \quad (8)$$

$$Q(x, y, z) = \mu_h P_{in} P(x, y, z) \cdot \frac{\alpha_T}{1 - e^{-\alpha_T}} \cdot e^{-\alpha_T z} \quad (9)$$

در این روابط،  $\mu_h$  ضریب انتقال گرما،  $\alpha_T$  ضریب انبساط

دمش انتهایی بایستی این نکته در خصوص میزان توان قابل‌استخراج مدنظر قرار گیرد. در شکل (۱۲) منحنی بستگی توان قابل جذب در محدوده توان شکستی بلور بر حسب ضریب جذب (درصد داپ) بر اساس رابطه ۷ رسم شده است. با افزایش ضریب جذب، مقدار توان مجاز قابل جذب در محیط بهره کاهش خواهد یافت. در این شکل، برای مقدار ضریب جذب حدود ( $cm^{-1}$ ) ۷ مقدار توان قابل جذب حدود ۳۵ وات می‌باشد. به عبارت دیگر حداکثر توان قابل جذب در ماده ۳۵W می‌باشد و نقطه امن کاری سیستم خواهد بود.



شکل (۱۲). منحنی بستگی توان قابل جذب در محدوده توان

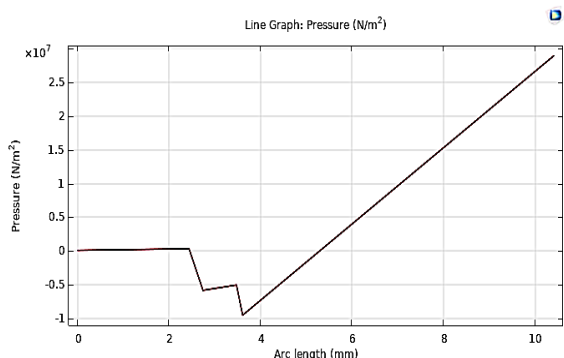
شکستی بلور بر حسب ضریب جذب (درصد داپ)

بررسی‌ها نشان داده که برای یک قطر لکه دمشی حدود ۴۰۰ μm به ازای مقادیر غلظت داپ ۰/۵، ۱ و ۲ درصد در بلور Nd:YVO<sub>4</sub>، به ترتیب حداکثر توان دمشی ۲۳، ۳۵ و ۱۵ وات می‌باشد [۱۲].

نتایج فوق نشان می‌دهد که قطر لکه دمشی می‌تواند به مقدار توان واقع در محدوده شکستی ماده فعال اثرگذار باشد. هر چه قطر لکه بزرگ‌تر باشد، امکان افزایش توان دمشی بیش‌تر خواهد بود؛ ولی در این بین می‌تواند اتلاف پراشی مدهای مراتب بالاتر و عملکرد چند مدی را القا کند. بایستی یک تعامل بین اندازه دمشی و عملکرد لیزر ایجاد نمود [۱۵]. با استفاده از بلورهای الکترواپتیکی مانند RTP و یا بلورهای آکوستوآپتیکی می‌توان این نوع از لیزرهای حالت جامد را در مد کیوسویچ شده به کاربرد. بسته به طول مشدد لیزری، می‌توان پالس‌های لیزری از مرتبه ۴ - ۲ نانوثانیه در نرخ تکرار ۱۰۰ KHz تولید نمود.

### ۳- آنالیز حرارتی محیط بهره لیزری

در این بخش به بررسی و تحلیل مسائل حرارتی محیط بهره لیزری با ابعاد هندسی 4mm×4mm×10mm پرداخته خواهد شد. در این بخش از دو روش برای تحلیل و صحت سنجی با گرمایی و تحلیل دمایی بلور لیزری تحت دمشی نوری خواهیم پرداخت. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی گفته شد، این محیط فعال لیزری تحت دمشی نوری از انتهای طول موج ۸۰۸nm با توان ۵۰w قرار دارد. با استفاده از اپتیک مناسب پرتو دمشی از انتها به



شکل (۱۶). توزیع تنش در نمایش خطی در طول محیط بهره تحت دمش نوری

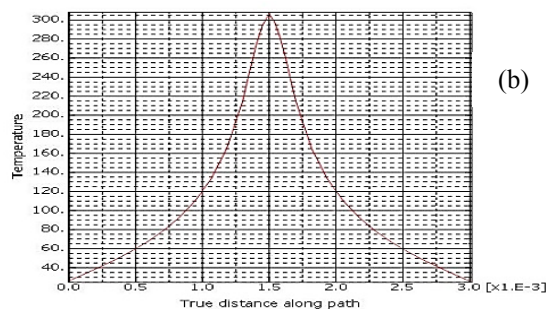
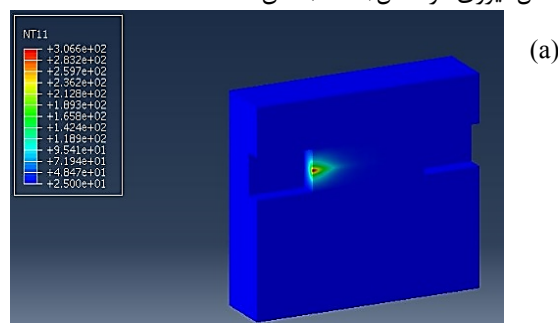
همان گونه که در شکل (۱۵b) مشاهده می شود، دما در طول ماده تحت دمش، با انتشار در طول، کاهش می یابد. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل های (۱۴) و (۱۵) نشان می دهد که در هر دو شبیه سازی افزایش دمایی حدود ۳۰۰ K در اثر دمش از انتها در محیط فعال القا خواهد شد. ادامه بررسی ها در زمینه اثرات حرارتی و توزیع تنش های مکانیکی ناشی از دمش انتهایی، حاکی از وجود حدود ۲۵MPa تنش مکانیکی القایی گرمایی در ماده می باشد که حدود ۵۰٪ مقدار قابل تحمل توسط ماده می باشد (۵۳MPa). به عبارت دیگر ماده در این شرایط، توانایی تحمل تنش های القایی گرمایی را خواهد داشت و به ناحیه شکست مکانیکی وارد نخواهد شد.

به منظور بررسی تقسیم تنش در طول ماده، برشی در آن ایجاد شده و نمودار توزیع تنش با نمایش خطی، در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که تا فاصله انتشاری ۴mm، تنش فشاری و از آن به بعد کششی خواهد بود.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج شبیه سازی یک لیزر توان بالای دمش انتهایی از نوع ۴ Nd:YVO<sub>4</sub> ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده این است که می توان سامانه لیزری پرتوان دمش از انتها با توان دمش از مرتبه ۵۰w را بدون وارد شدن به ناحیه تخریب مکانیکی و شکست بلور اجرا نمود. تحلیل نواحی پایداری مشدد لیزری نشان دهنده این موضوع است که می توان مشدد لیزری با ابعاد کوتاه را با حضور در ناحیه پایداری مشدد لیزری طراحی و تولید نمود. این لیزر با توجه به دمش نوری بالا و نیز طراحی مناسب کیوسوییچ الکتروپتیک و یا آکوستوپتیک، توانایی تولید قطاری از پالس های از نرخ ۱۰۰ کیلوهرتز را دارا می باشد. همچنین اطمینان از صحت نتایج شبیه سازی با نرم افزار تحلیل فیزیکی COMSOL نشان دهنده قابلیت بالای تحلیل حرارتی این نرم افزار می باشد.

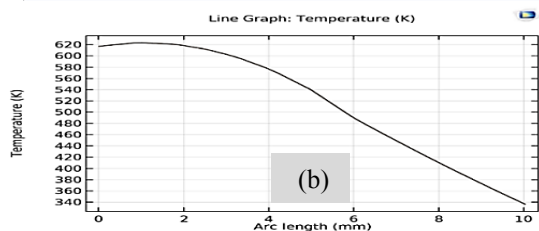
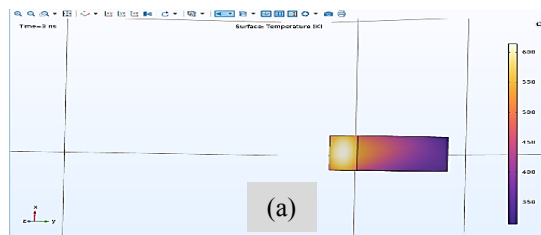
گرمایی، و  $P_{in}$  توان نوری دمشی می باشد. با استفاده از روابط ۸ و ۹ و انجام تنظیمات پارامتری لازم در نرم افزار، نتایج توزیع دمایی در بلور دمش از انتها به صورت شکل (۱۴a) می باشد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، حداکثر دمای ماده تحت دمش حدود ۳۰۶K می باشد. همچنین توزیع دما به صورت برش از مقطع ماده فعال لیزری در شکل (۱۴b) نشان داده شده است.



شکل (۱۴). توزیع دما در محل ماده لیزری تحت دمش از انتها و b: دما در مقطع برش خورده ماده فعال لیزری

#### ۳-۲ نتایج شبیه سازی گرمایی با نرم افزار COMSOL

به منظور انجام صحت سنجی نتایج فوق، شبیه سازی دمشی مشابهی توسط نرم افزار COMSOL انجام پذیرفت. نتایج این شبیه سازی در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۵). نتایج شبیه سازی دمایی با نرم افزار COMSOL. a: توزیع دما در حجم محیط بهره تحت دمش از انتها و b: توزیع دما در طول محیط بهره



ELECTRONICS.vol. 32, pp.2010-2016, 1996.  
DOI: 10.1109/3.541689

## ۵- مراجع

[12] X. Peng, Member, IEEE, Lei Xu, and A. Asundi, "Power Scaling of Diode-Pumped Nd:YVO4 Lasers", IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, vol. 38, pp. 1291-1299, 2002. DOI: 10.1109/JQE.2002.802443

[13] Y. F. Chen, T. M. Huang, C. C. Liao, Y. P. Lan, and S. C. Wang, "Efficient High-Power Diode-End-Pumped TEM00 Nd:YVO Laser", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS vol.11, pp. 1241-1243,1999. DOI:10.1364/OL.25.001016

[14] Yung-Fu Chen, Y. P. Lan and S. C. Wang, "Efficient high-power diode-end-pumped TEM00 Nd:YVO4 laser with a planar cavity", OPTICS LETTERS .vol. 25,1016-1018, 2000.DOI: 10.1364/OL.25.001016

[15] X. Yan, Liu, L. Huang, Y. Wang, X. Huang, D. Wang, and M. Gong, "A high efficient one-end-pumped TEM00 laser with optimal pump mode" Laser Phys. Lett. Vol. 5, pp.185-188, 2008. DOI: 10.1002/lapl.200710109

[1] Wang, L. Huang, M. Gong, H. Zhang, F. He, and M. Lei, "4.5-ns Pulse Generation at a 500-kHz Repetition Rate, from a Short-Cavity Acousto-optically Q-switched Nd:YVO4 Laser", Laser Physics, Vol. 17, pp. 1199-1203. 2007. DOI: 10.1134/S1054660X07100015

[2] Y. Wang, L. Huang, H. Zhang, X. Yan, Q. Liu, and M. Gong "A fundamental mode miniature acousto-optically Q-switched Nd:YVO4 laser with short pulse width at high repetition rates", Laser Phys. Lett. vol 5, pp. 286-290, 2008. DOI:10.1002/lapl.200710127

[3] Ke Liu, Ying Chen, Fangqin Li, Hongyan Xu, Nan Zong, Hongtao Yuan, Lei Yuan, Yong Bo, Qinjun Peng, Dafu Cui, and Zuyan Xu, "High peak power 4.7 ns electro-optic cavity dumped TEM00 1342-nm Nd:YVO4 laser", APPLIED OPTICS. Vol. 54, pp.717-720, 2015. DOI: 10.1364/AO.54.000717

[4] Qiu-Run He, Jing Guo, Bao-Fu Zhang, Zhong-Xing Jiao, "High-Repetition-Rate and High-Beam-Quality Laser Pulses with 1.5 MW Peak Power Generation from a Two-Stage Nd:YVO4 Amplifier", CHIN. PHYS. LETT. Vol. 36, pp. 114202-5, 2019. DOI: 10.1088/0256-307X/36/11/114202

[5] F. Thies, N. Bode, P. Oppermann, M. Frede, B. Schulz, AND B. Willke, "Nd:YVO4 high-power master oscillator power amplifier laser system for second-generation gravitational wave detectors", Optics Letters, Vol. 44, pp.719-722, 2019 . DOI: 10.1364/OL.44.000719

[6] M. R. Jafar fard, M. H. Daemi, "Measurement of the angle and bending of the two sides of the active medium of the laser disk using a single interference photo", APPL. Elrctromagnetic, vol 9, no.2 pp.56-62, 2021. (InPersian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2645515.3.1400.9.2.7.6>

[7] Y. F. Chen, " Design Criteria for Concentration Optimization in Scaling Diode End-Pumped Lasers to High Powers: Influence of Thermal Fracture", IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, vol. 35, pp. 234-239, 1999. DOI: 10.1109/3.740746

[8] W. Koechner, " solid state laser engineering", Springer, 120-128, 2006.

[9] LASCAD, laser simulation software, <https://www.lascad.com/>

[10] X. Peng, A. Asundi, " Heating measurements in diode-end-pumped Nd:YVO4 lasers", , Opt. Eng. Vol. 40, pp. 1100-1105, 2001. DOI: 10.1117/1.1365105

[11] Y. F. Chen, T. S. Liao, C. F. Kao, T. M. Huang, K. H. Lin, and S. C. Wang, " Optimization of Fiber-Coupled Laser-Diode End-Pumped Lasers: Influence of Pump-Beam Quality", IEEE JOURNAL OF QUANTUM