



دانشگاه سیستان و بلوچستان  
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

**بررسی عددی انتقال حرارت هذلولوی در یک  
جسم استوانه ای تحت تابش فوق سریع لیزر  
متحرک گاوسی**

استاد راهنما:

دکتر علیرضا حسین نژاد دوین

استاد مشاور:

دکتر سعید فراهت

تحقیق و نگارش:

مهران پارسایی برازجانی

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

شهریور ۱۳۹۰

## بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان «بررسی عددی انتقال حرارت هذلولوی در یک دامنه استوانه ای تحت تابش فوق سریع لیزر متحرک گاوسی»، قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد توسط دانشجو مهران پارسایی برازجانی تحت راهنمایی استاد پایان نامه دکتر علیرضا حسین نژاد دوین تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

(نام و امضاء دانشجو)

تاریخ

امضاء

نام و نام خانوادگی

استاد راهنما:

استاد راهنما:

استاد مشاور:

استاد مشاور:

داور ۱:

داور ۲:

نماینده تحصیلات تکمیلی:



دانشگاه سیستان و بلوچستان  
تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مهران پارسایی تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

امضاء

تقدیم به:

خانواده ام برای همه فداکاری ها و صبوری ها

## سپاسگزاری

این پایان نامه با همه فرازها و فرودها و سختی هایی که به دنبال داشت همراه با خاطره فراموش ناشدنی همراهی عزیزانی است که همه سختی ها همواره در کنار چنین خاطرات شیرینی به فراموشی سپرده می شود. نخست بر خود لازم می دانم از همه اساتید محترم گروه مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی شهید نیکبخت دانشگاه سیستان و بلوچستان تشکر و قدردانی نمایم، که در طول این دوره مطالب بسیاری از ایشان آموختم. مراتب ویژه قدردانی و سپاس را به استاد راهنمای ارجمند خود جناب آقای دکتر حسین نژاد تقدیم می دارم که در این دوره به نسبت طولانی، ضمن دلسوزی فراوان و ارایه بی دریغ آموخته ها، تجربیات و وقت خود، در جریان مشکلات جانبی و غیر مربوط نیز از توجه ایشان بی بهره نبوده ام. از خداوند سبحان تداوم توفیقات این بزرگوار و سایر اساتید محترم را خواهانم. ضمن آنکه جرقه اولیه تدوین پیشنهاد این پروژه به دوره کارشناسی و استاد ارجمند جناب آقای دکتر پرویز ملک زاده برمی گردد که در این جا از زحمات و توجهات ایشان، یاد و قدردانی می شود. لازم است بار دیگر بدین وسیله از شکیبایی، همراهی، فداکاری و بذل توجه مادی و معنوی خانواده خود، به خصوص پدر و مادرم، برادرانم مهرداد و حسین، و خواهرانم فاطمه و فرزانه کمال تشکر را نمایم و از بهترین پاداش دهندگان اجر فراوان برای ایشان را خواستار باشم، که تنها او توانا بر جبران چنین محبت هایی است.

مراتب سپاس و ستایش خود را به سوی خداوند روزی بخش و رحمت کننده، به خاطر همه محبت و لطف و عنایتی که به من دارد و رشحه ای از آن در بالای این مقال گردآورده شده است، ابراز می دارم که بیش از شایستگی و لیاقت، رحمت گسترده خود را به این ناتوان، بی نظر به خطای بنده تقصیر کارش، ارزانی و نازل می کند، و با گسترانیدن جبهه خشوع و عبودیت در برابر ذات بی انتهای او، در ستایش او به مولا و سرور خود، آن امام متقین و شیر همواره پیروز الهی اقتدا می کنم. آنجا که در ترنم است:

«خدایا! تویی سزاوار نیکو ستودن و بسیار و بیشمارت آفرین نمودن. اگر امید به تو بندند، بهترین امید بسته ای، و اگر چشم از تو دارند، این چشمداشت را هر چه نیکوتر، شایسته. خدایا در نعمت بر من گشادی و مرا زبانی دادی که بدان مدح جز تو را نخوانم و بر کس غیر تو آفرین نرانم. و بدان کسانی را نستایم که نومید کنند، یا گمان آن بود که نبخشند. خدایا! مرا به درگاه تو نیازی است که آن نیاز را جز فضل تو به بی نیازی نرساند، و آن درویشی را جز عطا و بخشش تو به توانگری مبدل نگرداند. خدایا!، خشنودی خود را بهره ما فرما، هم در این حال که داریم، و بی نیازمان گردان از اینکه جز به سوی تو دست برداریم، که تو بر هر چیز توانایی.»

نهج البلاغه، ترجمه دکتر سید جعفر شهیدی

## چکیده:

به دلیل تولید انرژی زیاد در عملیات گرمایی با دوره زمانی کوتاه که می توان آن را در بهبود کیفی مواد بوسیله لیزر یافت، مدل هدایت گرمای قدیمی فوریه دیگر معتبر نیست و مدل غیر فوریری آن که منجر به یک معادله هذلولوی می گردد، می بایست مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه با استفاده از یک مدل سه بعدی انتقال حرارت غیر فوریری، یک کد کامپیوتری بر اساس روش المان محدود (FEM) توسعه یافته است تا به مطالعه اثر لیزر در یک استوانه توپر تحت تابش غیر متقارن پرداخته شود. تپ لیزری که به لحاظ مکانی تابعیت گاوسی و به لحاظ زمانی تابعیت غیر گاوسی دارد، بر اساس قانون بیر به صورت یک چشمه گرمایی حجمی با کاهش توانی مدل شده است. اثر پارامترهای مختلف مانند زمان واهلش گرمایی، عدد بایوت، شعاع لیزر و دوره زمانی بررسی شده است. نتایج با مدل سنتی فوریه مقایسه گردیده است و تطابق خوبی را با حل تحلیلی در حالت چشمه گرمایی قابل انتگرال گیری، نمایش می دهد. نتایج نشان می دهد که در مدل غیر فوریری انتقال حرارت، دمای بیشینه، در نقطه زیر بیشینه تابش افزایش می یابد و آثار غیر فوریری انتقال گرما در دوره زمانی کوتاهتر و طول مشخصه کوچک تر، قوی تر می شود. به علاوه سرعت چشمه لیزری اثری خاص بر تغییرات دما ندارد.

**کلمات کلیدی:** انتقال حرارت هذلولوی- مدلسازی سه بعدی المان محدود - تابش غیر متقارن \_ پالس لیزری  
گاوسی - استوانه توپر

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه .....
۲	۱-۱- لیزر و کاربردهای آن .....
۴	۲-۱- معرفی چشمه لیزری گاوسی .....
۶	۳-۱- معادله مشخصه غیر فوریه ای .....
۹	۴-۱- معادله هذلولوی انتقال گرما .....
۱۰	۵-۱- مروری بر کارهای انجام گرفته قبلی .....
۱۳	۶-۱- معرفی کار حاضر .....
۱۵	فصل دوم: معرفی مسأله، شرایط حاکم و شرایط مرزی .....
۱۷	۱-۲- بیان مسأله .....
۱۷	۱-۱-۲. بیان مسأله ۱ .....
۱۸	۲-۱-۲. بیان مسأله ۲ .....
۱۹	۲-۲- معادله حاکم .....
۱۹	۱-۲-۲. معادله حاکم مسأله ۱ .....
۱۹	۲-۲-۲. معادله حاکم مسأله ۲ .....
۲۰	۳-۲- شرایط مرزی و اولیه .....
۲۰	۱-۳-۲. شرایط مرزی مسأله ۱ .....
۲۱	۲-۳-۲. شرایط مرزی مسأله ۲ .....
۲۲	۴-۲- مدل سازی چشمه لیزری .....
۲۴	۵-۲- بی بعد سازی معادلات حاکم و شرایط مرزی .....
۲۵	۱-۵-۲. بی بعد سازی مسأله ۱ .....
۲۷	۲-۵-۲. بی بعد سازی مسأله ۲ .....
۲۹	فصل سوم: روش حل عددی .....
۳۰	۱-۳- مقدمه .....
۳۰	۲-۳- روش حل عددی برای مسأله ۱ .....
۳۰	۱-۲-۳. توابع درونیاب مسأله ۱ .....
۳۴	۲-۲-۳. تشکیل فرم ضعیف و انتگرال وزن دهی شده مسأله ۱ .....
۳۶	۳-۲-۳. اعمال روش گالرکین برای مسأله ۱ .....
۴۱	۴-۲-۳. عبارات گذرا و چشمه حرارتی .....

۴۵	..... ۳-۳- الگوریتم برنامه محاسباتی مسأله ۱
۴۷	..... ۳-۴- روش حل عددی مسأله ۲
۴۷	..... ۳-۴-۱. شبکه حل مسأله ۲
۵۰	..... ۳-۴-۲. المان هشت وجهی
۵۳	..... ۳-۴-۳. تشکیل فرم ضعیف و قضیه واگرایی
۵۶	..... ۳-۴-۴. اعمال روش گالرکین برای المان هشت وجهی
۶۲	..... ۳-۴-۵. المان منشوری
۶۲	..... ۳-۴-۶. تدوین معادلات المان منشوری
۶۶	..... ۳-۴-۷. عبارت چشمه
۶۹	..... ۳-۵- الگوریتم برنامه محاسباتی مسأله ۲
۷۳	..... فصل چهارم: بررسی استقلال شبکه و اعتبار سنجی نتایج
۷۴	..... ۴-۱- بررسی استقلال شبکه
۷۵	..... ۴-۲- بررسی استقلال شبکه مسأله ۱
۷۷	..... ۴-۳- بررسی استقلال شبکه مسأله ۲
۸۱	..... ۴-۴- بررسی اعتبار نتایج
۸۴	..... فصل پنجم: نتایج حاصل و بررسی آن ها
۸۴	..... ۵-۱- نتایج حاصل از مسأله دوبعدی و بررسی آن ها
	..... ۵-۱-۱. اثر زمان واهلش گرمایی بدون بعد بر منحنی دمای بدون بعد بر حسب موقعیت در جهت $Y^*$
۸۴	..... ۵-۱-۲. بررسی اثر دوره زمانی اعمال لیزر روی دما
۸۵	..... ۵-۱-۳. خطوط هم تراز دمای بعددار
۸۶	..... ۵-۲- نتایج بدون بعد حاصل از مسأله استوانه ای سه بعدی و بررسی آن ها
۸۷	..... ۵-۲-۱. بررسی تأثیر عدد بایوت بر تغییرات دما در راستای $Z^*$
۸۸	..... ۵-۲-۲. بررسی تأثیر پارامتر $C^*$ بر تغییرات دمای بدون بعد در راستای $Z^*$
۸۹	..... ۵-۲-۳. اثر پارامتر $\tau_0^*$ بر تغییرات دمای بدون بعد بر حسب زمان
۹۱	..... ۵-۲-۴. اثر سرعت بدون بعد بر تغییرات دما در راستای $Z^*$
۹۲	..... ۵-۲-۵. اثر طول مشخصه محیط بر نمودار دمای بدون بعد در راستای شعاعی
۹۳	..... ۵-۲-۶. خطوط هم تراز دمای بدون بعد
۹۴	..... ۵-۳- نتایج بعددار حاصل از مسأله استوانه ای سه بعدی و بررسی آن ها
۹۴	..... ۵-۳-۱. بررسی تأثیر دوره زمانی اعمال لیزر بر تغییرات دما
۹۵	..... ۵-۳-۲. اثر شعاع تابش لیزر بر تغییرات دما
۹۶	..... ۵-۳-۳. بررسی اثر بیشینه تابش فرودی لیزر روی تغییرات دما
۹۷	..... ۵-۳-۴. بررسی اثر ضریب جابجایی بر تغییرات دما
۹۸	..... ۵-۳-۵. بررسی اثر سرعت چشمه لیزری
۹۹	..... ۵-۴- نتیجه گیری



۱۰۰	..... ۵-۵ - پیشنهادات برای ادامه کار
۱۰۲	..... <b>مراجع</b>
۱۰۷	..... <b>پیوست ها</b>
۱۰۸	..... پیوست (الف) - معرفی روش اجزای محدود
۱۱۱	..... پیوست (ب) - اصول تجميع معادلات المانی
۱۱۵	..... پیوست (ج) - پیشروی در زمان
۱۱۹	..... پیوست (د) - المان منشوری با پایه مثلثی
۱۲۱	..... پیوست (ه) - رابطه گاوس-لزاندرو و مختصات مساحتی

## فهرست جدول ها

صفحه	عنوان جدول
۸	جدول ۱-۱. مقدار زمان واهلش گرمایی برخی فلزات مشهور بر حسب $10^{-14}$ ثانیه بر اساس مرجع [۱۰].....
۷۷	جدول ۴-۱. نتایج مطالعه شبکه در جهت $X^*$ به ازای مقادیر (۴-۱) به غیر از $Im = 10^5$ و برای $X^* = 0.5$ ، $Y^* = 1.0$ و $t^* = 2$ .....
۷۷	جدول ۴-۲. نتایج مطالعه شبکه در جهت $Y^*$ به ازای مقادیر (۴-۱) به غیر از $Im = 10^4$ و برای $X^* = 0.5$ ، $Y^* = 1.0$ و $t^* = 2$ .....
۷۸	جدول ۴-۳. نتایج مطالعه شبکه در جهت $Z^*$ به ازای مقادیر (۴-۱) و برای $Z^* = 0.5$ ، $r^* = r_0^*$ ، $\Theta = 72^\circ$ و $t^* = 2$ ، $n_r = 5$ و $n_\Theta = 10$ .....
۷۸	جدول ۴-۴. نتایج مطالعه شبکه در جهت $\Theta$ به ازای مقادیر (۴-۱) و برای $Z^* = 0.5$ ، $r^* = r_0^*$ ، $\Theta = 90^\circ$ و $t^* = 2$ ، $n_z = 40$ و $n_\Theta = 10$ .....
۷۹	جدول ۴-۵. نتایج مطالعه شبکه در جهت $r$ به ازای مقادیر (۴-۱) و برای $Z^* = 0.5$ ، $r^* = r_0^*$ ، $\Theta = 90^\circ$ و $t^* = 2$ ، $n_z = 40$ و $n_\Theta = 20$ .....
۸۰	جدول ۴-۶. نتایج مطالعه شبکه برای یافتن بازه زمانی مناسب به ازای مقادیر (۴-۱) و برای $Z^* = 0.5$ ، $r^* = r_0^*$ ، $\Theta = 72^\circ$ و $t^* = 10$ .....

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان شکل
۵	شکل ۱-۱. توزیع گاوسی برای توان تابش لیزر .....
۵	شکل ۱-۲. تابعیت زمانی لیزر تابشی ( تابع غیر گاوسی ) .....
۱۷	شکل ۱-۲. دامنه مربعی تحت تابش لیزر .....
۱۸	شکل ۲-۲. نمای سه بعدی استوانه توپر .....
۱۹	شکل ۳-۲. نمای دو بعدی تابش لیزر و دامنه فیزیکی در صفحه XY .....
۲۳	شکل ۴-۲. پارامترهای هندسی مطرح در مدلسازی چشمه گرمایی .....
۳۱	شکل ۱-۳. طرحواره مساله دو بعدی .....
۳۱	شکل ۲-۳. المان مربعی .....
۴۹	شکل ۳-۳. نمای نمونه از شبکه بندی مسأله در صفحه X-Y .....
۴۹	شکل ۴-۳. نمای سه بعدی شبکه بندی دامنه حل .....
۵۰	شکل ۵-۳. نمای دوبعدی شبکه بندی دامنه حل برای صفحه عمود بر محور طولی .....
۵۱	شکل ۶-۳. المان هشت وجهی قطاع مانند مناسب برای مختصات استوانه ای .....
۵۱	شکل ۷-۳. نمای سه بعدی المان قطاع مانند .....
۵۴	شکل ۸-۳. حجم $\Omega$ محصور به سطح $\Gamma$ .....
۷۶	شکل ۱-۴. بررسی استقلال شبکه در راستای X برای مسأله دوبعدی برای مقادیر پیش فرض به غیر از $Im = 10^5$ .....
۷۶	شکل ۲-۴. بررسی استقلال شبکه در راستای Y برای مسأله دوبعدی برای مقادیر پیش فرض به غیر از $Im = 10^4$ .....
۷۸	شکل ۳-۴. نتایج بررسی استقلال شبکه در راستای Z به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۴) و به ازای $r_0^* = 2$ و $\Theta = 72^\circ$ و $t^* = 2$ .....
۷۹	شکل ۴-۴. نتایج بررسی استقلال شبکه در راستای $\Theta$ به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۴) و به ازای $r_0^* = 2$ و $\Theta = 90^\circ$ و $t^* = 2$ .....
۸۰	شکل ۵-۴. نتایج بررسی استقلال شبکه در راستای r به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۴) و به ازای $Z = 0.5$ و $\Theta = 90^\circ$ و $t^* = 2$ .....
۸۱	شکل ۶-۴. نتایج بررسی استقلال شبکه برای بازه زمانی به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۴) و به ازای $r_0^* = 2$ و $\Theta = 72^\circ$ و $t^* = 10$ .....
۸۲	شکل ۷-۴. مقایسه بین حل تحلیلی از مرجع [۴۲] و حل عددی برای $r_0^* = 2$ و $\Theta = 90^\circ$ و $t^* = 1.6$ برای چشمه حرارتی به فرم $Q = Q_0 \sin(\pi Z)$ و $Q_0 = 2 \times 10^3$ و مقادیر پیش فرض (۱-۴) .....
۸۵	شکل ۱-۵. منحنی دمای بدون بعد بر حسب موقعیت در جهت Y به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۵) و برای $t^* = 0.2$ .....
۸۵	شکل ۲-۵. نمودار دما بر حسب Y به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۵) و به ازای مقادیر مختلف

- ۸۶ ..... دوره زمانی اعمال لیزر برای مسأله دوبعدی
- شکل ۳-۵. خطوط هم تراز دمای بعددار مسأله دوبعدی به ازای مقادیر پیش فرض (۱-۵) و
- ۸۷ ..... برای  $t=0.5\mu s$
- شکل ۴-۵. اثر عدد بدون بعد بایوت روی منحنی دمای بدون بعد روی مسیر  $r^* = r_0^*$  و
- ۸۸ .....  $\Theta = 90^\circ$  و برای  $t^* = 2.6$  و مقادیر پیش فرض (۲-۵)
- شکل ۵-۵. اثر عدد بدون بعد  $C^*$  روی تغییرات دمای بدون بعد روی مسیر  $r^* = r_0^*$  و
- ۸۹ .....  $\Theta = 90^\circ$  و برای  $t^* = 1.0$  و مقادیر پیش فرض (۲-۵)
- شکل ۶-۵. تغییرات دمای بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد برای نقطه  $Z^* = 0.5$ ،  $r^* = r_0^*$  و
- ۹۰ .....  $\Theta = 90^\circ$  و به ازای مقادیر پیش فرض (۲-۵)
- شکل ۷-۵. تغییرات دمای بدون بعد، برای مسیر  $r^* = r_0^*$ ،  $\Theta = 90^\circ$  و سرعت چشمه حرارتی
- ۹۱ .....  $v^* = 0.1$  و به ازای زمان های بدون بعد مختلف
- شکل ۸-۵. تغییرات دمای بدون بعد، برای مسیر  $r^* = r_0^*$ ،  $\Theta = 90^\circ$  و زمان  $t^* = 2.0$  و به
- ۹۲ ..... ازای سرعت های بدون بعد مختلف
- شکل ۹-۵. نمودار تغییر دمای بدون بعد بر حسب مختص شعاعی مکان، برای مسیر
- ۹۳ .....  $Z^* = 0.5$  و  $\Theta = 90^\circ$ ، به ازای مقادیر پیش فرض (۲-۵) به غیر از  $t_p = 10^{-15}(s)$  و  $(W)P_m = 5 \times 10^{12}$
- شکل ۱۰-۵. کانتور دمای بدون بعد برای زمان های (الف).  $t^* = 0.02$ ، (ب).  $t^* = 0.1$ ، (ج).
- ۹۴ .....  $t^* = 0.5$ ، (د).  $t^* = 1$  و مقادیر پیش فرض (۲-۵)
- شکل ۱۱-۵. نمودار دما بر حسب جهت پیرامونی  $\Theta$ ، به ازای مقادیر پیش فرض (۲-۵) به
- ۹۵ ..... غیر از  $I_m = 10^{12} (W/m^2)$  و برای  $Z = L/2$ ،  $r = r_0$  و  $t = 2 \mu s$
- شکل ۱۲-۵. تغییرات دما در راستای  $Z$ ، برای  $\Theta = 90^\circ$ ،  $r = r_0$  و به ازای مقادیر پیش فرض
- ۹۶ ..... (۲-۵) به غیر از  $P_m = 10^6$ ، برای  $t = 2 \mu s$
- شکل ۱۳-۵. نمودار دما بر حسب جهت پیرامونی  $\Theta$  برای مسیر  $Z = L/2$ ،  $r = r_0$  و زمان
- ۹۷ .....  $t = 2 \mu s$  و به ازای مقادیر پیش فرض (۲-۵) به غیر از  $t_p = 1 \mu s$
- شکل ۱۴-۵. تغییرات دما بر حسب جهت پیرامونی  $\Theta$  برای مقادیر مختلف از ضریب جابجایی
- در سطح استوانه، به ازای مقادیر پیش فرض (۲-۵) به غیر از  $P_m = 5 \times 10^5 (W)$  و
- ۹۸ .....  $t_p = 1 \mu s$  برای مسیر  $Z = L/2$  و  $r = r_0$
- شکل ۱۵-۵. تغییرات دمای خروجی بر حسب موقعیت طولی  $Z$  روی مسیر  $\Theta = 90^\circ$  و  $r = r_0$  به ازای مقادیر پیش فرض (۲-۵) به غیر از  $t_p = 10^{-12} s$  و  $P_m = 5 \times 10^{12} (W)$  و برای مقادیر
- ۹۹ ..... مختلف سرعت چشمه لیزری
- ۱۱۱ ..... شکل ب-۱. یک نمونه ساده برای افراز دامنه حل
- ۱۱۹ ..... شکل د-۱. نمای سه بعدی المان منشوری
- ۱۱۹ ..... شکل د-۲. نمای المان منشوری در صفحه  $XY$
- ۱۲۲ ..... شکل ه-۱. مدل ناحیه محاسبه در روش گاوس-لزاندر
- ۱۲۲ ..... شکل ه-۲. مختصات مساحتی برای مثلث

## فهرست علائم

نشانه	علامت
مساحت سطح	A
عدد بایوت	Bi
نماد المان	e
تابعیت زمانی چشمه لیزری	g
ظرفیت گرمایی ویژه	c (kJ / kg.K)
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h (W / m <sup>2</sup> K)
طول مشخصه المان	H (m)
بیشینه شدت تابش لیزر	I <sub>m</sub> (W / m <sup>2</sup> )
ضریب هدایت گرمایی	k (W / mK)
طول استوانه و طول ضلع دامنه مربعی	L (m)
تعداد المان در راستاهای r ، θ و Z	n <sub>r</sub> , n <sub>θ</sub> , n <sub>z</sub>
توان تابش لیزر	P (W)
بیشینه قدرت لیزر	P <sub>m</sub> (W)
شار گرما	q (W / m <sup>2</sup> )
چشمه گرمایی	Q (W / m <sup>3</sup> )
متغیر شعاعی مکانی	r
شعاع استوانه	r <sub>0</sub>
چشمه گرمایی	S (W / m <sup>3</sup> )
تابع درونیاب	s
دما	T (K)
متغیر زمان	t (s)
دوره زمانی اعمال لیزر	t <sub>p</sub> (s)
شعاع لیزر	w (m)
متغیرات عمومی مکانی	X, Y, Z (m)
متغیرات محلی مکانی	x, y, z (m)
ضریب نظریف شبکه	β
ضریب جذب خطی محیط	γ (m <sup>-1</sup> )
دلتهای کرونوکر	δ
تغییرات متغیرات	Δ
متغیرات مکانی طبیعی	ξ, η

مختصه مکانی پیرامونی عمومی و محلی

چگالی

تابع وزن

زمان واهلش گرمایی

نماد اعداد بدون بعد

$\theta, \Theta$

$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$

$\omega$

$\tau_0 \text{ (s)}$

\*



# فصل اول

## مقدمه



## ۱-۱ لیزر و کاربردهای آن

لیزر شاخه جدیدی از دانش نورشناسی<sup>۱</sup> است که از دستاوردهای بشر در نیمه دوم قرن بیستم به حساب می آید. لیزر در واقع نتیجه تابش پرتوهای نور ناشی از تحریک القایی تعداد زیادی از اتم های مربوط به یک ماده یا مخلوطی است که آن را به عنوان سیستم لیزری می شناسند. نام لیزر را نیز از همین تعریف گرفته اند.<sup>۲</sup> این در حالی است که نور معمولی ناشی از نشر خودبه خودی فوتونهای ناظم فاز است [۱].

برای نور لیزر می توان ویژگی های زیر را برشمرد [۲].

- جهت مندی: نور لیزر به صورت باریکه ای به ضخامت چند میلی متر تولید می شود و تا مسافت های دور بدون افزایش ضخامت چشمگیر منتشر می شود.
- درخشندگی زیاد: توان لامپ های لیزری زیاد نیست. گاهی به حدود چند میلی وات می رسد. این در حالی است که توان یک لامپ حیابی معمولی ۲۰۰ وات است. البته باید متذکر شد که انرژی لیزر بر واحد سطح بیشتر است، چون این انرژی را بر سطحی بسیار کوچک متمرکز می کند.
- تک رنگی: نور لیزر تک رنگ است. البته هیچ نوری به طور مطلق تک رنگ نیست. در حالی که تغییرات مؤثر شدت با بسامد که آن را بیناب نور گویند، در نور معمولی در حدود  $10^{14}$  هرتز است، در لیزر به کمتر از چند هرتز می رسد.
- همدوسی: فوتون های نور لیزری به طور کامل همدوس یا هم فازند.
- توانایی کانونی شدن: نور لیزر را می توان بوسیله عدسی بر سطحی به بزرگی چند میکرون مربع متمرکز نموده و دمای آن را به شدت افزایش داد. امروزه می توان با کانونی کردن نور لیزر دما را در نقطه هدف به  $10^{24}$  درجه کلونین رساند.

<sup>1</sup> Optics

<sup>2</sup> Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

• توانایی تبدیل به فرم تپی<sup>۱</sup>: می توان نور لیزرها را به صورت تپ های کوتاه مدت ایجاد نمود. امروزه با بکار بردن روش های خاص انرژی هر تپ را تا  $10^{-15}$  ثانیه می توان کاهش داد.

نور لیزر می تواند به صورت موج پیوسته<sup>۲</sup> یا CW و یا به صورت غیر پیوسته یا تپی شکل باشد، که آن ها را در اصطلاح موج تپی<sup>۳</sup> یا PW می گویند. توان لیزر موج پیوسته در حدود چند میلی وات است. برای بسیاری از کاربردها لیزرهای پیوسته مناسب نبوده و کمتر مورد استفاده دارند. برای افزایش توان خروجی سعی می شود خروجی لیزر به صورت موج تپی باشد. چنین لیزری را به روش های مختلفی نظیر بستاور مکانیکی، کلیدزنی<sup>۴</sup> و قفل شدگی مدی<sup>۵</sup> می توان بدست آورد.

گفته می شود که لیزر همچون کبریتی باعث مشتعل شدن علم و فناوری شده است. هر کدام از ویژگی های لیزر مانند تکرنگی، جهتندی، همدوسی و درخشندگی خود اساس شاخه ای خاص از کاربرد لیزر است. اما به طور کلی می توان کاربردهای لیزر را به دو گروه مهم تقسیم کرد. یکی کاربرد لیزر در برهم کنش با ماده و دیگری کاربرد لیزر در ارتباطات [۱].

لیزرها می توانند به صورت های مختلف با مواد مختلف برهم کنش داشته باشند [۳]. بنابراین در کاربردهایی مانند فرآوری مواد، پزشکی و جوش هسته ای از جایگاه خاصی برخوردار شده اند. از کاربردهای لیزر در برهم کنش با مواد می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- لیزر به عنوان مته: باریکه لیزر می تواند مانند یک مته سوراخ هایی به قطر چند میکرون بدون خرده و دندان روی مواد مختلف ایجاد کند.
- لیزر برای جوشکاری: جوش دادن قطعات بسیار بزرگ یا بسیار کوچک بدون آسیب رساندن به نقاط مجاور با لیزر ممکن است و مورد استفاده بسیاری در صنایع ساخت خودرو و هواپیما دارد.
- برش های لیزری: برش اجسام مختلف با سرعت و دقت و تمیزی بسیار زیاد با لیزر ممکن است.

---

<sup>1</sup> Pulse

<sup>2</sup> Continues wave

<sup>3</sup> Pulse wave

<sup>4</sup> Q-Switching

<sup>5</sup> Mode Locking

در این پروژه هدف آن است که عملیات لیزری بر روی یک استوانه توپر و نیز یک دامنه مربعی به صورت عددی تحلیل گردد. این عملیات می تواند از انواع عملیات گرمایی باشد که برای بهبود خواص مواد بر مبنای تغییر شبکه کریستالی آن ها [۴]، قبل از برشکاری یا سایر انواع عملیات ساخت و تولید کاربرد دارد. این دو شکل یعنی استوانه و مربع از لحاظ کاربردی بسیار متداول بوده و مدل مناسبی برای بسیاری از قطعات صنعتی می باشند. در این پروژه پارامترهای مختلفی بررسی می گردد که در ادامه بیان می گردند. از آنجا که در انواع عملیات لیزری ممکن است، گرادیان های شدید دمایی و همچنین زمانهای بسیار کوچک وجود داشته باشد، معادلات معمول سهموی انتقال گرما دقت زیادی ندارد و بنابراین با مدل جدیدتری از انتقال گرما کار می شود.

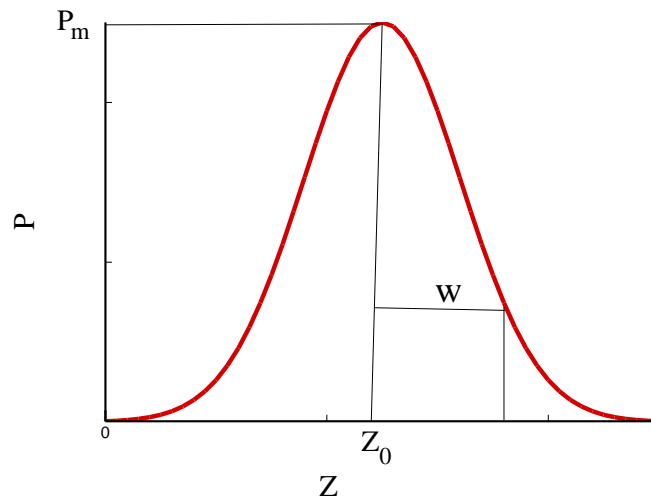
## ۲-۱ معرفی چشمه لیزری گاوسی

یکی از معمولترین توزیعات مکانی مربوط به لیزر توزیع گاوسی آن است [۲]. این توزیع را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P(X, Z, t) = g(t) P_m \exp \left[ - \left( \frac{X - X_0}{w} \right)^2 - \left( \frac{Z - Z_0}{w} \right)^2 \right] \quad (1-1)$$

که در آن  $P$  قدرت تابش لیزر بر حسب وات ( $W$ ) است.  $P_m$  بیشینه این توان است که در نقطه  $X_0$  و  $Z_0$  قرار دارد و این نقطه می تواند حرکت نیز داشته باشد.  $w$  میزان تمرکز منحنی گاوسی لیزر را نمایش می دهد و به عدسی متمرکز کننده پرتوهای خروجی لیزر بستگی دارد [۲]. به صورت معمول به آن شعاع تابش لیزر<sup>۱</sup> گویند و جایی از منحنی گاوسی را نمایش می دهد که شدت تابش به حدود ۱۳ درصد مقدار بیشینه رسیده باشد. چنین توزیعی از شدت تابش را توزیع گاوسی می نامند و در شکل (۱-۱) برای راستایی مانند  $Z$ ، می توان این تابعیت را به صورت زیر نمایش داد.

<sup>1</sup> Laser Beam radius

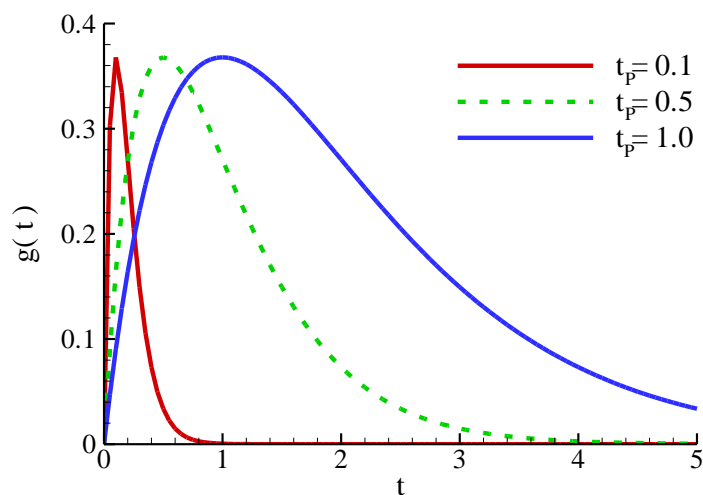


شکل ۱-۱. توزیع گاوسی برای توان تابش لیزر

برای توزیع زمانی تابش لیزر بر اساس مرجع [۱۴] می توان چنین تابعیتی را در نظر گرفت:

$$g(t) = \frac{t}{t_p} \exp\left[-\frac{t}{t_p}\right] \quad (۲-۱)$$

که به آن توزیع غیر گاوسی<sup>۱</sup> می گویند.  $t_p$  معرف دوره زمانی<sup>۲</sup> پالس لیزری است که به همین نام شناخته می شود و بر حسب ثانیه (s) است. شکل (۲-۱) تابعیت  $t$  بر حسب  $g$  به ازای مقادیر مختلف  $t_p$  را نشان می دهد.



شکل ۲-۱. تابعیت زمانی لیزر تابشی (تابع غیر گاوسی)

<sup>1</sup> Non-Gaussian Pulse

<sup>2</sup> Time Duration