

Study and Simulation of Solar Pumping for Nd: YAG Laser Using ZEMAX Program

Dr. Bassam Gazolin*

Dr. Jamal saeed**

Fatima Sheikhani***

(Received 9 / 3 / 2022. Accepted 15 / 5 / 2022)

□ ABSTRACT □

The research includes studying the methods of focusing and collecting solar radiation to obtain the appropriate optical pumping energy for the Nd: YAG laser. A solar concentrating system consisting of a flat mirror with an area of 1 m^2 and assembled in a parabolic shape with a diameter of 1.8 m was adopted, in order to focus the solar radiation on the active substance of the laser, and with this process we reached a focusing efficiency of 89%. The proposed system has been modeled and simulated by two methods of pumping (side and end) for the Nd: YAG rod by using Zemax program and comparing their efficiencies, the rod's absorption efficiency of the concentrated effective pumping energy was 80% in the end pumping system, while it reached 63% in the side pumping system. We calculated the laser output power and got 1.73w in the case of end-pumping and 0.612w in the case of side-pumping using a 95% reflective output mirror. And calculating the efficiency of the laser system, we got 0.94% in the case of end-pumping and 0.3% in the case of side pumping.

Keywords: solar radiation - active substance ND: YAG and spectral properties - solar concentrators - ZEMAX program - solar lasers - side and end pumping – efficiency

* Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.
bassam.g@scs-net.org

** Researcher – The Higher Institute of Applied Sciences and Technology - Damascus - Lattakia – Syria. jamalsaeed@gmmail.com

*** Postgraduate Student (Master) - Department of Physics - Faculty of Science - Tishreen University - Lattakia – Syria.fatimasheikhani@tishreen.edu.sy

دراسة ومحاكاة الضخ الشمسي لليزر Nd: YAG باستخدام برنامج ZEMAX

د. بسام غزولين*

د. جمال سعيد**

فاطمة وليد شيخاني***

(تاريخ الإيداع 9 / 3 / 2022. قُبِلَ للنشر في 15 / 5 / 2022)

□ ملخّص □

يتضمن البحث دراسة طرق تركيز وتجميع الاشعاع الشمسي للحصول على طاقة الضخ الضوئي المناسبة لليزر Nd: YAG. وتم اقتراح نظام تركيز شمسي مؤلف من مرآة مستوية مساحتها 1m^2 ومركز ذو قطع مكافئ قطره 1.8m من أجل تركيز الاشعاع الشمسي على المادة الفعالة لليزر وتوصلنا بهذه العملية إلى كفاءة تركيز بلغت %89. تم أيضاً نمذجة ومحاكاة النظام المقترح أعلاه بطريقتين للضخ (الجانبى، والأمامى) لقضيب Nd: YAG باستخدام برنامج Zemax والمقارنة بين كفاءتيهما حيث بلغت كفاءة امتصاص القضيب لطاقة الضخ الفعالة المركزة %80 في نظام الضخ الأمامى بينما بلغت %63 في نظام الضخ الجانبى. قمنا بحساب استطاعة خرج الليزر فحصلنا على 1.73w في حالة الضخ الطرفى و 0.612w في حالة الضخ الجانبى باستخدام مرآة خرج عاكسيتهها %95 وحساب كفاءة نظام الليزر فحصلنا على %0.94 في حالة الضخ الطرفى و %0.3 في حالة الضخ الجانبى.

الكلمات المفتاحية: الاشعاع الشمسي - المادة الفعالة ND: YAG والخواص الطيفية - المركزات الشمسية- برنامج ZEMAX- الليزرات الشمسية- الضخ الجانبى والطرفى - الكفاءة.

* استاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. bassam.g@scs-net.org

** باحث - المعهد العالى للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق - اللاذقية - سورية. jamalsaeed@gmmail.com

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

fatimasheikhani@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تُعدّ الليزرزات المضخّة بالأشعة الشمسية هامة جداً في مجالات البحث الحديثة، وخاصةً ليزرات الحالة الصلبة لأنها الأسهل استخداماً والأكثر انتشاراً والأقل كلفة.

نظراً لأهمية الليزر، توجد حاجة ماسة لتطوير منابع ليزرية متنوعة تتميز بمواصفات جديدة تناسب الإمكانيات والمتطلبات المتوفرة مع الأخذ بعين الاعتبار أن تخفيض التكلفة سواء في التطوير أو الإنتاج من أهم العوامل التي تؤخذ بعين الاعتبار في بلدان العالم الثالث.

تكمن أهمية البحث في استخدام الطاقات المتجددة وخصوصاً الطاقة الشمسية المجانية والمتوفرة بكثرة في بلدنا، والسعي لاستخدام الطاقة الشمسية في ضخ الليزرزات هو مسعى قديم ومتجدد لأن عملية الضخ الضوئي لليزرزات تمثل نصف التكلفة للأنظمة الليزرية.

تعدّ منظومة الليزر الشمسي من أهم الأعمال التي تعتبر قيد الدراسة حالياً ويجري تحسين مكونات هذه المنظومة إما من ناحية تقنية الضخ المستعملة أو طريقة تركيز الإشعاع الشمسي (القطع المكافئ، عدسة فريزل)، أو المادة الفعالة أو التجويف البصري، من أجل تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي مما يفتح المجال لتطبيقات كثيرة كما في الصناعة والطب والجانب العسكري وغيرها.

تعود صناعة أول ليزر شمسي إلى عام 1966 من مادة Nd: YAG من قبل العالم يونغ باستطاعة بلغت واط واحد وكفاءة تجميع تقدر بـ 3.4w/m^2 ، وبعد هذا الإنجاز لم يكن هنالك أعمال أخرى في هذا المجال حتى العام 1984 حيث تم الحصول على ليزر شمسي باستطاعة 18w وكفاءة تجميع 0.023w/m^2 من قبل العالم آراشي Arshe وزملاءه باستخدام نفس الوسط الفعال [1] ، وتمكن أوكوبو Ohkubo عام 2009 من تطوير ليزر يعمل بالضخ الشمسي ويتميز بالكفاءة العالية والتكلفة المنخفضة نظراً لاستخدام عدسة فريزل مساحتها (4 m^2) وتجويف ضخ كمرکز ثانوي ووسط ليزر سيراميك النديميوم YAG المشاب بالكروم حيث تم تحقيق خرج ليزر يبلغ حوالي 80w يقابل هذا الناتج 4.3% من كفاءة التحويل من الطاقة الشمسية إلى ليزر [2].

طور ليانغ و ألميدا Liang and Almeida عام 2011 نظاماً ليزرياً يُضخ بالطاقة الشمسية بواسطة عدسة فريزل قطرها 0.9m وباستخدام وسط سيراميك من Cr: Nd: YAG وبلغت طاقة الخرج الناتجة من هذا النظام 12.3w من ليزر مستمر [3].

قام مجموعة من الباحثين عام 2015 بتطوير نظام تركيز شمسي حيث تم استخدام عدسة فريزل ومجمّع قطعي مركب ثنائي الأبعاد (CPC-2D) فكانت متوسط قدرة الليزر 3.24w واستخدموا عدسة فريزل ومجمّع قطعي مركب ثلاثي الأبعاد (CPC-3D) فكانت متوسط القدرة 5.38 W [4].

قمنا في هذا البحث بدراسة مرجعية حول الإشعاع الشمسي وبلورة Nd: YAG وخواصها الطيفية من حيث طيف الامتصاص والإصدار، وتم التركيز على المركّزات الشمسية بمختلف أنواعها وبشكل خاص المركّز المكافئ وأخيراً قمنا بدراسة محاكاة عددية لنظام التركيز المقترح باستخدام برنامج زيماكس (zemax) ، وتم اختبار طريقتي الضخ (الضخ الجانبي والضخ الطرقي)، بهدف الحصول على أكبر استطاعة ممتصة للمادة الفعالة، حيث يكون الإشعاع المركّز الوارد مورّع على كامل الوسط الفعال في الطريقة الأولى ، أمّا في الطريقة الثانية فيكون الإشعاع المركّز الساقط متمركز على طرف المادة الفعالة.

طرائق البحث ومواده:

قمنا في هذا البحث بدراسة نظرية ومحاكاة عددية لنظام التركيز الشمسي وضخ بلورة Nd: YAG باستخدام برنامج (Zemax) ومحاولة الحصول على أكبر استطاعة ممتصة من الوسط الفعال. زيماكس هو برنامج تصميم بصري ذو استخدام واسع، يُستعمل لتصميم الأنظمة الضوئية وتحليلها، يعتمد أساس هذا البرنامج على تتبع الأشعة والحزم الضوئية ونمذجة الأشعة من خلال نظام بصري. يمكننا برنامج ZEMAX من تصميم عناصر بصرية مختلفة مثل العدسات العادية والعدسات شبه الكروية والمرايا والعناصر البصرية التفاضلية.

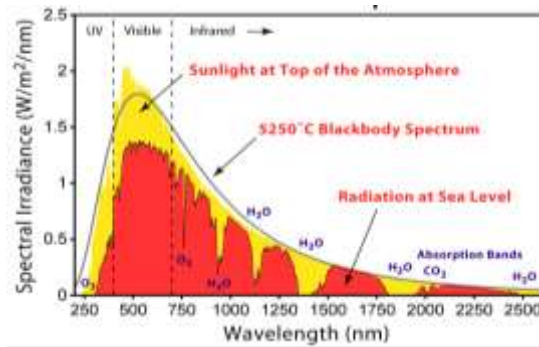
ZEMAX قادر أيضاً على نمذجة تأثير الطلاءات الخفيفة على سطح المكونات. يمكن لهذا البرنامج إجراء تتبع رقمي متسلسل (Sequential mode) بين العناصر الضوئية أو تتبع غير متسلسل (Non Sequential mode) لتحليل الضوء. يحتوي البرنامج على مكتبة ضخمة من العدسات والمواد المصنعة لها [9].

يضم zemax طرائق عديدة لتقييم أداء التصميم عن طريق توزيع الإضاءة ودوال الانتشار الضوئي واستخدام الكواشف. يسمح الكاشف بتسجيل قدر أكبر من البيانات، مثل الطاقة الواردة والزاوية، وتوزيع الطاقة ثنائي الأبعاد وملف تعريف الطاقة الواردة أو الممتصة في المنطقة التي يحددها الكاشف. يمكن وضع هذا النوع من الكواشف إما داخل أو خارج الجسم وله وظيفة الامتصاص أو الانعكاس أو عدم وجود أي تأثير على الإشعاع الساقط. يمكن ضبط دقة الصورة عن طريق تحديد عدد وحدات البيكسل للكاشف، مع مراعاة التأثير على إجمالي الوقت المطلوب لكل محاكاة. ينقسم حجم الكاشف لقضيب الليزر إلى إجمالي عدد معين من الفوكسل. ثم يتم العثور على طول المسار في كل فوكسل. بهذه القيمة ومعامل الامتصاص الفعال ل Nd: YAG، من الممكن تصميم النظام البصري بأكمله وتحديد معالمته، والذي ينقل طاقة الضخ إلى الوسط الفعال لليزر الشمسي. يمكن حساب طاقة المضخة الشمسية داخل وسط الليزر عددياً عن طريق جمع أشعة الضخ الممتصة لجميع الأطوال الموجية. وقد استخدمنا في هذه المحاكاة نسخة البرنامج (2013).

الإشعاع الشمسي والخواص الطيفية لقضيب Nd: YAG

يمكن تقسيم الطيف الشمسي إلى ثلاثة أقسام كما في الشكل (1):

1. **الموجات الحرارية Thermal Waves:** وهي أشعة غير مرئية بالنسبة للطيف الكهرومغناطيسي وتنسب إلى مجموعة الموجات ذات المدى الطويل وتُعرف بالأشعة تحت الحمراء وتقدر نسبتها نحو (49%) من مجموع الإشعاع الشمسي وجزئها الأكبر لهذه الأشعة يسهم في رفع درجة حرارة الغلاف الجوي وسطح الأرض وهي بذلك يكون لها أثر كبير في الدراسات المناخية، ويسهم بخار الماء في امتصاص قسم كبير منها عند أطوال موجية معينة.



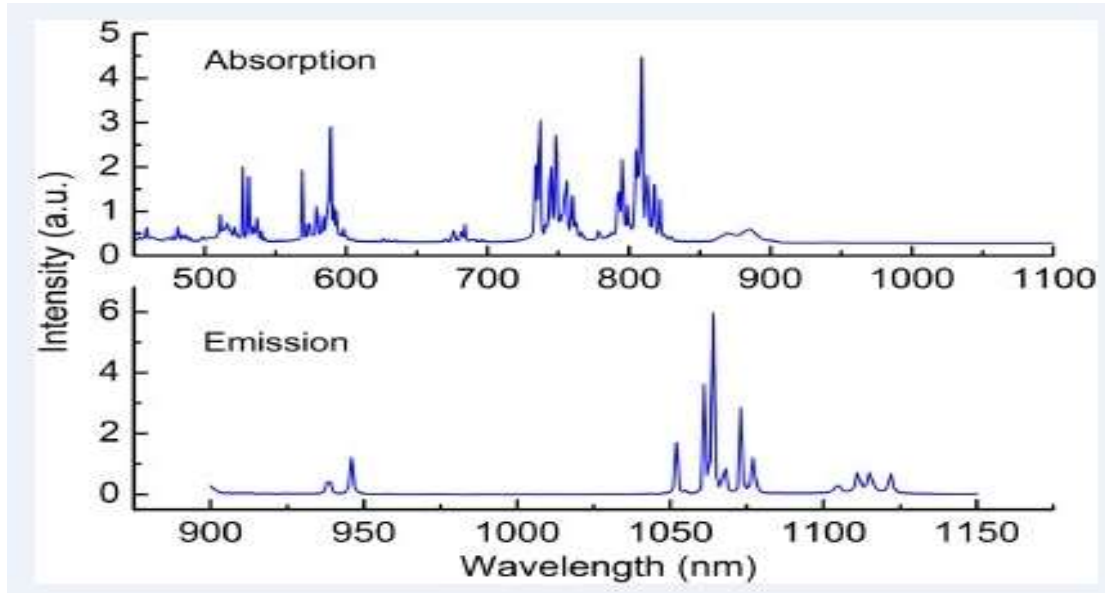
الشكل (1): طيف الإشعاع الشمسي [5].

2. **الضوء المرئي Visible Light**: وهو أشعة مرئية تقدر نسبتها بنحو (43%) من مجموع الإشعاع الشمسي، ويكون من ضمنها الأشعة الحمراء والزرقاء والخضراء وتعتمد النباتات على هذه الأشعة في عملية التركيب الضوئي.

3. **الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet Ray**: وتضم نحو (7%) من مجموع أشعة الشمس وتكون هذه الأشعة ذات طول موجي قصير وتصبح مفيدة للإنسان اذا وصلت له بكميات قليلة. أما بقية الإشعاع الشمسي الذي يقدر بنحو (1 %) فيكون بشكل أشعة سينية وغاما وموجات راديوية [5].

اخترنا في دراستنا مادة Nd: YAG لتوليد الليزر الشمسي لكونها أحد أفضل الأوساط الفعالة المستخدمة في حالة الضخ الشمسي بسبب تداخل طيف امتصاص Nd: YAG مع طيف الشمس. كما تمتلك مجموعة العقيق الإيتريوم والألمنيوم المشاب بالنديميوم مجموعة خواص فريدة لتشغيل الليزر. يُعد المضيف YAG صلباً (قاس)، ذو خواص ضوئية جيدة، وناقلية حرارية عالية. علاوة على ذلك، فإنّ البنية المكعبة لـ YAG تجعل خطوط فلورته ضيقة، مما يؤدي إلى ربح مرتفع وعتبة منخفضة لتشغيل الليزر. في Nd: YAG تحل شوارد النيوديميوم الثلاثية محل ذرات الإيتريوم الثلاثي التكافؤ في الشبكة، لذلك لا حاجة لتعويض التعادل الشحني [6].

يحوي طيف امتصاص بلورة النيوديميوم ياغ 22 قمة امتصاص أهمها عند الطول الموجي 880nm الشكل (2)



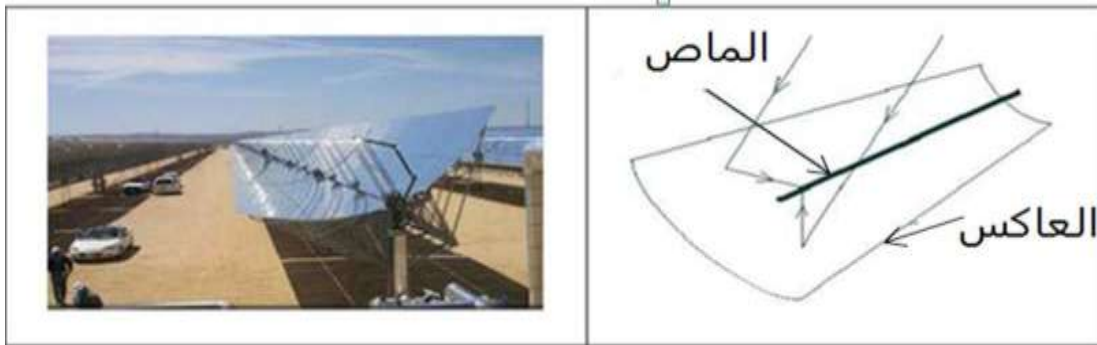
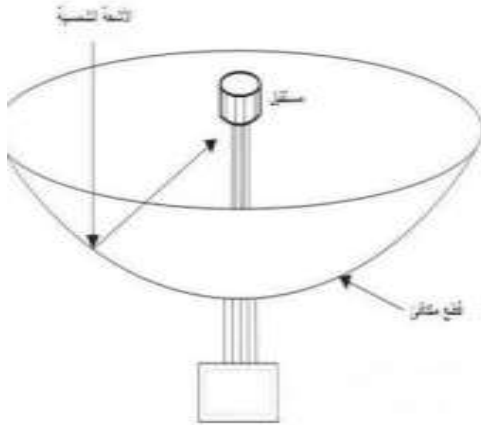
الشكل (2): طيف الامتصاص والإصدار لـ Nd: YAG [7]

أنواع المركّزات الشمسية [8]:

تُعرّف مركّزات الطاقة الشمسية بأنها أجهزة تعمل على تجميع وتركيز الإشعاع الشمسي لاستخدامه في مجالات مختلفة، حيث أنّ المجمّعات الشمسية هي المكوّن الأساسي لأي نظام يعمل على الاستفادة من الطاقة الشمسية، فهي الأداة التي تجمّع الأشعة الواردة لتركّزها على المستقبل.

تُصنّف المركّزات الشمسية إلى صنفين وهما النقطيّة والخطيّة، حيث تتركّز الأشعة الساقطة على العاكس في نقطة تسمى البؤرة كما في الشكل (3) أو خط يسمى المحور البؤري يوضحه الشكل (4). إنّ المجمّعات الأكثر استخداماً في مجال الليزر هي المجمّعات النقطيّة ومن أنواعها:

- المرکز الشمسي ذو القطع المكافئ.
- عدسات فريزل.



الشكل (3): مركز قطع مكافئ.

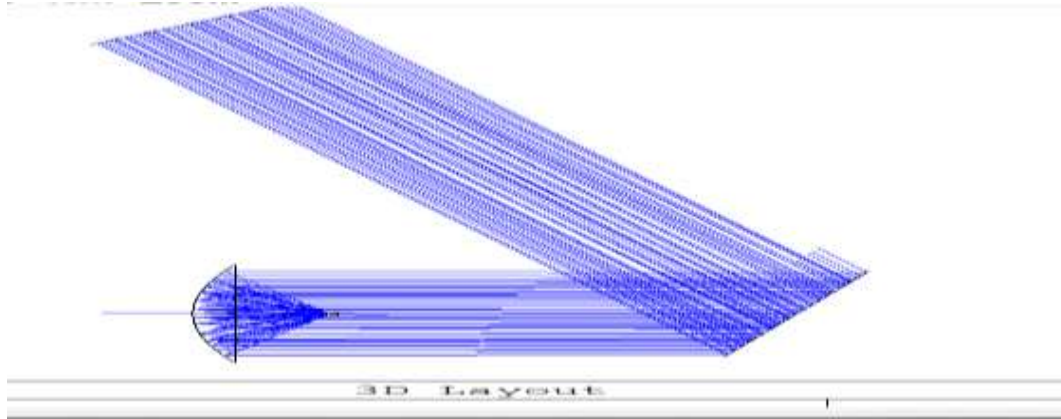
الشكل (4): مركز شمسي خطي.

واخترنا في هذا البحث مجمع القطع المكافئ لمزاياه، نذكر منها:

- 1- لأنه موجه دوماً باتجاه الشمس، لذلك يعتبر ذو كفاءة عالية.
 - 2- له نسب تركيز بحدود 600 إلى 2000 بالتالي كفاءته عالية في تركيز الطاقة الشمسية.
 - 3- يمكن له العمل بشكل مستقل أو كجزء من نظام موسع.
- مكونات منظومة ضخ الليزر الشمسي المقترح في هذه الدراسة:
- تتكون منظومة الضخ الشمسي من العناصر التالية، الشكل (5).

1. منبع الضخ (الشمس).
2. مرآة مسطحة.
3. مركز ذو قطع مكافئ.
4. فلتر.

5. حجرة الضخ.
6. المادة الفعالة (قضيبي Nd: YAG).
7. منظومة التبريد.
8. مرنان الليزر.



الشكل (5): مخطط منظومة الضخ الشمسي وفق برنامج zemax.

محاكاة منبع الضخ الشمسي: يوجد عدة أنواع من المنابع الضوئية في برنامج zemax واخترنا source radial لتمثيل منبع الأشعة الشمسية كما في الجدول (1).

الجدول (1) : بارامترات المنبع الشمسي وفق برنامج zemax

Object Type	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays
1	Source Radial	0	3000.000	0.000	57.000	0.000	0.000		50

Object Type	# Analysis Rays	Power(Watts)	Wavelength	Color #	X Half Width	Y Half Width	Minimum Angle	Maximum Angle	# Of Points
1	50000	640.000	0	0	400.000	400.000	0.000	0.270	5

حيث

x position, y position, z position: تمثل موقع (إحداثيات) المنبع على المحاور X,Y,Z.

Tilt About x, Tilt About y, Tilt About z: تمثل زاوية انحراف (ميلان) المنبع عن كل من المحاور الثلاثة.
 Material: تمثل نوع العنصر أو نوع مادته.
 Layout rays: تمثل عدد الأشعة الخارجة من المنبع.
 Analysis rays: تمثل عدد الأشعة التي يتم تحليلها.
 Power: استطاعة المنبع.

على اعتبار أنّ شدة الإشعاع الشمسي الواصلة للأرض تساوي تقريباً $1000w/m^2$ فإن استطاعة المنبع تُحسب من جداء مساحة المنبع في شدة الإشعاع الشمسي [8].

$$P_{source} = 0.640 m^2 \times 1000w.m^{-2} = 640w$$

wavenumber: الرقم صفر يشير إلى أن الأطول الموجية المستخدمة هي الأمواج المُدخلة في الجدول (7).

x half width, y half width: تمثل نصف امتداد المنبع (العرض) على كل من المحورين x,y.

Maximum angle: التقريب الزاوي للشمس عندما تُرصد من الأرض.

محاكاة المرآة المسطحة: تم اختيار مرآة مسطحة مربعة الشكل مساحتها $1m^2$ لاستقبال أشعة المنبع الشمسي وتوجيهها الى المرآة المكافئة كما في الجدول (2).

الجدول (2): بارامترات المرآة المسطحة وفق برنامج zemax

Object Type	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	X Half Width	Y Half Width	
2	Rectangle	0.000	0.000	2000.000	28.500	0.000	0.000	MIRROR	500.000	500.000

حيث

x position, y position, z position: تمثل موقع (إحداثيات) المرآة على المحاور x,y,z.

Tilt About x, Tilt About y, Tilt About z: تمثل زاوية انحراف (ميلان) المرآة عن كل من المحاور الثلاثة.

Material: نوع المادة (مرآة عاكسة)

x half width, y half width: تمثل نصف عرض المرآة على كل من المحورين x,y.

محاكاة المركز ذي القطع المكافئ: هو سطح عاكس مقعر لالتقاط أشعة الشمس وتجميعها وتركيزها في المحرق. تم

اختيار قطع مكافئ قطره 1.8m وقطر فتحته الكبرى 0.8m الجدول (3).

الجدول (3): بارامترات القطع المكافئ وفق برنامج zemax

Object Type	Maximum Aper	Minimum Aper	Par 5 (unused)	Par 6 (unused)	Par 7 (unused)	Par 8 (unused)	Par 9 (unused)	Par 10 (unused)	Par 11 (unused)
3	Standard Surface	500.000	0.000						

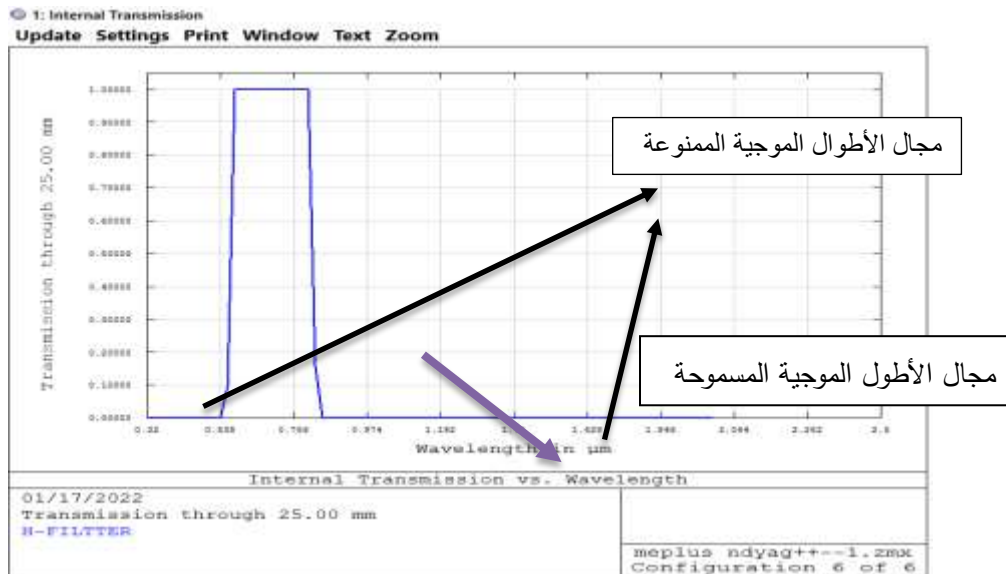
Object Type	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Radius	Conic
3 Standard Surface	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	MIRROR	900.000	-1.000

محاكاة الفلتر: تم استخدام فلتر أبعاده 17mm,17mm كما في الجدول (4): وطيف نفاذيته كما في الشكل (6).
الجدول (4): بارامترات الفلتر(المرشح) وفق برنامج zemax

Object Type	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Radius 1	Conic 1
4 Standard Lens	0.000	-1.000	490.000	0.000	0.000	0.000	H-FILTER	0.000	0.000

Object Type	Conic 1	Clear 1	Edge 1	Thickness	Radius 2	Conic 2	Clear 2	Edge 2	Far 10 (unused)
4 Standard Lens	0.000	17.000	17.000	2.000	0.000	0.000	17.000	17.000	

حيث x position, y position, z position تمثل موقع (إحداثيات) الفلتر على المحاور X,Y,Z.
Thickness: سماكة الفلتر مقدراً بالمليمتر.



الشكل (6): طيف نفاذية الفلتر

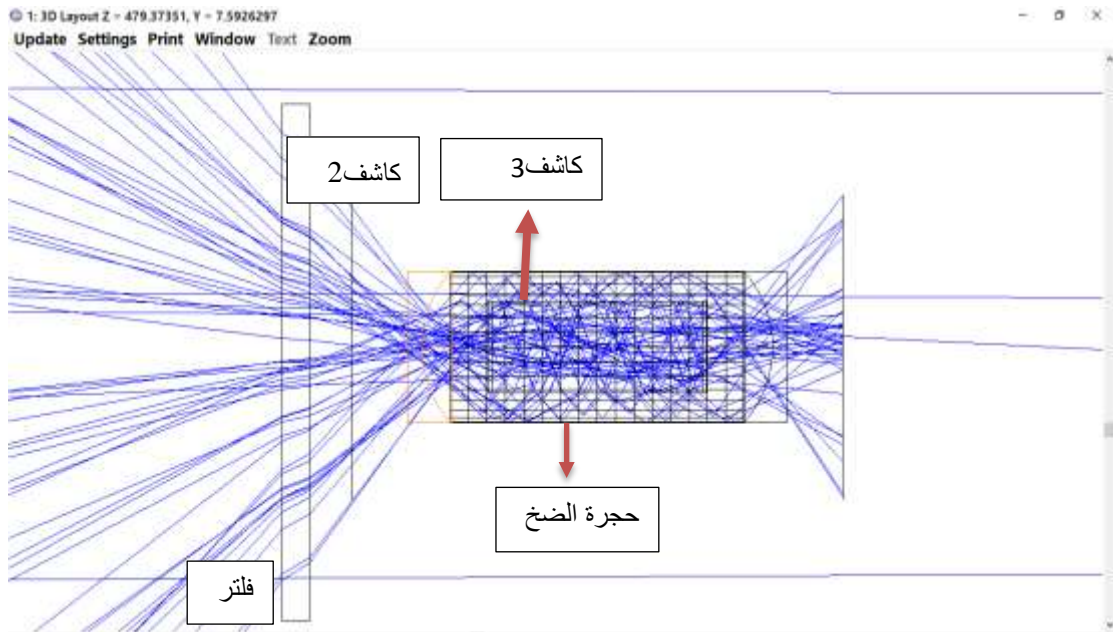
تكون وظيفة الفلتر السماح بمرور الأطوال الموجية المحصورة في المجال [0.538-0.9] (μm) وعدم السماح بمرور الأطوال الموجية خارج هذا المجال، أي أنّ قيم النفاذية المقابلة للأطوال الموجية المسموحة تساوي الواحد وقيم النفاذية المقابلة للأطوال الموجية الممنوعة تساوي الصفر.

محاكاة حجرة الضخ: هي عبارة عن أسطوانة أسطحها الداخلية مرآيا ذات درجة انعكاسية عالية، قطرها 10mm وطولها 21m. (الضخ الطرقي) كما في الجدول (5) ونصف أسطوانة عاكسة قطرها 10mm، وطولها 20mm (الضخ الجانبي).

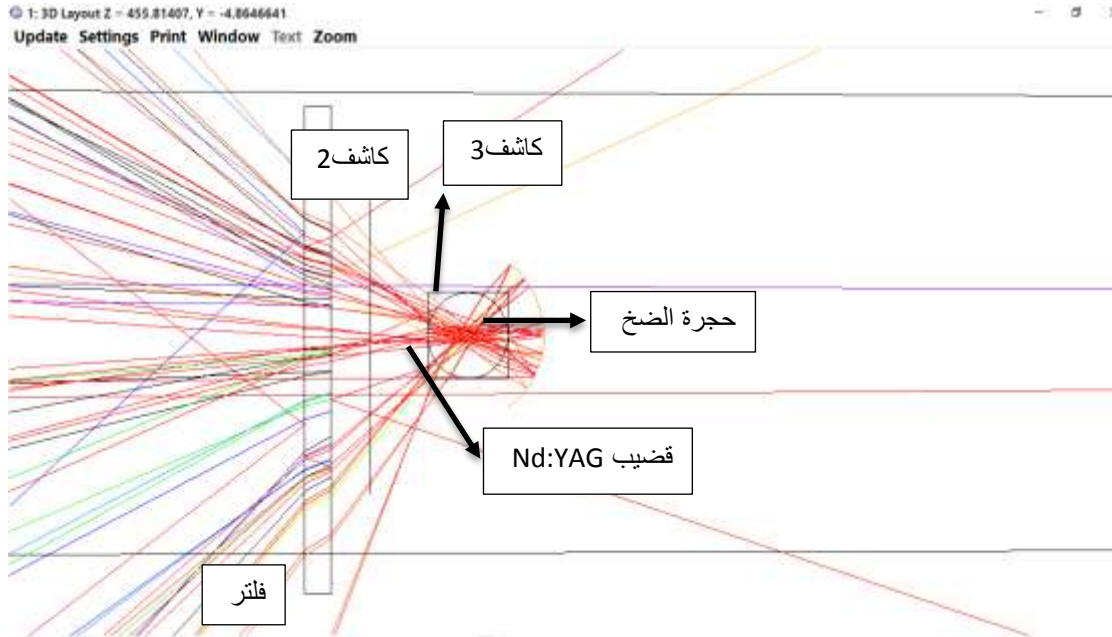
الجدول (5): بارامترات حجرة الضخ الأسطوانية وفق برنامج zemax

Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface 1 Config 6/6									
Edit Solves Tools View Help									
Object Type	Material	Front X Half ..	Front Y Half ..	Back X Half W..	Back Y Half W..	Z Length	Par 6 (unused)	Par 7 (unused)	Is Volume?
7	Ellipsoidal Volume	MIRROR	5.000	5.000	5.000	5.000	21.000		

قمنا باختيار شكل حجرة الضخ (أسطوانة) تبعاً لطريقة الضخ المتبعة (الطرقي) لكونه يحتضن المادة الفعالة، فالإشعاع الواصل من المركز يقوم بضخ طرفها مباشرة والسطح الداخلي يقوم بتسليط الإشعاع المشتت في عملية الضخ على جوانب المادة الفعالة وهذا للاستفادة من أكبر قيمة للإشعاع الشمسي المركز كما في الشكل (7) ، و(نصف أسطوانة) عاكسة للضخ (الجانبي) كما في الشكل (8).



الشكل(7): منظومة الضخ الأمامي وفق برنامج zemax.



الشكل (8): منظومة الضخ الجانبي وفق برنامج Zemax

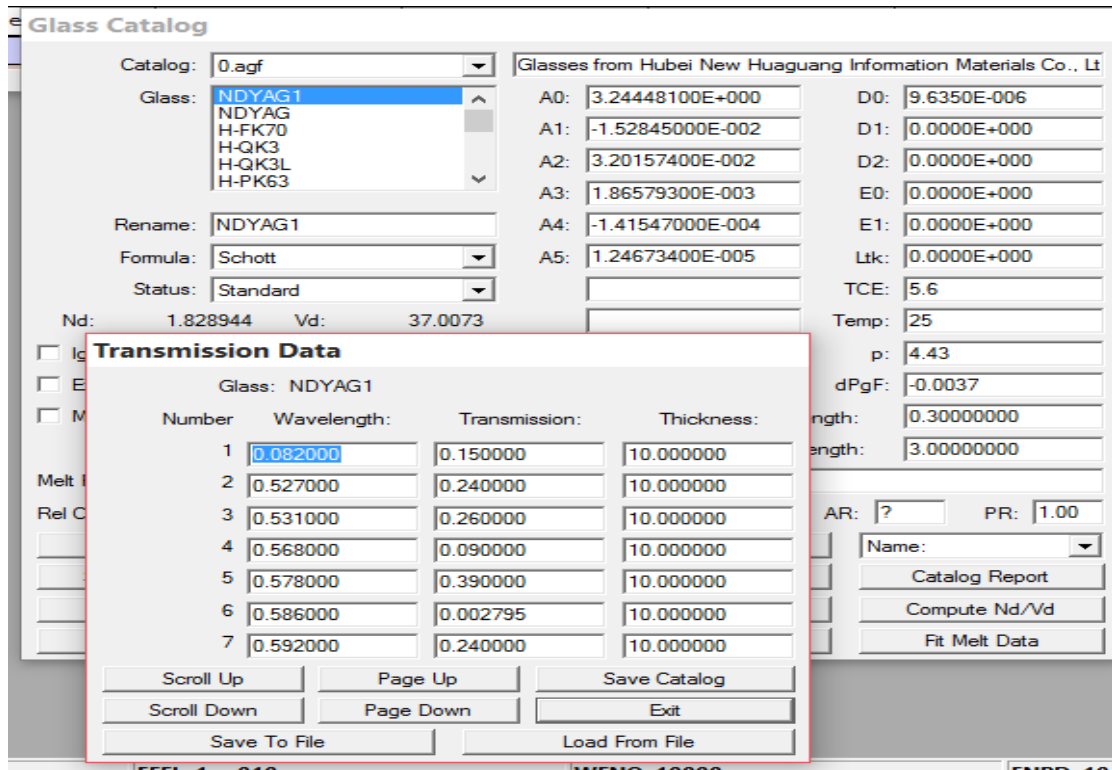
محاكاة قضيبي Nd: YAG : تم اختيار بلورة اسطوانية الشكل قطرها 6mm وطولها 15 mm كما في الجدول (6).

الجدول (6): بارامترات قضيبي Nd: YAG.

Object Type	Z Length	Back R	Par 4 (unused)	Par 5 (unused)	Par 6 (unused)	Par 7 (unused)	Par 8 (unused)	Par 9 (unused)	Par 10 (unused)
6 Cylinder Volume	15.000	3.000							

حيث Z length: طول القضيبي، Front R, Back R: نصف قطر الوجه الأمامي أو الخلفي للقضيبي.

قمنا بإضافة مادة النديميوم ياغ الى كتالوج الزجاج حيث قرينة انكسارها 1.828 الجدول (7).



الجدول (7): كاتالوج الزجاج في برنامج zemax.

الطول الموجي (μm)	0.527	0.531	0.568	0.578	0.586	0.592	0.732	0.736	0.743
معامل الامتصاص (cm ⁻¹)	1.43	1.35	2.41	0.94	5.88	1.43	1.43	2.41	1.83
النفاذية المحسوبة (I/I ₀)	0.24	0.26	0.09	0.39	0.002794785	0.24	0.24	0.09	0.16

و قمنا أيضاً بإدخال قيم معاملات الامتصاص لكل طول موجي يمتصه النديميوم ياغ وحساب النفاذية المقابلة لها من العلاقة $I/I_0 = e^{-\alpha x}$ كما في الجدول (8) وإدخالها أيضاً الى برنامج zemax .

الجدول (8): قيم معاملات الامتصاص [6] والنفاذية المحسوبة المقابلة لها عند كل طول موجي:

الطول الموجي (μm)	0.746	0.753	0.758	0.790	0.793	0.803	0.805	0.808	0.811
معامل الامتصاص (cm ⁻¹)	6.21	3.73	3.24	1.05	2.88	3.22	2.81	6.91	4.27
النفاذية (I/I ₀)	0.002009237	0.02	0.04	0.35	0.06	0.04	0.06	0.000997758	0.01

الطول الموجي (μm)	0.815	0.820	0.865	0.880
معامل الامتصاص (cm ⁻¹)	1.39	1.90	1.43	0.92
النفاذية (I/I ₀)	0.25	0.15	0.24	0.40

منظومة التبريد:

يتم استخدام الماء لتبريد قضيب الليزر بسبب الناقلية الحرارية العالية واللزوجة المنخفضة والحرارة النوعية له، حيث يتم تصميم مسار دوراني للماء ضمن التجويف البصري لضمان معدل تدفق مياه كاف.
مرنان الليزر:

يتألف من مرآتين تنتقل بينهما الفوتونات المتولدة ذهاباً وإياباً على طول المحور البصري (Resonator) للتجويف، تم استخدام مقارن خرج عاكسيته 98%.

نتائج المحاكاة العددية:

نستعمل الكواشف من أجل معرفة الاستطاعة في أي نقطة من المنظومة الضوئية [9].

الكاشف رقم 1:

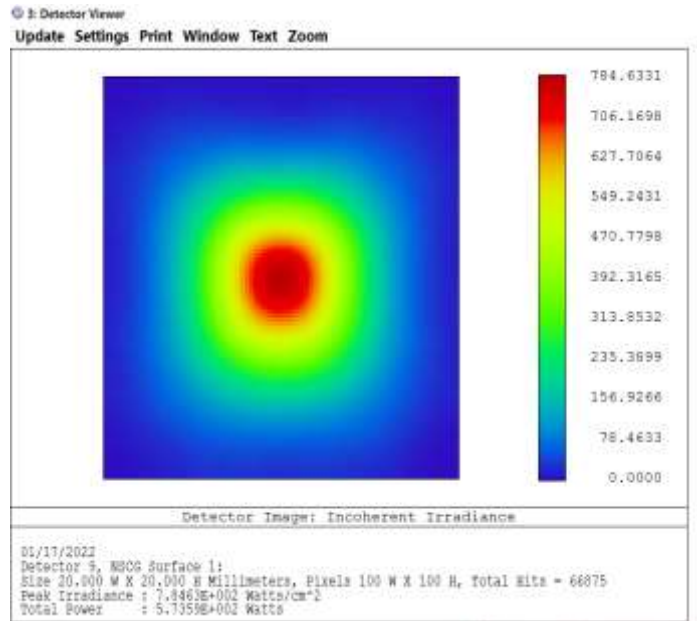
استخدمنا كاشف من النوع detector rectangle (كاشف سطحي) أبعاده 20mm,20mm موضح الجدول (9).
الجدول (9): بارامترات الكاشف الموجود بالمحرق وفق برنامج zemax.

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
Detector Rectangle	كاشف بالمحرق	0	0	0.000	0.000	447.000	0.000	0.000	0.000

Object Type	Material	X Half Width	Y Half Width	# X Pixels	# Y Pixels	Data Type	Color	Smoothing	Scale
Detector Rectangle		11.000	11.000	100	100	0	0	0	0

حيث x pixels, y pixels: عدد بكسلات الكاشف على المحورين x, y.

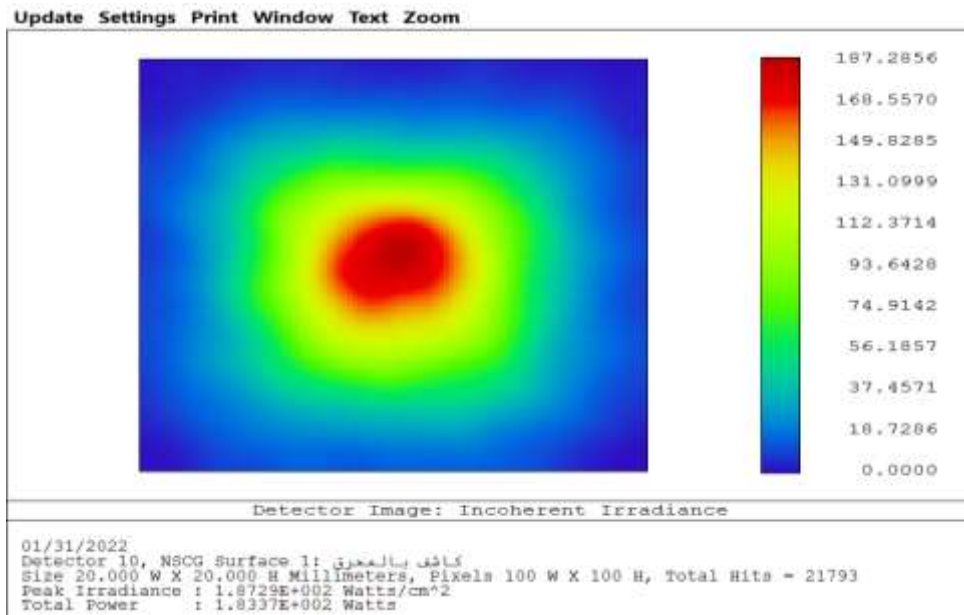
الهدف من استعمال الكاشف هو معرفة مكان تموضع محرق القطع المكافئ وكذلك قيمة الاستطاعة في هذه النقطة، بعد وضعه في المكان التقريبي بتغيير إحداثيات الموقع بعد تشغيل البرنامج نحصل على الشكل (9).



الشكل (9): يمثل توزيع الاستطاعة المركزة وكذلك قيمتها الكلية في بؤرة المركز المكافئ.

بلغت الاستطاعة المركزة 573.5w أي ما يعادل 784.6 w/mm^2 وبالتالي كفاءة التركيز 89%.
الكاشف رقم 2:

استخدمنا كاشف من النوع detector rectangle (كاشف سطحي) أبعاده 22mm,22mm بعد الفلتر الشكل (10):



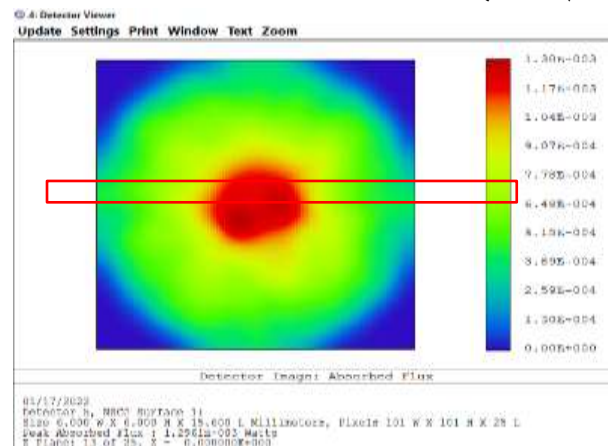
الشكل (10): يمثل توزيع الاستطاعة المركزة المرشحة وكذلك قيمتها الكلية.

فبلغت الاستطاعة المركزة المرشحة 183.3w.

الكاشف رقم 3:

استخدمنا كاشف من النوع detector volume (كاشف حجمي) أبعاده 6mm,6mm,15mm حول البلورة. حيث تكون المادة الفعالة مغمورة فيه بهدف معرفة نسبة الاستطاعة الممتصة في كل نقطة من نقاط الوسط الفعال وتوزيعها على طول القضيب .

a. الضخ الطرفي: بلغت الاستطاعة الممتصة 147w وبالتالي نحسب كفاءة الامتصاص من العلاقة (الاستطاعة الممتصة/الاستطاعة الواردة) وتساوي 80%، الشكل (10).



الشكل (10): يمثل توزيع الاستطاعة الممتصة في الكاشف الحجمي (ضخ طرفي).

5: Detector Viewer: كاشف عالي اللمعة

Update Settings Print Window

Detector Viewer Listing

File : C:\Users\asus\Desktop\فلتر\امامي اسود فلتر\زيماكس\zmx
 Title:
 Date : 04/16/2022
 Configuration 6 of 6

Detector 5, NSCG Surface 1: كاشف عالي اللمعة
 Size 6.000 W X 6.000 H X 15.600 L Millimeters, Pixels 101 W X 101 H X 25 L

Peak Absorbed Flux : 1.9277E-003 Watts
 Total Absorbed Flux : 1.4705E+002 Watts

Smoothing : None
 Data Type : Absorbed Flux
 Detector X : 0.0000
 Detector Y : 0.0000
 Detector Z : 462.5000
 Detector Tilt X : 0.0000
 Detector Tilt Y : 0.0000
 Detector Tilt Z : 0.0000
 Position Units : Millimeters
 Z Plane : All 25
 Flux Units : Watts

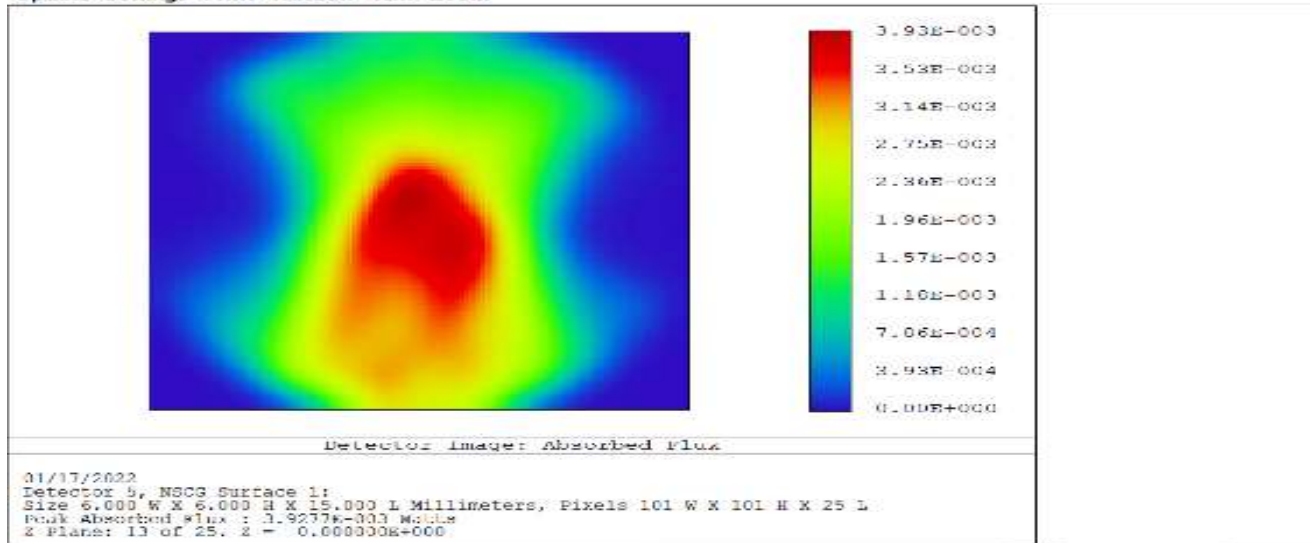
Z Plane 1 of 25. Z = -7.488000E+000

الشكل (11): يمثل قيمة الطاقة الكلية الممتصة في الكاشف الحجمي (ضخ طرفي).

b. الضخ الجانبي: بلغت الاستطاعة الممتصة 115.5w وبالتالي كفاءة الامتصاص 63%، الشكل (12).

3: Detector Viewer

Update Settings Print Window Text Zoom



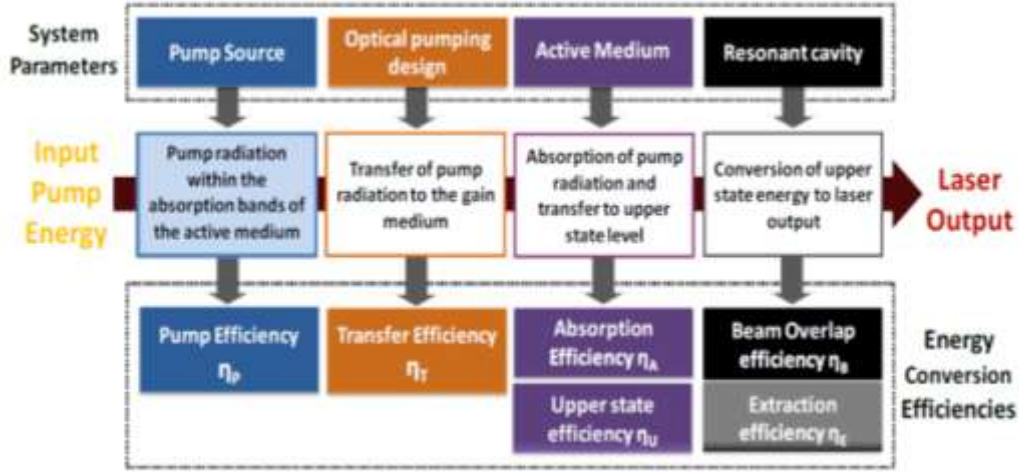
الشكل (12): يمثل توزيع الاستطاعة الممتصة وكذلك قيمتها الكلية في الكاشف الحجمي (ضخ جانبي).

ويمكن تلخيص النتائج بالجدول (10) التالي:

الجدول (10): نتائج الضخ الطرفي والضخ الخلفي

الضخ الجانبي	الضخ الطرفي	
640w		استطاعة المنبع الشمسي
573w		الاستطاعة المركزة
89%		كفاءة التركيز
183w		الاستطاعة المرشحة (الفعالة)
115.5	147w	الاستطاعة الممتصة
63%	80%	كفاءة الامتصاص

تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة ليزر



الشكل (13): تحويلات الطاقة في ليزر صلب

لمعرفة كفاءة ميل الليزر (slope efficiency) يجب معرفة ما يلي:

- كفاءة (مردود) الضخ (pump efficiency) وتُعرّف بالعلاقة

$$\eta_p = \frac{P_p}{P_{in}} \quad (1)$$

حيث P_p طاقة الضخ المفيدة (الفعالة) وهي جزء من طاقة الدخل والتي تقع ضمن مجال امتصاص المادة الفعالة لليزر. P_{in} طاقة الدخل.

بما أن مصدر ضخ الليزر في دراستنا هو الشمس، فإن كفاءة الضخ η_p لا تعتمد على الطاقة الكهربائية بل تعتمد على كفاءة تداخل طيف امتصاص الوسط الفعال مع طيف الإصدار الشمسي على النحو التالي

$$\eta_p = \eta_{ovp} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} g_{\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

حيث $g\lambda$ هو الإشعاع الطيفي لمصدر الضخ (الشمس)، λ_1 إلى λ_2 هو مجال الطول الموجي داخل نطاقات امتصاص الوسط الفعال.

وبالنسبة لليزر Nd: YAG المضخ بالطاقة الشمسية فإنّ تداخل طيف امتصاصه مع طيف الإصدار الشمسي (η_{ovp}) يساوي 0.14 او 0.16 [4].

• **كفاءة انتقال الطاقة (transfer efficiency)** تُعرّف بالعلاقة

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_p} \quad (3)$$

حيث P_t جزء الطاقة المركزة المنتقلة من مصدر الضخ إلى الوسط الفعال والتي تعتمد على الشكل الهندسي للمركزات الشمسية وأبعاد حجرة الضخ وانعكاس جدرانها وخسائر امتصاصها و أبعاد القضيب المصدر وقضيب الليزر ، وكذلك المسافة الفاصلة بينهما ، انعكاس جدران المضخة. P_p طاقة الضخ المفيدة (الفعالة).

• **كفاءة الامتصاص (absorption efficiency)** تُعرّف بأنّها النسبة بين الطاقة الممتصة والطاقة المركزة الفعالة المنتقلة إلى الوسط الفعّال كما في العلاقة

$$\eta_a = \frac{P_a}{P_t} \quad (4)$$

حيث P_a جزء الطاقة الممتص ضمن القضيب الليزري Nd: YAG. P_t الطاقة المركزة المفيدة الواصلة للبلورة.

• **كفاءة كمومية (quantum efficiency)** هي النسبة بين عدد الفوتونات المساهمة في انبعاث الليزر وعدد فوتونات المضخة ($\eta_q = 0.9$) Nd: YAG [4].

• **كفاءة ستوكس quantum efficiency** تُعرّف بالنسبة بين طاقة فوتونات الليزر الصادر إلى طاقة فوتونات الضخ كما في العلاقة

$$\eta_s = \frac{h\nu_l}{h\nu_p} = \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \quad (5)$$

حيث λ_p طول موجة فوتونات الضخ

λ_l طول موجة فوتونات الليزر

في الليزر الذي يتمّ ضخّه بالطاقة الشمسية، يُعرّف الطول الموجي للمضخة على أنه متوسط الطول الموجي للإشعاع الشمسي الممتص والمُرَجَح

$$\lambda_p = \eta_{ovp} = \frac{\int_{ab}^{ab} g_{\lambda} \lambda d\lambda}{\int_{ab}^{ab} g_{\lambda} d\lambda} \quad (6)$$

(العلامة الموجودة أسفل التكامل) تشير إلى أن التكامل يتمّ على نطاقات امتصاص الليزر فقط.

نظرًا لأن الطول الموجي لمادة الليزر Nd: YAG هو $\lambda_l = 1064 \text{ nm}$ ، و الطول الموجي للمضخة الشمسية = 660 nm يكون $\eta_s = 0.62$.

• **كفاءة الترابط (coupling efficiency):**

تتخضع طاقة خرج الليزر بسبب الخسارات في المرنان ويعبر عن ذلك بكفاءة الترابط (التقارن) بالعلاقة

$$\eta_c = \frac{-\ln(R)}{\delta - \ln(R)} = \frac{T}{T + \delta} \quad (7)$$

T : ضياعات مرآة الخرج (نفاذية).

R : عاكسية مرآة الخرج.

δ : الضياعات الكلية ضمن المجاوبة.

$$\delta = 2 \alpha l + \delta_D + \delta_M \quad (8)$$

$2 \alpha l$ الخسارة في البلورة ذهاباً وإياباً.

δ_D خسارة الانكسار.

δ_M خسارة التبعثر.

• **كفاءة الميل slope efficiency**

تتناسب كفاءة الميل طردياً مع كفاءة التقارن وتعطى بالعلاقة التالية

$$\eta_{slope} = \eta_p \eta_t \eta_a \eta_q \eta_b \eta_c = \eta_p \eta_t \eta_a \eta_q \eta_b \left(\frac{-\ln(R)}{\delta - \ln(R)} \right) \quad (9)$$

ويمكن أن تُكتب بالشكل

$$\eta_{slope} = \frac{P_{out}}{P_{in} - P_{th}} \quad (10)$$

الجدول (11) جدول بالقيم المستخدمة لحساب الكفاءة

zemax حُسبت من برنامج	0.89	η_t	كفاءة الانتقال
zemax حُسبت من برنامج	0.8 (ضخ طرفي) 0.63 (ضخ جانبي)	η_a	كفاءة الامتصاص
[8]	0.16	η_{ovp}	كفاءة الضخ
حُسبت من العلاقة (5)	0.62	η_s	كفاءة ستوكس
[7]	0.9	η_q	الكفاءة الكوانتية
[7]	1	η_b	كفاءة حزمة التداخل
[8]	0.003 cm^{-1}	α	معامل تشتت بلورة Nd:YAG
	15 mm	l	طول بلورة Nd:YAG
	3 mm	r	نصف قطر بلورة Nd:YAG
[7]	2.2 kw/cm^2	I_s	كثافة الإشباع
	95%	R	عاكسية مرآة الخرج

بتعويض قيم الكفاءات السابقة في العلاقة (9) نحصل على كفاءة الميل

$\eta_{slope} = 0.043$ أي 4.3%	ضخ طرفي
$\eta_{slope} = 0.034$ أي 3.4%	ضخ جانبي

إن شرط الحصول على الليزر هو أن يكون الريح أكبر تماماً من الضياعات في كل دورة للشعاع ضمن المجاوب. سنقوم بحساب معامل الريح g_0 من العلاقة (11) والريح G لمرور واحد في القضيب الليزري وفق العلاقة (12)

$$g_0 = \frac{p_a \cdot \eta_{slope}}{A \cdot I_s} \quad (11)$$

حيث p_a : الاستطاعة الممتصة، A : مساحة المقطع العرضي للقضيب، I_s : كثافة الإشباع لمادة النيديميوم ياغ واحدها W/cm^2 ، η_s : كفاءة ميل الليزر.

$$G = e^{gl} \quad (12)$$

بالتعويض في العلاقة (11) و (12) نحصل على

$G = 1.0001 > 1$	$g_0 = 0.0101$	ضخ طرفي
$G = 1.00009 > 1$	$g_0 = 0.006$	ضخ جانبي

تُعطى استطاعة عتبة ضخ الليزر (threshold pump power) بالعلاقة التالية

$$P_{th} = \left(\frac{\delta - \ln R}{2} \right) \frac{A h \nu_l}{\eta \sigma \tau_f} = \left(\frac{\delta - \ln R}{2 \eta_p \eta_t \eta_a \eta_q \eta_s \eta_b} \right) A I_s \quad (13)$$

تُعطى استطاعة خرج الليزر بالعلاقة

$$P_{out} = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{\delta - \ln R} - 1 \right) = -\ln(R) \left(\frac{\eta_p \eta_t \eta_a \eta_q \eta_s \eta_b}{\delta - \ln R} P_{in} - A I_s \right) \quad (14)$$

كما يمكن أن تكتب بدلالة كفاءة الميل بالعلاقة

$$P_{out} = \eta_{slope} (P_{in} - P_{th}) \quad (15)$$

τ_f : زمن حياة الفوتون واحدها μs .

σ : المقطع الفعال للإصدار الليزري المحثوث cm^2 .

$h \nu_l$: طاقة الفوتون المنبعث من الانتقالات الليزرية (J).

P_{out} : استطاعة الخرج واحدها الواط (W).

P_{in} : استطاعة الدخل واحدها الواط (W).

P_{th} : استطاعة العتبة واحدها الواط (W).

تُعطى الكفاءة الكلية للنظام بالعلاقة (16)

$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (16)$$

بالتعويض في العلاقات (13) و (14) و (16) باعتبار أن الطاقة الداخلة هي الطاقة المركزة الفعالة

$$P_{in} = 183W \text{ نحصل على}$$

الضخ الجانبي	الضخ الطرفي	
165.3 w	130.2 w	استطاعة عتبة الضخ P_{th}
0.612 w	1.73 w	استطاعة خرج الليزر P_{out}
0.3%	0.94%	الكفاءة الكلية η_{sys}

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- وجدنا من خلال المحاكاة العددية باستخدام برنامج (Zemax) أن استطاعة الممتصة بالنسبة للضخ الطرفي أكبر من استطاعة الممتصة للضخ الجانبي، وذلك يعود إلى أن الإشعاع الممتص يكون مركّز على الطرف في حين يكون موزّع على الجوانب.
- وجدنا حسابياً أن استطاعة عتبة الضخ في حالة الضخ الطرفي أقل من استطاعة العتبة في الضخ الجانبي بسبب التناسب العكسي مع استطاعة الممتصة.
- وجدنا حسابياً أن استطاعة خرج الليزر في حالة الضخ الطرفي أكبر منها في الضخ الجانبي.
- وجدنا حسابياً أن كفاءة الميل والكفاءة الكلية في حالة الضخ الطرفي أكبر منها في الضخ الجانبي.

التوصيات:

- تغيير أبعاد بارامترات نظام التجميع من أجل زيادة طاقة التركيز وتغيير أبعاد المادة الفعالة وشكل حجرة الضخ.
- توجيه الإشعاع المركّز إلى القضيبي باستخدام الموجّهات الضوئية (الألياف الضوئية).
- توسيع الدراسة على أنواع أخرى من البلورات التي يمكن أن تقلل من استطاعة عتبة الضخ أو يكون لها مجال امتصاص لأشعة الشمس أكبر من مجال امتصاص Nd: YAG.

References:

1. Weksler, M., Schwartz, J., *Solar-pumped solid-state lasers*. IEEE Journal of Quantum Electronics 24 (6), 1222–1228, 1988.
2. Ohkubo, T., *Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens*. Optics Letters 34 (2), 175–177, 2009.
3. Liang, D., Almeida, J., *Highly efficient solar-pumped Nd: YAG laser*. Optical Express 19 (27), 26399–26405, 2011.
4. ABDEL-HADI, Y., GHITAS, M., ABULWAFI, A., Sabry, M. *Simulation model of a new solar laser system of Fresnel lens according to real observed solar radiation data in Helwan of Egypt*, National Research Institute of Astronomy and Geophysics, 249-255, 2015.
5. Ghalib, M., *efficiency evaluation of different grooves silicon solar cell using ZEMAX, master thesis, Bagdad university, 2010.*
6. LIANG, D. *High-efficiency solar laser pumping by a ring-array concentrator*, NOVA University of Lisbon. 2019.
7. Kochner W., Bass M., *Solid-State Lasers*, Springer, 2006
8. ALMIDA, J. *Advances in solar-pumped laser efficiency and brightness*, NOVA University of Lisbon. 2017.
9. Software for optical design; zemax development corporation, (2005). _