

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
قسم الفيزياء

أطروحة: لنيل شهادة الدكتوراه

تخصص: فيزياء الإشعاعات، كاشف وبصريات إلكترونية

من طرف: عيادي عائشة

تحت عنوان:

دراسة لمركز شمسي لضخ الإشعاع الشمسي لغرض التطبيقات الإلكترونية الضوئية

نوقشت علنا بتاريخ 2023/12/16 من طرف اللجنة المكونة من :

رئيسا	أستاذ التعليم العالي-جامعة ورقلة	بشكي جمال
مناقشا	أستاذ التعليم العالي-جامعة ورقلة	بن مبروك لزهري
مناقشا	أستاذ التعليم العالي-جامعة غرداية	داودي باحمد
مناقشا	أستاذ محاضر-أ-المدرسة العليا ورقلة	سويقات عبد القادر
مشرفا	أستاذ التعليم العالي-جامعة ورقلة	بن طويلة عمر
مشرفا مساعدا	أستاذ محاضر-أ-جامعة ورقلة	سوداني محمد البار

الموسم الجامعي 2024/2023

الإهداء

أهدي هذا العمل المتواضع:

إلى روح "والدتي" رحمها الله، واسكنها فسيح جنانه.

إلى "أفراد عائلتي" الأعزاء، الذين ساندوني في هذه المسيرة منذ البداية.

إلى اللاوتي وقفن معي في عثراتي: ميار، وهيبة.ح، مريم.ش، أمال.م، إنتصار.ع، تكريم.ق،
مريم.ب.

إلى "أساتذتي" الأجلاء، الذين كانت لهم بصمة، في مشواري الدراسي.

إلى كل من ساهم من قريب أو من بعيد في وصولي إلى ما وصلت إليه اليوم.

عائشة

التشكرات

الحمد لله الذي علم بالقلم علم الإنسان ما لم يعلم والصلاة والسلام على حبيبنا محمد صل الله عليه وسلم مُبلغ الرسالة، ومؤدي الأمانة، وناصح الأمة.

تم بفضل وتيسير من الله إنجاز هذه العمل المتمثل في مشروع نيل شهادة الدكتوراه تخصص فيزياء الإشعاعات، كاشف وبصريات إلكترونية ، في مخبر تطوير الطاقات الجديدة والمتجددة بالمناطق الجافة والصحراوية **LENREZA** كلية الرياضيات وعلوم المادة بجامعة قاصدي مرباح ورقلة.

في البداية أود أن أشكر والدي الذي أعلم أنني عبثا أحاول أن أوافيه حقه، فأدأه الله لي، وللجامعة، ثم أتقدم بفائق الشكر والاحترام والامتنان لأستاذي المشرف على الأطروحة "بن طويلة عمر" على سعيه الكبير من أجل تيسير وتسهيل سيرورة هذا العمل، وعلى جهده وعلمه ووقته المبذولين، كما أتقدم بالشكر الجزيل إلى أستاذي ووالدي الروحي "سوداني محمد البار" المساعد المشرف على الأطروحة على كل ما بذله معي من جهد ووقت وعلم من أجل إتمام هذا العمل، فشكرا لكم جميعاً، وجزاكم الله عني كل خير.

كما أتوجه بعبارات الشكر لكل من ساعدني ولو بكلمة طيبة وأخص بالذكر أختي ميار، أختي أسامة، صديقاتي تكريم، انتصار، مريم، أساتذتي الأستاذ بن مبروك لزهري، الأستاذ عاشوري عبد الرحيم، الأستاذ بشكي جمال.

كما أشكر أعضاء لجنة المناقشة على قبولهم مناقشة هذا العمل وهم السادة: الأستاذ الدكتور بشكي جمال من جامعة ورقلة، الأستاذ الدكتور بن مبروك لزهري من جامعة ورقلة، الأستاذ الدكتور سويقات عبد القادر من المدرسة العليا بورقلة، الأستاذ الدكتور داودي باحمد من جامعة غرداية، ولهم مني أسامي عبارات الامتنان.

عائشة

ملخص

في هذا العمل وبالاعتماد على المحاكاة، قمنا بتركيز الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة بالجزائر خط الطول $L=5.240$ ، دائرة العرض $\varphi=31.570$ والارتفاع عن سطح البحر $Z=141$ m باستخدام مركز صحن قطع مكافئ بسيط ذو قطرين مختلفين في يومين شتوي وصيفي، يقوم بالضخ الطرقي لثلاث ليزرات قضيب YAG: Nd صفيحة YAG: Nd وقضيب GSGG:Nd:Cr من أجل إنتاج الليزر. كما استعنا بمنظومة تبريد من أجل درجة حرارة مناسبة لليزر. حيث تحصلنا على 7.84 Mw/m^2 إشعاع مركز، وسجلنا استطاعة دخول 955.5 واط، أنتجت لنا استطاعة خرج لليزر تعادل 46.43 واط.

الكلمات المفتاحية: إشعاع شمسي، ليزر شمسي، استطاعة دخول، استطاعة خرج، $YAG: Nd$ ، $GSGG:Nd:Cr$.

Abstract

In this paper, based on the simulation, we concentrate the solar radiation in Ouargla region in Algeria for laser production. The parameters location of this region were the longitude is L-5.24, latitude is q-31.57, and the height above the sea level is Z=141 m. To do so, we use a reflective dish with two different diameters in a summer day and winter day as well. The laser production is achieved by side-pumping of three lasers namely YAG:Nd rod, YAG:Nd plate and GSGG:Nd:Cr rod. To get a suitable temperature for the laser, we use a refrigeration system and a solar spectrum filter. We obtained a 7.84 Mw/m^2 concentrated radiation and recorded an inpower of 955.5 W and an outpower of the laser equal to 46.43 W.

Keywords: Solar radiation, solar laser, reflective dish, YAG:Nd, GSGG:Nd:Cr.

فهرس المحتويات

-	إهداء
-	تشكرات
-	ملخص
iv-i	فهرس المحتويات
vii-v	قائمة الأشكال
viii	قائمة الجداول
xii-ix	قائمة الرموز والاختصارات
5-1	المقدمة العامة
34-7	الفصل الأول: الإشعاع الشمسي والمركبات الشمسية
8	I.1. الإشعاع الشمسي
8	I.1.1. تعريف الإشعاع الشمسي
9	I.2.1. طيف الإشعاع الشمسي
10	I.3.1. العوامل المؤثرة على توزيع الإشعاع الشمسي
10	I.3.1.1. زاوية الورود
10	I.2.3.1. اختلاف مدة التشميس للمنطقة
11	I.3.3.1. شفافية الغلاف الجوي
11	I.4.3.1. تضاريس المنطقة
11	I.5.3.1. الألبيدو
11	I.4.1. الثابت الشمسي
13	I.5.1. الزوايا الشمسية
13	I.1.5.1. الإحداثيات الزمنية
15	I.2.5.1. الإحداثيات الأفقية

فهرس المحتويات

17	3.5.1.I الإحداثيات الأرضية
18	6.1.I توقيت شروق و غروب الشمس
19	7.1.I الإشعاع الشمسي المباشر و المنتشر
19	1.7.1.I الإشعاع الشمسي المباشر
20	2.7.1.I الإشعاع الشمسي المنتشر
20	8.1.I التتبع الشمسي
20	1.8.1.I التتبع بمحوري دوران
21	2.8.1.I لتتبع بمحور دوران واحد
21	3.8.1.I تبع ارتفاع الشمس
21	4.8.1.I تتبع سمت الشمس
22	5.8.1.I حالة عدم التتبع (تثبيت اللاقط الشمسي)
22	2.I المراكز الشمسية
23	1.2.I مراكز البؤرة الخطية (مراكز الأحواض الشمسية)
23	1.1.2.I المركز الشمسي الأسطواني القطع مكافئ
24	2.2.I مراكز البؤرة النقطية
24	1.2.2.I الصحن القطع مكافئ
24	2.2.2.I مراكز البرج الشمسي
25	3.2.I الصحن القطع مكافئ
28	4.2.I الدراسة الضوئية
28	1.4.2.I المردود الضوئي للصحن القطع مكافئ .
30	الخلاصة
34-31	المراجع

فهرس المحتويات

61-35	الفصل الثاني: الليزر الشمسي والليزر الشمسي
36	1.II. المكونات الأساسية لجهاز الليزر
38	2.II. مبدأ عمل الليزر: التفاعل إشعاع - مادة
39	1.2.II. الامتصاص
41	2.2.II. لإصدار العفوي
42	3.2.II. الإصدار المحثوث
44	4.2.II. التضخيم الضوئي
46	3.II. المنظومة الليزرية
46	1.3.II. نظام ثلاثي المستويات
47	2.3.II. نظام رباعي المستويات
48	4.II. أنواع الليزر
48	1.4.II. ليزر الحالة الصلبة
49	2.4.II. ليزر الحالة الغازية
50	3.4.II. ليزر الحالة السائلة
50	5.II. ليزر Nd:YAG
51	1.5.II. بنية الليزر Nd:YAG
51	2.5.II. مبدأ عمل الليزر Nd:YAG
53	7.II. الليزر الشمسي
53	1.7.II. فكرة الليزر الشمسي
54	2.7.II. تقنية الليزر الشمسي
55	3.7.II. طرق ضخ الليزر الشمسي
56	4.7.II. عملية تحويل الطاقة

فهرس المحتويات

58	5.6.II. الكفاءة التجميعية لليزر
59	الخلاصة
61-60	المراجع
78-62	الفصل الثالث: النموذج
63	1.III. دراسة توثيقية لليزر الشمسي
66	2.III. النموذج
68	1.2.III. نظام التبريد
69	2.2.III. مرشح طيف الإشعاع الشمسي
70	3.2.III. الفرضيات التبسيطية للنموذج
70	4.2.III. الدراسة الحرارية لتبريد مادة الليزر
72	5.2.III. المعالجة الرقمية للمعادلات التفاضلية
73	6.2.III. الحل العددي
75	الخلاصة
78-76	المراجع
98-79	الفصل الرابع: تحليل ومناقشة النتائج
80	1.IV. الإشعاع الشمسي المركز
82	2.IV. استطاعة خرج الليزر
90	3.IV. درجة الحرارة
93	4.IV. كفاءة التجميع
96	الخلاصة
98	المراجع
102-99	الخاتمة العامة

فهرس المحتويات

-	الملحق
---	--------

قائمة الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
9	توزيع طيف الإشعاع الشمسي	1-1
10	محاكاة إشعاع الجسم الأسود لطيف الإشعاع الشمسي	2-1
12	المسافة بين الشمس و الأرض	3-1
12	الثابت الشمسي بدلالة اليوم من السنة n	4-1
13	حركة الأرض بالنسبة للشمس	5-1
14	بيان تغيرات زاوية الميل الشمسي خلال أيام السنة	6-1
16	زاوية سمت الشمسي و الارتفاع الشمسي	7-1
17	زاوية الساعة الشمسية و دائرة العرض للمنطقة	8-1
18	زوايا تحديد المواقع (زاوية خط العرض ϕ و زاوية خط الطول L)	9-1
21	رسم توضيحي لتتبع سمت الشمس	10-1
23	المركز الشمسي الأسطوانى القطع مكافئ	11-1
24	الصحن القطع مكافئ•	12-1
24	مركزات البرج الشمسي	13-1
26	رسم توضيحي مساحة القطع مكافئ	14-1
26	رسم توضيحي لزاوية الحافة	15-1
27	الشكل تغيرات d/f بدلالة زاوية الحافة ψ	16-1
27	لعلاقة بين البعد المحرقى و زاوية الحافة من أجل قطر ثابت للصحن	17-1
38	رسم توضيحي للتجويف الرنيني	1-2
38	الآليات الرئيسية لتفاعل الإشعاع مع المادة	2-2
39	رسم توضيحي لعملية الامتصاص	3-2
40	مخطط يوضح عملية الامتصاص	4-2
41	مخطط يوضح عملية الإصدار العفوي	5-2

قائمة الأشكال

44	رسم توضيحي لعملية التضخيم الضوئي	6-2
47	نظام ذو ثلاث مستويات	7-2
48	نظام ذو أربعة مستويات	8-2
51	بنية الليزر YAG: Nd	9-2
52	مخطط يوضح مبدأ عمل الليزر	10-2
54	رسم توضيحي لليزر الشمسي	11-2
55	تحويل الطاقة في: (أ) الليزر الذي يتم ضخه بالكهرباء، (ب) الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية	12-2
55	رسم تخطيطي لليزر الحالة الصلبة الذي يعمل بالطاقة الشمسية	13-2
56	رسم تخطيطي للضخ الجانبي	14-2
56	رسم تخطيطي للضخ الطرفي	15-2
57	الخطوات الأربعة لعملية تحويل الطاقة لأشعة الليزر YAG: Nd التي تعمل بالطاقة الشمسية	16-2
67	رسم توضيحي لنظام التركيز المدروس	3-1
68	رسم توضيحي لنظام التبريد المستعمل	3-2
74	المخطط الانسيابي للبرنامج العددي:	3-3
81	شدة الإشعاع الشمسي خلال يوم: (أ) 29 ديسمبر (ب) يوم 29 جويلية	1-4
82	تغييرات استطاعة خرج الليزر بدلالة استطاعة الدخول يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره YAG: Nd، D=1m لصفحة	2-4
83	تغييرات استطاعة خرج الليزر بدلالة استطاعة الدخول يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره D=1m، ل: (أ) قضيب الليزر YAG: Nd و (ب) قضيب الليزر GSGG: Nd: Cr	3-4
84	تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره D=2m، لصفحة YAG: Nd	4-4
85	تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره D=2m، ل: (أ) قضيب الليزر YAG: Nd و (ب) قضيب الليزر GSGG: Nd: Cr	5-4
86	تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره D=1m، لصفحة YAG: Nd	6-4

قائمة الأشكال

87	تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=1m$ ، ل: (أ) قضيب الليزر YAG:Nd و (ب) قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr	7-4
88	تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=2m$ ، لصفحة YAG: Nd	8-4
89	تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=2m$ ، ل: (أ) قضيب الليزر YAG:Nd و (ب) قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr	9-4
91	تغييرات درجة الحرارة قبل وبعد التبريد خلال يوم 29 ديسمبر للمركز الشمسي: (أ) $D=1m$ ، (ب) $D=2m$	10-4
92	تغييرات درجة الحرارة قبل وبعد التبريد خلال يوم 29 جويلية للمركز الشمسي: (أ) $D=1m$ ، (ب) $D=2m$	11-4

قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	رقم الجدول
66	أبعاد الصحن القطع المكافئ المدرس	1-3
67	متغيرات النظام الشمسي	2-3
69	متغيرات الليزر المستعمل	3-3
93	الكفاءة التجميعية للمواد الليزرية المختارة	1-4
94	مقارنة بين استطاعة الدخول والخروج لدراستنا ودراسة سابقة	2-4
95	مقارنة بين استطاعة الدخول والخروج لدراستنا ودراسة سابقة	3-4

قائمة الرموز

الوحدة	المقدار الفيزيائي	الرمز
m^2	المساحة	A
$^{\circ}$	زاوية السميت الرأسية	A
/	معامل التراجع الهندسي	A_f
/	الكتلة الهوائية الضوئية	AM
/	معامل الاحتكاك	C_f
/	التركيز الهندسي للمركز الشمسي	C_g
$\frac{J}{K Kg}$	السعة الحرارية	C_p
M	القطر	D
Min	معادلة التصحيح الزمني	Et
M	السماك	E
/	معامل الشكل	F
M	البعد البؤري	F
W/m^2	شدة الإشعاع الشمسي الكلي	G
$^{\circ}$	زاوية الإرتفاع الشمسي	H
$W/(m^2.K)$	معامل إنتقال الحرارة	h_c
W/m^2	شدة الإشعاع الشمسي المباشر	I
$^{\circ}$	زاوية ورود الإشعاع الشمسي	I
$^{\circ}$	زاوية خط الطول للمنطقة	L

قائمة الرموز

kg/s	التدفق الكتلي	m
Jour	رقم اليوم من السنة	N_j
/	رقم نوسلت اللابعدي	Nu
/	رقم برانتل اللابعدي	Pr
W	التدفق الحراري	Q
°C	درجة الحرارة	T
H	التوقيت الشمسي الحقيقي	TVS
H	التوقيت العالمي	TU
W/(m ² .K)	معامل الضياع الحراري	U_L
m/s	سرعة الرياح	V
M	عرض فتحة المجمع الشمسي	W
°	زاوية الساعة الشمسية	W
/	معامل الامتصاص	α
°	زاوية ميلان المجمع عن الأفق	β
/	معامل الاعتراض	γ
°	زاوية الميل الشمسي	δ
/	معامل الانبعاث	ε
°	زاوية الذروة	θ_Z
°	زاوية الحافة	θ_R

قائمة الرموز

Kg/m^3	الكتلة الحجمية	ρ
/	معامل الانعكاس	ρ°
J/K	ثابت بولتزمان	K
/	معامل النفاذية	τ
°	زاوية دائرة العرض للمنطقة	φ
/	المردود	η
/	معامل التوصيل الحراري	λ
J.S	ثابت بلانك	h
S^{-1}	التردد	ν
/	تعداد الأيونات	N
J.S.m^{-3}	كثافة الطاقة	$\rho(\nu)$
S^{-1}	معامل اينشتاين في الإصدار العفوي	A
m/J.S^2	معامل اينشتاين في الإصدار المحثوث	B
S	متوسط فترة الحياة	τ
w/m^2	شدة الشعاع الساقط	I_P
M	طول المرنان	L
/	معامل الريح في الليزر	γ
m^2	مساحة المقطع العرضي للوسط الفعال	A_α
w/m^2	تدفق التشبيع	I_S

قائمة الرموز

/	الكفاءة الكوانتية	η_q
/	نسبة التداخل	η_{ovp}
/	معامل الإمتصاص	α
/	الضیاعات	γ_l
/	النفاذية	T
/	الإنعكاسية	R
W	استطاعة العتبة	P_{th}
W	استطاعة الدحول	P_{in}
W	استطاعة خرج الليزر	P_{out}
/	كفاءة الليزر الشمسي	η

المقدمة العامة

مقدمة عامة

إن التزايد الكبير في استهلاك الطاقة الأحفورية يشكل خطراً يهدد كوكبنا نتيجة ما يسببه من تلوث بيئي وتغيرات مناخية كالاحتباس الحراري، حيث بلغ الاستهلاك العالمي للنفط في سنة 2021 حوالي 94.1 مليون برميل يوميا، بينما بلغ 99.98 مليون برميل يوميا في سنة 2022. ناهيك عن أنها طاقة قابلة للنفاد لذلك كانت هناك جهود كبيرة تحاول استغلال الطاقات المتجددة والتي لا تنفذ كطاقة الشمس والرياح والمياه...

تعتبر الشمس أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة، تنبعث منها طاقة تُقدر كثافة تدفقها بـ 63 Kw/m^2 ، تستقبل الأرض منها $1.7 \cdot 10^{14} \text{ Kw}$ بكثافة تدفق تصل إلى 1 Kw/m^2 على سطح الأرض، أي ما يعادل بالتقريب 10000 مرة من الطلب العالمي عن الطاقة، لذلك يتم استغلال هذه الطاقة في شتى المجالات [3] [1].

إن ضعف كثافة الإشعاع الشمسي في التطبيقات الصناعية جعل الباحثين يفكرون في تركيز هذا الإشعاع وذلك بالاعتماد على المركبات الشمسية. تقوم المركبات الشمسية على استقبال الإشعاع الشمسي على مستوى الفتحة، ثم تعكسه في البؤرة فيجتمع ويتركز هناك ويتحول إلى إشعاع شمسي مركز ذو طاقة كبيره مقارنة بالإشعاع الشمسي المباشر. يستغل هذا الإشعاع في مجالات عدة منها المجال الالكتروضوئي.

يعد الليزر أحد أهم اكتشافات الإنسان إثارة للاهتمام، في المجال الالكتروضوئي كلمة ليزر بالحروف الإنجليزية **LASER** هي اختصار لـ **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**، وتعني

تضخيم الضوء بانبعث الإشعاع المحثوث، وهو عبارة عن تحويل حزمة ضوئية ذات موجات ضوئية غير منتظمة وباستخدام مواد مناسبة تدعى البلورات الليزرية وتكون عالية النقاوة يمكن حثها من أجل إنتاجها لأشعة ضوئية منتظمة ذات طول موجي واحد [4]، وعندما تتوافق هذه الموجات وبعد انعكاسها عدة مرات بين مرآتين داخل بلورة الليزر تتداخل الموجات، وتخرج من الجهاز حزمة ضوئية رفيعة جداً وقوية جدا، لدرجة أنها قادرة على احتراق الألماس، وهو أصلب مادة في الطبيعة [5].

مقدمة عامة

من أجل تضخيم الضوء نحتاج لمصدر طاقة لإثارة الذرات المستقرة وحثها على الانتقال لمستويات طاقة أعلى تدعى هذه التقنية بالضخ وله عدة طرق ضخ كهربائي ضخ كيميائي، ضخ ضوئي [6].

يعتبر الضخ الضوئي من أحدث طرق الضخ، حيث يقوم بتحويل الإشعاع الشمسي المركز الغير مترابط والعريض النطاق إلى إشعاع ليزر متماسك وأحادي اللون، من أجل ذلك تقوم المركبات الشمسية بتركيز الإشعاع الشمسي لتوفر كثافة ضخ أكبر من العتبة اللازمة لإثارة الذرات، ومنه إنتاج ليزر يعتمد على الإشعاع الشمسي، أو بما يسمى بالليزر الشمسي.

يختلف مقدار طاقة العتبة، وذلك حسب المادة الفعالة لبلورة الليزر [7]، حيث أعلن في سنة 1963 م، عن أول ليزر شمسي باستخدام مرآة كروية بفتحة 35.56 cm من طرف Kiss ومجموعته [8] ، وتوالت بعده المحاولات إلى يومنا هذا.

أصبح الليزر الشمسي محط اهتمام كبير نظرًا لأهميته في العديد من التطبيقات خاصة في المناطق التي تتميز بتوفر الشمس بشكل كبير وندرة مصادر الطاقة التقليدية، مثل الفضاء، والصحاري ، والبحار والمحيطات..

حيث يعمل الباحثون على تطوير الليزر الشمسي من خلال العمل على زيادة استطاعة الخرج بكفاءة تجميعية عالية من أجل استغلاله في إنجاح الكثير من المهام والتطبيقات مثل التخلص من الحطام الفضائي المداري، رصد الكواكب حيث يُستخدم لتحديد مواقعها بدقة ومعرفة اتجاهاتها ومعدلات حركتها، وقياس المسافات الكونية، كما يستخدم في الاتصالات الفضائية والملاحة الفضائية، أما جيولوجيا فيمكن لليزر تحليل المعادن والصخور الموجودة على سطح الكواكب والنجوم ، بالإضافة إلى حل بعض المشكلات البيئية كمشكلة تراكم أكسيد المغنيسيوم في المحيطات، وذلك عبر تحويله إلى مادة المغنيسيوم، والكثير من المجالات العلمية الأخرى [4].

يتميز الموقع الجغرافي لمنطقة ورقلة في الجزائر بارتفاع ساعات التشميس، حيث يقدر متوسطها حوالي 8.87 ساعة يوميًا، أما سنويًا فتقدر بحوالي 3236.4 ساعة [الملحق]، كما يتميز بانخفاض منسوب الأمطار وهذا ما

مقدمة عامة

يجعلها مناسبة للدراسات الحرارية والضوئية. حيث قمنا بدراسة حرارية ضوئية من أجل الحصول على استطاعة خرج معتبرة لليزر الشمسي وكفاءة تجميع عالية نسبياً، بناءً على شدة الإشعاع الشمسي المركز في منطقة ورقلة بالجزائر. حيث اعتمدنا على مركز شمسي عبارة عن صحن قطع مكافئ بأقطار مختلفة ودون اللجوء إلى التتبع الشمسي، مما يجعل النظام يتميز بالبساطة، خلافاً للأنظمة المستعملة فنظام العدسات مثلاً يتطلب عناية خاصة وتنظيف دائم لها من الغبار لضمان تركيز أفضل للضوء، خاصة في منطقة ورقلة التي تتميز بنشاط معتبر للرياح [9-10].

كما استخدمنا ضخ جانبي للمواد الفعالة المستعملة، من أجل إنتاج الليزر الشمسي، وتفادياً لارتفاع درجة الحرارة على مستوى المادة الفعالة أضفنا نظام تبريد ومرشح للطيف، لحمايتها من التلف.

قسمنا هذه الدراسة على أربعة فصول:

الفصل الأول كان بعنوان الإشعاع الشمسي والمركبات الشمسية:

تطرقنا فيه إلى مفهوم الإشعاع الشمسي، والعوامل المؤثرة على توزيعه، كذلك الزوايا الشمسية، وكل من الإحداثيات الزمنية، والأفقية، والأرضية، ثم انتقلنا إلى معادلات تقدير الإشعاع الشمسي، وأنواع التتبع الشمسي، بعدها انتقلنا إلى أنواع المركبات الشمسية وركزنا على الصحن القطع مكافئ، ثم دراسة ضوئية له، ومردوده الضوئي.

الفصل الثاني كان بعنوان الليزر والليزر الشمسي: تطرقنا فيه إلى الليزر ومكوناته، ثم مبدأ عمله حيث عرضنا خلاله عمليات الامتصاص، الإصدار العفوي، الإصدار المحثوث، ثم التضخيم الضوئي، والمنظومة الليزرية ذات ثلاث مستويات، وأربع مستويات، ثم أنواع الليزر، بعدها انتقلنا إلى الليزر الشمسي تطرقنا في ذلك إلى فكرته، وتقنيته، ثم إلى طرق ضخه، ثم اختتمنا الفصل بكفاءة الليزر وخلاصة.

الفصل الثالث كان بعنوان النموذج تطرقنا فيه أولاً إلى دراسة توثيقية لليزر الشمسي، ثم شرح النموذج الذي طرحناه في هذا العمل بعدها تطرقنا لنظام التبريد المستعمل من أجل خفض درجة الحرارة على مستوى بلورة الليزر، ومرشح

مقدمة عامة

طيف الإشعاع الشمسي الذي يسمح بمرور طيف الأشعة تحت الحمراء فقط، ولتسهيل الدراسة وضعنا فرضيات تبسيطية للنموذج بعدها قمنا بالدراسة الحرارية لتبريد مادة الليزر ومن ثمة انتقلنا إلى المعالجة الرقمية ثم حلها. الفصل الرابع كان بعنوان تحليل ومناقشة النتائج تطرقنا فيه إلى عرض النتائج المتحصل عليها، حيث قمنا بعرض ومناقشة، وتحليل كل من الإشعاع الشمسي المركز والمتحصل عليه، استطاعة خرج الليزر للمواد الليزرية الثلاث، درجة حرارة بلورة الليزر قبل وبعد التبريد، وكفاءة التجميع، بعدها استعنا ببعض الدراسات السابقة من أجل المقارنة بها.

ختاماً حوصلنا النتائج في خاتمة عامة وآفاق مستقبلية.

- [1] Soudani, M.E., et al., Experimental and theoretical study of Parabolic trough collector (PTC) with a flat glass cover in the region of algerian sahara (Ouargla). Journal of Mechanical Science and Technology, 2017. 31: p. 4003-4009.
- [2] Kreith F, Kreider JF. Principles of solar engineering. New York: McGraw-Hill; 1978.
- [3] M. Romero, D. Martinez, and E. Zarza, "Terrestrial solar thermal power plants: on the verge of commercialization," in Proceedings of the 4th international conference on solar power from space, 2004.
- [4] صالح مصطفى الأتروشي و رياض وديع يوسف ،"الليزر أسس و استخدامات"، كلية الهندسة ،جامعة دهوك ،دار دجلة ، الطبعة الأولى 1426هـ-2008م.
- [5] د.سعود بن حميد اللحياني ،"الليزر و تطبيقاته" ، كلية العلوم ،جامعة أم القرى،كلية العلوم التطبيقية
شعبة الفيزياء الطبية110330 <http://upu.edu.sa/page/ar/110330> .
- [6] بيلا أ.لينكيل، "الليزرات"، جامعة سان فرناندو، جامعة كاليفورنيا، ترجمة فاروق عبودي قيصر، كلية العلوم، دار الكتب للطباعة و النشر، جامعة الموصل 1403 هـ - 1984 م.
- [7]. د. محمد كوسا، " فيزياء الليزر وتطبيقاته"، كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، 2005-2006.
- [8] Frankl J. (1962) Sun-powered lasers. Inst. 274, 531–532.
- [9] Guide des Energies Renouvelables. Ministère de L'énergie et des Mines Algérienne. (Edition 2007).
- [10] Guide des Energies Renouvelables, République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère de L'énergie et des Mines, Edition 2007.

الفصل الأول

الإشعاع الشمسي والمركبات

الشمسية

مقدمة

تعتبر الطاقة الشمسية أصل جميع الطاقات على مستوى الأرض سواء الأحفورية منها أو الطاقات المتجددة كما تتميز بكونها واسعة الانتشار وبسيطة الاستعمال وغير مكلفة، واستغلها الإنسان منذ القدم في تلبية احتياجاته وتطور هذا الاستخدام مع تطور الصناعة والتكنولوجيا، ويتم الاستفادة من الطاقة الشمسية من خلال التحويل الحراري حيث يتم تسخين الموائع بتعرضها للإشعاع الشمسي أو من خلال التحويل الكهروضوئي بواسطة الخلايا الشمسية. سنتعرض في هذا الفصل إلى تقدير شدة الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض والعوامل المؤثرة عليه من الموقع واليوم من السنة والتوقيت وذلك من خلال تحديد الزوايا الشمسية، وكذا التعرف على أنواع الإشعاع الشمسي وطرق التتبع.

1.I. الإشعاع الشمسي

1.1.I. تعريف الإشعاع الشمسي

ينبعث الإشعاع الشمسي على شكل فوتونات لها سرعة الضوء (C) وفق موجات عرضية حيث لكل فوتون طول موجي (λ) وكمية الطاقة (E) تتناسب عكسيا مع الطول الموجي و حسب نظرية بلانك كما توضح المعادلة الآتية:

$$E = hu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1 - 1)$$

حيث:

$$u = \frac{c}{\lambda} \text{ هي تردد الموجة [Hz].}$$

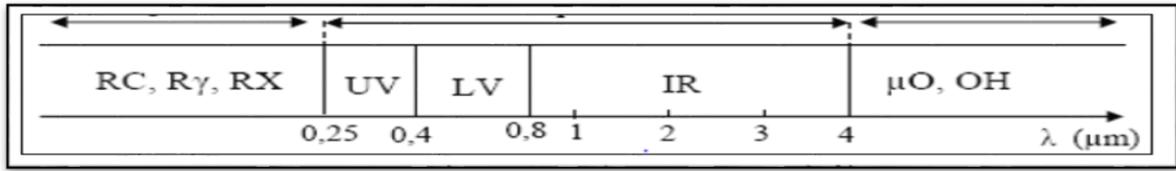
λ : طول الموجة

c: سرعة الضوء في الفراغ، حيث $c=3 \times 10^8$ [m/s].

h: ثابت بلانك، حيث $h=6.62 \times 10^{-34}$ [J.s].

2.1.I. طيف الإشعاع الشمسي

إن الإشعاع الشمسي الصادر من الشمس على شكل أمواج كهرومغناطيسية بأطوال موجية مختلفة، تتوزع طاقتها على طيف الإشعاع بنسبة 98% في مجال $\lambda \in [0.25-4]\mu\text{m}$ ، بينما نجد 1% من الطاقات تحت هذا المجال و1% فوق هذا المجال [2]، كما هو مبين في الشكل 1-1.



الشكل 1-1: توزيع طيف الإشعاع الشمسي [3].

$\lambda \in [0.25-0.4]\mu\text{m}$ المجال فوق البنفسجي (UV) يمثل 7% من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

$\lambda \in [0.4-0.8]\mu\text{m}$ المجال المرئي (LV) يمثل 47% من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

$\lambda \in [0.8-4]\mu\text{m}$ المجال تحت الأحمر (IR) يمثل 45.5% من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

حيث:

R $_X$: الأشعة السينية. R $_Y$: الأشعة غاما. R $_C$: الأشعة الكونية.

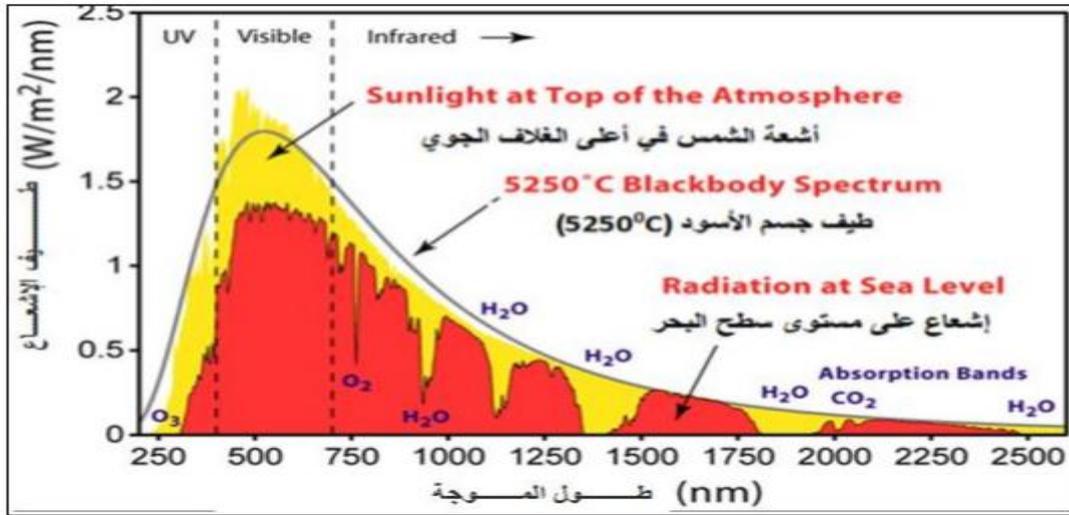
μ_0 : أشعة الميكروويف

OH: أشعة الراديو.

إن الإشعاع الشمسي يحاكي إشعاع الجسم الأسود في درجة الحرارة $T=5600\text{ K}$ في مجال الطيف

$\lambda \in [0.25-4]\mu\text{m}$ بينما يصل إلى سطح الأرض بعد بعض الامتصاصات من قبل مختلف الغازات و

بخار الماء داخل الغلاف الجوي [2]، كما هو مبين في الشكل 1-2.



الشكل 1-2: محاكاة إشعاع الجسم الأسود لطيف الإشعاع الشمسي [4].

3.1.1.I العوامل المؤثرة على توزيع الإشعاع الشمسي

العوامل التي تؤثر في شدة الإشعاع الشمسي و في تغيرها خلال اليوم من الشروق للغروب وكذا تغيرها خلال

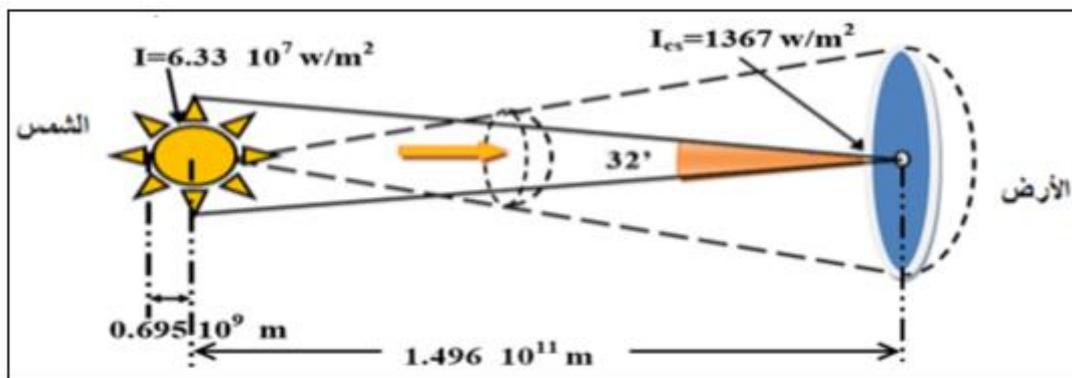
مختلف فصول السنة:

1.3.1.I زاوية الورود

تؤثر هذه الزاوية في شدة الأشعة الشمسية الواصلة لسطح الكرة الأرض، وذلك لأن الأشعة الشمسية ذات الورود الناظمي على سطح الأرض تكون عالية الشدة، بسبب زيادة كثافة توزيعها على سطح الأرض من جهة و قصر المسافة التي تقطعها مقارنة بالأشعة ذات الورود المائل من جهة ثانية، وبذلك تكون أقل عرضة للضياعات بفعل تأثير كل من الانكسار والانتشار والامتصاص التي تحدث في الغلاف الجوي الخارجي.

2.3.1.I اختلاف مدة التشميس للمنطقة

يؤدي اختلاف مدة التشميس دورا كبيرا في تغير كمية أشعة الشمس الواصلة إلى سطح الأرض عند كل منطقة. فبسبب ميلان الأرض تتمدد مدة التشميس لنصف الكرة الأرضية الشمالي صيفا وتتقلص مدة التشميس شتاء، والعكس من ذلك بالنسبة لنصف الكرة الأرضية الجنوبي.



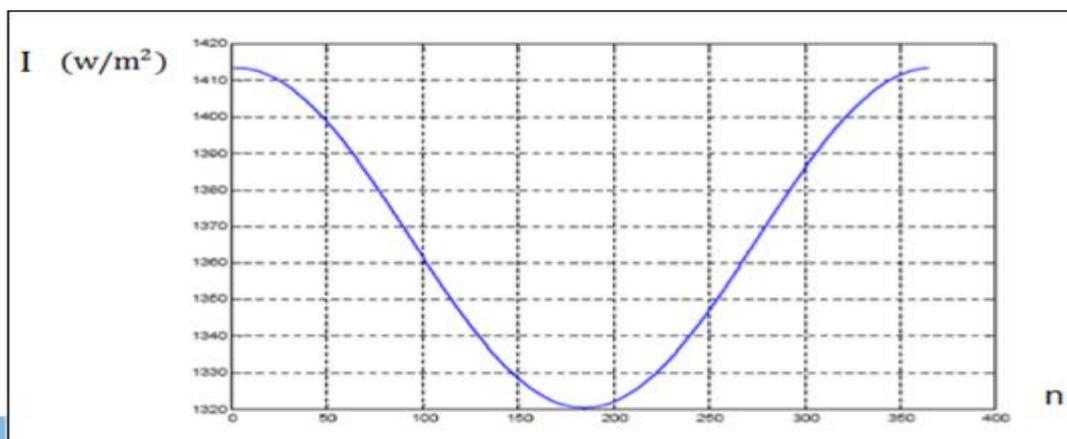
الشكل 1-3: المسافة بين الشمس و الأرض [7].

وتعطي علاقة الثابت الشمسي خلال أيام السنة بالمعادلة 1-2 والموضحة بالمنحنى البياني في الشكل 1-4 [8]:

$$I = I_0 \left[1 + 0.034 \left[(n_2) \cos \frac{360}{356} \right] \right] \quad (2 - 1)$$

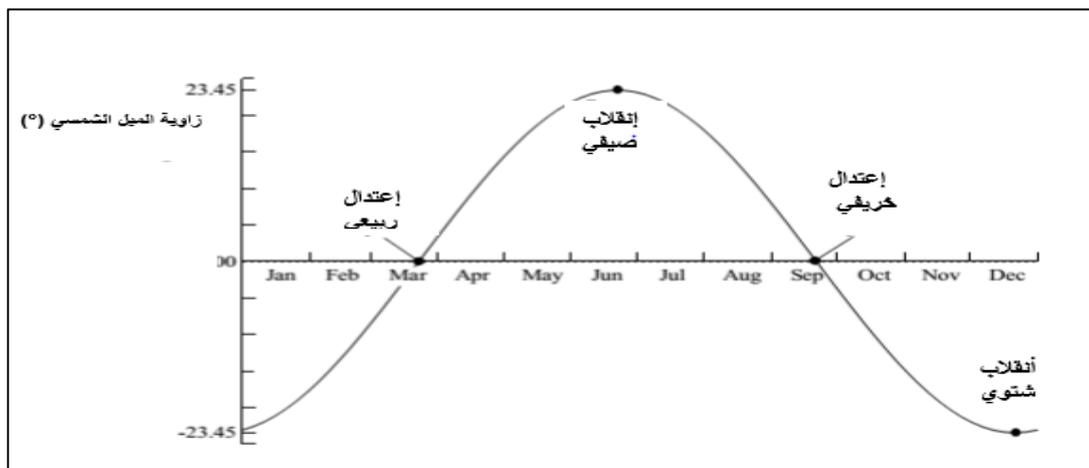
I_0 : الثابت الشمسي الواصل إلى طبقة الجو المحيط بالأرض.

N_2 : رقم اليوم من السنة ابتداءً من 1 جانفي (n=1,, 365).



الشكل 1-4: الثابت الشمسي بدلالة اليوم من السنة n [6].

بينما تكون $\delta=0$ في الاعتدالين الخريفي في 21 سبتمبر والربيعي في 21 مارس. كما يبين الشكل 1-6.



الشكل 1-6: بيان تغيرات زاوية الميل الشمسي خلال أيام السنة.

ب. زاوية الساعة الشمسية (ω)

إن الإشعاع الشمسي يسمح دورة كاملة حول الأرض (360°) خلال (24 h) وفق دائرة العرض، أي (

15° لكل ساعة، ومع اعتبار الزوال هو المبدأ ($\omega=0$) تعطي عبارة زاوية الساعة الشمسية [11].

بالعلاقة:

$$\omega = 15(TVs - 12) \quad (4 - 1)$$

حيث TVs يمثل التوقيت الشمسي الحقيقي الذي يعتمد الزوال الشمسي في المنطقة ($\omega=0$) عند الساعة

12:00 زوالاً. وتكون $\omega > 0$ مساءً، بينما تكون $\omega < 0$ صباحاً [12].

ج. التوقيت الشمسي الحقيقي (TVs)

يرتبط مباشرة بدوران الأرض حول نفسها، والمعروفة بزاوية الساعة الشمسية ω . حيث يكون الزوال الشمسي

عند الساعة $TVs=12$.

$$TVs = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (5 - 1)$$

د. متوسط التوقيت الشمسي TSM

وهو الوقت الذي يوافق دوران الأرض حول الشمس. ويختلف قليلا عن TVs نتيجة التصحيح الزمني

(الفرق الأقصى ET=16 min).

$$TSM = TVs + ET \quad (6 - 1)$$

حيث تعطى المعادلة الزمنية (Et) بالعلاقة التالية:

$$ET = 0.0072 \cos n - 0.0528 \cos 2n - 0.0012 \cos 3n - 0.1229 \sin n - 0.1565 \sin 2n - 0.014 \sin 3n \quad (7 - 1)$$

حيث: n تمثل رقم اليوم في السنة من 1 إلى 365.

2.1.5.I الإحداثيات الأفقية

أ. زاوية الارتفاع h

وهي الزاوية المحصورة بين الخط الواصل بين نقطة على سطح الأرض و مركز الشمس والخط

الأفقي الذي تمر فيه النقطة على الأرض. [13]. حيث: $h \in [-90^\circ, +90^\circ]$ وتكتب بالعلاقة

التالية. [14]:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (8 - 1)$$

مع الأخذ بعين الاعتبار أن $h=0$ عند شروق وغروب الشمس. بينما $h>0$ في النهار، و $h<0$ في

الليل.

ب. زاوية السميت الشمسي **a**

هي الزاوية التي يصنعها مسقط الشعاع الشمسي الوارد للنقطة من سطح الأرض على المستوى الأفقي، مع المحور المتجه للجنوب عند هذه النقطة، وتكون هذه الزاوية موجبة إذا كانت نحو الغرب وتكون سالبة إذا كانت نحو الشرق كما يبين الشكل 1-7، وتعطى بالعلاقة: [14]

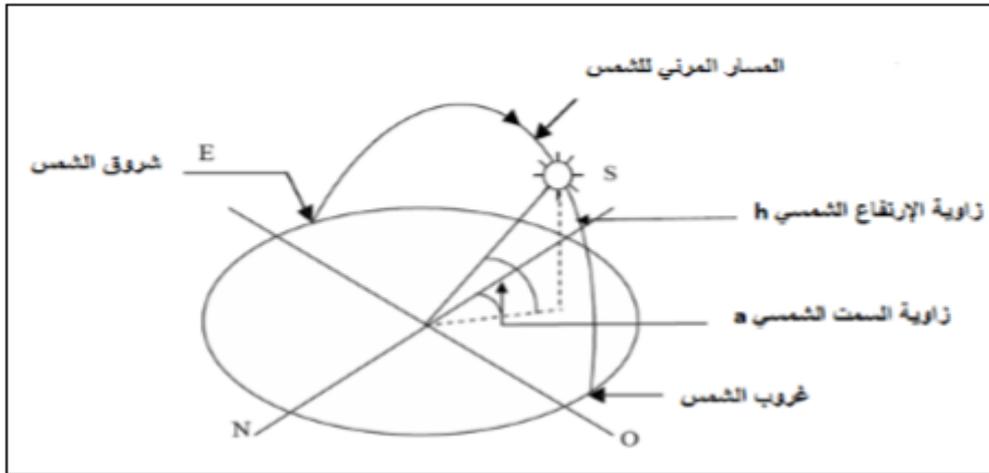
$$\cos a = \frac{\sin h \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cdot \cos \varphi} \quad (10 - 1)$$

حيث: $\alpha \in [-180^\circ, +180^\circ]$

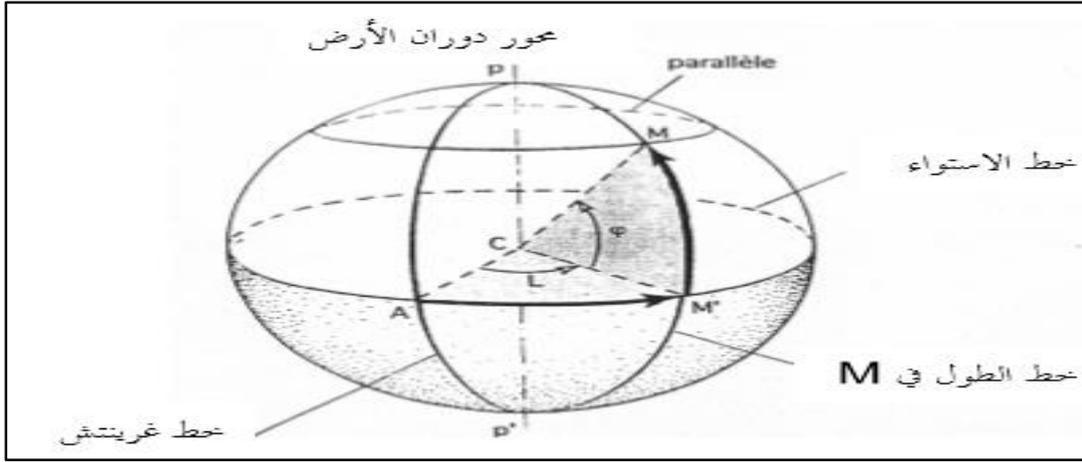
$a=0$: مسقط الشعاع الشمسي منطبق على محور الجنوب.

$a>0$: مسقط الشعاع منحرف عن محور الجنوب باتجاه الغرب.

$a<0$: مسقط الشعاع منحرف عن محور الجنوب باتجاه الشرق [14].



الشكل 1-7: زاوية السميت الشمسي و الإرتفاع الشمسي [15].



الشكل 1-9: زوايا تحديد المواقع (زاوية خط العرض φ وزاوية خط الطول L) [14].

6.1.I. توقيت شروق و غروب الشمس

تعتمد مدة التشميس لليوم بلحظتين مُهمتين هما شروق و غروب الشمس، تعطى معادلاتهما بالشكل

التالي [6]:

- التوقيت الشمسي للشروق:

$$TVS_{\text{lever}} = 12 - \frac{\omega S}{15} \quad (11 - 1)$$

- التوقيت الشمسي للغروب:

$$TVS_{\text{coucher}} = \left(12 + \frac{\omega S}{15}\right) \quad (12 - 1)$$

تعطى الزاوية الشمسية للشروق $-\omega S$ والغروب $+\omega S$ ، لما تنعدم زاوية ارتفاع الشمس في العلاقة 12-1 [6].

لما $h=0$ ، فإن $\sin(h)=0$ ومنه تصبح:

$$\begin{aligned} \cos \omega S &= -\tan \delta \cdot \tan \varphi \Rightarrow \omega S \\ &= -\text{arc cos}(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \end{aligned} \quad (13 - 1)$$

7.1.I. الإشعاع الشمسي المباشر و المنتشر

1.7.1.I. الإشعاع الشمسي المباشر

هو الإشعاع الذي يرد من الشمس ليصل إلى سطح الأرض مباشرة من دون عمليات ضوئية أخرى (تشتت، انعكاس، انكسار ..) وتكون نسبته عالية في الأيام المشمسة بينما في الأيام الغائمة يكون تقريبا معدوما. [17].
تعطى عبارة شدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد من الشمس إلى سطح الأرض ناظما بعد اختراقه للغلاف الجوي بالعلاقة [18]:

$$I_b = I[a_0 + a_1 e^{-K \cdot AM}] \quad (14 - 1)$$

حيث a_0 ، a_1 و K ثوابت تجريبية تعطى من طرف Duffie و Beckman بالعلاقات التالية:

$$a_0 = 0.94[0.4237 - 0.00821(6 - Z)^2] \quad (15 - 1)$$

$$a_1 = 0.98[0.5055 - 0.00595(6.5 - Z)^2] \quad (16 - 1)$$

$$K = 1.02[0.2711 - 0.01858(2.5 - Z)^2] \quad (17 - 1)$$

حيث:

Z : ارتفاع المنطقة فوق سطح البحر معبرا عنها ب Km .

AM : الكتلة الهوائية الضوئية.

I : الثابت الشمسي.

أما في حالة الإشعاع الشمسي المباشر الذي يرد بزاوية i على سطح مائل تعطى بالعلاقة:

$$I_{bt} = I_b \cos i \quad (18 - 1)$$

2.7.1.I. الإشعاع الشمسي المنتشر

وهو الإشعاع الذي يصل سطح ما بعدما نحجب عنه الإشعاع المباشر بواسطة التظليل. وتكون كمية هذا

الإشعاع 10% عندما تكون السماء صافية، و 100% عندما تكون السماء عاتمة [17].

وتعطى عبارة شدة الإشعاع الشمسي المنتشر بالعلاقة:

$$I_d = I \cdot \sin h[0.2710 - 0.2939(a_0 + a_1 e^{-K \cdot AM})] \quad (19 - 1)$$

حيث أن الإشعاع المنتشر لا يتأثر بالمركبات الشمسية بخلاف الإشعاع المباشر الذي تحدث له عملية التركيز. [19].

8.1.1. التتبع الشمسي

من أجل الحصول على أقصى كمية من الإشعاع الشمسي المباشر في مختلف التطبيقات الضوئية والحرارية يجب تتبع فتحة اللاقط لمسار الشمس حتى تبقى أشعة الشمس ناظمية أو شبه ناظمية على الفتحة خلال مدار مدة التشميس ويوجد عدة أنواع للتتبع الشمسي:

1.8.1.1. التتبع بمحوري دوران

في هذه الحالة يتم تحريك اللاقط الشمسي أفقياً نحو سمت الشمس ورأسياً نحو ارتفاع الشمس، بحيث تبقى أشعة الشمس دوماً ناظمية على سطح الفتحة، وهذا النوع من التتبع مناسب للصحن القطع مكافئ كونه يمثل الحالة المثالية من حيث الاستفادة من الطاقة الشمسية من جهة، مع إمكانية التحقيق العملي نظراً لقلة العطالة الدورانية للصحن من جهة ثانية.

وفي هذه الحالة تكون زاوية الورود معدومة $\theta=0$.

2.8.1.1. التتبع بمحور دوران واحد

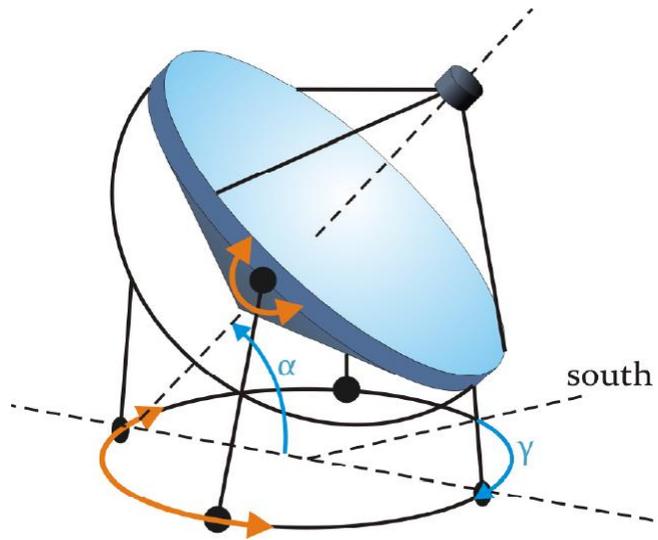
يكون التتبع بمحور دوران واحد على نوعين إما تتبع الارتفاع أو تتبع السمت:

3.8.1.I. تتبع ارتفاع الشمس

في هذه الحالة يتم تحريك اللاقط الشمسي رأسياً نحو ارتفاع الشمس بحيث تبقى أشعة الشمس دوماً تقع في المستوى الناظمي على سطح الفتحة، مع تثبيت زاوية سمت عند $\alpha=0$ أي توجيه اللاقط نحو الجنوب بالنسبة لنصف الكرة الشمالي، باعتبارها الوضعية الأنسب، وزاوية ارتفاع اللاقط تساوي زاوية ارتفاع الشمس.

4.8.1.I. تتبع سمت الشمس

في هذه الحالة يتم تحريك اللاقط الشمسي أفقياً مع سمت الشمس حيث يكون موجه شرقاً مع شروق الشمس ثم يتجه شيئاً فشيئاً نحو الغرب، حيث تكون زاوية سمت اللاقط تساوي زاوية سمت الشمس بينما تثبت زاوية ارتفاع اللاقط في القيمة المتوسطة $\beta = \varphi - \delta$. الفرق بين زاوية دائرة العرض وزاوية الميلان الشمسي، باعتبارها الزاوية الأنسب خلال اليوم.



الشكل 10-1: رسم توضيحي لتتبع سمت الشمس.

5.8.1.I. حالة عدم التبع (تثبيت اللاقط الشمسي)

في هذه الحالة تتعلق زاوية الورود i بين الشعاع الشمسي والنام على سطح فتحة اللاقط الشمسي بزوايا (دائرة خط العرض للمنطقة , زاوية الميلان الشمسي، زاوية السم، زاوية الساعة الشمسية، زاوية ميلان سطح اللاقط عن الأفق β) وتعطى بمعادلة [20].John et al

$$\begin{aligned} \cos i = & \sin\varphi(\sin\delta. \cos\beta + \cos\delta. \cos\alpha. \cos\omega. \sin\beta) \\ & + \cos\varphi(\cos\delta. \cos\omega. \cos\beta - \sin\delta. \sin\alpha. \sin\beta) \\ & + (\cos\delta. \sin\alpha. \sin\omega. \sin\beta) \end{aligned} \quad (20 - 1)$$

وفي حالة سطح الفتحة أفقية $\beta=0$ تصبح زاوية الورود:

$$\cos i = \sin\varphi. \sin\delta + \cos\varphi. \cos\delta. \cos\omega \quad (21 - 1)$$

ومن أجل توجيه اللاقط نحو الجنوب (زاوية سمت المجموع معدومة $\alpha=0$) مع ميلان عن الأفق بزاوية β :

$$\cos i = \sin(\varphi - \beta). \sin\delta + \cos(\varphi - \beta). \cos\delta. \cos\omega \quad (22 - 1)$$

ومن أجل ميلان سطح اللاقط عن الأفق بزاوية $\varphi=\beta$ تصبح العلاقة:

$$\cos i = \cos\delta. \cos\omega \quad (23 - 1)$$

نظرا لضعف شدة الإشعاع الشمسي في التطبيقات الصناعية، فإن الحاجة ملحة لرفع كثافة الإشعاع، ويتحقق ذلك من خلال المركزات الشمسية التي تستقبل الإشعاع الشمسي المباشر، وتجمعه نحو البؤرة، بفضل التصميم الهندسي للعاكس. وبذلك نحصل عند البؤرة على كثافة إشعاع شمسي جد مرتفع يصل إلى آلاف الأضعاف. وهذا ما نتعرف عنه في الفقرات القادمة.

2.I. المركزات الشمسية

تستخدم المركزات الشمسية في تجميع الإشعاع الشمسي نحو البؤرة، وبذلك الحصول على شدة إشعاع شمسي مركز ذو كثافة عالية، يستغل في مختلف التطبيقات الصناعية قصد التحويل الحراري أو الضوئي. وتقوم المركزات بهذا

الدور بفضل التصميم الهندسي للعاكس الذي يجعله يملك بؤرة خطية أو نقطية. وستعرف في هذا الفصل على أهم المركزات ومكوناتها وآلية اشتغالها ونهتم بدراسة أحد أنواعها وهو الصحن القطع مكافئ.

يعتمد مبدأ عمل المركزات الشمسية على استقبال الإشعاع الشمسي المباشر الساقط من خلال الفتحة حيث يرد على سطح العاكس وبعد الانعكاس تتجمع الأشعة الشمسية على البؤرة النقطية أو الخطية وبذلك تتضاعف شدة الإشعاع الشمسي عشرات إلى آلاف المرات حسب نسبة التركيز الهندسي C التي تعبر عن نسبة مساحة سطح الفتحة A_{ap} إلى مساحة سطح المستقبل A_r .

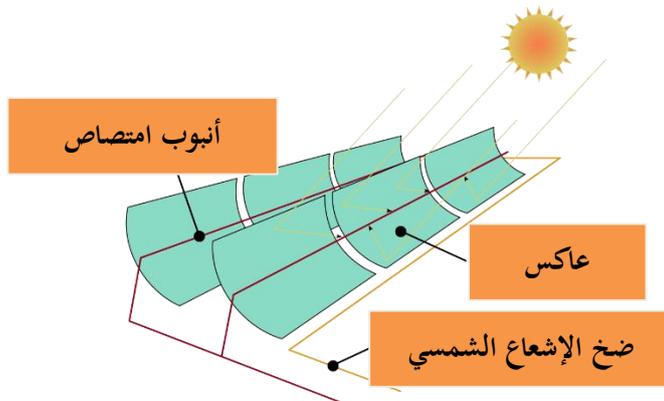
$$C = \frac{A_{ap}}{A_r} \quad (24 - 1)$$

ويوجد ثلاث أنواع من المركزات الشمسية :

1.2.I. مركزات البؤرة الخطية (مركزات الأحواض الشمسية)

وهي المركزات التي تملك محور بؤري خطي تتجمع فيه الأشعة الشمسية وعادة ما يثبت في هذا المحور أنبوب امتصاص يسري به مائع ناقل للحرارة قصد التحويل الحراري للطاقة الشمسية ويتراوح تركيزها الهندسي (30 - 80) [21] وأهمها:

1.1.2.I. المركز الشمسي الأسطواني القطع مكافئ

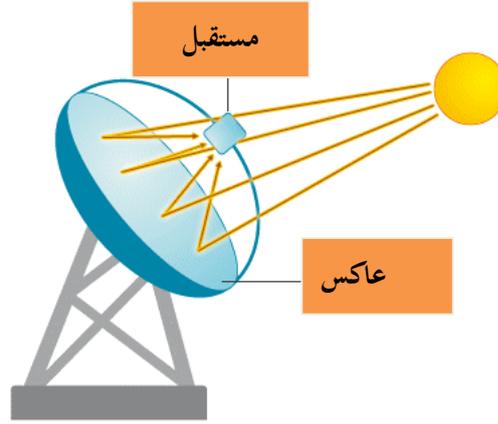


الشكل 1-11: المركز الشمسي الأسطواني القطع مكافئ. [22]

2.2.I.2.2.I. مركزات البؤرة النقطية

وهي المركزات التي تملك بؤرة نقطية تتجمع عندها الأشعة الشمسية ويثبت فيها مستقبل قصد التحويل الحراري للطاقة الشمسية أو قصد التحويل الضوئي ويتراوح تركيزها الهندسي (800 - 8000) [21] وأهمها:

1.2.2.I. الصحن القطع مكافئ

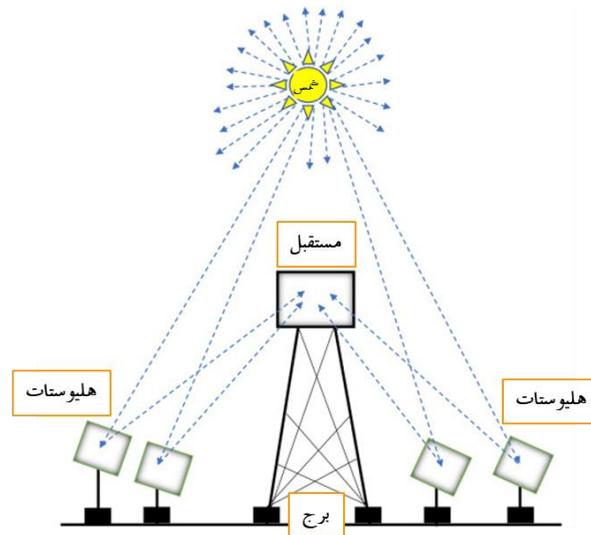


الشكل 1-12: الصحن القطع مكافئ. [22]

2.2.2.I.2.2.I.2.2.I. مركزات البرج الشمسي

تتكون من مرايا مستوية مثبتة في مساحات شاسعة وموجهة لتعكس الإشعاع الشمسي نحو مستقبل مركزي

موجود في قمة برج ويتراوح تركيزها (200 - 1000) [21].



الشكل 1-13: مركزات البرج الشمسي. [22]

3.2.I. الصحن القطع مكافئ

1.3.2.I. مكوناته

• العاكس

يكون سطحه قطع مكافئ يطل على مادة عاكسة كالفضة أو الألمنيوم من أجل عكس الإشعاع الشمسي وتجميعه في البؤرة النقطية.

• المستقبل

يوضع المستقبل عند البؤرة لاستقبال الإشعاع الشمسي المركز ويحدث عنده أما التحويل الحراري للطاقة الشمسية مثل حالة محرك ستيرلينغ كمستقبل أو يحدث التحويل الضوئي للطاقة الشمسية مثل حالة المواد الليزرية كمستقبل .

2.3.2.I. هندسة الشكل القطع مكافئ

نحصل على مجسم لعاكس قطع مكافئ بدوران القطع مكافئ حول محوره. معادلة القطع مكافئ للدوران حول محوره (محور التناظر Z) تعطى بالمعادلة:

$$X^2 + Y^2 = 4.f.Z \quad (25 - 1)$$

حيث:

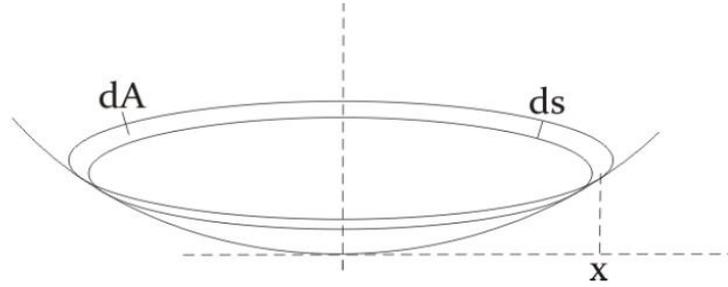
$$Z = \frac{a^2}{4}.f \quad (26 - 1)$$

• مساحة سطح القطع المكافئ

تُحسب بمكاملة المعادلة:

$$dAs = 2. \pi. a \sqrt{dz^2 + da^2} \quad (27 - 1)$$

$$dAs = 2. \pi. a \sqrt{\left(\frac{a}{2f}\right)^2 + 1}. da \quad (28 - 1) \quad \text{ومنه}$$



الشكل 1-14: رسم توضيحي مساحة القطع مكافئ. [23]

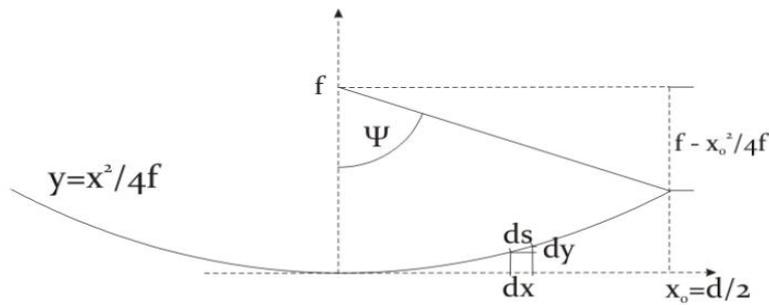
وبذلك تعطى عبارة مساحة القطع مكافئ: [7]

$$As = \int_0^{\frac{d}{2}} dAs = \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot f^2 \left\{ \left[\left(\frac{d}{4f}\right)^2 + 1 \right]^{3/2} - 1 \right\} \quad (29 - 1)$$

بينما مساحة الفتحة تمثل مساحة قرص نصف قطره d:

$$Aa = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (30 - 1)$$

• زاوية الحافة



الشكل 1-15: رسم توضيحي لزاوية الحافة. [7]

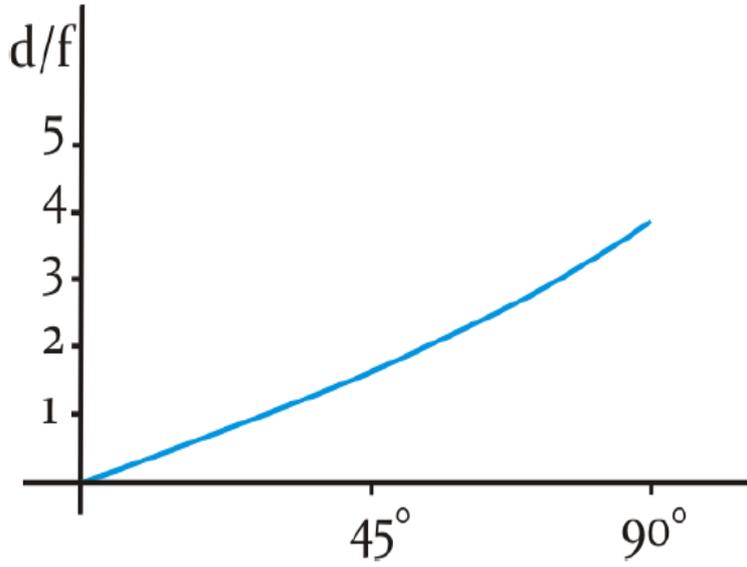
ومنه تكون عبارة زاوية الحافة: [24]

$$\tan \psi = \frac{x_0}{f - \frac{x_0^2}{4f}} \quad (31 - 1)$$

بالتعويض نجد:

$$\tan \psi = \frac{\frac{d}{f}}{2 - \frac{1}{8} \left(\frac{d}{f}\right)^2} \quad (32 - 1)$$

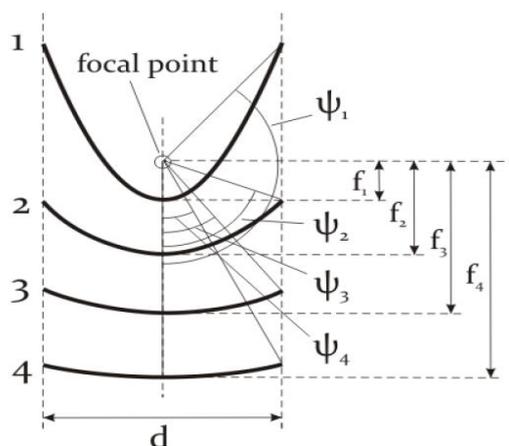
ونحصل على التمثيل البياني d/f بدلالة زاوية الحافة ψ : [25]



الشكل 16-1: تغيرات d/f بدلالة زاوية الحافة ψ : [25]

وعند تحديد قطر ثابت للصحن القطع مكافئ d وتحديد نقطة ثابتة كبقرة فإننا نستطيع تمثيل مختلف القطوع

المكافئة بأبعاد محرقية f وزوايا حافة ψ مختلفة الشكل.



الشكل 1-17: لعلاقة بين البعد المحرقى وزاوية الحافة من أجل قطر ثابت للصحن. [13]

4.2.I. الدراسة الضوئية

وتكون شدة الإشعاع الشمسي الساقط على البؤرة (المستقبل) بعد عملية التركيز :

$$G_h = I \times \rho^o \times C \quad (33 - 1)$$

بينما تكون شدة طيف الإشعاع الشمسي النافذ للمستقبل عن طريق المرشح الطيفي \$I(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)\$ يفي تعطي بالعلاقة:

$$G(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = I(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) \times \rho^o \times C \quad (34 - 1)$$

حيث تعطي شدة طيف الإشعاع الشمسي، \$I(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)\$ المباشر بالعلاقة:

$$I(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = I_0(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) [a_0 + a_1 e^{-K \cdot AM}] \quad (35 - 1)$$

حيث طيف الثابت الشمسي \$I_0(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)\$:

$$I_0(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = E(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left[\left(N_J \right) \frac{360}{365} \right] \right] \quad (36 - 1)$$

ومن علاقة بلانك التي تعطي طاقة الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود: [5]

$$E(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = \left(\frac{D_s}{D_{s,T}} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 \left[e^{(C_2/\lambda T)} - 1 \right]} d\lambda \quad (37 - 1)$$

حيث:

$$C_1 = 2\pi h c^2 \quad (38 - 1)$$

$$C_2 = hc/K \quad (39 - 1)$$

D_S قطر الشمس.

$D_{S,T}$ المسافة بين الشمس والأرض.

1.4.2.I المردود الضوئي للصحن القطع مكافئ

من أجل الصحن مثبت (عدم التتبع الشمسي) حيث يكون موجه للجنوب (انعدام زاوية السمات الشمسي) ومن أجل زاوية ميلان الصحن عن الأفق تساوي زاوية دائرة العرض للمنطقة ($\beta = \varphi$) وهي الوضعية الأنسب للتثبيت على مدار السنة فان زاوية ميلان الشعاع الشمسي على الناظم على السطح التي تعطى بالعلاقة:

$$\cos i = \cos \delta * \cos \omega \quad (40 - 1)$$

وتعطى شدة الإشعاع الشمسي المركز على المستقبل بوحدة W :

$$g = I \cdot \rho^0 \cdot \cos i \cdot \left(\pi \frac{d^2}{4} \right) \quad (41 - 1)$$

أما في حالة وجود مرشح طيفي تكون شدة الإشعاع الشمسي المركز على المستقبل بوحدة W :

$$g(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = I(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) \cdot \rho^0 \cdot \cos i \cdot \left(\pi \frac{d^2}{4} \right) \quad (42 - 1)$$

بينما شدة الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الفتحة بوحدة W :

$$g_0 = I \cdot \left(\pi \frac{d^2}{4} \right) \quad (43 - 1)$$

ويكون المردود الضوئي للصحن القطع مكافئ النسبة بين الإشعاع الشمسي الذي يصل للمستقبل والإشعاع

الشمسي الذي يرد للفتحة ويعطى عند وجود المرشح الطيفي بالعلاقة:

$$\eta_{op} = \frac{g(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)}{g_0} = \rho^0 \cdot \cos i \cdot \frac{I(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)}{I} \quad (44 - 1)$$

وبتعويض عبارة زاوية الورود C نجد:

$$\eta_{op} = \rho^0 \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \frac{I_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)}}{I} \quad (45 - 1)$$

وتكون شدة الإشعاع الشمسي الذي يصل المستقبل بوحدة w/m^2 وفق العلاقة:

$$G_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = \frac{g_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)}}{\left(\pi \frac{d_f^2}{4}\right)} = I_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} \cdot \rho^0 \cdot \cos i \cdot \left(\frac{d}{d_f}\right)^2 \quad (46 - 1)$$

ومنه نجد:

$$G_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = I_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} \cdot \rho^0 \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot C \quad (47 - 1)$$

حيث التركيز الهندسي للصحن القطع مكافئ:

$$C = \frac{A_{ap}}{A_r} = \left(\frac{d}{d_f}\right)^2 \quad (48 - 1)$$

الخلاصة

الصحن القطع مكافئ من أهم المركبات الشمسية ذات البؤرة النقطية، ويتم استخدامه في التحويل الحراري من خلال محرك ستيرلينغ الذي يمتص الطاقة الحرارية للإشعاع الشمسي وينتج طاقة ميكانيكية بواسطة دورة ترموديناميكية. كما يتم استخدامه في توليد الليزر من خلال مادة الليزر المثبتة في البؤرة، حيث تمتص طيف الإشعاع المناسب، وتنتج الليزر ذو الاستعمال الواسع في الصناعة والطب والتكنولوجيات الحديثة. وهذا ما سنتعرف عليه في الفصل القادم.

المراجع

- [1] Mary Jane Hale, "Survey of Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants", NREL/SR-550-27925, Period of Performance: September 13, 1999. June 12, 2000.
- [2] Kreith F, Kreider JF. Principles of solar engineering. New York: McGraw-Hill; 1978.
- [3] M. Romero, D. Martìnez, and E. Zarza, "Terrestrial solar thermal power plants: on the verge of commercialization," in Proceedings of the 4th international conference on solar power from space, 2004.
- [4] Abbas Ghassemi, SOLAR ENERGY Renewable Energy and the Environment, © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC, International Standard Book Number: 978-1-4200-7566-3 (Hardback).
- [5] S. Teske, L. Crespo and C. Richter, Solar thermal electricity, Global Outlook 2016, Greenpeace International, European Solar Thermal Electricity Association ESTELA, Solar PACES (2016).
- [6] O. Behar, A. Khellaf and K. Mohammedi, A novel parabolic trough solar collector model - Validation with experimental data and comparison to Engineering equation solver (EES), Energy Conversion and Management, 106 (2015) 268-281.
- [7] D. A. Baharoon, H. A. Rahman, W. Z. W. Omar and S. O.Fadhl, Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently - a review, Renew Sustain Energy, Rev., 41 (2015) 996-1027.

- [8] L. Stoddard, J. Abiecunas and R. O’Connell, Economic energy and environmental benefits of concentrating solar power in California, National Renewable Energy Laboratory, Subcontract report NREL/SR-550-39291, April (2006).
- [9] Guide des Energies Renouvelables. Ministere de L’énergie et des Mines Algérienne. (Edition 2007).
- [10] Shahrin. A, Haizatul. H, Nik Siti. H, and Mohd. S, Effects of Dust on the Performance of PV Panels, World Academy of Science Engineering and Technology, 58 2011.
- [11] Iqbal, M., "An Introduction to Solar Radiation", Academic, Toronto (1983).
- [12] John R. Howell, R. Bannerot, G. Vliet, "Solar – Thermal Energy Systems", Copyright © by McGraw-Hill, Inc. 1982.
- [13] Gueymard, C., 2004. “The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models”. Solar energy, 76(4), pp. 423–453.
- [14] Capdrou. M, 1987. Atlas Solaire de l’Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux. Volume1, Tome 2 ; Office des Publications Universitaires, Algérie.
- [15] Zekai.Sen, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, ISBN 978-1-84800-133-6 © 2008 Springer-Verlag London Limited.
- [16] Goswami, D. Y., Kreith, F., Kreider, J. F., and Kreith, F., 2000. Principles of Solar Engineering. second ed., Taylor & Francis, Philadelphia, PA.

- [17] Tomas Markvart, "Solar Electricity", Second edition, University of Southampton, UK, Madrid, Jon Wiley and sons Ltd. ISBN, 2000.
- [18] Stine, W. B., and Harrigan, R. W., 1985. Solar Energy Fundamentals and Design: With Computer Applications. Wiley-Interscience, Apr.
- [19] Woolf, H. M., 1968. "On the Computation of Solar Evaluation Angles and the Determination of Sunrise and Sunset Times". National Aeronautics and Space Administration Report NASA TM-X-164, USA.
- [20] S. a. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Second Edi. 2013, p.840
- [21] Shah A., S. C. Kaushik, S.N. Garg, "Computation of beam Solar Radtiation at Normal Incidence Using Artificial Neural Network", Renewable Energy 31(2006) 1483-1491.
- [22] Geyer M., Stine B. William "Power from the Sun" Copyright © 2001 by J. T. Lyle Center.
- [23] Pierre Henir Communay, héliothermique le gisement solaire methods et calculs, ISBN 2-84139-036-5(France),2002.
- [24] Anderson B. Solar energy: fundamentals in building design. New York: McGraw-Hill; 1977.
- [25] Malik MAS, Tiwari GN, Kumar A, Sodha MS. Solar distillation. New York: Pergamon Press; 1985.
- [26] Meinel AB, Meinel MP. Applied solar energy: an introduction. Reading, MA: Addison-Wesley; 1976.

[27] Kreider JF, Kreith F. Solar heating and cooling. New York: McGraw-Hill; 1977.

الفصل الثاني

الليزر والليزر الشمسي

مقدمة

الليزر هو نوع من أنواع الضوء يمتلك العديد من المميّزات التي جعلته يدخل في الكثير من تطبيقات التكنولوجيا الحديثة مثل نقل المعلومات (الاتصالات عبر الألياف الضوئية ، ...)، والطب (طب العيون، طب الأسنان ...)، والصناعة (لحام وقطع المواد، و المعالجة السطحية،...). الليزر هي أجهزة تُولد أو تُضخّم الإشعاعات ذات الترددات الواقعة في المجال تحت الأحمر (Infrared) أو فوق البنفسجي (ultraviolet) من الأمواج الكهرومغناطيسية.

جاءت تسمية كلمة الليزر من الأحرف الأولى لفكرة عمل الليزر والمتمثلة في الجملة التالية: Light

Amplification by Stimulated Emission of Radiation وتعني تضخيم الضوء بواسطة الإصدار المحثوث للإشعاع الكهرومغناطيسي.

الليزر عبارة عن حزمة ضوئية شديدة التماسك زمانياً ومكانياً، ولها زاوية انقراج صغيرة جداً، كما له خصائص مميزة لا توجد في الضوء الذي تُصدره بقية المصادر الضوئية الأخرى ولعلّ أهمها: الاتجاهية، أحادية اللون، الترابط. وقد تنبأ أينشتاين بوجود الليزر في 1917م، من خلال وضع الأساس النظري لعملية الإصدار المحثوث، وتم تصميم أول جهاز ليزر في 1960م بواسطة ميمان.

1.II. المكونات الأساسية لجهاز الليزر [1-4]

جهاز الليزر عبارة عن مصدر للضوء يعمل على تجميع وتركيز وتقوية الإشعاعات الضوئية على شكل حزمة ضوئية رفيعة جداً في اتجاه واحد، بحيث تكون هذه الحزمة متجانسة و متماسكة وتستطيع قطع مسافات كبيرة في خط مستقيم. يتكون جهاز الليزر من ثلاث أجزاء رئيسية هي:

• الوسط الفعّال

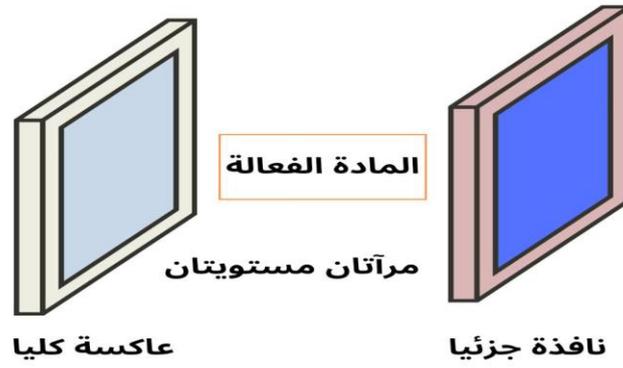
يُطلق على الوسط الفعال في الليزر اسم "وسط التضخيم". يمكن أن يكون هذا الوسط مادة صلبة أو سائلة أو غازية. تحتوي مادة الوسط الفعال على ذرات أو جزيئات لها مخطط مستويات طاقة محدد. يوجد في هذا المخطط مستوى شبه مستقر يتوافق مع انتقال مسموح بين مستويين طاقيين، ويكون هذا الانتقال بطيئًا مقارنة بالانتقالات الأخرى مما يؤدي هذا إلى تراكم عدد كبير من الذرات المثارة في هذا المستوى، محققًا توزيعًا معكوسًا للإسكان. هذا التوزيع هو شرط أساسي للإصدار المحثوث.

• التجويف الرنيني أو المرنان

المرنان هو أحد المكونات الأساسية لليزر، وهو يتكون في أبسط أشكاله من مرآتين متقابلتين موضوعتين على التوازي، ويتم وضع المادة الفعالة بينهما. يعكس المرنان الفوتونات المتولدة في الوسط الفعال، مما يؤدي إلى انعكاسها ملايين المرات في الثانية ذهابًا وإيابًا بين المرآتين. مازةً عبر الوسط الفعال، مما يحفز الذرات المثارة على إصدار فوتونات جديدة. تؤدي هذه العملية إلى إنشاء حزمة ليزرية.

• مصدر الضخ

الضخ هو عملية نقل الطاقة من مصدر الطاقة إلى الوسط الفعال في الليزر. تؤدي هذه الطاقة إلى إثارة الذرات المستقرة في الوسط الفعال، مما يؤدي إلى انتقالها إلى مستويات طاقة أعلى. يُعرف هذا التوزيع غير المتوازن للطاقة باسم التوزيع المعكوس، وهو ضروري لعمل الليزر. هناك عدة طرق للضخ، بما في ذلك الضخ الضوئي، والضخ الكهربائي، والضخ الكيميائي.

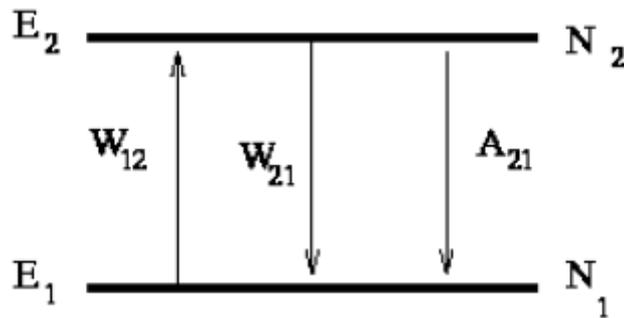


الشكل 2-1: رسم توضيحي للتجويف الرنيني.

II.2. مبدأ عمل الليزر: التفاعل إشعاع-مادة

لفهم مبدأ الليزر، علينا أولاً دراسة التفاعل بين الإشعاع والمادة، وفهم عمليات امتصاص الضوء وإصداره من طرف ذرات أو جزيئات الوسط الفعال. إن أصل ظاهرة التضخيم الضوئي والليزر بشكل خاص هو تفاعل المادة مع الإشعاع الكهرومغناطيسي، هذا التفاعل يؤدي إلى حدوث انتقالات بين مستويات الطاقة المختلفة لذرات المادة. هذه الانتقالات قد تكون مصحوبة بتبادل فوتون (إشعاعية) أو لا (غير إشعاعية) [5].

الفوتونات التي تنتشر في المادة يمكن أن تمتصها الأيونات، مما يؤدي إلى انتقالها إلى مستوى طاقة أعلى. ثم تعود الأيونات إلى المستوى الأساسي، مُصدرة الفائض من الطاقة على شكل فوتون. تشترك جميع هذه الظواهر في خاصيتين أساسيتين: امتصاص أو إصدار الفوتونات. لذلك، فهي تعتبر آليات إشعاعية [5-7].



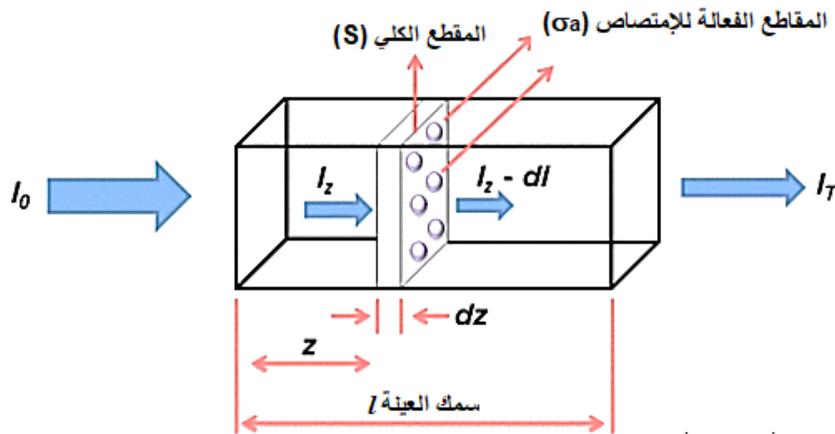
الشكل 2-2: الآليات الرئيسية لتفاعل الإشعاع مع المادة.

1.2.II. الامتصاص

عندما تتعرض ذرات المادة للإشعاع، فإنه يمكنها أن تمتص الفوتونات. تعمل طاقة الفوتون على رفع الإلكترونات من مداراتها المنخفضة إلى مدارات أعلى. تسمى هذه العملية بالإثارة. لا يمكن امتصاص الفوتون إلا إذا كانت طاقته تزيد عن فرق الطاقة بين مدارات الإلكترونات في الذرة [5، 8]:

$$E = h\nu = E_2 - E_1 \quad (1 - 2)$$

امتصاص الفوتون هو الآلية التي ينتقل بها الأيون من المستوي الأول إلى المستوي الثاني. يمكن نمذجة هذه العملية بطريقتين مختلفتين، اعتمادًا على ما إذا كنا نهتم بتغير شدة الإشعاع مع مرور الزمن أو تغير عدد الأيونات المثارة. في كلتا الحالتين، نحتاج إلى إدخال المقطع الفعال للامتصاص σ_a ، وهو معامل التناسب بين احتمال امتصاص الفوتون وعدد الأيونات في وحدة الحجم. ونرمز لتعداد المستويين الطاقويين للحالة الأساسية والمثارة بـ N_1 و N_2 على الترتيب و N للتعداد الكلي [6، 7].



الشكل 2-3: رسم توضيحي لعملية الإمتصاص.

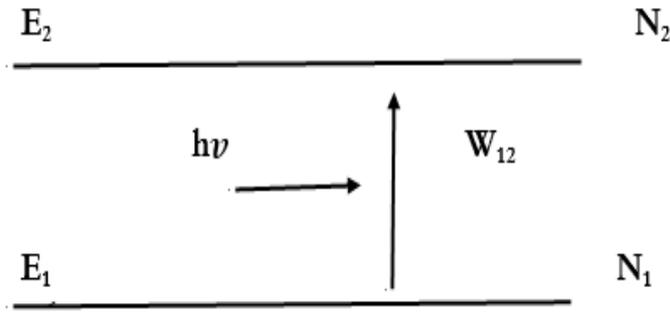
تقل كثافة الشعاع أثناء الانتشار عبر الوسط الممتص وفقا لمعادلة التالية:

$$\frac{dI(z)}{dz} = -\sigma_a I(z) N_1 \quad (2 - 2)$$

على افتراض أن احتمال الامتصاص يكون ضعيفا، فإن التعداد في المستوي المثار E_2 يكون ضئيلا مقارنة بالتعداد الكلي للأيونات N (cm^{-3}) وبالتالي فإن $N_1 \approx N$ الشدة المتبقية من شعاع الليزر الناتج من الوسط الممتص ذي السمك l تعطى بالعلاقة:

$$I(l) = I_0 e^{-\sigma_a N l} = I_0 e^{-\alpha l} \quad (3 - 2)$$

حيث $\alpha = \sigma_a \cdot N$ هو معامل الامتصاص الذي يعبر عنه بوحدة cm^{-1} . ويمكن فهمه على أنه احتمال الامتصاص لكل وحدة طول.



الشكل 2-4: مخطط يوضح عملية الامتصاص.

تغير التعداد في المستوى الطاقوي E_2 مع مرور الزمن يمكننا من تعيين احتمال الإثارة لوحدة الزمن W_{12} .

$$\frac{dN_2(dt)}{dt} = \sigma_a D N_2(dt) = w_{12} N_2(dt) \quad (4 - 2)$$

حيث D يمثل تدفق الفوتون لوحدة المساحة، أي عدد الفوتونات التي تعبر المقطع العرضي في ثانية واحدة، ويعطى بالعلاقة:

$$D = \frac{I}{h\nu} \quad (5 - 2)$$

يمكن أيضا التعبير عن احتمالية الانتقال وذلك باستخدام معامل أينشتاين B_{12} :

$$w_{12}(v) = B_{12} \rho(v) \quad (6 - 2)$$

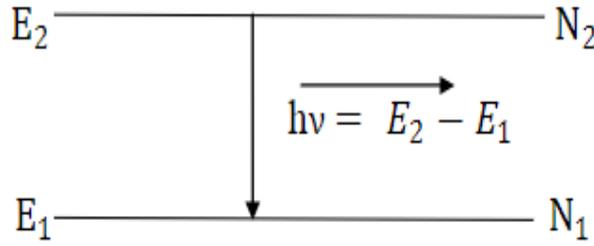
حيث $\rho(v)$ هي كثافة الطاقة لوحدة السطح (J.s.m^{-3}).

II.2.2. الإصدار العفوي

الأيونات لا تبقى لمدة طويلة في الحالة المثارة. وتعود تلقائياً للمستوى الأساسي، مما يجعل الطاقة الفائضة تتحرر في شكل انبعاث الضوء. وتسمى هذه الظاهرة بالإصدار العفوي، حيث تنتقل الأيونات من المستوى المثار E_2 إلى المستوى الأساسي E_1 . متوسط فترة الحياة الذي تبقى فيه الأيونات في الحالة المثارة يسمى بمدة حياة الحالة المثارة، وهي كمية إحصائية يعبر عنها كالتالي [10،9]:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i \quad (7 - 2)$$

حيث N_0 هو عدد الأيونات في الحالة المثارة عند $t = 0$.



الشكل 2-5: مخطط يوضح عملية الإصدار العفوي.

يمكن التعبير عن تغير التعداد N_2 للمستوى المثارة بدلالة معامل أينشتاين A_{21} ، والذي يمثل احتمال الاصدار العفوي لوحدة الزمن، بالمعادلة التالية:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (8 - 2)$$

ونتوصل بسهولة إلى المعادلة التالية:

$$N_2 = N_0 e^{-A_{21}t} \quad (9 - 2)$$

في الحالة البسيطة الخاصة بنظام مكون من مستويين طاقيين فقط، نعرف مدة حياة الإشعاع على النحو التالي:

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{A_{21}} \quad (10 - 2)$$

حيث τ_{rad} : مدة حياة الإشعاع في الحالة المثارة.

هناك عمليات إثارة أخرى لا تتضمن إصدار فوتون، ويمكن أن يكون لهذه العمليات أيضًا مدد حياة غير إشعاعية. كما يمكن أن يكون للذرة عدة مستويات طاقة E_j ومستوى مثار E_m وتحدث الانتقالات التلقائية بين هذه المستويات. تتميز هذه الانتقالات بعدة احتمالات للإصدار التلقائي A_{mj} . مجموع هذه الاحتمالات هو الاحتمال الكلي للإثارة. ومدة الحياة الإشعاعية تساوي:

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{\sum_j A_{mj}} \quad (11 - 2)$$

II.3.2. الإصدار المحثوث

يحدث هذا الإصدار عن طريق تحفيز الأيونات لتنتقل من مستوي طاقة أعلى إلى مستوي طاقة أدنى وذلك بواسطة فوتون يمتلك طاقة مساوية إلى الفرق الطاقي بين المستويين، وينتج عن هذا الانتقال انبعاث فوتون آخر يمتلك نفس خصائص الفوتون المحفز، هذه العملية هي أساس عمل الليزر.

من أجل الإصدار المحثوث يجب أن تكون نسبة التعداد في الحالة المثارة N_2 أكبر من نسبة التعداد في الحالة الأساسية N_1 ، أي يجب أن تكون هناك حالة انقلاب تعداد. يمكن نمذجة هذه الظاهرة بطريقة إحصائية من خلال إدخال احتمال الإصدار، وذلك باستخدام معامل أينشتاين B_{21} [8,5]:

$$w_{21}(v) = B_{21} \rho(v) \quad (12 - 2)$$

تغير التعداد N_2 بدلالة الزمن في هذه الحالة هو:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21} \rho(v) N_2 \quad (13 - 2)$$

ونعرّف المقطع الفعال للإصدار σ_e كالتالي:

$$\frac{dN_2}{dt} = -w_{21} N_2 = -\frac{\sigma_e I_p}{h\nu} N_2 \quad (14 - 2)$$

حيث I_p هو شدة الشعاع الساقط (w/cm^2).

في حالة نظام ذي مستويين يكون لدينا:

$$\frac{dN_2}{dt} = w_{12}N_1 - (w_{21} + A_{21})N_2 = -\frac{dN_1}{dt} \quad (15 - 2)$$

وعند الاتزان الحراري، يمكن إعطاء نسبة التعداد في المستويين بدلالة معامل بولتزمان:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{hv}{kT}} \quad (16 - 2)$$

حيث:

$g_i = 2J_i + 1$: درجة التوالد في مستوى الطاقة E_i ، T : درجة الحرارة و k : ثابت بولتزمان.

في النظام الاستقرار ($\frac{dN_i}{dt} = 0$) نجد:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{w_{12}}{w_{21} + A_{21}} = \frac{g_2}{g_1} \quad (17 - 2)$$

ويمكننا التعبير عن كثافة الطاقة للحزمة في وحدة المساحة $\rho(\nu)$ كما يلي:

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{B_{12} g_1}{B_{21} g_2} e^{\frac{hv}{kT}} - 1\right)} \quad (18 - 2)$$

ووفقا لقانون بلانك، فإن:

$$\rho(\nu) = \frac{8 \pi n^3 \nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (19 - 2)$$

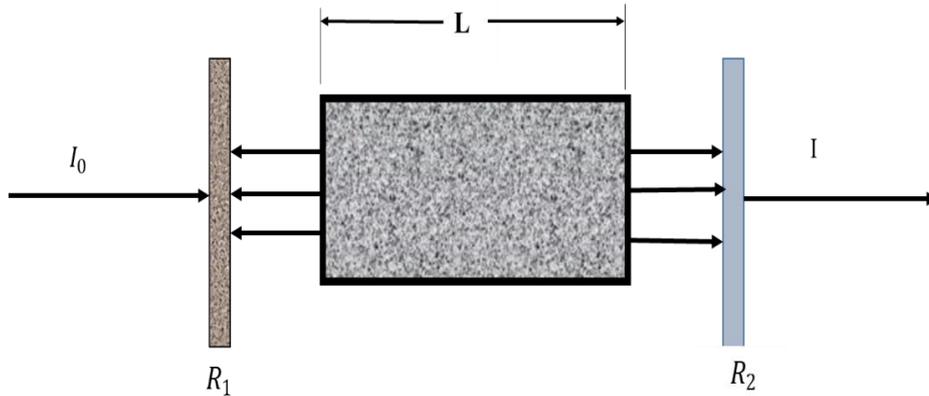
بالمطابقة بين طرفي المعادلتين نجد علاقتي أينشتاين:

$$g_1 B_{21} = g_2 B_{12} \quad (20 - 2)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8 \pi n^3 h \nu^3}{c^3} \quad (21 - 2)$$

II.4.2. التضخيم الضوئي

لكي يعمل الليزر، يجب ضخ الوسط الفعال (الذرات أو الجزيئات) بواسطة مصدر طاقة. يؤدي هذا إلى إثارة الذرات والجزيئات، مما يعني انتقالها إلى مستويات طاقة أعلى. يُعرف هذا باسم "التوزيع العكسي". في التوزيع العكسي، تكون غالبية الذرات والجزيئات في مستويات الطاقة العليا بدلاً من المستويات المنخفضة [3] عندما تعود ذرة أو جزيء مثار إلى مستوى الطاقة الأساسي، فإنها تطلق فوتوناً. يمكن أن يحفز هذا الفوتون ذرة أو جزيء آخر على الانتقال إلى مستوى طاقة أعلى، مما يؤدي إلى إطلاق فوتون آخر. يمكن أن يحدث هذا بشكل متكرر، مما يؤدي إلى زيادة عدد الفوتونات الناتجة بشكل كبير.



الشكل 2-6: رسم توضيحي لعملية التضخيم الضوئي.

يمكن التعبير عن الضياعات الناجمة عن منظومة الليزر باستثناء ضياعات نفاذية المرآة الأمامية الخاصة بخرج الليزر بمعامل واحد (γ) ويمكن إيجاد شرط العتبة وذلك بدراسة تغير شدة الإشعاع داخل المرنان خلال دورة كاملة. عند انتقال حزمة الضوء الإبتدائية من المرآة الأمامية إلى الخلفية تزداد شدة الحزمة من I_0 إلى I وفق المعادلة التالية [8]:

$$I = I_0 e^{(\gamma - \alpha)L} \quad (22 - 2)$$

حيث:

L : يمثل طول المرنان.

γ : معامل الريح.

α : الضياعات الكلية في المنظومة.

وعند سقوط الحزمة الضوئية على المرآة الخلفية التي معامل انعكاسها يساوي R_2 فإن شدة الحزمة ستصبح كما يلي:

$$I = I_0 R_2 e^{(\gamma - \alpha)L} \quad (23 - 2)$$

وبعد رجوع الحزمة و سقوطها على المرآة الأمامية التي معامل انعكاسها R_2 تكون الحزمة الضوئية قد أكملت دورة كاملة، وتصبح الشدة النهائية للضوء كما يلي:

$$I = I_0 R_1 R_2 e^{2(\gamma - \alpha)L} \quad (24 - 2)$$

ويعبر عن الريح الكلي الحاصل في المنظومة الليزرية، خلال دورة كاملة بالمعادلة التالية:

$$G = \frac{I_0 R_1 R_2 e^{2(\gamma - \alpha)L}}{I_0} \quad (25 - 2)$$

أي:

$$G = R_1 R_2 e^{2(\gamma - \alpha)L} \quad (26 - 2)$$

إذا كانت قيمة الريح الكلي $G \geq 1$ خلال دورة واحدة فإن عملية التذبذب سوف تستمر، بحيث يمكن الحصول على شعاع الليزر، أما إذا كان $G < 1$ فإن التذبذب سوف يتلاشى ويضمحل الشعاع بحيث يتعذر الحصول على الليزر، لذا يمكن اعتبار $G = 1$ شرطاً للعتبة كما يلي:

$$G = R_1 R_2 e^{2(\gamma - \alpha)L} = 1 \quad (27 - 2)$$

$$\gamma_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (28 - 2)$$

الحد الأول من هذه المعادلة يمثل الضياعات الكلية في المنظومة (α) بينما يمثل الحد الثاني الخرج الليزري، كما يلاحظ أن الريح الكلي خلال دورة كاملة يعتمد أسياً على ربح الوسط الفعال (γ) الذي بدوره يعتمد على الانعكاس السكاني ونوع الوسط الفعال المستخدم.

II.3. المنظومة الليزرية [8، 11]

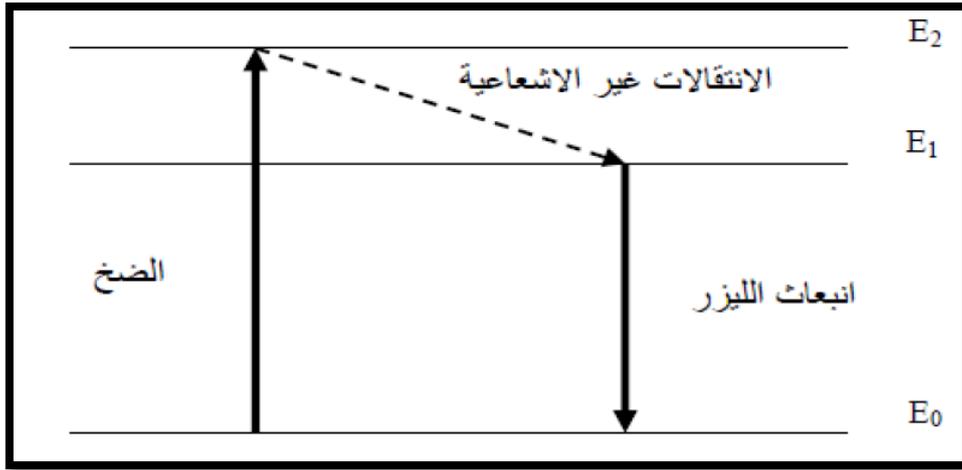
تصنف المنظومات الليزرية وفق مستويات طاقة الوسط الفعال، إلى منظومتين وهما:

II.3.1. نظام ثلاثي المستويات

يتكون هذا النظام من ثلاث مستويات، المستوى الأساسي E_0 الذي يمثل المستوى الليزري السفلي ومستوى الإثارة E_2 الذي يمثل المستوى الليزري العلوي والمستوى E_1 الذي يمثل مستوى شبه المستقر أو البيني. وفي حالة التوازن الحراري تكون أغلب الذرات في الحالة الأساسية، وبواسطة مصدر ضوئي تثار الذرات من المستوى الأساسي إلى المستوى الثالث بعد ذلك تنتقل الذرات سريعاً إلى المستوى الثاني (المستوى شبه المستقر)، وتبقى فترة زمنية أطول في هذا المستوى مما يحقق عملية التوزيع العكسي، أي عدد الذرات في المستوى شبه المستقر أكبر من عدد الذرات في المستوى الأساسي، ومن هنا تكون الذرات مهياًة لحدوث الانبعاث المحرض، وبالتالي حدوث عملية تضخيم الإشارة ذات الطاقة الموافقة للفرق بين المستوى شبه المستقر والمستوى الأساسي.

يوجد شكلان ممكنان للانتقال الليزري في منظومة ثلاث مستويات وهما:

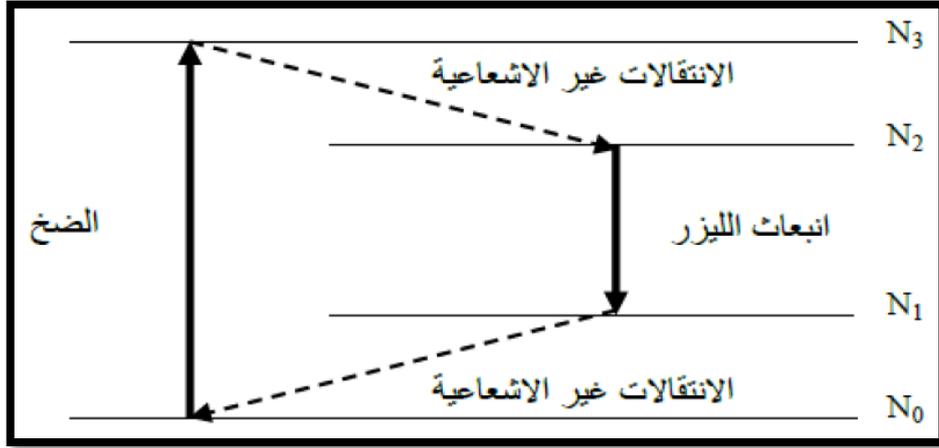
- الانتقال الليزري يحدث بين المستوى الأعلى و المستوى البيني كما في حالة ليزر CO_2 .
- الانتقال الليزري يحدث بين المستوى البيني والمستوى الأسفل كما هو الحال في ليزر الياقوت.



الشكل 2-7: نظام ذو ثلاث مستويات.

II.3.2. نظام رباعي المستويات

يتكون من أربع مستويات طاقة ، المستوى الأرضي N_0 ، والمستوي الليزري السفلي N_1 ، والمستوي الإثارة N_2 والمستوي الليزري العلوي N_3 ، وفي حالة التوازن الحراري يكون عدد الذرات الموجودة في مستويين N_1 و N_2 قليل جدا، وبواسطة مصدر ضوئي يحصل ضخ من المستوى N_0 إلى مستوي N_3 الذي يملك عمرا قصير جدا مما يجعل انتقال الذرات إلى المستوى N_2 مسرعا جدا، وتبقى الذرات في مستوي N_2 مدة أطول مما يؤدي إلى توزيع عكسي للذرات، أي يكون عدد الذرات في مستوي N_2 أكبر من عدد الذرات في مستوي N_1 لكونه فراغا من البداية، وبما أن عمر المستوى N_1 قصير جدا فنه يسهل تفرغها، وبالتالي نحصل على فعل الليزر بين مستويين N_1 و N_2 .



الشكل 2-8: نظام ذو أربعة مستويات.

إن نسبة الضخ اللازمة لإنجاز انقلاب التعداد في نظام ذي أربعة مستويات هي أخفض (أقل) بكثير مقارنة مع نظام ذي ثلاث مستويات وهذا ناتج عن كون أن المستوى السفلي للانتقال الليزري (والذي هو هنا ليس المستوى الأساسي) يكون فارغاً نسبياً عند الاتزان الحراري، وبالتالي فإن الذرات التي تصل إلى هذا المستوى تحول آتياً تقريباً إلى المستوى الأساسي (0) وانقلاب التعداد بالتالي يكون سهل الإنجاز بشكل كبير و مردود الليزر يكون أحسن.

4.II. أنواع الليزر [4-1]:

يأتي الليزر بأنواع مختلفة حسب المادة المستخدمة لإنتاجه فهناك ليزر الحالة الصلبة وليزر الحالة السائلة وليزر الحالة الغازية.

1.4.II. ليزر الحالة الصلبة

ليزرات الحالة الصلبة هي تلك الليزرات التي تكون فيها المواد الفعالة عبارة عن أيونات شائبة داخل بلورات أيونية، والأيون يكون عادة أحد العناصر الانتقالية من الجدول الدوري (مثل Cr^{+3}) أو أيونات العناصر الترابية النادرة. يتكون ليزر الحالة الصلبة من الوسط الفعال ومصدر الضخ وبعض الأجزاء الأخرى:

● **الوسط الفعال:** هو عبارة عن بلورة من مادة صلبة يتم إدخال أيونات فعالة فيها لغرض توليد الليزر من أكثر بلورات الليزر الشائعة هي الياقوت و النيوديميوم-ياك (YAG: Nd) والنيوديميوم-زجاج (Nd :Glass) والألكسندرايت (Alexandrite) والتيتانيوم-زفير (Ti :sapphire). كما يعتبر ليزر أنصاف النواقل من ليزرات الحالة الصلبة ولكنه لا يستخدم بلورة وإنما تراكيب من أنصاف النواقل يتم ضخها بواسطة التيار الكهربائي.

● **مصدر الضخ:** يستخدم في الغالب المصباح الوميضي إذ يتم تسليط جهد كهربائي بين طرفي المصباح الوميضي فينتج أشعة ضوئية تمتصها بلورة الوسط الفعال لنتشار. يمكن أن يتم ضخ بلورة الوسط الفعال باستخدام شعاع ليزر آخر مثل ليزر أشباه الموصلات وهذه الطريقة تكون ذات كفاءة أعلى من طريقة الضخ بالمصباح الوميضي. كما يمكن استخدام الضخ بواسطة الأشعة الشمسية.

II.4.2. ليزر الحالة الغازية

يعتمد هذا النوع على مادة غازية مثل الهيليوم و النيون و غاز ثاني أكسيد الكربون، يتراوح مدى طول موجة ليزرات الحالة الغازية بين الأشعة فوق البنفسجية و الضوء المرئي و الأشعة تحت الحمراء، ويستخدم في قطع المواد الصلبة لطاقته العالية.

● **الوسط الفعال:** هو عبارة عن أنبوب من الزجاج أو السيراميك يحتوي على غاز واحد مثل ليزرات الأركون والزينون والهيدروجين والنيتروجين أو خليط من غازين مثل ليزرات الهيليوم - نيون وفلوريد الهيدروجين وكلوريد الزينون أو خليط من أكثر من غازين مثل ليزرات $N_2: HeCo_2$ ، ولا يمكن ضخ الليزر الغازي باستخدام المصباح الوميضي لأن نطاق الامتصاص للغاز يكون ضيقاً جداً.

- **مصدر الضخ:** هو عبارة عن مجهز قدرة كهربائية يقوم بتحويل القدرة الكهربائية إلى قطبين كهربائيين في الأنبوب (الأنود والكاثود) الذي يحتوي على الغاز (أو الغازات) فيحدث التفريغ الكهربائي للغاز ويتولد الليزر.

II.3.4. ليزر الحالة السائلة

ويطلق عليه أحيانا اسم ليزر الصبغة، يتراوح مدى طول موجته في المنطقة تحت الحمراء.

- **الوسط الفعال:** هو عبارة عن صبغة عضوية مذابة في محلول مناسب مثل الماء أو الكحول الأيثيلي وغيرها.

- **مصدر الضخ:** يستخدم المصباح الوميضي كما في ليزرات الحالة الصلبة، يمكن أن يتم ضخ الوسط الفعال باستخدام شعاع ليزر آخر مثل ليزر بخار النحاس وهذه الطريقة تكون ذات كفاءة أعلى من طريقة الضخ بالمصباح الوميضي.

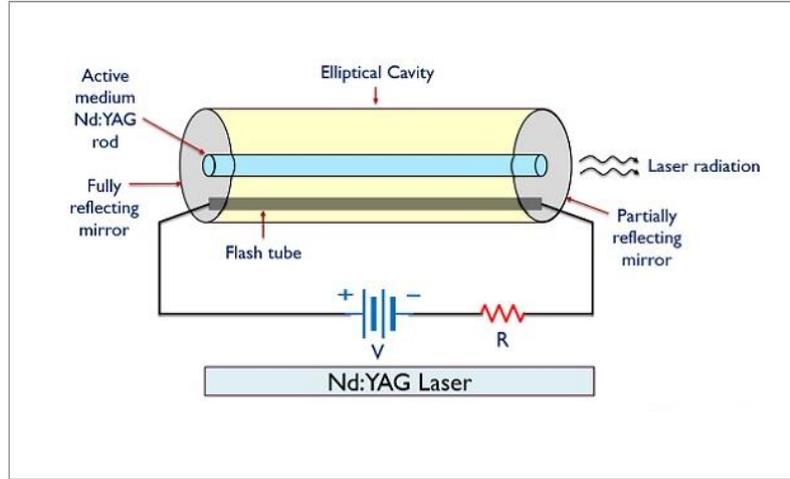
II.5. ليزر YAG: Nd

يعد ليزر YAG: Nd (عقيق ألمنيوم الإيتريوم المشبع بالنيوديميوم : $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) من ليزرات الحالة الصلبة المستخدمة على نطاق واسع نظراً لمجموعة من الخصائص الفريدة التي تتمتع بها بلورة YAG: Nd، حيث تتميز هذه البلورة بموصلية حرارية عالية وجودة بصرية جيدة. بالإضافة إلى ذلك، تتيح البنية المكعبة لـ YAG عرض خط فلوري ضيق مما يؤدي إلى كسب مرتفع وعتبة منخفضة لتشغيل الليزر. ليزر YAG: Nd هو نظام ليزر ذي أربعة مستويات، مما يعني أن مستويات الطاقة الأربعة تشارك في عمل الليزر. الضوء الناتج عن هذا الليزر يكون عادة في منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة عند الطول الموجي 1064 nm، كما أنه يمكن أن يصدر ضوء الليزر عند عدة أطوال موجية مختلفة: 1440 nm، 1320 nm، 1120 nm و 940 nm.

تعمل هذه الليزر في الوضع النبضي والمستمر، ولديها العديد من التطبيقات المختلفة في المجال الطبي والعلمي مثل جراحة الليزر والتحليل الطيفي بالليزر [11-14].

1.5.II. بنية الليزر YAG: Nd

يتكون ليزر YAG: Nd من ثلاثة عناصر مهمة: مصدر الطاقة (الضخ)، والوسط الفعال، والمرنان البصري. بنية هذا الليزر موضحة في الشكل 2-9. يتم استبدال كمية صغيرة من أيونات الإيتريوم (Y^{3+}) بالنيوديميوم (Nd^{3+}) في الوسط الفعال (بلورة YAG: Nd) [11]. يتم تحضير هذا الوسط الفعال على شكل قضيب أسطواني بحيث تكون نهايتا هذا القضيب مصقولة جيدا ومسطحة ومتوازية بصريًا. يتم وضع هذا القضيب الأسطواني (قضيب الليزر) ومصدر الضخ (أنبوب الفلاش) داخل مرنان بصري عبارة عن تجويف عاكس بدرجة عالية ببيضاوي الشكل.

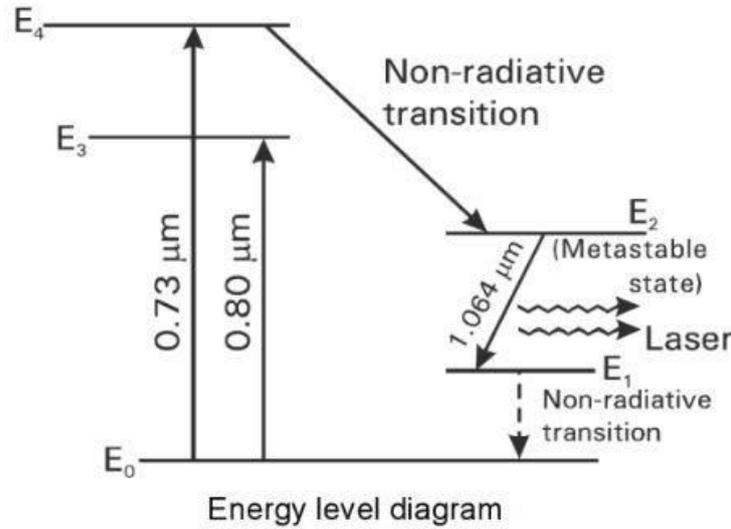


الشكل 2-9: بنية الليزر YAG: Nd.

2.5.II. مبدأ عمل الليزر YAG: Nd

وضح الشكل 2-10 مخطط مستويات الطاقة لليزر YAG: Nd، هذه المستويات الطاقوية هي تلك

الخاصة بأيونات النيوديميوم (Nd^{3+}).



الشكل 2-10: مخطط يوضح مبدأ عمل الليزر.

عند تشغيل مصباح الفلاش، فإنّ الضخّ الضوئي يؤدي إلى إثارة أيونات Nd^{3+} من المستوى الطاقوي E_0 إلى مستويات الطاقة الأعلى E_3 و E_4 عن طريق امتصاص الإشعاعات ذات الأطوال الموجية $0.80 \mu\text{m}$ و $0.73 \mu\text{m}$ على الترتيب.

تقوم أيونات Nd^{3+} المثارة بالانتقال من مستويات الطاقة هذه. يعتبر الانتقال من مستوى الطاقة E_4 إلى E_2 بمثابة انتقال غير إشعاعي. الحالة E_2 هي الحالة شبه المستقرة. عند الإثارة المستمرة، يتم تجميع أيونات Nd^{3+} في المستوى E_2 ويتم تحقيق انقلاب السكان بين E_2 و E_1 .

تقوم أيونات Nd^{3+} بالانتقال التلقائي من E_2 إلى E_1 ، ويكون هذا الانتقال مصحوباً بانبعث فوتونات طاقتها $h\nu$. تتسبب هذه الفوتونات المنبعثة في إطلاق سلسلة من الفوتونات المحفزة بين E_2 و E_1 .

تتعرض الفوتونات التي تسير بالتوازي مع محور المرنان إلى انعكاسات متعددة في المرايا مما يؤدي إلى حركتها ذهاباً وإياباً بين المرآتين، ونتيجة لذلك مع مرور بعض الوقت، فإن الانتقال $E_2 \rightarrow E_1$ ينتج عنه شعاع ليزر مكثف ومتماسك بطول موجي 1064 nm من خلال المرآة العاكسة جزئياً. تقوم أيونات Nd^{3+} بعد ذلك بإجراء انتقال بين $E_1 \rightarrow E_0$ ، وهو انتقال غير إشعاعي.

يتم استخدام جزء فقط من الطاقة المنبعثة من مصباح الفلاش لإثارة أيونات Nd^{3+} ، بينما يقوم الباقي بتسخين البلورة. وبالتالي، يمكن تبريد النظام إما عن طريق دوران الهواء أو الماء.

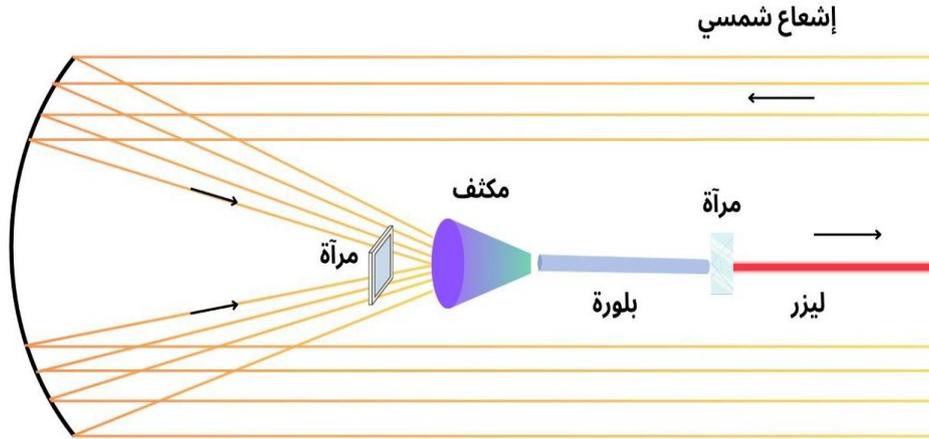
6.II. ليزر GSGG: Nd: Cr

يُعدُّ ليزر GSGG: Nd: Cr ليزراً صلباً اكتشف في أوائل الثمانينيات، حيث يتم استخدام النيوديميوم (Nd) والكروم (Cr) كعوامل إضافية في بلورة الغارنيت للجنادولينيوم والسكانديوم والغاليوم (GSGG). يتيح الثابت الشبكي الكبير لـ GSGG: Nd التفاعل مع Cr لنقل الطاقة بسرعة وكفاءة من أيون Cr إلى أيون Nd، مما يُعزِّز كفاءة الليزر. يشتهر ليزر GSGG: Nd: Cr بكفاءته العالية وقوة الإخراج العالية وعتبة منخفضة، ويُستخدم في مجموعة من التطبيقات، بما في ذلك معالجة المواد وجراحة الليزر.

يعتبر الـ GSGG: Nd:Cr مرشحاً جيداً لليزرات الشمسية بسبب حزم الامتصاص القوية والعريضة للـ Cr التي تكون أعظمية عند 450 nm و 640 nm وخطوط Nd الضيقة، والتي تظهر امتصاص الإشعاع الشمسي بشكل قوي [15، 16]. ومع ذلك يتطلب هذا الليزر إدارةً حراريةً جيدةً بسبب الحرارة المتزايدة في البلورة.

7.II. الليزر الشمسي

الليزر الشمسي Solar Pumped Laser (ويرمز له اختصاراً SPL) هو نوع من أنواع الليزر ظهر بعد اكتشاف أول ليزر في عام 1960 [11، 17]، ويشترك في نفس الخصائص البصرية مع الليزر التقليدي مثل انبعاث إشعاع كهرومغناطيسي متماسك يمكنه تحقيق طاقة عالية، ولا يختلف عنه إلا في كونه يستخدم الإشعاع الشمسي كمصدر للضخ، وذلك عن طريق تركيز أشعة الشمس على الوسط الفعال (غاز أو سائل أو صلب).

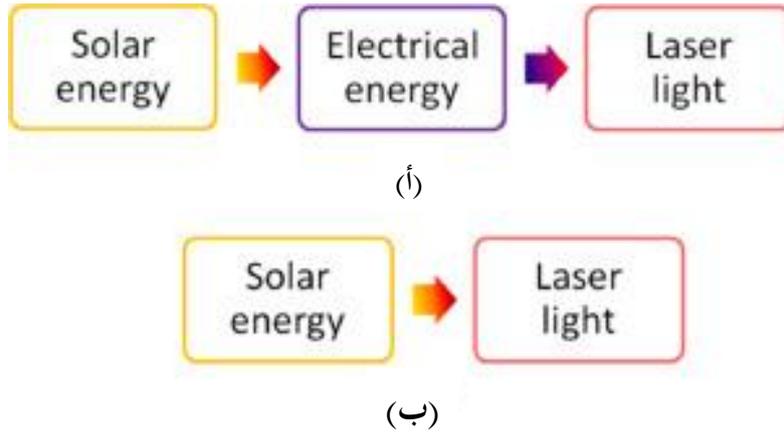


الشكل 2-11: رسم توضيحي لليزر الشمسي.

II.1.7. فكرة الليزر الشمسي

إن تحويل ضوء الشمس إلى ضوء ليزر بدأ كحلم وانتهى ليصبح حقيقة. وقد بدأت هذه الحقيقة تتحقق بعد وقت قصير من اختراع الليزر [11]. يختلف هذا النوع من الليزر عن أنواع الليزر الأخرى في أنه لا يحتاج إلى أي مصدر طاقة صناعي، ولهذا فإن الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية أكثر فعالية وأقل تكلفة وأبسط بكثير في الإنجاز بسبب الإزالة الكاملة لمصدر الطاقة الكهربائي [14، 18].

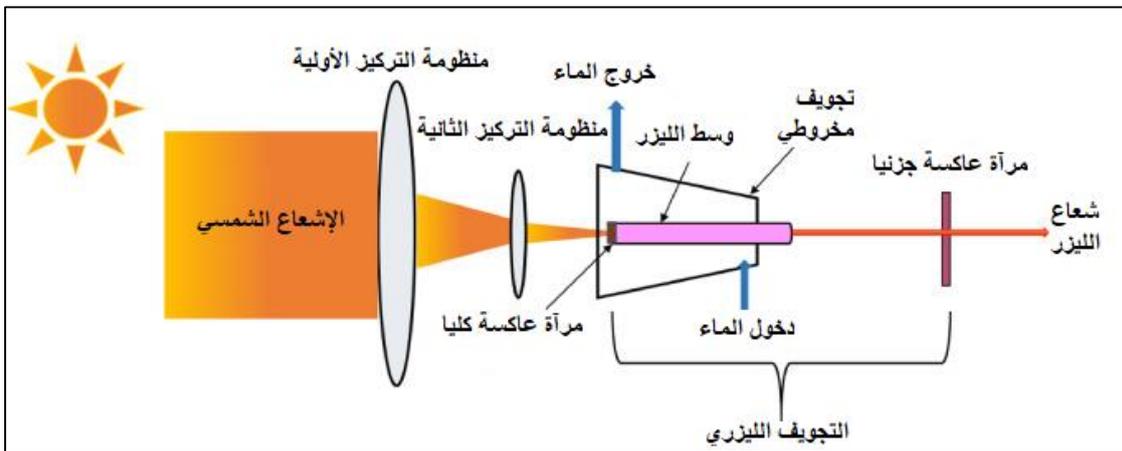
تسمح أجهزة الليزر التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية (SPLs) بالتحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى ليزر، وبالتالي توفر فرصة لتسخير مصدر للطاقة المتجددة. في أجهزة الليزر التي تعمل بالكهرباء، يتم تحويل الطاقة الشمسية في البداية إلى كهرباء، ومن ثم يتم تغذية الليزر بهذه الطاقة الكهربائية لتوليد حزمة الإشعاع المتماثلة. بالمقارنة مع الليزر الذي يعمل بالكهرباء، فإن الليزر الذي يعمل بالطاقة الشمسية يوفر خطوتين لتحويل الطاقة، كما هو موضح في الشكل 2-11 [14].



الشكل 2-12: تحويل الطاقة في: (أ) الليزر الذي يتم ضخه بالكهرباء، (ب) الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية [14].

II.2.7. تقنية الليزر الشمسي

تتكون منظومة الليزر الشمسي من عدة أجزاء لها دور أساسي في تحقيق غاية المنظومة، ويمكن تصنيفها بشكل أساسي إلى: منظومة التركيز الأولية، منظومة التركيز الثانية، منظومة التبريد، منظومة التتبع، وسط الليزر (الوسط الفعال)، مرنانة الليزر أو التجويف الرنين [12، 14].



الشكل 2-13: رسم تخطيطي لليزر الحالة الصلبة الذي يعمل بالطاقة الشمسية [14].

3.7.II. طرق ضخ الليزر الشمسي

• الضخ الجانبي

ينتقل ضوء الشمس المركز بشكل موحد الوسط الفعال عن طريق سطحه الأسطواني مما يؤدي إلى توزيع منتظم للضوء المضخ داخله.



الشكل 2-14: رسم تخطيطي للضخ الجانبي.

• الضخ الطرفي

ينتقل ضوء الشمس المركز إلى الوسط الفعال عن طريق أحد طرفيه مما يؤدي إلى توزيع غير منتظم للضوء المضخ داخله.



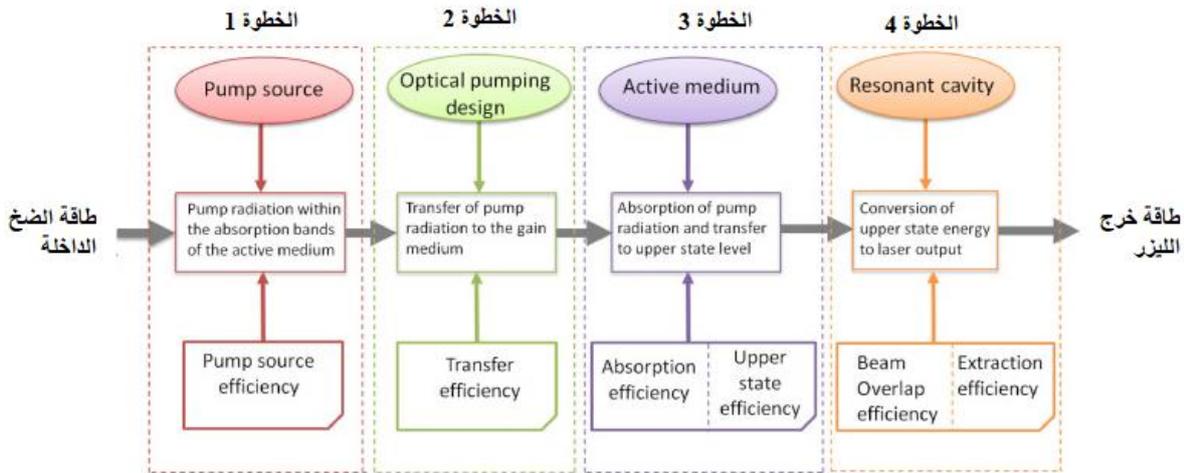
الشكل 2-15: رسم تخطيطي للضخ الطرفي.

4.7.II. عملية تحويل الطاقة

تُعرف عملية تحويل الطاقة بأنها نقل الطاقة من الإشعاع الشمسي إلى حزمة الليزر. يعتمد أداء الليزر الذي يعمل بالطاقة الشمسية على كفاءة المنظومة الإجمالية وطاقة الخرج [14]. كما رأينا سابقاً، فإن الليزر الشمسي

عبارة عن منظومة تجمع بين العديد من العناصر البصرية المختلفة، وبالتالي فإن تصميم هذه المنظومة يؤثر بشكل عام على كفاءة الليزر.

يوضح الشكل 2-16 عملية تحويل الطاقة لأشعة الليزر YAG: Nd ذات الحالة الصلبة التي تعمل بالطاقة الشمسية في أربع خطوات [7، 14].



الشكل 2-16: الخطوات الأربعة لعملية تحويل الطاقة لأشعة الليزر YAG: Nd التي تعمل بالطاقة الشمسية [14].

يمكن حساب قوة ضخ العتبة لقضيب الليزر من الصيغة [8]:

$$P_{th} = \frac{A_{\alpha} I_s}{\eta_q \eta_{ovp} \alpha} \left(\frac{2\gamma_1 - \ln R}{2\varepsilon} \right) \quad (29 - 2)$$

حيث:

A_{α} : هي مساحة المقطع العرضي للقضيب.

I_s : تدفق التشبع.

η_q : الكفاءة الكوانتية.

η_{ovp} : نسبة التداخل.

α : معامل الامتصاص.

γ_1 : الضياعات في القضيب.

ε : كفاءة الضخ.

يمكننا أيضاً حساب قيمة الكفاءة فوق العتبة (slope efficiency) وفق المعادلة التالية [8]:

$$\eta_s = \eta_q \eta_{ovp} \alpha \varepsilon \left(\frac{T}{2\gamma_1 - \ln R} \right) \quad (30 - 2)$$

حيث: T نفاذية مقرنة الإخراج (output coupler)

يمكن كتابة طاقة خرج الليزر على النحو التالي [8]:

$$P_{out} = A_\alpha I_s \left[\frac{T}{(2\gamma_1 - \ln R)} \right] [g_0 - (\gamma_1 - \ln \sqrt{R})] \quad (31 - 2)$$

حيث I_s هو تدفق التشبع، T و R هما نفاذية وانعكاسية مرآة الخرج على التوالي، g_0 هو كسب الإشارة الصغيرة؛

و γ_1 هو الضياع لكل عبور في الليزر.

ويمكن كتابة طاقة خرج الليزر بالمعادلة التالية:

$$P_{out} = \eta_s (P_{in} - P_{th}) \quad (32 - 2)$$

5.7.II الكفاءة التجميعية لليزر

الكفاءة التجميعية لليزر الشمسي هي النسبة بين الطاقة الليزرية المنبعثة ومساحة فتحة المركز الشمسي.

وحدتها W/m^2 [14].

و يمكن التعبير عنها بالصيغة التالية:

$$\eta = \frac{P_{out}}{A_{ap}} \quad (33 - 2)$$

حيث:

η هي الكفاءة التجميعية لليزر الشمسي.

P_{out} هي طاقة خرج الليزر.

A_{ap} هي مساحة فتحة المركز الشمسي.

الخلاصة

الليزر هو نوع من الضوء يتميز بتماسكه الزمني والمكاني، وزاوية انفرجه الضيقة، وخصائصه المميزة مثل الاتجاهية وأحادية اللون والترابط. يُعتبر ليزر YAG: Nd مثالاً هاماً على ليزر حالة صلبة، ويتم استخدامه على نطاق واسع في مجموعة متنوعة من التطبيقات. تكون بنيته مكونة من مصدر للطاقة ووسط فعال ومرنان بصري. بينما يُستخدم الليزر الشمسي لنقل الطاقة من الإشعاع الشمسي إلى حزمة الليزر، ويعتمد أداءه على تصميم المنظومة البصرية. كفاءة الليزر الشمسي تُقيم نسبة الطاقة المحولة إلى طاقة ليزرية مما يؤثر على أدائه.

المراجع

- [1] صالح مصطفى الأتروشي و رياض وديع يوسف، "الليزر أسس و استخدامات"، كلية الهندسة، جامعة دهوك، دار دجلة، الطبعة الأولى 1426 هـ - 2008 م.
- [2] د.سعود بن حميد اللحياني، "الليزر و تطبيقاته"، كلية العلوم، جامعة أم القرى، كلية العلوم التطبيقية شعبة الفيزياء الطبية. <http://upu.edu.sa/page/ar/110330>
- [3] بيلا آ لينكيل، "الليزرات"، جامعة سان فرناندو، جامعة كاليفورنيا، ترجمة فاروق عبودي قيصر، كلية العلوم، دار الكتب للطباعة و النشر، جامعة الموصل 1403 هـ - 1984 م.
- [4] د. محمد كوسا، "فيزياء الليزر وتطبيقاته"، كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، 2005-2006.
- [5] Bentouila, Omar. *Etude des verres dopés par des rares pour les applications lasers et amplificateurs optique*. Thèse de doctorat. Université de Ouargla-Kasdi Merbah, 2016.
- [6] Svelto, Orazio, HANNA, David C., et al. *Principles of lasers*. New York : Springer, 2010.
- [7] Koechner, Walter. Properties of solid-state laser materials. *Solid-state laser engineering*, 2006, p. 38-101.
- [8] Abdel-Hadi, Yasser Abdel-Fattah. Development of optical concentrator systems for directly solar pumped laser systems. 2006.
- [9] V. Moizan, "Etude de l'amplification laser en bande II dans les fibres de verres chalcogénures", thèse de doctorat, Université de Rennes I, (2008).
- [10] Ion Vasilief, Guides d'onde canaux amplificateurs en verres de fluorures dopées erbium: spectroscopie et amplification optique, Thèse Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, (2003)

- [11] Saïd Mehellou, " Pompage optique des lasers par faisceau solaire ", Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018
- [12] حمروني نور الدين، ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين، أطروحة دكتوراه، جامعة حمه الأخضر، الوادي، 2021.
- [13] Vistas, C.R. (2023). Laser Materials for Solar-Pumped Lasers. In: Solar-Pumped Lasers. Green Energy and Technology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24785-9_4
- [14] Sonam Berwal, Neha Khatri, Daewook Kim, A review on design modalities of solar-pumped solid-state laser, Applied Surface Science Advances, Volume 12, 2022, 100348, ISSN 2666-5239, <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100348>.
- [15] Yerebakan, T., et al., Red-diode-pumped Cr: Nd: GSGG laser: two-color mode-locked operation. JOSA B, 2017. 34(5): p. 1023-1032.
- [16] Reed, E., A flashlamp-pumped, Q-switched Cr: Nd: GSGG laser. IEEE journal of quantum electronics, 1985. 21(10): p. 1625-1629.
- [17] Young C. G., A sun pumped (CW) one-watt laser, Applied Optics, Vol. 5, No. 6, 993–997 (1966).
- [18] Liang, Dawei et Almeida, Joana. Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser. *Optics express*, 2011, vol. 19, no 27, p. 26399-26405.

الفصل الثالث

النموذج

يعتبر الضخ الشمسي في الليزر من الطرق الحديثة للضخ، حيث يقوم بتحويل الإشعاع الشمسي المركز الغير مترابط إلى إشعاع ليزر أحادي اللون، من أجل ذلك قمنا بالمحاكاة والنمذجة لمنظومة تركيز شمسي متمثلة في صحن قطع مكافئ، وبناء على فرضيات تبسيطية للظواهر الفيزيائية الحادثة، يُركز الإشعاع الشمسي ليوفر كثافة ضخ أكبر من العتبة اللازمة لإثارة المواد الليزرية المستعملة ومنه إنتاج الليزر.

III.1. دراسة توثيقية لليزر الشمسي

كانت البداية في سنة 1963 حيث أعلن Kiss ومجموعته عن أول ليزر شمسي باستخدام مرآة كروية بفتحة 35.56 cm [1].

في سنة 1966: قام Young C.G بضخ طرفي جانبي لليزر Nd : YAG باستخدام مركز أولى مرآة مكافئة بقطر 61 cm فأنتج ليزر شمسي استطاعته 1 W [2].

في سنة 1984: أنتج Arashi وزملاءه 18 W باستخدام مرآة مكافئة مساحتها 78.5 cm^2 وكانت كفاءة التجميع 0.22 وذلك باستغلال ليزر Nd : YAG قطره 4 mm وطوله 75 mm [3].

في سنة 1988: تمكن Weksler وزمليه باستخدام مركز مركب مكافئ CPC لضخ ليزر Nd : YAG فانتج 60 W [4].

في سنة 1996: تمكن Jenkins من تحسين كفاءة تجميع ليزر تم ضخه بواسطة فرن شمسي عالي التدفق، حيث بلغت كفاءته 4.7 W/m^2 [5].

في سنة 2003: حقق Lando وزملاءه بضخ جانبي لليزر Nd : YAG كفاءة تجميع 6.7 بمرآة أولية مجزئة مساحتها 6.75 m^2 في وضع التبع [6].

في سنة 2007: قام Yabe وزملاءه بواسطة عدسة فرينل بضخ ليزر Nd : Cr : YAG فانتج ليزر شمسي ذو كفاءة تجميع 18.7 W/m^2 [7].

في سنة 2008: استطاع Yabe تحسين كفاءة التجميع فحقق 20 W/m^2 بواسطة عدسة فرينل ذات مساحة 4 m^2 بضخ ليزر Nd : Cr : YAG بينما بلغت استطاعته 80 W [8].

في سنة 2011: حقق Liang ومن معه باستغلال عدسة فرينل مساحتها 0.64 cm^2 ليزر شمسي استطاعته 12.35 W ذو كفاءة تجميع 19.3 W/m^2 حيث تم الضخ الطرقي لقضيب ليزري من مادة Nd : YAG قطره 4 mm [9].

في سنة 2012: قام Yasser ومن معه باستعمال عدسة فرينل $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ حيث تم ضخ قضيب Nd : YAG قطره 2 mm وطوله 7 mm فانتج 6.8 W [10].

في سنة 2012: قام Dinh ومن معه باستعمال عدسة فرينل مساحتها حيث تم ضخ قضيب Nd : YAG قطره 6 mm وطوله 100 mm فانتج ليزر شمسي كفاءته 30 W/m^2 [11].

في سنة 2013: تمكن Liang من إنتاج 33.6 W بالضخ الجانبي لقضيب Nd : Cr : YAG قطره 7 mm وذلك باستعمال مركز شمسي عبارة عن مرآة قطعية مكافئة [12].

في سنة 2013: تمكنت Almeida وزملاءها من إنتاج ليزر شمسي استطاعته 40 W وكفاءة تجميعه 13.9 W/m^2 بالضخ الطرقي لليزر Nd : YAG وذلك باستعمال مركز شمسي عبارة عن مرآة مكافئة. [13].

في سنة 2014: قام Xu وزملاءه باستغلال عدسة فرينل من أجل الضخ الطرقي الجانبي لليزر Nd : YAG فانتج 20.3 W [14].

في سنة 2015: تمكنت Almeida وزملاءها من تحسين عملها السابق حيث أنتجت ليزر شمسي استطاعته 56 W وكفاءة تجميعه 21.1 W/m^2 لكن عن طريق الضخ الطرقي الجانبي لنفس الليزر، لليزر YAG : Nd وذلك باستعمال نفس المركز شمسي [15].

في سنة 2015: قام Yasser ومن معه باستعمال عدسة فريزل $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ومركز مركب مكافئ CPC حيث تم ضخ قضيب YAG : Nd قطره 2 mm وطوله 7 mm فانتج 6.5 W [16].
في سنة 2016: استخدم Liang وزملاءه مرآة مكافئة بالإضافة إلى عدسة سيليكات كبيرة شبه كروية للضخ الطرقي والجانبي لقضيب YAG : Nd قطره 4 mm. نتج عنه ليزر شمسي استطاعته 29.3 W بكفاءة تجميع 25 W/m^2 [17].

في سنة 2018: قام Liang وزملاءه بضخ جانبي لوسط ليزر YAG : Nd : Cr قطره 4.5 mm وطوله 35 mm باستخدام مرآة هيلوستات مكافئة بمساحة تجميع فعالة 1 m^2 لتجميع الطاقة الشمسية وعدسة من السيليكات السائلة لتوجيه الضوء فأنتج استطاعة ليزرية 32.5 W وكفاءة تجميع 32.5 W/m^2 [18].
في سنة 2019: باستعمال مكثف شمسي بسيط أنتج Miguel Catela ليزرا شمسيا وصلت استطاعته 10 W [19].

في سنة 2021: استطاع Claudia بواسطة مرآة قطعية مكافئة وعدسة نصف كروية على رأس الليزر ضخ جانبي لقضيب YAG : Nd : Cr قطره 4 mm فنتج عنه ليزر ذو كفاءة تجميع 23.6 W/m^2 [20].

في سنة 2022: تمكن Zitoacai باستخدام مركز شمسي مركب قطره 1.5 m يجمع بين عدسة فريزل ومرآة مكافئة معدلة لضخ قضيب ليزر YAG : Nd قطره 5 mm وطوله 22 mm أنتج ليزر شمسي استطاعته 74.6 W. وذو كفاءة تجميعية 42.2 W/m^2 [21].

III.2. النموذج

في هذا العمل وعلى خلاف باقي الأنظمة الموجودة سابقا اعتمدنا في تصميم النظام على البساطة مقابل استطاعة خرج وكفاءة تجميع مقبولين لليزر. بناء على شدة الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة بالجزائر، والواقعة على خط طول $L=5.240$ ، ودائرة عرض $\varphi=31.570$ أما الارتفاع $Z=141m$ عن سطح البحر.

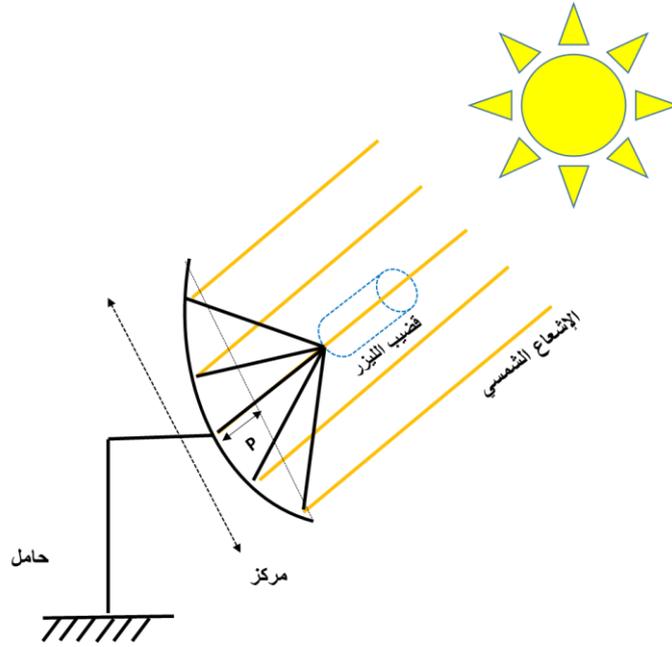
يتكون نظامنا من صحن عاكس ذو شكل قطع مكافئ، حيث يقوم هذا المركز الشمسي بتركز الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على سطحه في نقطة البؤرة وبذلك يكون التركيز تركيزا نقطيا على مستوى البؤرة.

حيث اخترنا قطرين مختلفين لهذا الصحن العاكس 1 m ، 2 m حتى يكون النظام غير مكلف وبسيط

خلافاً للأنظمة المستعملة التي تتطلب عناية خاصة وتنظيف دائم لها من الغبار لم نستعمل التتبع الشمسي ولا العدسات ومرايا هيلوستات المكافئة.

الجدول 3-1: أبعاد الصحن القطع المكافئ المدروس.

قطر الصحن $d=2m$	قطر الصحن $d=1m$	
1m	1m	البعد البؤري f
0.25m	0.0625m	الارتفاع p
53.1°	28°	زاوية الحافة ψ



الشكل 3-1: رسم توضيحي لنظام التركيز المدروس.

بما أن نظامنا الشمسي المعتمد في هذه الدراسة ذو تركيز نقطي، فقد تم تثبيت -بلورة الليزر- في بؤرة الصحن العاكس من أجل الضخ الجانبي للمادة. وباستغلال المواد الليزرية الفعالة التالية YAG المطعم بـ Nd في شكل قضيب ثم في شكل صفيحة، GSGG المطعم بـ Nd و Cr. يوضح الجدول 3-2 متغيرات النظام الشمسي.

الجدول 3-2: متغيرات النظام الشمسي.

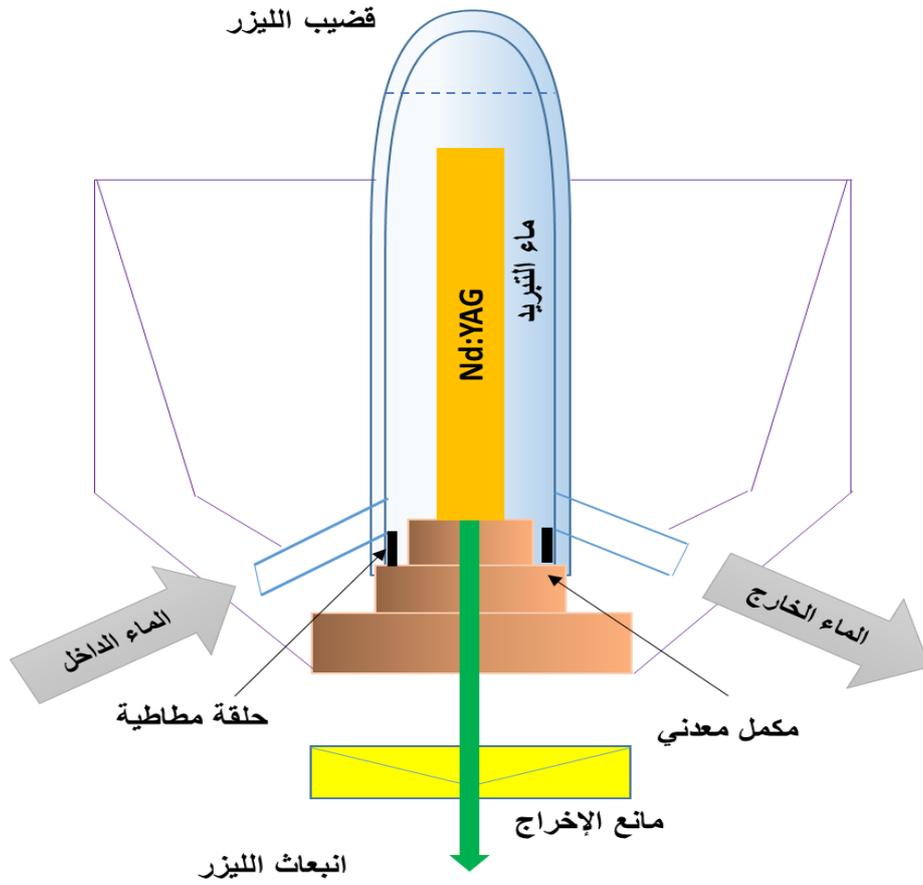
القيمة	المتغيرات
4560	$\rho_r (\text{Kg/m}^3)$
590	$C_{p_r} (\text{J/Kg})$
11.2	$\lambda_r (\text{w/m.K})$
0.05	α_r
0.9	ρ_0

III.1.2. نظام التبريد

تتعرض بلورة الليزر المثبتة في بؤرة الصحن العاكس لدرجة حرارة مرتفعة قد تؤدي في مستويات معينة إلى تلف المادة الليزرية، وتفاديا لهذا الارتفاع ولحماية البلورة من التلف.

لجأنا إلى نظام تبريد يعتمد على تدوير الماء حول بلورة الليزر. الشكل 2-3 يوضح مخطط لنظام التبريد

المعتمد.



الشكل 2-3: رسم توضيحي لنظام التبريد المستعمل.

يوضح الجدول 3-3 متغيرات الليزر المستعمل.

الجدول 3-3: متغيرات الليزر المستعمل.

المتغيرات	قضيبة GSGG Nd(1%),Cr(1%)	صفيحة YAG Nd(1%)	قضيبة YAG Nd(1%)
الطول الموجي $\lambda(\mu\text{m})$	1.06	1.06	1.06
تدفق التشبع لبلورة الليزر I_s (w/cm^2)	2.16×10^3	926	926
نسبة التداخل η_{ovp}	0.24	0.1	0.06
الكفاءة الكمية η_q	0.9	0.9	0.9
معامل الامتصاص α	0.6	0.6	0.6
قطر D_a (cm)	0.63	0.5	0.63
الطول L (cm)	3	/	3
كفاءة الضخ ε	0.8	0.8	0.8

III.2.2. مرشح طيف الإشعاع الشمسي

قمنا بتثبيت مرشح لطيف الإشعاع الشمسي على سطح المستقبل يسمح بمرور جزء محدد من الطيف

$[\lambda_1 \rightarrow \lambda_2]$ والذي ينبعث فيه الليزر المدروسة، بالإضافة إلى أن المرشح يساهم في خفض درجة الحرارة بإلغاءه

للأطياف الأخرى في الليزر.

تمتلك الليزر الثلاثة طول موجي يقدر بـ $1.06 \mu\text{m}$ ، لذلك اخترنا مرشح يسمح بمرور الأشعة تحت

الحمراء فقط $[0.7 \mu\text{m} - 300 \mu\text{m}]$ والتي من ضمنها الطول الموجي لهذه الليزر، وبالتالي شدة الإشعاع

الشمسي التي تصل المستقبل هي $G_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}$.

حيث $\lambda_1 = 0.7 \mu\text{m}$ و $\lambda_2 = 300 \mu\text{m}$ وتُعطى بالعلاقة التالية [22]:

$$G_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = I_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} \times \rho^o \times C \quad (1 - 3)$$

حيث $I_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)}$ شدة الإشعاع الشمسي على سطح الأرض لطيف الأشعة تحت الحمراء المحدد $[0.7 \mu\text{m} - 300 \mu\text{m}]$ وتعلق قيمته بالثابت الشمسي لهذا الطيف [23]:

$$I_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = I_0(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) [a_0 + a_1 e^{-K.AM}] \quad (2 - 3)$$

حيث $I_0(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)$ ثابت الشمسي لطيف الأشعة تحت الحمراء المحدد [الملحق]

$$I_0(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2) = \lambda_2 T - \lambda_1 T \quad (3 - 3)$$

III.3.2. الفرضيات التبسيطية للنموذج

ولتبسيط دراسة هذا النموذج اعتبرنا

- الأيام المختارة من أجل هذه الدراسة أيام صحوة خالية من السحب والغيوم.
- عيوب الشكل للنظام الشمسي المدروس مهملة.
- الانتقال الحراري على مستوى بلورة الليزر أحادي البعد وبالتالي التبادلات الحرارية تتم في الاتجاه القطري، وبذلك لا يوجد فرق بين مختلف المقاطع العرضية للبلورة.
- التبادل الحراري بالإشعاع مهمل وتنتقل الحرارة بالتوصيل و الحمل القسري عبر مقطع البلورة كما هو مبين في الفقرة الموالية.
- نعتبر عند الشروق درجة حرارة كل من بلورة الليزر والماء في نظام التبريد مساوية لدرجة حرارة الجو المحيط وذلك كشرط ابتدائي لانطلاق البرنامج.

III.4.2. الدراسة الحرارية لتبريد مادة الليزر

يسقط الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح الصحن القطع مكافئ، ثم ينعكس ويتركز في بؤرة الصحن. تتلقى بلورة الليزر المثبتة في البؤرة إشعاع الشمس المركز. حيث يكون ذو كثافة عالية بالتالي درجة حرارة

مرتفعة جدا مما يؤدي الى ضعف آلية إنتاج الليزر وكذا تعرض مادة الليزر إلى التلف. ومن أجل تفادي هذا الارتفاع في درجات الحرارة نقوم بعملية تبريد مادة الليزر عن طريق إحاطتها بفجوة يتدفق فيها الماء من المدخل نحو المخرج. يتم انتقال الحرارة بالتوصيل عبر البلورة، كما يتم فقدان جزء من الحرارة من خلال نظام التبريد عبر الحمل القسري مع الماء الذي يتم تدويره في النظام بتدفق كتلي \dot{m}_w حول سطح الليزر. مع اعتبار أن الفجوة معرضة للهواء الجوي.

• معادلة درجة حرارة المحيط [الملحق]

$$T_a = \frac{(T_{Max} - T_{Min})}{2} \sin [(T_{sunrise} - 8) + \frac{(T_{Max} + T_{Min})}{2}] \quad (5 - 3)$$

• معادلة التوازن الحراري لليزر

$$(L_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr}) \frac{\partial T_r}{\partial t} = G \cdot \tau \cdot \alpha_r + k_r \frac{\partial T_r}{\partial x} + 4 \frac{L_r}{D_r} h_{conv} (T_w - T_r) \quad (6 - 3)$$

• معادلة التوازن الحراري للماء

$$\dot{m}_w \cdot C_{pw} (T_w^t - T_w^{t-\Delta t}) = \pi D_r \cdot L_f \cdot h_{conv} (T_f - T_w) \quad (7 - 3)$$

يتم تحديد معامل انتقال الحرارة بالحمل h_{conv} من العلاقة [24]:

$$h_{conv} = \frac{k_w}{D_r} Nu_w \quad (8 - 3)$$

في حالة التدفق المضطرب رقم نوسالت يعطى بـ [24]:

$$Nu_w = 0.023 \cdot Re_D^{0.8} \cdot Pr_w^{0.33} \quad (9 - 3)$$

Re_D هو عدد رينولدز، و Pr_w هو عدد برانتيل للماء.

III.5.2. المعالجة الرقمية للمعادلات التفاضلية

من أجل مجال زمني صغير نسبياً Δt وتقسيمة طولية لليزر قصيرة نسبياً Δx نكتب :

$$\frac{\partial T_r}{\partial t} = \frac{T_r^t - T_r^{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (10 - 3)$$

$$\frac{\partial T_r}{\partial x} = \frac{T_r^x - T_r^{x-\Delta x}}{\Delta x} \quad (11 - 3)$$

• معادلة الموازنة الحرارية لمادة الليزر

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(L_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr})}{\Delta t} - \frac{K_r}{\Delta x} + 4 \frac{L_r}{D_r} h_{conv} \right] T_r - \left[4 \frac{L_r}{D_r} h_{conv} \right] T_w \\ & = \left[G \cdot \tau \cdot \alpha_r + \frac{(L_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr})}{\Delta t} T_r^{t-\Delta t} \right. \\ & \quad \left. - \frac{K_r}{\Delta x} T_r^{x-\Delta x} \right] \end{aligned} \quad (12 - 3)$$

• معادلة الموازنة الحرارية للماء

$$\begin{aligned} & [-\pi D_r \cdot L_r \cdot h_{conv}] T_r + [\dot{m}_w \cdot C_{pw} + \pi D_r \cdot L_r \cdot h_{conv}] T_w \\ & = \dot{m}_w \cdot C_{pw} T_w^{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (13 - 3)$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_r \\ T_w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} \quad (14 - 3)$$

• تحديد العناصر المصفوفية

$$a_{11} = \left[\frac{(L_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr})}{\Delta t} - \frac{K_r}{\Delta x} + 4 \frac{L_r}{D_r} h_{conv} \right]$$

$$a_{12} = - \left[4 \frac{L_r}{D_r} h_{conv} \right]$$

$$a_{21} = [-\pi D_r \cdot L_r \cdot h_{conv}]$$

$$a_{22} = [\dot{m}_w \cdot C_{pw} + \pi D_r \cdot L_r \cdot h_{conv}]$$

$$b_1 = \left[G \cdot \tau \cdot \alpha_r + \frac{(L_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr})}{\Delta t} T_r^{t-\Delta t} - \frac{K_r}{\Delta x} T_r^{x-\Delta x} \right]$$

$$b_2 = \dot{m}_w \cdot C_{pw} T_w^{t-\Delta t}$$

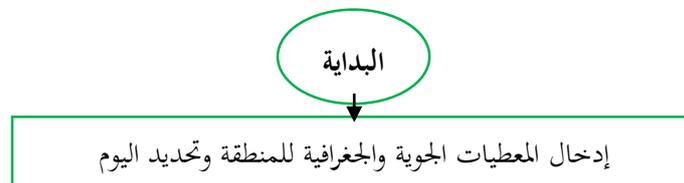
III.6.2. الحل العددي

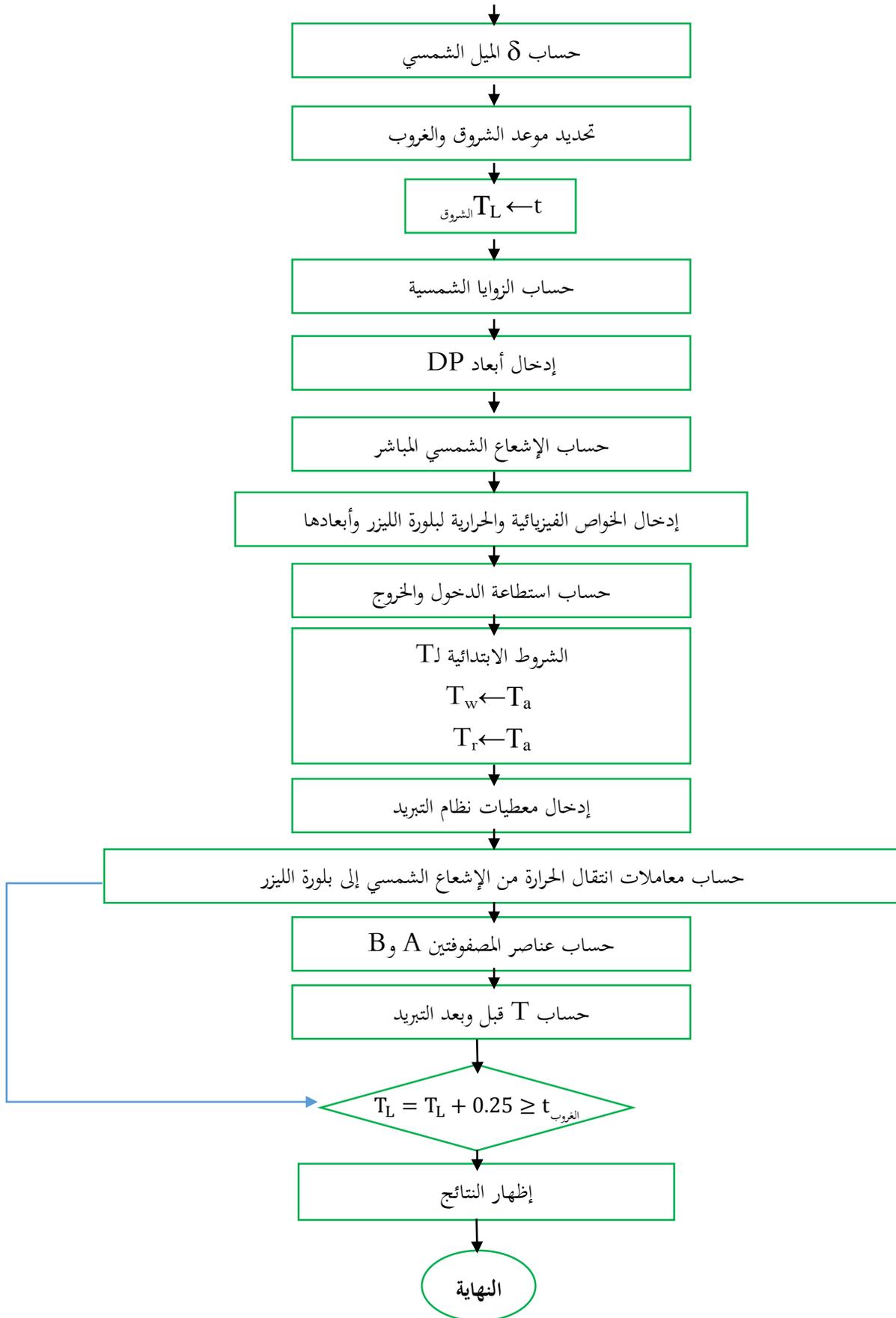
قمنا بإعداد برنامج بلغة الماتلاب (MATLAB)، في البداية يطلب البرنامج رقم اليوم من السنة N_J التي تتم فيها الدراسة، ثم يطلب المعطيات الجغرافية المتمثلة في إحداثيات المنطقة (خط الطول ودائرة عرض) وكذا المعطيات الجوية المتمثلة في درجة الحرارة القصوى T_{max} والدنيا T_{min} وسرعة الرياح في اليوم المدروس [الملحق]، ووفقا لمعادلتي الشروق والغروب، يقوم البرنامج بتحديد موعد الشروق والغروب.

ثم بحساب الزوايا الشمسية. يطلب البرنامج ثانية الأبعاد الخاصة بالمركز ليقوم بحساب شدة الإشعاع الشمسي المباشر والكلبي كل 15 دقيقة من الشروق إلى غروب الشمس اعتمادا على معادلة الإشعاع الشمسي.

مرة أخرى يطلب البرنامج إدخال الخواص الفيزيائية والحرارية لبلورة الليزر وكذا أبعادها ليقوم بحساب استطاعة الدخول والخروج. نقوم بعدها بإدخال معطيات النظام التبريد وعند درجات حرارة ابتدائية (T_r, T_w) تكون في حدود درجة حرارة المحيط T_a .

يقوم البرنامج بحساب معاملات انتقال الحرارة من الإشعاع الشمسي إلى بلورة الليزر مروراً بالمائع المتواجد في نظام التبريد، وبحساب عناصر المصفوفتين A و B ثم درجات الحرارة (T_r, T_w) قبل وبعد التبريد كل 15 دقيقة، وتكرر العملية إلى غروب الشمس. في الشكل أدناه مخطط انسياب البرنامج العددي الذي يوضح هذا الحساب.





الشكل 3-3: المخطط الانسيابي للبرنامج العددي.

الخلاصة

قمنا بدراسة نموذج محاكاة لإنتاج ليزر شمسي بواسطة صحن قطع مكافئ، هذا الأخير مزود بنظام تبريد لتقليل الحرارة ومرشح لطيف الإشعاع الشمسي يسمح بمرور الأشعة تحت الحمراء فقط، والتي يقع ضمنها الطول الموجي لليزرات المستعملة، من أجل ذلك وضعنا فرضيات تبسيطية لنموذج ودراسة حرارية له، من خلال معادلات الموازنة الحرارية، ومن ثم حل هذه المعادلات باستغلال برنامج الماتلاب.

- [1] Kiss, Z. J., Lewis, H. R., Duncan, R. C. (1963) Sun pumped continuous optical maser. *Appl. Phys. Lett.* 2, 93-94.
- [2] Young, C. W. (1966) A sun-pumped cw one-watt laser. *Appl. Opt.* 5, 993-997.
- [3] Arashi, H., Oka, Y., Sasahara, N., Kaimai, A., Ishigame, M. (1984) A solar-pumped cw 18 W Nd:yag laser. *Jpn. J. Appl. Phys.* 23, 1051–1053.
- [4] Weksler, M., Shwartz, J. (1988) Solar-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* 24, 1222– 1228.
- [5] Jenkins, D., Lando, M., O'Gallagher, J., Winston, R. (1996) A solar pumped Nd:YAG laser with a record efficiency of 4.7 watt/m². *Bulletin of Israel Physics Society* , 101.
- [6] Lando, M., Kagan, J., Linyekin, B., Dobrusin, V. (2003) A solar pumped Nd:yag laser in the high collection efficiency regime. *Opt. Commun.* 222, 371–381.
- [7] Yabe, Y., Ohkubo, T., Uchida, S., Nakatsuka, M., Funatsu, T., Mabuti, A., Oyama, A., Nakagawa, Y., Oishi, T., Daito, K., Behgol, B., Nakayama, Y., Yoshida, M., Motokoshi, S., Sato, Y., Baasandash, C. (2007) High efficiency and economical solar energy pumped laser with Fresnel lens and chromium co-doped laser medium. *Appl. Phys. Lett.* 90, 261120–261123.
- [8] Yabe T., Bagheri B., Ohkubo T., Uchida S., Yoshida K., Funatsu T., Oishi T., Daito K., Ishioka M., Yasunaga N., Sato Y., Baasandash C., Okamoto Y., and Yanagitani K. (2008) 100 W-class

- solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle. *Applied Physics* 104, 083104.
- [9] Liang, D., Almeida, J. (2011) Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser. *Opt. Express* 19, 26399–26405.
- [10] Dinh, T. H., Ohkubo, T., Yabe, T., Kuboyama, H. (2012) 120 W continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and a Nd:YAG rod. *Opt. Lett.* 37, 2670–2672.
- [11] Abdel-Hadi, Y.A., Simulation model of a new solar pumped laser system of Fresnel lens in Helwan of Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2012. 1(2): p. 195-198.
- [12] Liang, D., Almeida, J., Guillot, E. (2013) Side-pumped continuous wave Cr:Nd:YAG ceramic solar laser. *Appl. Phys. B. - Lasers and Optics* 111, 305-311.
- [13] Almeida, J., Liang, D., Guillot, E., Abdel-Hadi, Y. (2013) A 40 W cw Nd:yag solar laser pumped through a heliostat: a parabolic mirror system. *Laser Phys.* 23, 065801-065801.
- [14] Xu, P., Yang, S., Zhao, C., Guan, Z., Wang, H., Zhang, Y., Zhang, H., He, T. (2014) High-efficiency solar pumped laser with a grooved Nd:YAG rod. *Appl. Opt.* 53, 3941–3944.
- [15] Abdel-Hadi, Y.A., et al., Simulation model of a new solar laser system of Fresnel lens according to real observed solar radiation data in Helwan of Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2015. 4(2): p. 249-255.
- [16] Almeida, J., Liang, D., Vistas, C. R., Bouadjemine, R., Guillot, E. (2015) 5.5W continuous-wave TEM00-mode Nd:YAG solar laser

- by a light guide/2V pump cavity. Appl. Phys. B. - Lasers and Optics 121, 473-482.
- [17] Liang, D., Almeida, J., Vistas, C. R., Oliveira, M., Gonçalves, F., Guillot, E. (2016) High-efficiency solar pumped TEM00 mode Nd:YAG laser. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 145, 397–402.
- [18] Liang, D. Cláudia, R. Vistas, Tibúrcio, B.D., Almeida, J. (2018) Solar-pumped Cr:Nd:YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 185, 75–79.
- [19] Catela M., Liang D., Almeida J., and R. Vistas C. (2019) Homogenization and penetration effects of 1064 nm Nd:YAG solar laser and concentrated solar radiations on ex vivo chicken breast samples. J. Laser Appl. 31, 022010.
- [20] Vistas C. R., Liang D., Almeida J., Tibúrcio B. D., Garcia D., Catela M., Costa H., Guillot E. (2021) Ce:Nd:YAG side-pumped solar laser. J. of Photonics for Energy, 11(1), 018001.
- [21] Cai, Z., et al., Highly efficient solar laser pumping using a solar concentrator combining a Fresnel lens and modified parabolic mirror. Energies, 2022. 15(5): p. 1792.
- [22] Alam, S., S. Kaushik, and S. Garg, *Computation of beam solar radiation at normal incidence using artificial neural network*. Renewable energy, 2006. **31**(10): p. 1483-1491.
- [23] Iqbal, M., *An introduction to solar radiation*. 2012: Elsevier.
- [24] Annaratone, D., *Engineering heat transfer*. 2010: Springer Science & Business Media.

الفصل الرابع

تحليل ومناقشة النتائج

مقدمة

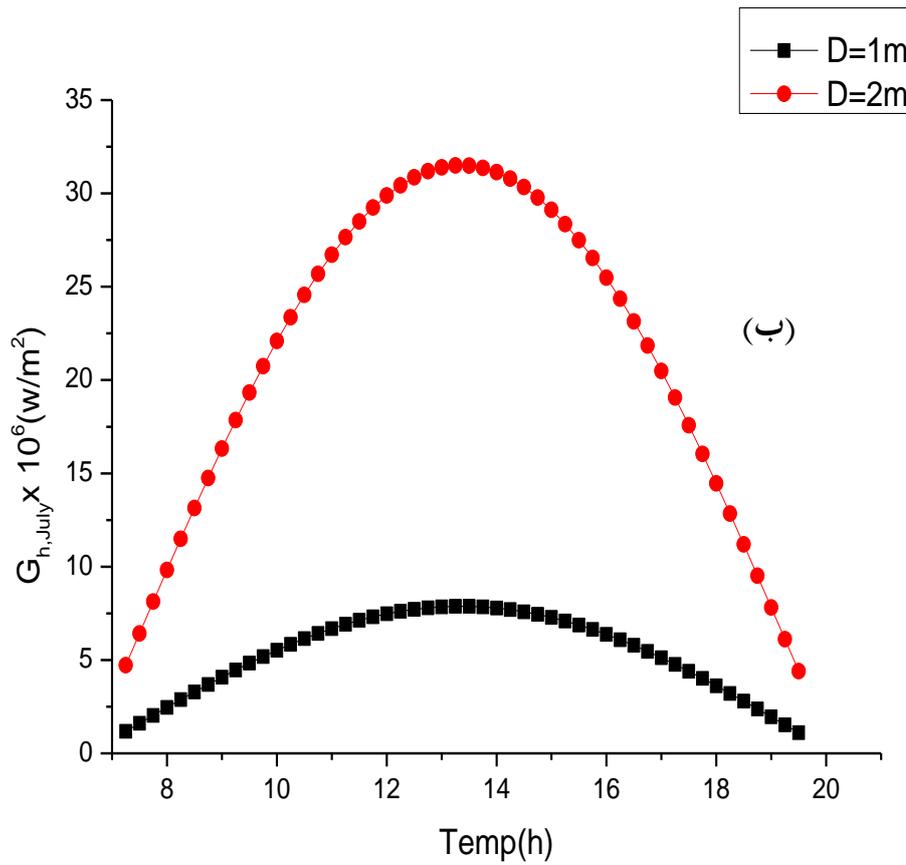
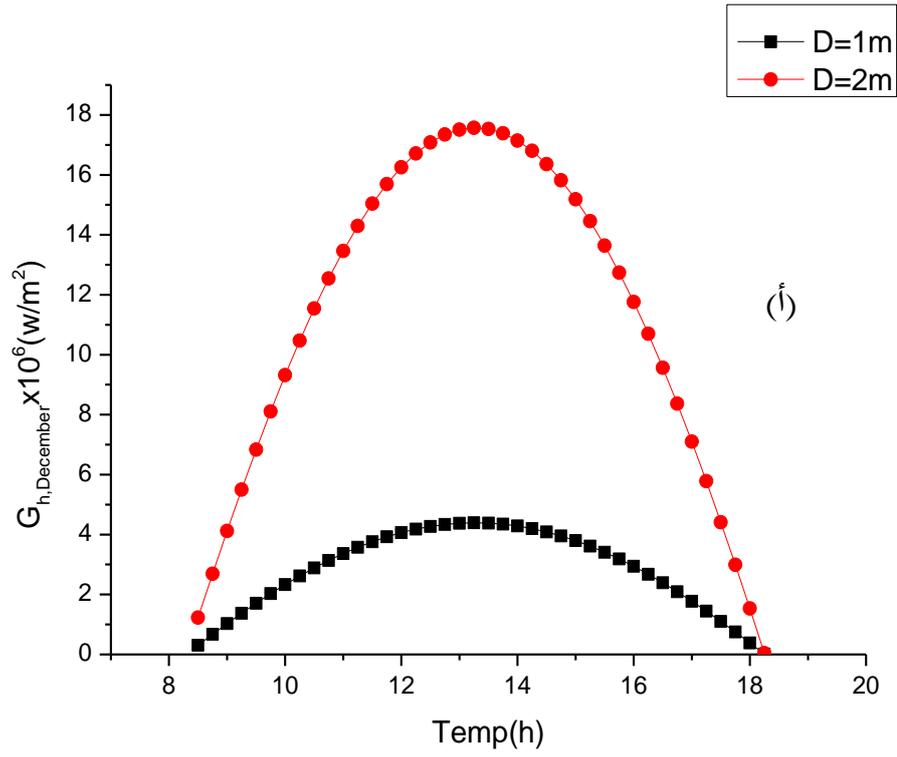
في هذه الفصل نعرض دراستنا التي تعتمد على النمذجة والمحاكاة العددية لنظامنا الشمسي، من أجل إنتاج ليزر شمسي، من خلال قضيب ليزري YAG:Nd وصفيحة ليزرية YAG:Nd وقضيب ليزري و GSGG:Nd:Cr.

بعد الضخ الجانبي لليزر بواسطة الإشعاع الشمسي المركز الصادر عن الصحن قطع مكافئ بقطر 1 m ثم قطر 2 m. سجلنا في كل مرة قيم الإشعاع الشمسي المركز، استطاعة خرج الليزر، ودرجة الحرارة على مستوى بلورة الليزر قبل وبعد عملية التبريد

اخترنا يوم شتوي (29 ديسمبر) ويوم صيفي (29 جويلية). وكانت النتائج التالية:

1.IV. الإشعاع الشمسي المركز

يستقبل صحن القطع المكافئ الإشعاع الشمسي ويجمعه في بؤرته بعد الانعكاس ومنه نحصل على إشعاع مركز تتزايد شدته بدءاً من شروق الشمس ليصل إلى الذروة عند الزوال ثم يتراجع لينعدم بعد الغروب. في يوم شتوي وعند الزوال تم تركيز 4.39 MW/m^2 من الإشعاع الشمسي من أجل قطر 1 m بينما من أجل قطر 2 m تم تركيز 17.57 MW/m^2 . وهذا ما يوضحه المنحنى في الشكل 1-4 (أ). أما في يوم صيفي فبلغت عند الزوال 7.87 MW/m^2 من أجل القطر 1 m و 31.5 MW/m^2 من أجل قطر 2 m، كما هو موضح في منحنى الشكل 1-4 (ب).



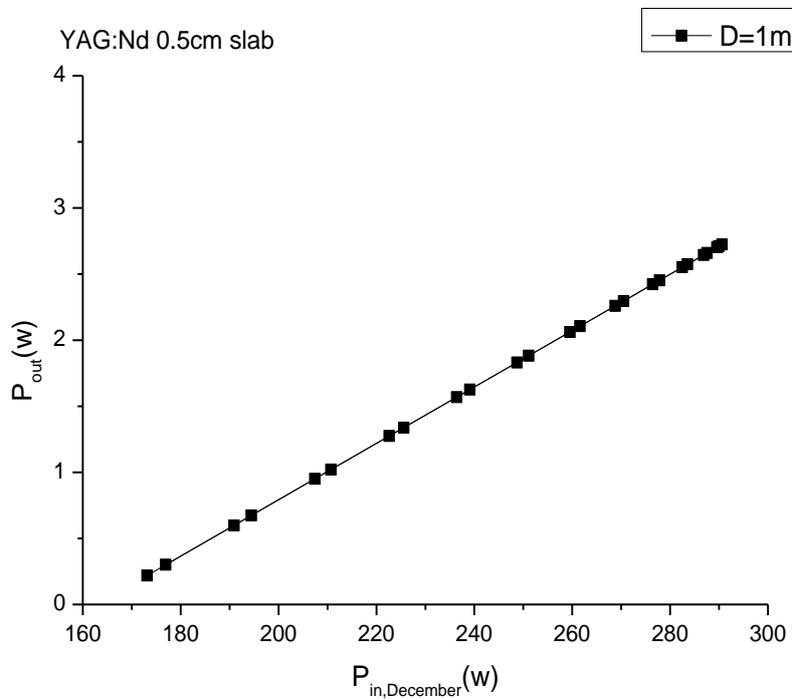
الشكل 4-1: شدة الإشعاع الشمسي خلال يوم: (أ) 29 ديسمبر (ب) يوم 29 جويلية.

2.IV. استطاعة خرج الليزر

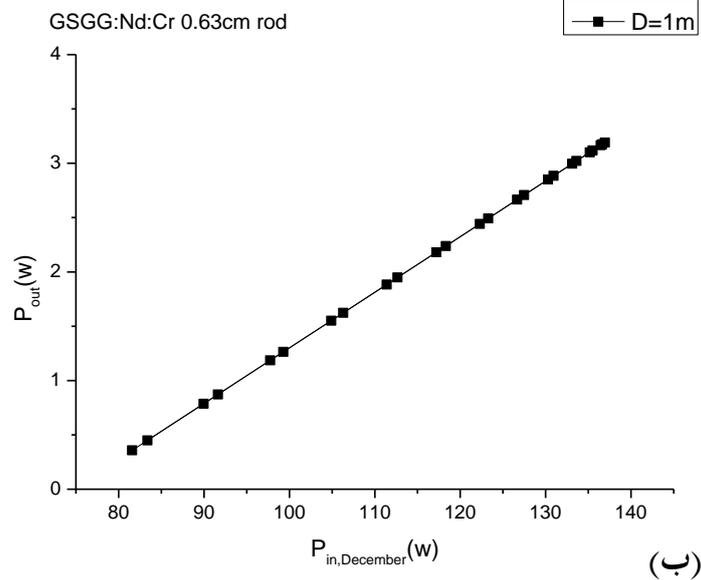
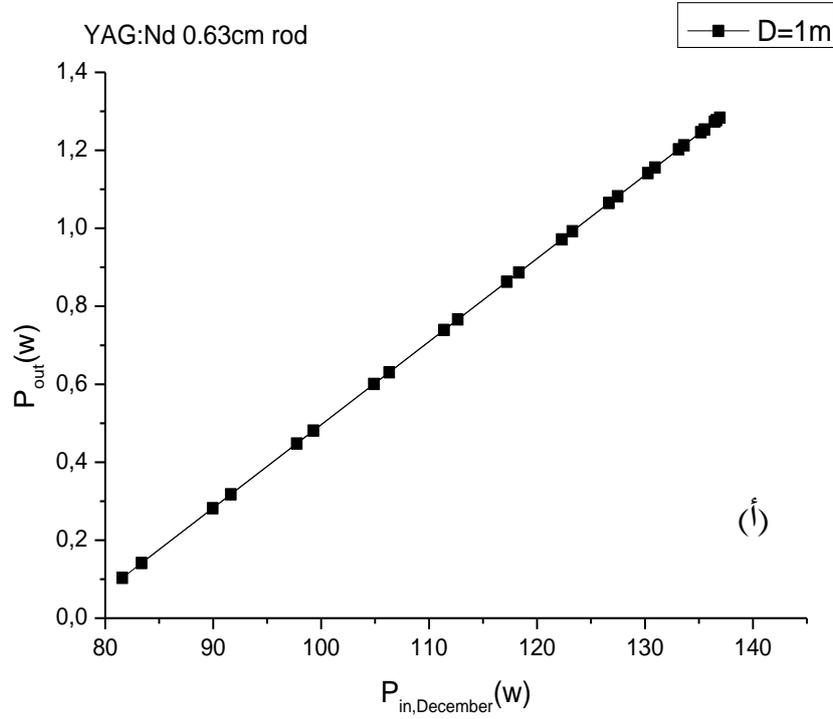
عندما تستقبل مادة الليزر المثبتة في بؤرة الصحن الإشعاع الشمسي المركز تكون استطاعة خرج الليزر متناسبة طردا مع استطاعة الدخول .

قمنا بتسجيل ورسم نتائج المحاكاة في كل مرة من أجل ثلاث أنواع من المواد الليزرية: قضيب الليزر YAG:Nd، صفيحة ليزر YAG:Nd وقضيب الليزر GSGG:Nd:Cr، بعد تثبيت مرشح الطيف الشمسي وهذا ما توضحه المنحنيات في الأشكال أدناه.

يبدأ ظهور الليزر، في اليوم الشتوي، في حدود الساعة 10:00، حيث سجلنا استطاعة خرج 1.28 W و 2.72 W و 3.19 W من قضيب الليزر YAG: Nd ومن صفيحة ليزر YAG:Nd ومن قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr على الترتيب في حدود الواحدة زوالا وذلك من أجل قطر 1 m لصحن القطع المكافئ كما هو موضح في الشكلين 2-4 و 3-4.

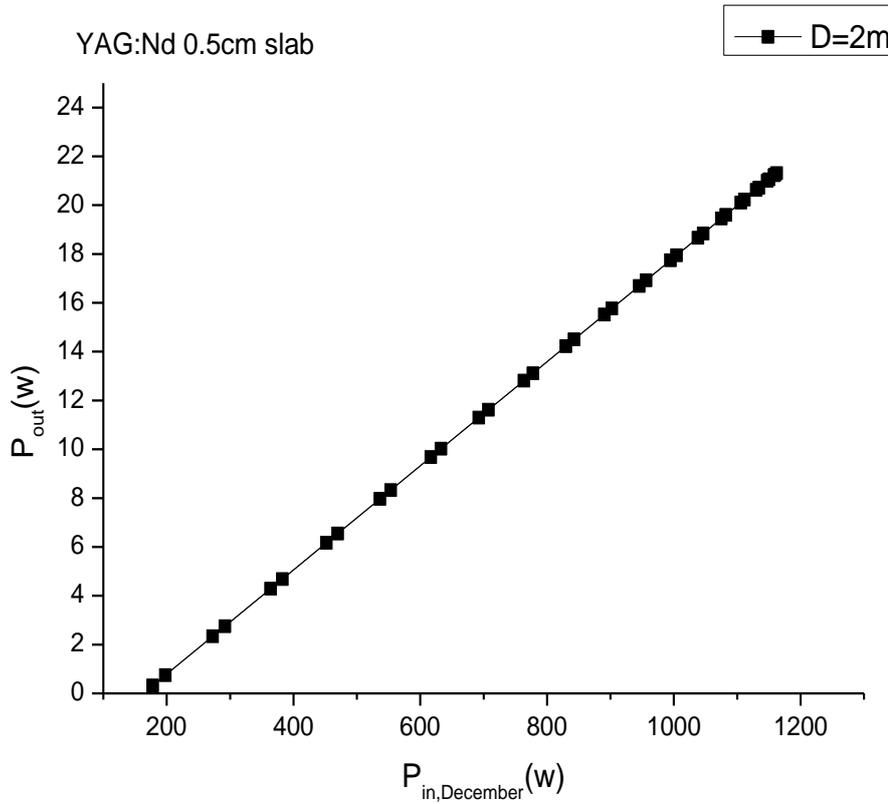


الشكل 4-2: تغييرات استطاعة خرج الليزر بدلالة استطاعة الدخول يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره $D=1m$ ، لصفحة $YAG:Nd$.

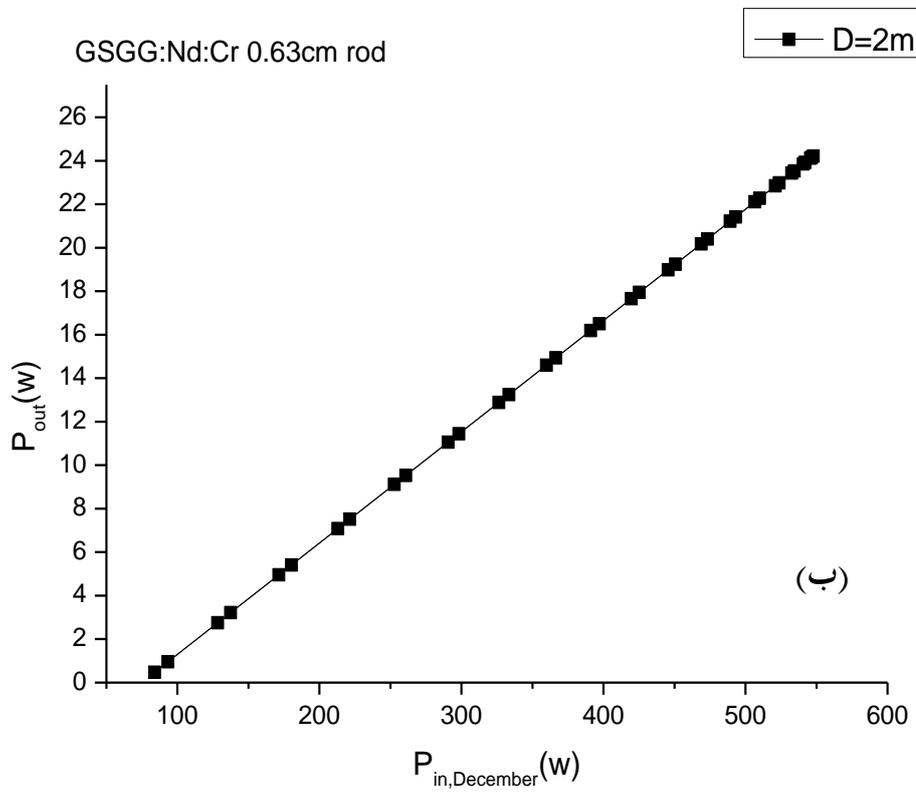
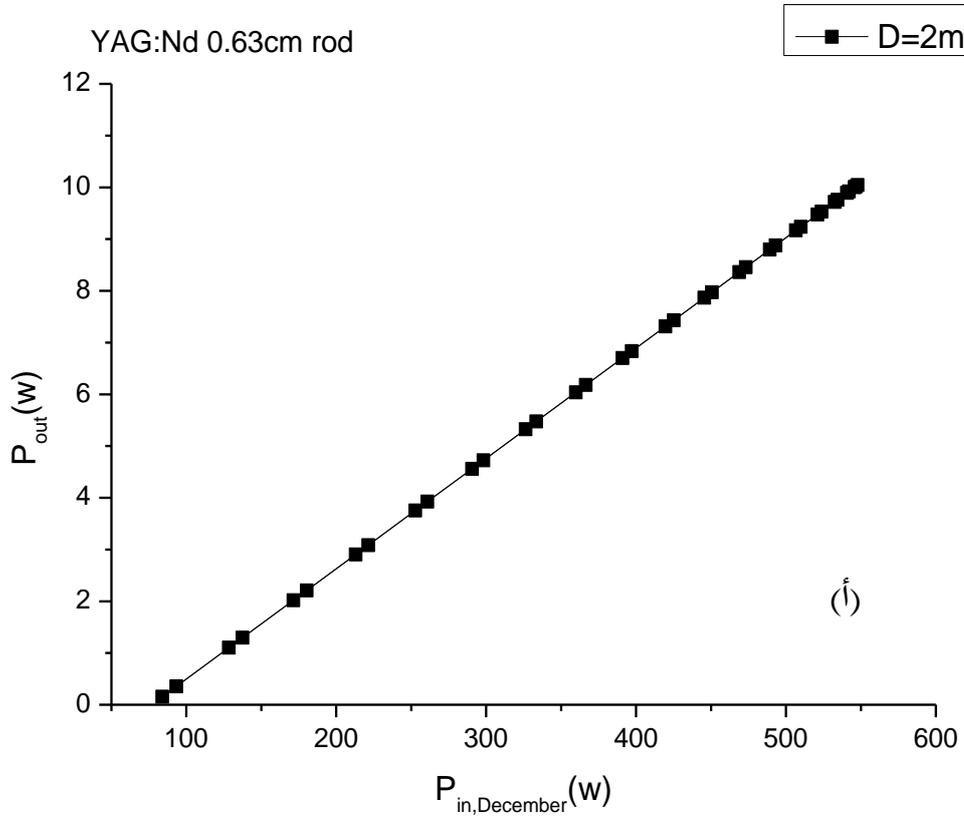


الشكل 4-3: تغييرات استطاعة خرج الليزر بدلالة استطاعة الدخول يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره $D=1m$ ، ل: (أ) قضيب الليزر $YAG:Nd$ و (ب) قضيب الليزر $GSGG:Nd:Cr$.

أما عند قطر 2 m لصحن القطع المكافئ فالليزر يظهر في حدود 8:30 صباحا، حيث سجلنا استطاعة خرج 10.04 W ، 21.31W ، و 24.21W من قضيب الليزر YAG:Nd ، من صفيحة ليزر YAG:Nd ومن قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr على الترتيب في حدود الواحدة زوالا كما هو مبين في الشكلين 4-4 و 4-5.



الشكل 4-4: تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره $D=2m$ ، لصفحة YAG: Nd.



الشكل 4-5: تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 ديسمبر لمركز شمسي نصف قطره $D=2m$ ، ل: (أ) قضيب

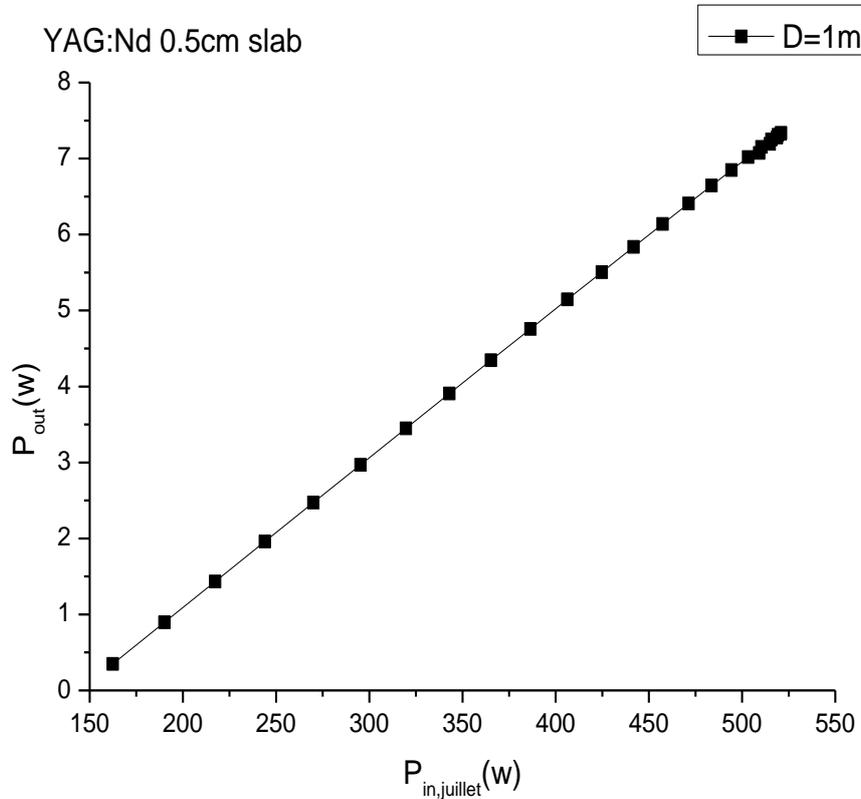
الليزر $YAG:Nd$ و (ب) قضيب الليزر $GSGG:Nd:Cr$.

بينما يبدأ ظهور الليزر، في اليوم الصيفي، في حدود الساعة 7:45، حيث سجلنا استطاعة خرج $3.59 W$ ،

$7.33W$ ، و $8.74 W$ من قضيب الليزر $YAG: Nd$ ، من صفيحة ليزر $YAG: Nd$ ومن قضيب

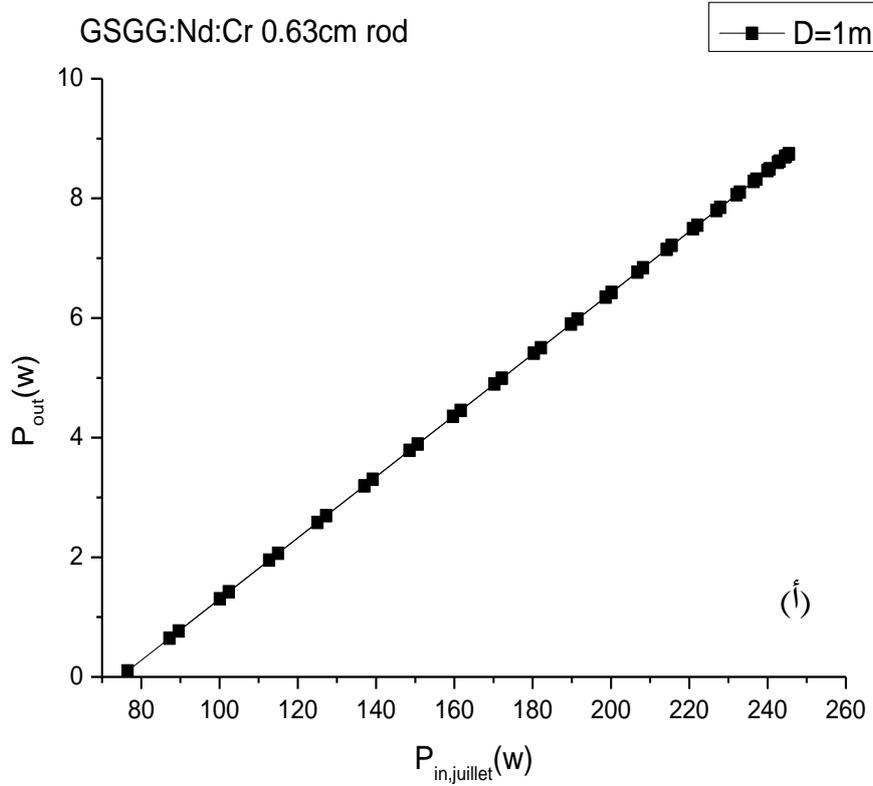
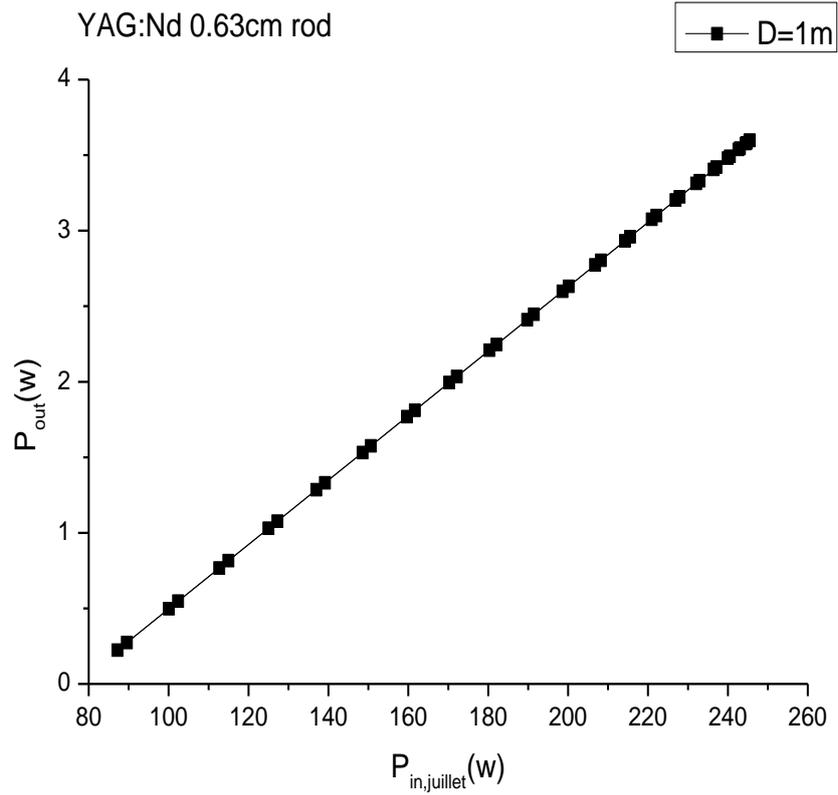
الليزر $GSGG: Nd: Cr$ على الترتيب في حدود الواحدة زوالاً. وذلك من أجل قطر $1 m$ لصحن القطع

المكافئ حسب ما يظهره الشكلان 4-6 و 4-7.



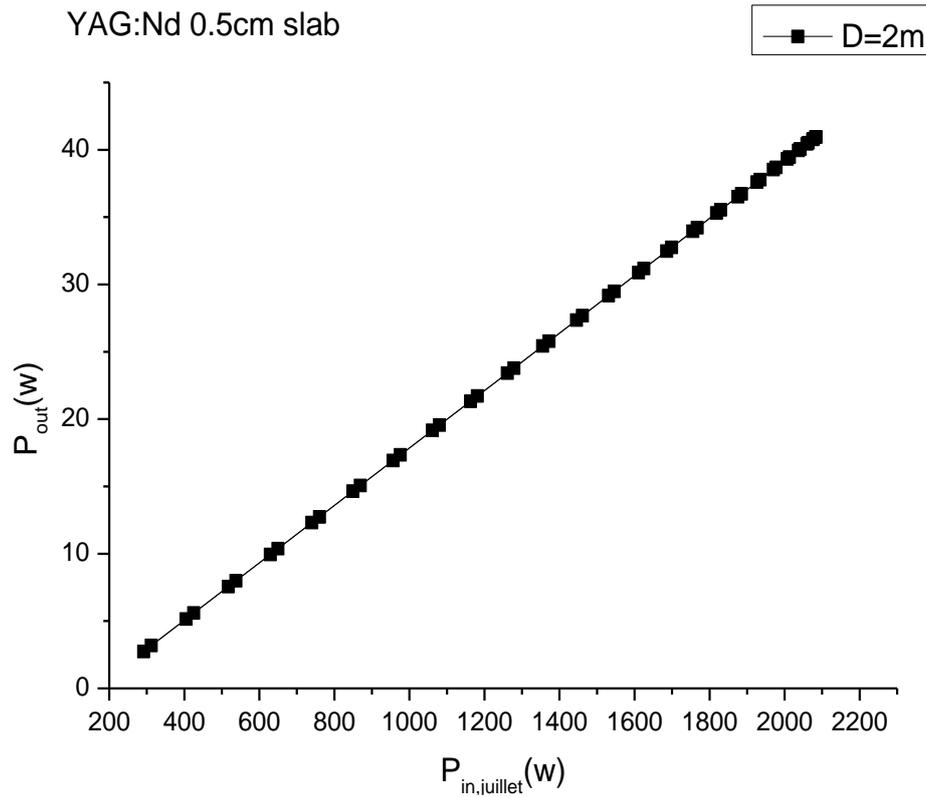
الشكل 4-6: تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=1m$ ،

لصفيحة $YAG: Nd$.

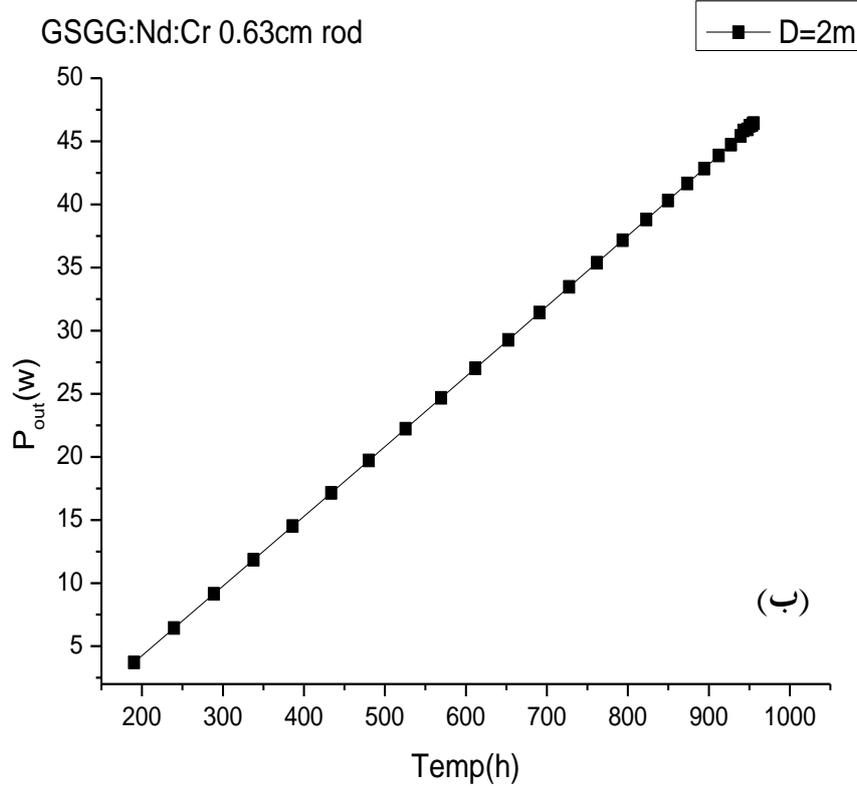
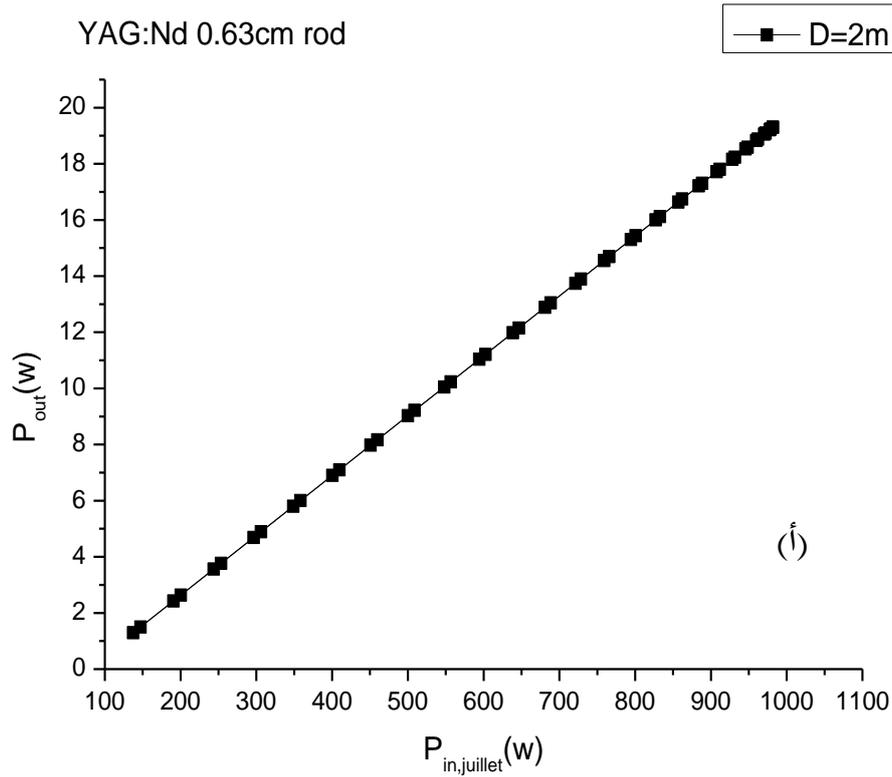


الشكل 4-7: تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=1m$ ، ل: (أ) قضيب الليزر YAG:Nd و (ب) قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr.

أما عند قطر 2 m لصحن القطع المكافئ فالليزر يظهر في حدود الساعة 6:45 صباحا، حيث سجلنا استطاعة خرج 19.30 W، 40.96 W، و 46.43 W من قضيب الليزر YAG:Nd، من صفيحة ليزر YAG:Nd ومن قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr على الترتيب في حدود الواحدة زوالا، كما هو مبين في الشكلين 8-4 و 9-4.



الشكل 8-4: تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=2m$ ، لصفيحة YAG:Nd.



الشكل 4-9: تغييرات استطاعة خرج الليزر خلال يوم 29 جويلية لمركز شمسي نصف قطره $D=2m$ ، ل: (أ) قضيب الليزر YAG:Nd و (ب) قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr.

3.VI. درجة الحرارة

بعد استخدام نظام تبريد على مستوى بلورة الليزر في بؤرة الصحن تحصلنا على نتائج قمنا برسمها في منحنيات

الشكلين 10-4 و 11-4.

سجلنا في، اليوم الشتوي، درجات الحرارة 50.5°C و 145°C عند قطر 1 m و 2 m لصحن القطع

المكافئ على الترتيب. بعد تبريد البلورة الليزرية انخفضت درجات الحرارة إلى 27°C و 50°C ، عند قطر 1 m

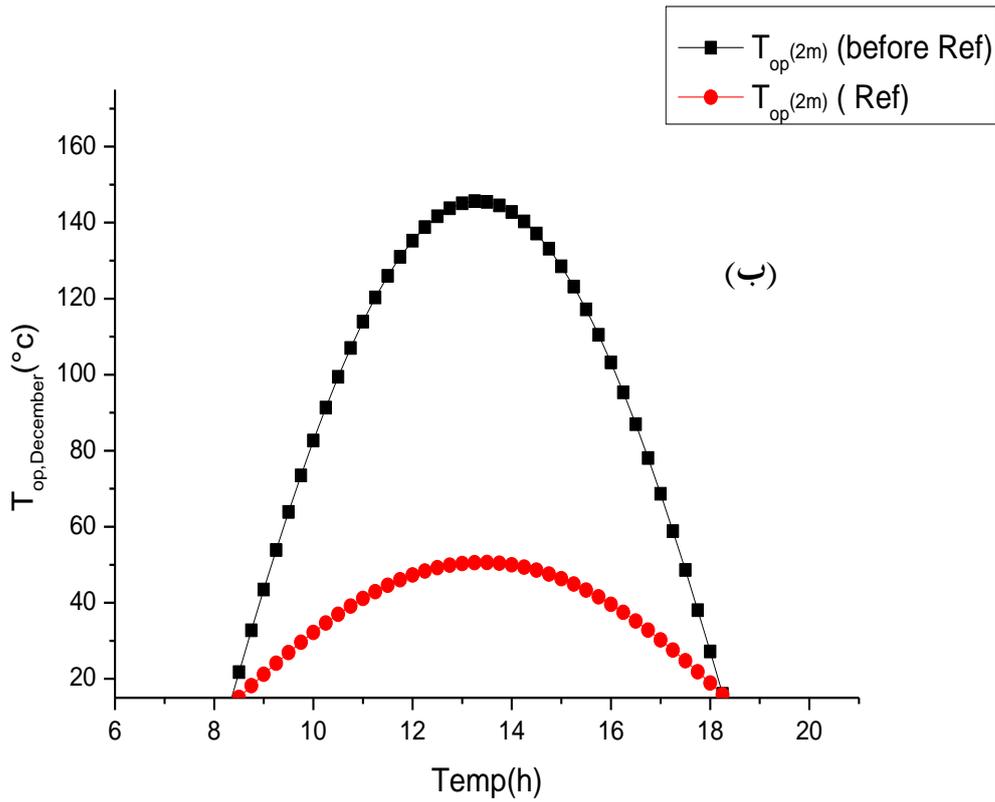
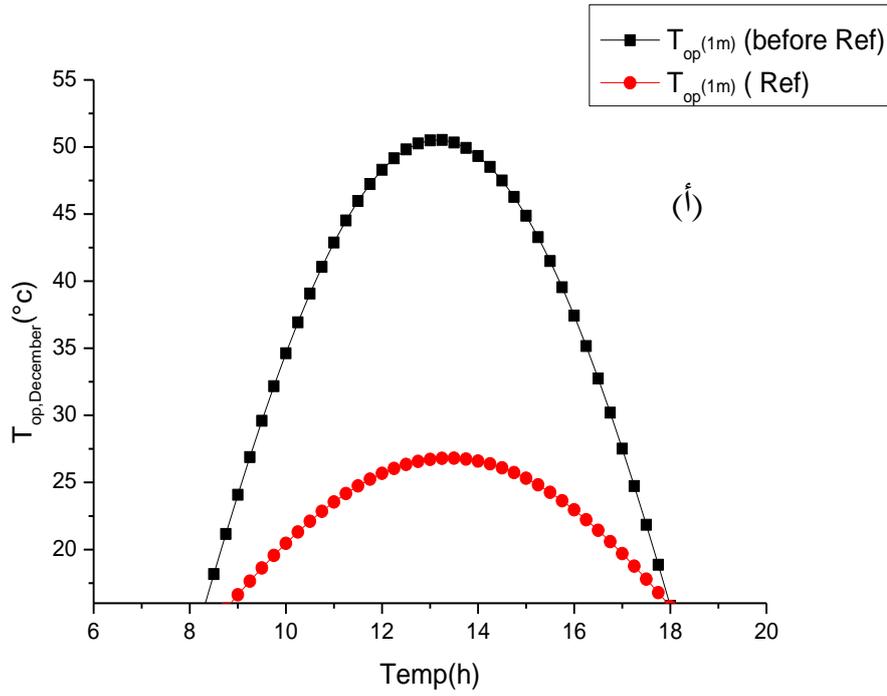
و 2 m لصحن القطع المكافئ على الترتيب.

بينما في، اليوم الصيفي، كانت درجات الحرارة تلامس 101°C و 272°C عند قطر 1 m و 2 m

لصحن القطع المكافئ على الترتيب. بعد التبريد سجلنا 59°C و 101°C عند قطر 1 m و 2 m لصحن

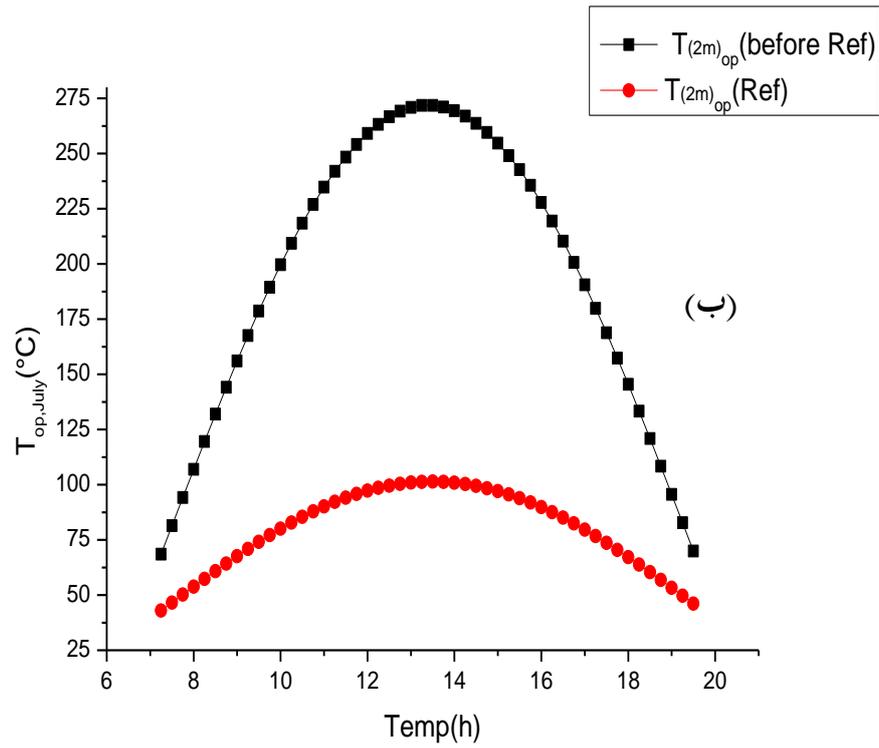
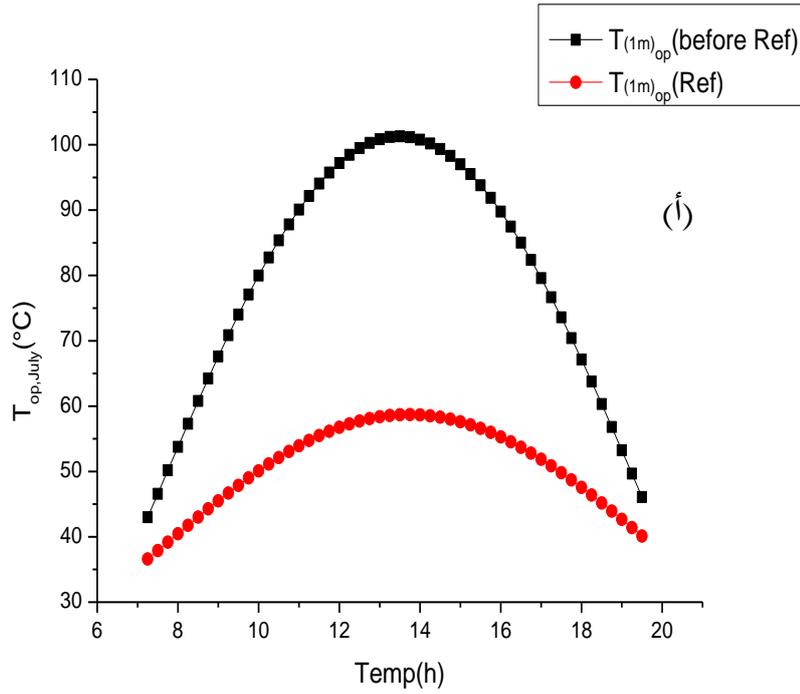
القطع المكافئ على الترتيب. تعتبر درجات الحرارة هذه مقبولة على مستوى بلورة الليزر. لذلك من الضروري

الاستعانة بالتبريد خاصة في الأيام ذات درجات الحرارة المرتفعة لحفظ المادة الليزرية من التلف.



الشكل 4-10: تغييرات درجة الحرارة قبل وبعد التبريد خلال يوم 29 ديسمبر للمركز الشمسي: (أ)

$D=2m$..(ب) ، $D=1m$



الشكل 4-11: تغييرات درجة الحرارة قبل وبعد التبريد خلال يوم 29 جويلية للمركز الشمسي: (أ)

$D=2m..(ب)$ ، $D=1m$

4.V. كفاءة التجميع

من خلال الجدول 1-4 نجد أن الكفاءة التجميعية المسجلة لقضيب الليزر GSGG:Nd:Cr أعلى

منه مقارنة بـ YAG:Nd سواء كان في شكل قضيب أو صفيحة، نظرا لتحقيقه استطاعة خرج معتبرة.

كذلك كانت الكفاءة في اليوم الصيفي أعلى مقارنة بكفاءة اليوم الشتوي، وذلك بناء على الإشعاع

الشمسي الذي يكون تدفقه كبير في فصل الصيف وبالتالي طاقة ضخ أكبر، ذرات مثارة أكثر فاستطاعة خرج

معتبرة، كما أن هذه الكفاءة متناسبة طردا مع قطر المركز.

والملاحظ من خلال الدراسات السابقة، أن أنظمة الليزر التي تحقق كفاءات عالية كانت تعتمد على الضخ

الطرفي، مثل نظام Liang [1] ومجموعته وCai [2] ومجموعته، إلا أن الضخ الجانبي، والذي اعتمدنا عليه في

دراستنا، يُعد طريقة فعالة لتوزيع كامل طاقة الضخ الممتصة على طول قضيب الليزر، أو سطوح الصفيحة، مما يقلل

من تبعات الحمل الحراري، التي تلازم عملية الضخ.

بالإضافة إلى أن المراكز المعقدة التركيب توفر إشعاع شمسي أكثر، وبالتالي طاقة ضخ أعلى، وهذا ما كان

في نظام Cai [2] ومجموعته.

الجدول 1-4: الكفاءة التجميعية للمواد الليزرية المختارة.

قضيب	صفيحة	قضيب		
<i>YAG : Nd</i>	<i>YAG : Nd</i>	GSGG:Nd:Cr		
1.63	3.49	4.06	الكفاءة التجميعية في اليوم	D = 1
3.20	6.79	7.71	الشتوي w/m^2	D = 2
4.57	9.33	11.13	الكفاءة التجميعية في اليوم	D = 1
6.15	13.04	14.79	الصيفي w/m^2	D = 2

ولتأكيد مصداقية محاكاتها وفعالية نظامنا رغم بساطته وقلة تكلفته في تركيز الإشعاع الشمسي واستغلاله في

إنتاج الليزر، قمنا باستبدال مركزنا بمركز الذي استعمله عبد الهادي ومجموعته فتحصلنا على النتائج التالية:

الجدول 4-2: مقارنة بين استطاعة الدخول والخروج لدراستنا ودراسة سابقة.

عبد الهادي ومجموعته	دراستنا	المتغيرات
696	1128.71	P_{in}
13.86	18.4435	P_{out}

تُظهر النتائج أنه عند استبدال مركزنا بمركز عبد الهادي ومجموعته في نظام إنتاج الليزر الشمسي أن استطاعة الإشعاع المركز للنظام المدروس والتي وصلت 714.1128 W أكبر من التي وفرها نظام عبد الهادي ومجموعته 696 W [3] وبالتالي كانت استطاعة خرج الليزر المنتج 18.44 W هي أيضا أكبر من استطاعة خرج ليزر عبد الهادي التي لم تتعدى $13,86 \text{ W}$.

لقد حققنا نتائج أفضل من غيرنا رغم أن هؤلاء لهم أنظمة شبيهة بنظامنا مع وجود عدسة فريزل و مرايا هيلوستات مكافئة، كما هو موضح في الجدول 4-3.

حيث حقق عبد الهادي ومجموعته [3] استطاعة دخول 696 W أنتجت استطاعة ليزرية 13.86 W من خلال مركز يتكون من عدسة فريزل و مركز مركب مكافئ (CPC).

بينما حقق Liang ومجموعته [1] إشعاع شمسي مركز قدره 870 W/m^2 نتج عنها استطاعة ليزرية 32.5 W من خلال مركز يتكون هذا النموذج من مرآة هيلوستات مكافئة مساحتها 1 m^2 لتجميع الطاقة الشمسية وعدسة من السيليكا السائلة لتوجيه الضوء تم الضخ الجانبي لوسط ليزر YAG: Nd: Cr قطره 4.5 mm وطوله 35 mm .

الجدول 4-3: مقارنة بين استطاعة الدخول والخروج دراستنا ودراسات سابقة.

[2] Cai	[4] Vistas	[1] Liang	عبد الهادي [3]	الدراسة الحالية	نوع المركز
يتكون المركز الأساسي من عدسة فرينل ومرآة مكافئة معدلة، مطلية بالفضة (R) (95% = تم وضع عدسة فرينل في الجزء العلوي من المركز لتتركز ضوء الشمس في الطرف الأمامي لرأس الليزر تم تركيب المرآة المكافئة بشكل محوري أسفل عدسة فرينل لتتركز ضوء الشمس على جوانب رأس الليزر	رأس الليزر الشمسي تم تكوينه من عدسة نصف كروية مزدوجة المرحلة وتجويف ضخم على شكل متوازي الأضلاع، والذي كان يقوم بتوجيه وإعادة توزيع الإشعاع الشمسي المكثف من منطقة التركيز لمرآة نصف قطعية إلى قضيب الليزر.	يتكون هذا النموذج من مرآة هيلوستات مكافئة مساحتها 1 m^2 لتجميع الطاقة الشمسية و عدسة من السيليكات السائلة لتوجيه الضوء تم الضخ الجانبي لوسط ليزر YAG: Nd : Cr قطره 4.5 mm وطوله 35 mm	يتكون هذا النموذج من عدسة فرينل ومركز مركب مكافئ (CPC)	يتكون النموذج من صحن عاكس قطع مكافئ ثبتنا بلورة الليزر في بؤرته	
/	/	870	/	7.84	G_h Mw/m ²
/	600	/	696	955.5	P_{in} (W)
74.6	16.5	32.5	13.86	46.43	P_{out} (W)
طربني جانبي	جانبي	طربني جانبي	جانبي	جانبي	نوع الضخ

أما Vistas ومجموعته [4] فأنتج استطاعة ليزرية بعد أن استطاع تحقيق استطاعة دخول 600 W من

خلال منظومة مكونة من رأس ليزر الشمسي يتكون من عدسة نصف كروية مزدوجة، وتجويف ضخم على شكل

متوازي الأضلاع، والذي كان يقوم بتوجيه وإعادة توزيع الإشعاع الشمسي المكثف من منطقة التركيز لمرآة نصف قطعية إلى قضيب الليزر.

كما أنه هناك أنظمة لا يمكننا المقارنة بها مثل نظام Cai ومجموعته [2] لأن النظام المعتمد نظام معدل حيث يتكون المركز الأساسي من عدسة فرينل ومرآة مكافئة معدلة، مطلية بالفضة ($R = 95\%$). تم وضع عدسة فرينل في الجزء العلوي من المركز لتركيز ضوء الشمس في الطرف الأمامي لرأس الليزر تم تركيب المرآة المكافئة بشكل محوري أسفل عدسة فرينل لتركيز ضوء الشمس على جوانب رأس الليزر وبذلك يكون أكثر تعقيدا من نظامنا، كما أنه يسمح بضخ مزدوج -ضخ وجاني - للمادة الليزرية.

الخلاصة

استطعنا، باستغلال الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة بالجزائر، تركيز ما يعادل 7.84 Mw/m^2 بواسطة مركز ذو شكل قطع مكافئ وذلك لضخ المادة الليزرية، حيث وفرنا بذلك استطاعة دخول تقدر ب W 955.5 فأنتجت استطاعة خرج تصل إلى 46.43 W بكفاءة معتبرة، بدون الحاجة إلى نظام تركيز معقد كاستعمال مرايا هيلوستات مكافئة، وعدسات فرينل. ولا نحتاج في هذه الحالة إلى صيانة مستمرة والتي لا غنى عنها في منطقة ورقلة التي تتميز بنشاط معتبر للرياح الرملية وبالتالي تطاير الغبار. ويكون باستغلال الأشعة تحت الحمراء فقط من ضمن الطيف الشمسي الكلي والتي تضم الأطوال الموجية لليزرات المدروسة، حيث اعتمادنا في ذلك على مرشح الطيف الشمسي.

كما تمكنا من توفير درجة حرارة مناسبة لليزر بواسطة مرشح الطيف الشمسي ونظام تبريد حيث استطاعا خفضها في فصل الصيف من حوالي $272 \text{ }^\circ\text{C}$ إلى ما دون $101 \text{ }^\circ\text{C}$ ، وهي درجة حرارة مناسبة لليزر، على

خلاف درجة الحرارة قبل التبريد. يُعد نظام التبريد ضروري في فصل الصيف بشكل خاص لحماية المادة الليزرية من التلف.

المراجع

- [1] Abdel-Hadi, Y.A., et al., *Simulation model of a new solar laser system of Fresnel lens according to real observed solar radiation data in Helwan of Egypt*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2015. 4(2): p. 249-255.
- [2] Vistas, C.R., et al., *Ce: Nd: YAG side-pumped solar laser*. Journal of Photonics for Energy, 2021. 11(1): p. 018001-018001.
- [3] Cai, Z., et al., *Highly efficient solar laser pumping using a solar concentrator combining a Fresnel lens and modified parabolic mirror*. Energies, 2022. 15(5): p. 1792.
- [4] Liang, D., et al., *Solar-pumped Cr: Nd: YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018. 185: p. 75-79.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة

قمنا ببناء على شدة الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة، بتركيز الإشعاع بواسطة مركز شمسي نقطي صحن قطع مكافئ من دون تتبع شمسي (بسيط التكلفة)، ثم يضخ الإشعاع الشمسي المركز على مادة الليزر من شروق الشمس إلى غروبها، ونحسب استطاعة خرج الليزر كل ربع ساعة في أيام مختلفة من السنة. ومن أجل تمرير جزء من الطيف فقط والذي ينتمي إليه الطول الموجي لبلورة الليزر قمنا بوضع مرشح للطيف الضوئي مناسب للمادة الليزرية، ونظرا لارتفاع درجة حرارة مادة الليزر بسبب ارتفاع شدة الإشعاع المركز من جهة و ارتفاع درجة حرارة الجو من جهة ثانية، خاصة في الصيف، مما قد يسبب تلف لمادة الليزر، لذا وضعنا نظام تبريد لهذه المادة.

وبعد الدراسة الضوئية والحرارية للنموذج المقترح توصلنا إلى النتائج التالية :

- 1- يبدأ ظهور الليزر في اليوم الشتوي، من أجل قطر 2 m لصحن القطع المكافئ في حدود 8:30 صباحا بينما من أجل قطر 1 m في حدود الساعة 10:00.
- 2- يبدأ ظهور الليزر في اليوم الصيفي، من أجل قطر 2 m لصحن القطع المكافئ في حدود 6:45 صباحا بينما من أجل قطر 1 m في حدود الساعة 7:45.
- 3- في اليوم الشتوي سجلنا استطاعة خرج 10.04 W، 21.31 W، و 24.21 W من قضيب الليزر YAG: Nd، من صفيحة ليزر YAG: Nd ومن قضيب الليزر GSGG:Nd:Cr على الترتيب في حدود الواحدة زوالا من أجل صحن قطع مكافئ بقطر 2 m.
- 4- في اليوم الصيفي سجلنا استطاعة خرج 19.30 W، 40.96 W، و 46.43 W من قضيب الليزر YAG: Nd، من صفيحة ليزر YAG: Nd ومن قضيب الليزر

الخاتمة العامة

GSGG:Nd:Cr على الترتيب في حدود الواحدة زوالا من أجل صحن قطع مكافئ بقطر m

.2

-5 سجلنا في اليوم الشتوي درجات الحرارة $50,5^{\circ}\text{C}$ و 145°C عند قطر 1 m و 2 m لصحن

القطع المكافئ على الترتيب. وبعد تبريد البلورة الليزرية انخفضت درجات الحرارة إلى 27°C

و 50°C ، عند قطر 1 m و 2 m لصحن القطع المكافئ على الترتيب.

-6 بينما في، اليوم الصيفي، كانت درجات الحرارة تقارب 101°C و 272°C عند قطر 1 m و

2 m لصحن القطع المكافئ على الترتيب. بعد التبريد سجلنا 59°C و 101°C عند قطر 1m

و 2 m لصحن القطع المكافئ على الترتيب.

-7 الكفاءة التجميعية في اليوم الشتوي من أجل قطر الصحن 2 m بلغت 3,20 و 6.79 و 7.71

من أجل قضيب الليزر YAG: Nd من صفيحة ليزر YAG: Nd ومن قضيب الليزر

GSGG:Nd:Cr على الترتيب.

-8 الكفاءة التجميعية في اليوم الصيفي من أجل قطر الصحن 2 m بلغت 6.15، 13.04، و 14.79

من أجل قضيب الليزر YAG: Nd، من صفيحة ليزر YAG: Nd ومن قضيب الليزر

GSGG:Nd:Cr على الترتيب.

-9 توضح النتائج ان النموذج المدروس رغم بساطته في التكلفة وفي الصيانة فانه اعطى كفاءة تجميعية

معتبرة واستطاعة خرج مقبولة مقارنة بنماذج لدراسات سابقة رغم كونها أكثر تعقيدا من نموذجنا

المدروس.

الخاتمة العامة

10- استطعنا في نموذجنا معالجة ارتفاع درجة الحرارة لمادة الليزر من خلال وضع المرشح الطيفي المناسب وكذا من خلال نظام التبريد وبعد الدراسة الحرارية كانت درجة الحرارة للمادة الليزرية مقبولة ومناسبة ولا تعرضها للتلف خلال كل مدة التشميس.

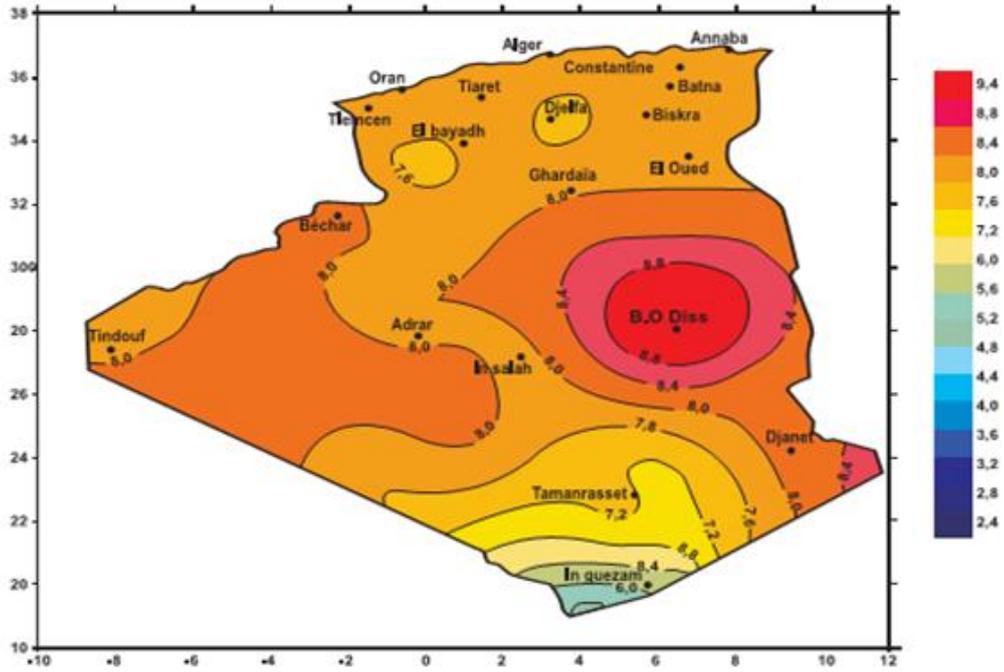
• آفاق مستقبلية

بالنظر إلى أهمية الليزر الشمسي التي بلغت مختلف المجالات وبناء على دراستنا نسجل التوصيات والآفاق التالية حتى تكون محل دراسات ومشاريع مستقبلية:

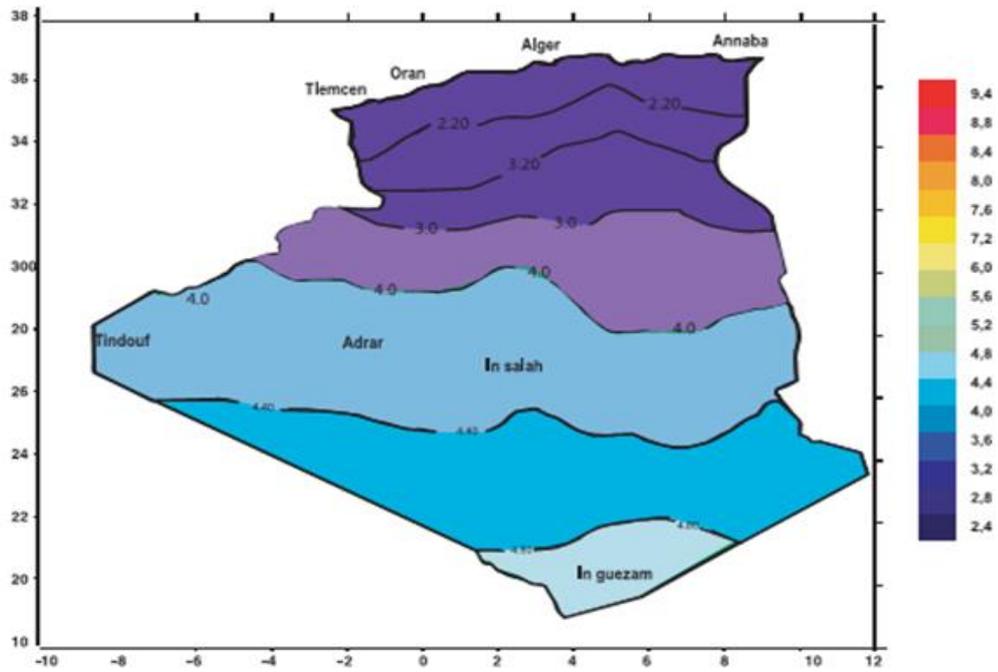
- استغلال النتائج المحققة في هذه الدراسة من أجل التحكم في نوعية بلورة الليزر وشكلها وأبعادها حسب خصائصها الضوئية والحرارية بالإضافة إلى تكلفتها وبالتالي تحسين طاقة خرج الليزر وفقا للظروف الجوية في منطقة ورقلة.
- اعتماد الضخ المزدوج من أجل تحقيق كفاءات تجميعية أعلى مع الأخذ بعين الاعتبار درجات الحرارة العالية التي توافق هذا النوع من الضخ.
- الاعتماد على الألياف البصرية من أجل تسهيل استخدام وتوجيه الليزر الشمسي المنتج.
- تخزين الطاقة الشمسية بواسطة الألواح الكهروضوئية (PV) من أجل استغلالها لإنتاج الليزر الشمسي وذلك في غياب الشمس.
- الاعتماد على تقنية التبريد بواسطة ضخ الهواء قسريا بمراوح (PV).

الملحق

الملحق



الشكل 1: شدة تدفق الإشعاع الشمسي في الجزائر على سطح أفقي خلال شهر جويلية.



الشكل 2: شدة تدفق الإشعاع الشمسي في الجزائر على سطح أفقي خلال شهر ديسمبر.

الجدول 1: عدد ساعات التشميس الشهري والمتوسط اليومي لكل شهر خلال سنة (2018) بورقلة.

المديرية الجهوية للأرصاد الجوية للجنوب الشرقي بورقلة مصدر المعلومات:

الشهر	عدد ساعات التشميس الشهري	متوسط عدد ساعات التشميس اليومي
جانفي	246.7	07.96
فيفري	244.4	08.73
مارس	252.5	08.14
أفريل	309.5	10.32
ماي	316.9	10.22
جوان	225.3	07.51
جويلية	298.5	09.63
أوت	320.8	10.35
سبتمبر	259.5	08.65
أكتوبر	288.3	09.30
نوفمبر	224.2	07.47
ديسمبر	249.8	08.06
المجموع السنوي	3236.4	08.87

الجدول 2: الطاقة الشمسية ومدة التشميس في مختلف أنحاء الجزائر.

الصحراء	الهضاب العليا	الساحلية	المناطق
86%	10%	4%	نسبة المنطقة
3500	3000	2650	مدة التشميس في السنة
2650	1900	1700	الطاقة المتوسطة KWh/m ² /an

الجدول 3: متوسط درجات الحرارة الدنيا والقصى وسرعة الرياح خلال سنة (2018) بورقلة.

مصدر المعلومات: المديرية الجهوية للأرصاد الجوية للجنوب الشرقي بورقلة.

الشهر	متوسط درجة الحرارة الدنيا T _{min} °C	متوسط درجة الحرارة القصوى T _{max} °C	سرعة الرياح القصوى Km/h
جانفي	06.2	19.4	14
فيفري	08.2	22.8	20
مارس	10.1	23.8	26
أفريل	15.1	31.4	14
ماي	20.2	35.2	29
جوان	23.8	39.7	20
جويلية	28.5	44.6	15
أوت	27.9	44.1	16
سبتمبر	25.8	40.6	16
أكتوبر	17.0	32.9	14
نوفمبر	12.1	25.7	20
ديسمبر	05.9	19.0	20

الجدول 4: المقادير الجغرافية والجوية لمدينة ورقلة.

القيمة	المقادير الجغرافية والجوية
$\varphi=31.57^0$	زاوية خط العرض
$L=5.24^0$	زاوية خط الطول
$Z=141m$	الارتفاع عن سطح البحر
$a=0.35$	الألبدو (النورانية)

الجدول 5: قيم λT .

$\lambda T (\mu\text{m})\text{K}$	$F_{0-\lambda T}$	$\lambda T (\mu\text{m})\text{K}$	$F_{0-\lambda T}$
500	0.13×10^{-7}	5000	0.63371
600	0.112×10^{-6}	5200	0.65792
700	0.22×10^{-5}	5400	0.68031
800	0.184×10^{-4}	5600	0.701
900	0.912×10^{-4}	5800	0.72009
1000	0.321×10^{-3}	6000	0.73777
1100	0.926×10^{-3}	6200	0.75408
1200	0.00216	6400	0.76917
1300	0.00436	6600	0.78315
1400	0.00783	6800	0.79607
1500	0.01285	7000	0.80806
1600	0.01977	7500	0.83435
1700	0.0286	8000	0.85624
1800	0.03941	8500	0.87455
1900	0.05215	9000	0.88997
2000	0.06672	9500	0.90303
2200	0.10093	10 000	0.91414
2400	0.14027	11 000	0.93183
2600	0.18312	12 000	0.94504
2800	0.22788	13 000	0.95508
3000	0.27322	14 000	0.96284
3200	0.31807	15 000	0.96892
3400	0.3617	16 000	0.97375
3600	0.40357	18 000	0.9808
3800	0.44334	20 000	0.98554
4000	0.48085	30 000	0.99528
4200	0.51596	40 000	0.99791
4400	0.54875	50 000	0.99889
4600	0.57923	.	1.00000
4800	0.60751	.	