

## محاكاة ليزر صلب (Nd:YAG) يعمل باستخدام مفتاح جودة قابل للإشباع

د. بسام غزولين\*

د. زياد هرموش\*\*

غدير وافيقي نويره\*\*\*

(تاريخ الإيداع 9 / 2 / 2021. قُبل للنشر في 10 / 8 / 2021)

### □ ملخص □

تم الحصول على محاكاة نظام ليزر صلب يعمل باستخدام مفتاح جودة قابل للإشباع  $Cr^{+4}:YAG$  كحل عددي لهذا النموذج. تم الحل بطريقتين عدديتين مختلفتين والمقارنة بينهما. تم حساب خصائص وشكل خرج الليزر ومقارنتها مع النتائج التجريبية.

**الكلمات المفتاحية:** نمذجة ليزر الحالة الصلبة، مفتاح سلبي.

\* أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

أستاذ - قسم هندسة القوى - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

طالب دراسات عليا (ماجستير) - اختصاص فيزياء الليزر والأطياف الذرية والجزيئية - قسم الفيزياء - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Modeling of Solid ( Nd:YAG) Laser Operating with a Saturable Absorber Q-switch

Dr. Bssam Ghazoleen\*  
Dr. Zeiad Harmoosh\*\*  
Ghadir Nweira\*\*\*

(Received 9 / 2 / 2021. Accepted 10 / 8 /2021)

### □ ABSTRACT □

The simulation of solid laser system operating with a saturable absorber Q-switch  $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$  was obtained as a numerical solution for this model. The solution was implemented in two different numerical methods and comparing between them. The laser output shape and characteristics were calculated and compared with experimental results.

**Keywords:** Modeling solid state laser, Saturable absorber .

---

\* Associate Professor, Physics Department, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Professor, Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*\*Postgraduate Student (Master), Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria. ghnweira@gmail.com

**مقدمة:**

درست البلورات المضيفة المشبعة بالكروم ووجد أنها تمتلك امتصاصاً قابلاً للتشبع في نطاق الميكرومتر [1,2] مما يجعلها خياراً جيداً للعمل كمفتاح جودة في ليزر الـ Nd:YAG [3,4]، كما درس الباحث Degnan ليزر Nd:YAG وأدخل في حساباته الثابت  $\gamma$  الذي يصف الخسارة في كثافة الانعكاس السكاني نتيجة لإصدار فوتون واحد والثابت  $\gamma_s$  الذي يصف إسكان الأيونات نتيجة امتصاص فوتون واحد [5]، في العام (1995) درس الباحث Shimony وآخرون ليزر الـ Nd:YAG الذي يستخدم مفتاح الجودة كصفحة من الـ Cr<sup>4+</sup>:YAG والتي تلعب دوراً مزدوجاً الأول ماص قابل للإشباع والثاني صفحة بروستر، وأظهر أن الخسارة التي تساهم بها أيونات الـ Cr<sup>4+</sup> النشطة في اللوحة ترتبط بامتصاص الحالة المثارة وتعتمد على تركيز الأيونات [6]. قدم Xingyu وآخرون في العام 1997 حل معادلات المعدل التي تصف تشغيل الليزر الذي يعمل باستخدام مفتاح سلبي والتي تأخذ بعين الاعتبار امتصاص الحالة المثارة للماص القابل للإشباع وحصل على تعبيرات عن خصائص النبضة الليزرية مثل طاقة الخرج، والاستطاعة، وعرض النبضة باستخدام المعاملات المتعلقة بوسط التضخيم والماص القابل للإشباع والمرنان وبالتالي أصبح بالإمكان التنبؤ بخصائص النبضة الليزرية [7].

تعد ليزرات الحالة الصلبة التي تعمل باستخدام مفتاح جودة قابل للإشباع من أكثر الليزرات المستخدمة في التطبيقات العلمية والصناعية التي لا تتطلب معدلات تكرار دقيقة، نظراً لبساطتها في التصميم، والموثوقية، والتكلفة المنخفضة، نظراً لكون طريقة تعديل معامل الجودة سلبية passive. إذ يعتبر المفتاح السلبي طريقة للحصول على نبضات من مرتبة النانو ثانية وأقل من نانو ثانية [8-11]. الأدوات القياسية المستخدمة لتحليل أداء ليزر الحالة الصلبة ذات المفتاح السلبي هي معادلات المعدل، حيث أنه تم تحليل نماذج ليزرات الحالة الصلبة ذات المفتاح السلبي في كثير من المراجع [5-8].

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف البحث إلى تطبيق طريقتين لحل المعادلات عددياً، واستخدام إحداهما للوصول إلى قيم واقعية لعرض النبضة والاستطاعة، ومعرفة خرج الليزر من معرفة خصائص الماص القابل للإشباع ومعاملات المرسل الليزري.

**طرائق البحث ومواده:**

- حاسوب مجهز ببرنامج MATLAB وبرنامج الـ Origin5.

معادلات المعدل بوجود المفتاح السلبي [11]:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[ 2\sigma n l - 2\sigma_{gs} n_{gs} l_s - 2\sigma_{es} n_{es} l_s - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - L \right] \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma \sigma c \phi n \quad (2)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = -\sigma_{gs} c \phi n_{gs} \quad (3)$$

$$\frac{dn_{es}}{dt} = \sigma_{gs} c \phi n_{gs} \quad (4)$$

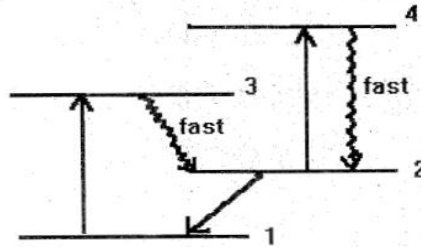
$$n_{gs} + n_{es} = n_0 \quad (5)$$

حيث أن  $\emptyset$  تمثل كثافة الفوتونات داخل المرنان،  $n$  تمثل كثافة الانقلاب السكاني داخل القضيب الليزري،  $\sigma$  تمثل المقطع العرضي للإصدار المحثوث في القضيب الليزري،  $l$  طول القضيب الليزري،  $l_s$  طول الماص القابل للإشباع،  $n_{es}$  كثافة إسكان السوية المهيجة في الماص القابل للإشباع،  $n_{gs}$  كثافة إسكان السوية الأرضية في الماص القابل للإشباع،  $n_0$  كثافة الإسكان الكلية في الماص القابل للإشباع،  $\sigma_{gs}$ ،  $\sigma_{es}$  المقطع العرضي للسوية الأرضية والمهيجة في الماص القابل للإشباع على الترتيب،  $R$  عاكسية مرآة الخرج،  $L$  يمثل الضياعات الكلية غير المفيدة ضمن المجاوب.  $\gamma$  معامل يعبر عن النقصان الصافي في إسكان السويتين الليزريتين نتيجة إصدار فوتون واحد في الليزر المستمرة الرباعية المستوى يأخذ القيمة 1 بينما قيمته 2 بالنسبة لليزر الثلاثية المستوى،  $c$  سرعة الضوء.  $t_r$  زمن دورة كاملة ضمن المجاوب.

قيم الثوابت المدخلة في المعادلات (4) - (1):

$$\sigma = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2, \quad \sigma_{es} = 70 \times 10^{-19} \text{ cm}^2, \quad \sigma_{gs} = 20 \times 10^{-19} \text{ cm}^2, \quad \gamma = 1, \quad c = 3 \times 10^{10} \text{ cm}$$

مفتاح الجودة الماص القابل للإشباع هو عبارة عن مادة الـ  $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$  تمتص الأفعال الليزرية البدائية الناتجة عن التضخيم التلقائي للفوتونات، وتتم هذه العملية بين السوية 1 و 3 كما هو موضح بالشكل (1)، تستمر هذه العملية حتى يتم إشباع السوية الأرضية، وتصل المادة إلى النفاذية العظمى (انخفاض الضياعات)، وتبقى الضياعات محصورة بالسوية المهيجة (ESA) غير القابلة للإشباع. خلال هذه الفترة يكون الربح ضمن المادة الفعالة قد تجاوز حد العتبة وبالتالي يتم الحصول على نبضة ليزرية ذات طاقة عالية وعرض نبضة ضيقة (من رتبة النانو ثانية).



الشكل رقم (1): مخطط سويات الطاقة لشاردة الكروم في الياغ [11]

تم حل جملة المعادلات التفاضلية (1)-(4) حلاً مشتركاً بطريقة رانج كوتا (Runge-Kutta) من المرتبة الرابعة. حيث أن خوارزمية طريقة رانج - كوتا من المرتبة الرابعة لحل مسألة القيمة الابتدائية في جملة معادلتين تفاضليتين في المجال  $[t_0, b]$  تعطى بالخوارزمية التالية [12]:  
لتكن لدينا جملة المعادلتين التفاضليتين غير الخطيتين الآتيتين:

$$\dot{Y}(t) = f(t, y(t), z(t))$$

$$\dot{Z}(t) = g(t, y(t), z(t))$$

$$z(t_0) = z_0, \quad y(t_0) = y_0 \quad \text{مع الشرتين الابتدائيتين}$$

المدخلات:  $(t_0, Y_0, z_0)$  الشروط الابتدائية.

N عدد نقاط التجزئة في المجال  $[t_0, b]$  ، b نقطة نهاية المجال.

المخرجات:  $(t_i, Y_i, z_i)$

خطوة 1: نعرف الدالتين

Function  $f(t, y, z) = \text{expression}$

Function  $g(t, y, z) = \text{expression}$

خطوة 2: نحسب طول الخطوة  $h = (b - t_0) / N$

خطوة 3: ننفذ الخطوات من 4 حتى 14 ضمن الحلقة التكرارية :

For  $i=0$  to  $N-1$

خطوة 4: نحسب المعامل  $K_1 = h * f(t_i, Y_i, z_i)$

خطوة 5: نحسب المعامل  $L_1 = h * g(t_i, Y_i, z_i)$

خطوة 6: نحسب  $K_2 = h * f(t_i + \frac{h}{2}, Y_i + K_1/2, z_i + L_1/2)$

خطوة 7: نحسب  $L_2 = h * g(t_i + \frac{h}{2}, Y_i + K_1/2, z_i + L_1/2)$

خطوة 8: نحسب  $K_3 = h * f(t_i + \frac{h}{2}, Y_i + K_2/2, z_i + L_2/2)$

خطوة 9: نحسب  $L_3 = h * g(t_i + \frac{h}{2}, Y_i + K_2/2, z_i + L_2/2)$

خطوة 10: نحسب  $K_4 = h * f(t_i + h, Y_i + K_3, z_i + L_3)$

خطوة 11: نحسب  $L_4 = h * g(t_i + h, Y_i + K_3, z_i + L_3)$

خطوة 12: نحسب  $y_{i+1} = y_i + \left(\frac{1}{6}\right) * (K_1 + 2 * K_2 + 2 * K_3 + K_4)$

خطوة 13: نحسب  $z_{i+1} = z_i + \left(\frac{1}{6}\right) * (L_1 + 2 * L_2 + 2 * L_3 + L_4)$

خطوة 14: نحسب من المجال نقطة جديدة  $t_{i+1} = t_i + h$

خطوة 15: ننفذ الحلقة التكرارية For  $i=0$  to  $N-1$  لطباعة ناتج الحل العددي:

$t_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$

خطوة 16: النهاية

أولاً: نطبق طريقة أولر لإيجاد الحل العددي لجملة المعادلات (4)-(1):

شروط البدء  $n_0 = (\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + L) / 2\sigma_l$  ،  $\phi_0=0$  ،  $n_{gs0}=0$  ،  $n_{es0} = -\ln(T_0) / (l_s * \sigma_{gs})$

$$\phi_i = \phi_{i-1} + \frac{\phi}{t_r} [2\sigma n_{i-1} - 2\sigma_{es} n_{es\ i-1} l_s - 2\sigma_{gs} n_{gs\ i-1} l_s - \ln(1/R) - L] \cdot h$$

$$n_i = n_{i-1} + [-\gamma c \sigma n_{i-1} \phi_{i-1}] \cdot h$$

$$n_{gs\ i} = n_{gs\ i-1} + [-\sigma_{gs} c \phi_{i-1} n_{gs\ i-1}] \cdot h$$

$$n_{es\ i} = n_{es\ i-1} + [\sigma_{es} c \phi_{i-1} n_{gs\ i-1}] \cdot h$$

$$i=0, 1, 2, \dots, N-1$$

ثانياً: نطبق طريقة رانج كوتا من المرتبة الرابعة لإيجاد الحل العددي لجملة المعادلات (4)-(1):

$$n_0 = \left( \ln \left( \frac{1}{R} \right) + \ln \left( \frac{1}{T_0^2} \right) + L \right) / 2\sigma l, \quad \phi_0=0, \quad n_{gs0}=0, \quad n_{es0} = -\ln(T_0) / (l_s * \sigma_{gs}) \text{ شروط البدء}$$

$$\phi_i = \phi_{i-1} + \frac{\phi}{t_r} [2\sigma n_{i-1} - 2\sigma_{es} n_{es\ i-1} l_s - 2\sigma_{gs} n_{gs\ i-1} l_s - \ln(1/R) - L] \cdot h$$

$$n_i = n_{i-1} + [-\gamma c \sigma n_{i-1} \phi_{i-1}] \cdot h$$

$$n_{gs\ i} = n_{gs\ i-1} + [-\sigma_{gs} c \phi_{i-1} n_{gs\ i-1}] \cdot h$$

$$n_{es\ i} = n_{es\ i-1} + [\sigma_{es} c \phi_{i-1} n_{gs\ i-1}] \cdot h$$

$$k_1 = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma n_{i-1} - 2\sigma_{es} n_{es\ i-1} l_s - 2\sigma_{gs} n_{gs\ i-1} l_s - \ln(1/R) - L] \cdot h$$

$$s_1 = [-\gamma c \sigma n_{i-1} \phi_{i-1}] \cdot h$$

$$p_1 = [-\sigma_{gs} c \phi_{i-1} n_{gs\ i-1}] \cdot h$$

$$z_1 = [\sigma_{es} c \phi_{i-1} n_{gs\ i-1}] \cdot h$$

$$k_2 = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma (n_{i-1} + s_1/2) - 2\sigma_{es} (n_{es\ i-1} + z_1/2) l_s - 2\sigma_{gs} (n_{gs\ i-1} + p_1/2) l_s - \ln(1/R) - L] \cdot h$$

$$s_2 = [-\gamma c \sigma (n_{i-1} + s_1/2) (\phi_{i-1} + k_1/2)] \cdot h$$

$$p_2 = [-\sigma_{gs} c (\phi_{i-1} + k_1/2) (n_{gs\ i-1} + p_1/2)] \cdot h$$

$$z_2 = [\sigma_{es} c (\phi_{i-1} + k_1/2) (n_{gs\ i-1} + p_1/2)] \cdot h$$

$$k_3 = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma (n_{i-1} + s_2/2) - 2\sigma_{es} (n_{es\ i-1} + z_2/2) l_s - 2\sigma_{gs} (n_{gs\ i-1} + p_2/2) l_s - \ln(1/R) - L] \cdot h$$

$$s_3 = [-\gamma c \sigma (n_{i-1} + s_2/2) (\phi_{i-1} + k_2/2)] \cdot h$$

$$p_3 = [-\sigma_{gs} c (\phi_{i-1} + k_2/2) (n_{gs\ i-1} + p_2/2)] \cdot h$$

$$z_3 = [\sigma_{es} c (\phi_{i-1} + k_2/2) (n_{gs\ i-1} + p_2/2)] \cdot h$$

$$k_4 = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma (n_{i-1} + s_3) - 2\sigma_{es} (n_{es\ i-1} + z_3) l_s - 2\sigma_{gs} (n_{gs\ i-1} + p_3) l_s - \ln(1/R) - L] \cdot h$$

$$s_4 = [-\gamma c \sigma (n_{i-1} + s_3) (\phi_{i-1} + k_3)] \cdot h$$

$$p_4 = [-\sigma_{gs} c (\phi_{i-1} + k_3) (n_{gs\ i-1} + p_3)] \cdot h$$

$$z_4 = [\sigma_{es} c (\phi_{i-1} + k_3) (n_{gs\ i-1} + p_3)] \cdot h$$

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \left( \frac{1}{6} \right) * (K_1 + 2 * K_2 + 2 * K_3 + K_4)$$

$$n_{i+1} = n_i + (1/6) * (s_1 + 2 * s_2 + 2 * s_3 + s_4)$$

$$n_{gs\ i+1} = n_{gs\ i} + (1/6) * (p_1 + 2 * p_2 + 2 * p_3 + p_4)$$

$$n_{es\ i+1} = n_{es\ i} + (1/6) * (z_1 + 2 * z_2 + 2 * z_3 + z_4)$$

$$; i=0, 1, 2, \dots, N-1$$

بعد حل المعادلات نحصل على عدد الفوتونات ويضربها باستطاعة الفوتون الواحد نحصل على الاستطاعة  $p(w)$

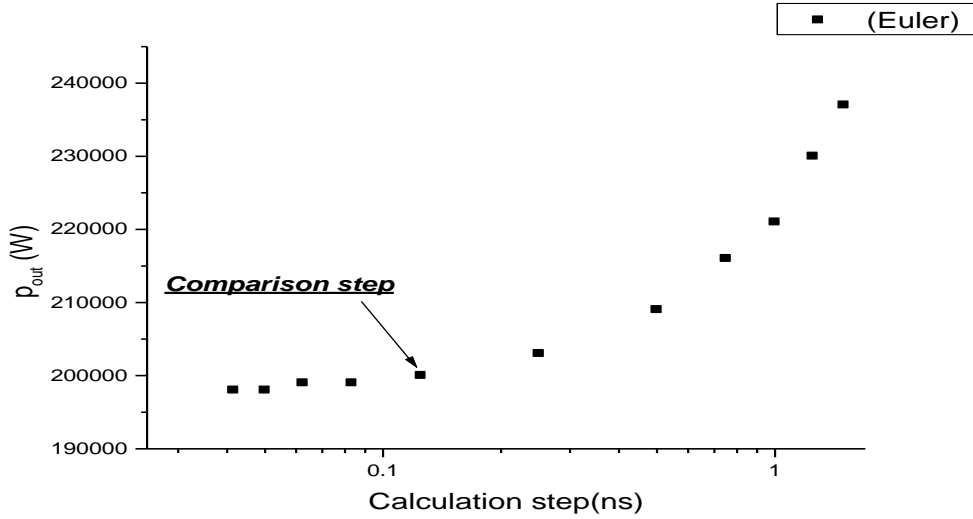
### النتائج والمناقشة:

تمت مقارنة طريقة رانج كوتا من المرتبة الرابعة مع طريقة أولر (Euler) وبالاتماد على الجدول رقم (3) تم اعتماد طريقة رانج كوتا من المرتبة الرابعة لإجراء الحسابات العددية حيث أن زمن إجراء الحساب من أجل قيم مختلفة لكل من

النفاذية والعاكسية في طريقة رانج كوتا من المرتبة الرابعة هو أصغر بشكل ملموس من الزمن اللازم في طريقة أولر وذلك بعد تحديد خطوة المقارنة بالاعتماد على مبدأ التقارب الذي يعتمد على اختيار الخطوة التي يكون قيمة الخطأ النسبي المنوي عندها أقل من 1% كما هو موضح بالجدول رقم (1) من أجل طريقة أولر مرفق أيضا بالشكل رقم (2) الذي يوضح ثبات قيمة الاستطاعة عند خطأ نسبي منوي أقل من 1% وذلك مهما صغرنا خطوة الحساب.

الجدول رقم (1): يوضح الخطأ النسبي بدلالة الخطوة (Euler)

T0=90%	R=90%	الخطأ النسبي	الخطأ النسبي (%)
P(W)	الخطوة h(ns)		
2.37E+05	1.5	0.19596	19.5
2.30E+05	1.25	0.159646	15.9
2.21E+05	1	0.118434	11.8
2.16E+05	0.75	0.090202	9
2.09E+05	0.5	0.057121	5.7
2.03E+05	0.25	0.026061	2.6
2.00E+05	0.125	0.010808	1
1.99E+05	0.0833	0.005808	0.5
1.99E+05	0.0625	0.003283	0.3
1.98E+05	0.05	0.001818	0.1
1.98E+05	0.0416	0.000586	0.05

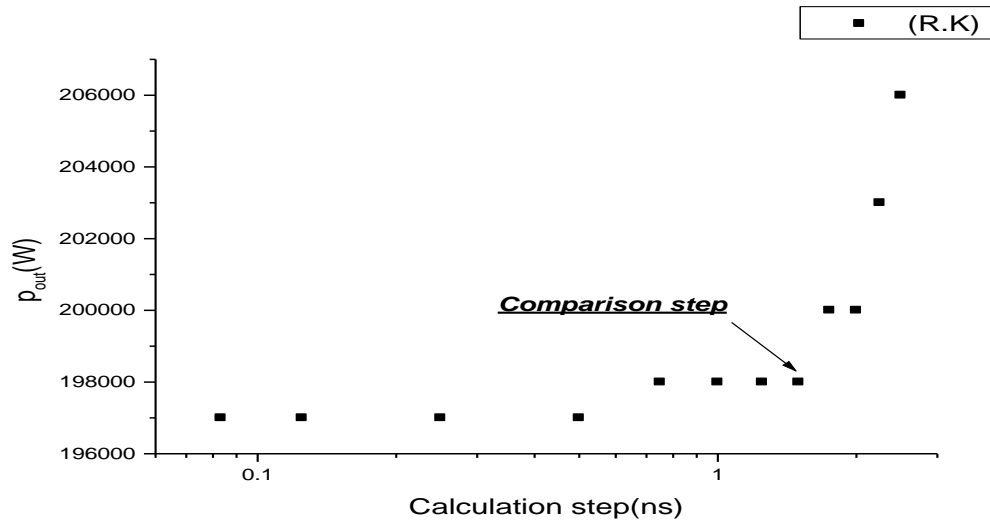


الشكل رقم (2): يوضح تغيرات قيم الاستطاعة مع خطوة الحساب في طريقة Euler [الباحث]

قمنا بنفس الدراسة السابقة من أجل طريقة رانج كوتا وتم تبين الخطأ النسبي في الجدول رقم (2) مرفق أيضاً بالشكل رقم (3) الذي يوضح ثبات قيمة الاستطاعة على الرغم من تصغير الخطوة وذلك من أجل عاكسية  $R=90\%$  ونفاذية بدائية للماص القابل للإشباع  $T_0=90\%$ .

الجدول رقم (2): يوضح الخطأ النسبي بدلالة الخطوة (R.K)

T0=90%	R=90%	الخطأ النسبي	الخطأ النسبي (%)
P(W)	الخطوة h(ns)		
2.06E+05	2.5	0.042998	4.2
2.03E+05	2.25	0.029307	2.9
2.00E+05	2	0.014299	1.4
2.00E+05	1.75	0.011713	1.1
1.98E+05	1.5	0.003854	0.38
1.98E+05	1.25	0.0036	0.36
1.98E+05	1	0.003448	0.34
1.98E+05	0.75	0.00142	0.1
1.97E+05	0.5	0.000913	0.09
1.97E+05	0.25	0.000761	0.07
1.97E+05	0.125	0.000254	0.02
1.97E+05	0.0833	0.0001	0.01

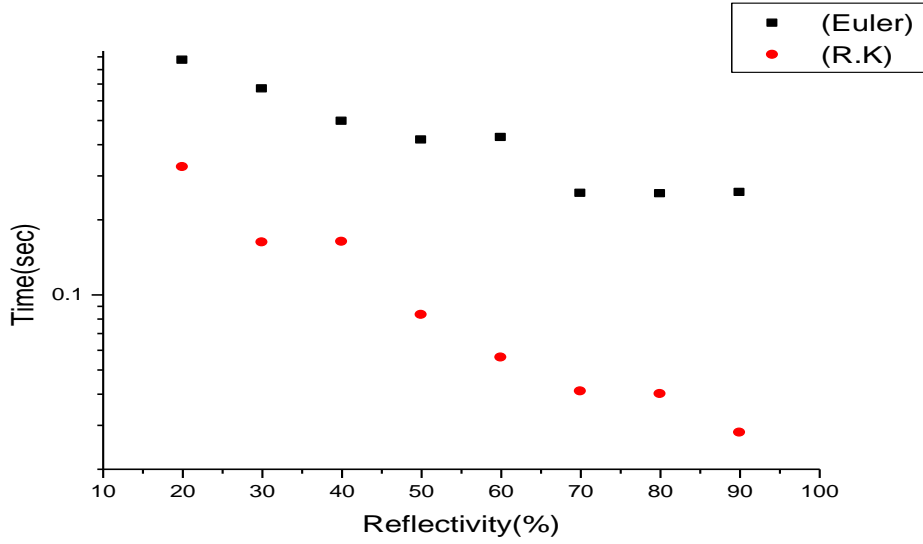


الشكل رقم (3): يوضح تغيرات قيم الاستطاعة مع خطوة الحساب في طريقة (R.K) [الباحث]



الجدول رقم (3): مقارنة زمن الحساب بين طريقة رانج كوتا من المرتبة الرابعة مع طريقة أولر

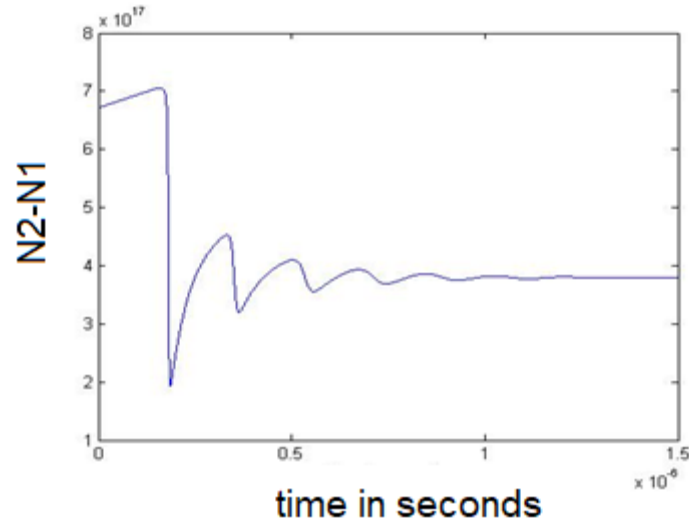
زمن الحساب (sec)		خطوة المقارنة (ns)		T0%	R%
رانج كوتا	أولر	رانج كوتا	أولر		
0.028	0.257	1.5	0.083	90	90
0.04	0.254	1	0.083	80	80
0.041	0.255	1	0.083	70	70
0.056	0.427	0.75	0.05	60	60
0.083	0.417	0.5	0.05	50	50
0.163	0.496	0.25	0.042	40	40
0.162	0.668	0.25	0.031	30	30
0.325	0.871	0.125	0.024	20	20



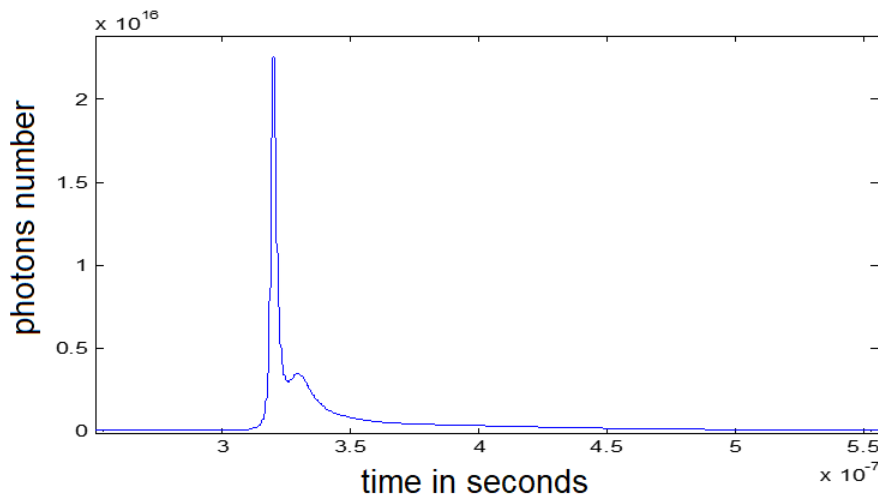
الشكل رقم (4): يوضح الفرق في زمن الحساب بين الطريقتين من أجل قيم مختلفة للعكسية [الباحث]

توصيف خرج البرنامج:

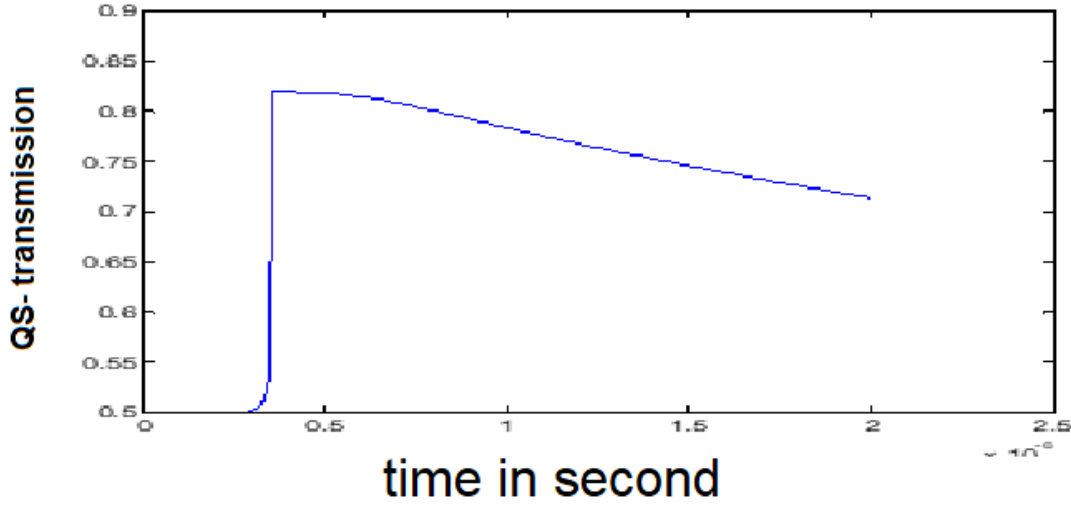
يتم الحصول في خرج البرنامج على عدة أشكال لمنحنيات النفوذية، عند تشغيل البرنامج ضمن معطيات الليزر فيتم الحصول في الخرج على منحنى لتغير الانقلاب السكاني، ومنحنى تغير عدد الفوتونات، و منحنى تغير النفوذية مع الزمن كما هو موضح بالاشكال (5)، (6)، (7).



الشكل رقم (5): يوضح تغير الاسكان كتابع للزمن في خرج البرنامج [الباحث]



الشكل رقم (6): يوضح عدد الفوتونات كتابع للزمن في خرج البرنامج [الباحث]



الشكل رقم (7): يوضح تغير النفاذية البدائية كتابع للزمن في خرج البرنامج [الباحث]

كما يظهر من الشكل (5) فإن تغير الاسكان يبدأ بهبوط حاد متوافق مع تولد النبضة الليزرية الرئيسية الظاهر في الشكل (6) والتي يليها مجموعة من النبضات الضعيفة المتداخلة والتي تظهر بشكل واضح في تغيرات الاسكان. أما الشكل (7) فيظهر تغير نفوذية مفتاح الجودة التي تنتقل من قيمة منخفضة (ضياعات كبيرة) إلى قيمة مرتفعة (ضياعات صغيرة) بسبب حدوث الاشباع في الماص. وكما يظهر من الشكل (7) يعود الماص إلى حالته غير المشبعة البدئية ببطء زمنياً بينما يكون الفعل الليزري قد انتهى خلال زمن أقصر بكثير من زمن العودة إلى الوضع البدئي.

مقارنة النتائج في خرج البرنامج مع النتائج العملية المأخوذة من المراجع:

تمت المقارنة بين النتائج النظرية في حساباتنا مع النتائج النظرية والتجريبية المذكورة في المرجع [14].

في البداية تم تعريف الثوابت والواحدات علماً أنه تمّ اعتماد واحدة الـ cm للطول والثانية للزمن وإدخال المعطيات المتعلقة بالليزر من مواصفات القضيب، مواصفات المجاوب، ومواصفات مفتاح الجودة السليبي.

مواصفات القضيب الليزري [13]:

قرينة انكسار القضيب الليزري: 1.82، طول الموجة:  $10640 \times 10^{-10}$  m،

المقطع العرضي الفعّال:  $2.8 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>

مواصفات مفتاح الجودة [13]:

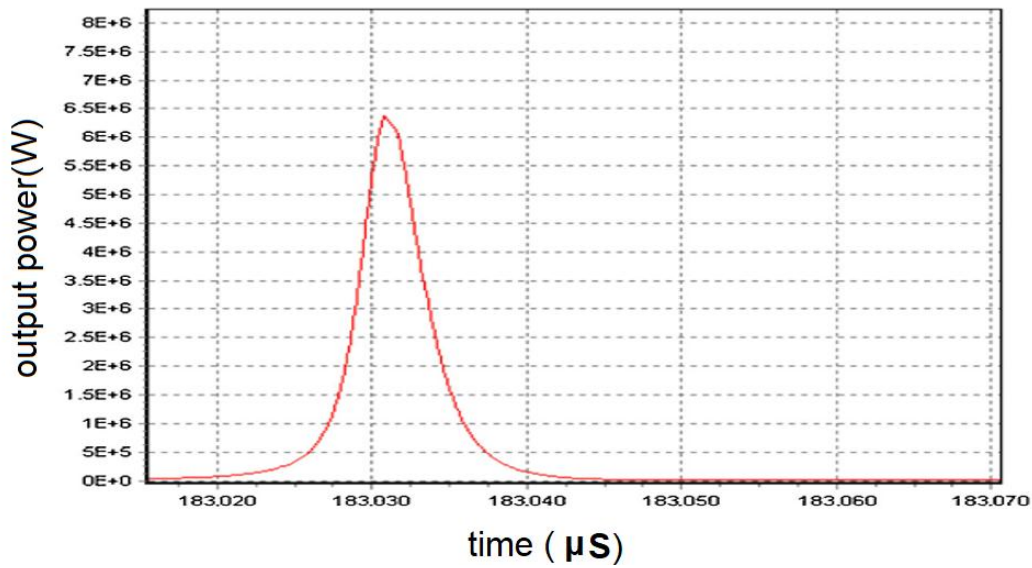
المقطع العرضي للسوية الأرضية:  $70 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>، المقطع العرضي للسوية المهيجة:  $20 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>

المعطيات المستخدمة في المرجع [14]: طول القضيب الليزري: 11 cm، القطر: 0.5 cm،

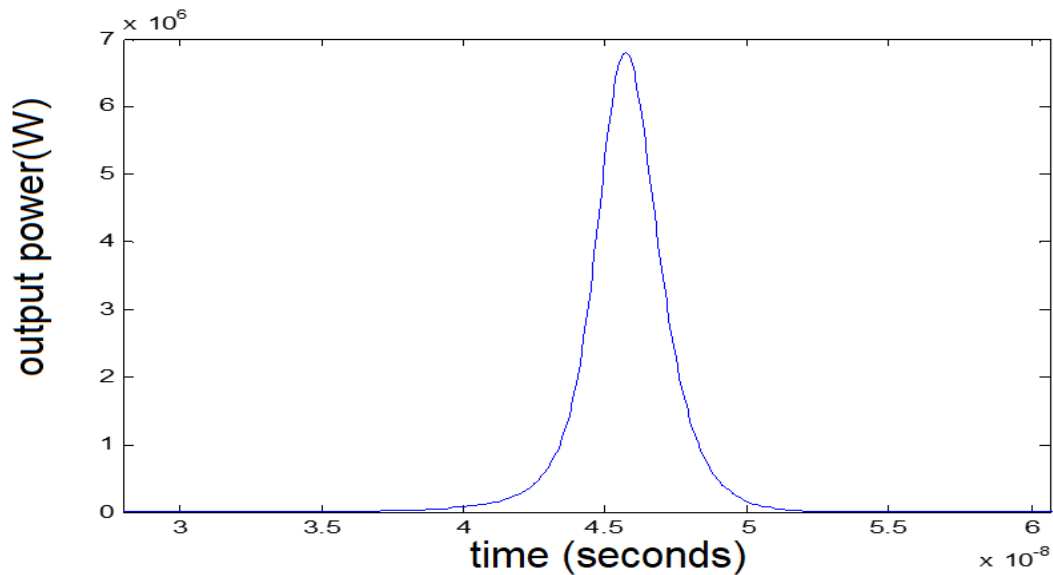
عاكسية مرآة الخرج 20% النفاذية البدائية للماص القابل للإشباع  $T_0=20\%$ .

الجدول رقم (4): مقارنة بين النتائج النظرية مع القياسات التجريبية. [14]

	طاقة الخرج (mJ)	عرض النبضة (ns)
القياس التجريبي [14]	26	7
الحساب النظري [14]	24	3.7
الحساب النظري [الباحث]	25.2	3.7



الشكل رقم (8): محاكاة نبضة مفردة لليزر بمفتاح سلبي. [14]



الشكل رقم (9): محاكاة نبضة مفردة لليزر بمفتاح سلبي [الباحث].

نلاحظ من القيم الواردة في الجدول رقم (4) أن الفرق بين القيم الحسابية والتجريبية بالنسبة لقيم الطاقة لا يتجاوز 3% في حساباتنا أما في القيم الواردة بالمرجع المذكور 7%. بالنسبة لعرض النبضة فإن الاختلاف واضح في كل من حساباتنا النظرية والحسابات النظرية الواردة بالمرجع [14].

تمت مقارنة نتائج الخرج لقيمة الطاقة أيضاً مع نتائج تجريبية مأخوذة من المرجع [15] كما هو موضح في الجدول (5). المعطيات التجريبية: طول القضيب الليزري: 5 cm، قطر القضيب: 0.4 cm، طول المجاوب: 8 cm،

الجدول رقم (5): مقارنة بين القيم التجريبية والنظرية لخرج الطاقة

طاقة الخرج (mJ) حسابيا [الباحث]	طاقة الخرج (mJ) تجريبيا [15]	النفاذية البدائية%	العاكسية %
18.1	20	65	40
18.3	19	65	47
24.3	21	40	70
21	20	53	
17.3	17	65	

نلاحظ أن الحسابات النظرية متوافقة بشكل جيد مع القياسات التجريبية باستثناء قيمة الطاقة عند العاكسية 70% والنفاذية 40% (وقد يكون السبب خطأ بعملية القياس).

الجدير بالذكر أنه تم التوافق بين القيم التجريبية والنظرية بدون استخدام الإقتراح المقدم بالمرجع وهو تغيير المقاطع العرضية للسوية الأرضية من  $70 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  لتصبح  $50 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  والسوية المهيجة من  $20 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  لتصبح  $10 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  في الماص القابل للإشباع يعود ذلك إلى النموذج الرياضي المستخدم.

تمت مقارنة نتائج الخرج لقيمة الطاقة أيضاً مع نتائج تجريبية مأخوذة من المرجع [16]. المعطيات التجريبية: طول القضيب الليزري: 9 cm، قطرالقضيب: 0.3 cm، طول المجاوب: 33 cm، عاكسية مرآة الخرج 48%، النفاذية البدائية للماص القابل للإشباع 40%.

الجدول رقم (6): مقارنة بين القيم التجريبية والنظرية لخرج الطاقة

طاقة الخرج نظرياً (mJ) [الباحث]	طاقة الخرج تجريبياً (mJ) [16]
10.1	10.4

نلاحظ أن الحساب النظري متوافق بشكل جيد مع القياس التجريبي وقيمة الخطأ النسبي المئوي لا تتجاوز الـ 3%.

**الاستنتاجات والتوصيات:**

تعد برامج المحاكاة من البرامج المفيدة جداً لأنها تسمح بإجراء نمذجة لحالات مختلفة للنظام المدروس بشكل قريب من الإجراء العملي، فهي تغني عن تأمين الأجهزة والأدوات باهظة الثمن، وتوفر عامل أمان عالي. تمّ تقديم محاكاة لنظام ليزري صلب Nd:YAG يعمل باستخدام مفتاح جودة قابل للإشباع ( $Cr^{+4}$ ) وكانت النتائج متقاربة جداً مع الواقع التجريبي بالنسبة لقيم الطاقة وذلك بعيداً عن الإقتراحات المذكورة في تلك المراجع مثل تغيير المقاطع العرضية لبلورة الـ ( $Cr^{+4}$ )، أما بالنسبة لعرض النبضة كان الاختلاف واضح ولتلافي هذه المشكلة نقترح دراسة الأنماط كون المرسلات المدروسة متعددة الأنماط ودراسة تأثير ذلك على عرض النبضة ونقترح أيضاً دراسة معادلات المعدل لليزر مع الأخذ بعين الاعتبار التأثيرات الحرارية ذلك للوصول إلى قيم أكثر واقعية لعرض النبضة.

**References:**

- [1]- DANILOV, A. A.; EVSTINGEEV, V. L.; IICHEV, N. N.; MALUTIN, A. A.; YU, M.; UMSHKOV, A. F. *Cr<sup>+4</sup>:YAG Q-Switching of Nd:host laser oscillators*. Sov. J. Qunt. Electro, Vol. 27, NO. 6. 1987.
- [2]- DEMCHUK, M. I.; MICHAIELOV, V. P.; ZHAVORONKOV, N. I.; LIVSHITS, K. V.; POROKOSHIN, N. V.; MINKOV, B. I. *Cr<sup>+4</sup>:YAG Q-Switching of Nd:host laser oscillators*. Opt, Vol.17, NO. 929, 1992.
- [3]- ANDRAUSKAS, D. A.; KENNEGY, C. *Advanced solid state laser*. Technical Digest, 91, PP 239. 1991
- [4]- Zabanov, E. A.; Porochorov, A.; Shkadareverich, A.; Shcherbokov, I. *Repulsion of energy levels and conductivity of small metal samples*. sov. J. Qunt.Electro, 16 1552. 1986.
- [5]- DEGNAN, J. J. *Theory of the Optimally Coupled Q-Switched Laser*. IEEE Journal of Quantum electronics, Vol. 25, NO. 2. PP 214 – 220. 1989.
- [6]- SHIMONY, Y.; BURSHEIN, Z.; KALISKY, Y. *Cr<sup>+4</sup>: YAG as Passive Q-Switch and Brewster Plate in a Pulsed Nd: YAG Laser*. IEEE Journal of Quantum electronics, VOL. 31, NO. 10. PP 1738-1741.1995.
- [7]- XINGYU, Z.; SHENGZHI, Z.; QINGPU, W.; QIDI Z. Z.; LIANKE, S.; SHAOJUN, Z. *Optimization of Cr<sup>+4</sup> –Doped Saturable-Absorber Q-Switched Lasers*. IEEE Journal of Quantum electronics, VOL. 33, NO.12, PP 2286-2294. 1997.
- [8]- KALISKY, Y. *Cr<sup>+4</sup>-doped crystals their use as laser and passive Q-switch*. Prog. Quantum Electro. VOL.28. NO.5. PP 249-303. 2004.
- [9]- CHEN,J.; KUNG, H.; YAU, H.; LIU,H.; CHENG, T. *Passive Q-switch for Nd:hosted solid state lasers* .Opt. Rev. Vol.7. NO6. PP 511-519. 2000.
- [10]- ZAYHOWSKI, J. J. *Passively Q-switch for Nd:YAG microchip lasers and application*. J. Alloys Compd, Vol.46. NO.3. PP 393-400. 2000.
- [11]- XIAO, G.; BASS, M. *A Generalized Model for Passively Q-Switched Lasers Including Excited State Absorption in the Saturable Absorber*. IEEE J .Quantum Electron, Vol .33. NO.1. PP 41- 44. 1997.
- [12]- PRESS, W. H.; S. A. *Teukolsky numerical recipes*. 2<sup>nd</sup> edn. (Cambridge University Press), pp 347-383, 707-714. 1997.
- [13]- KOECHNER, W. *Solid-State Laser Engineering*, Springer. USA.PP 488-533. 2006.
- [14]- ALSOUS, M. B. *Modeling of flash-pumped passively Q-switched solid state laser*. J Opt, India.2015.

[15]- BIGBOY, M. *Designing a low cost passively Q-switched solid state laser transmitter*. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. PP 55. 2017.

[16]- Haneen Mohamed. Examples of parameters of a side-injected pulsed laser with high-power laser diodes. Higher Institute of Applied and Technological Sciences 2019.