

دراسة تأثير أبعاد تجاويف أنبوبة التسريع على تردد الطنين في مسرع 10MeV المُصمَّم في Raja Ramanna Centre for Advanced Technology

- * د.عدنان علي أحمد
* د.فاتن أحمد الأحمد
*** غنى علي مرعي

(تاريخ الإيداع 2022 /8/16 – تاريخ النشر 2022 /10/3)

□ ملخّص □

يتناول هذا البحث دراسة تأثير بعض بارامترات التجويف على تردد الطنين في مسرع خطي بطاقة 10MeV عن طريق نمذجة العلاقة التي تصف هذا التردد بواسطة MATLAB ومقارنتها مع نتائج تمت دراستها لمسرّع بنفس طاقة الخرج في الصين، لاسيما أن المسرعات ذات طاقة الخرج 10MeV هذه حديثة ويتم العمل على إظهارها كبنية مدمجة بسيطة بعيدة عن التعقيد .
الكلمات المفتاحية: مسرع ، تردد الطنين ، تجويف ، أنبوبة التسريع .

* مدرس في كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سوريا
**مدرس في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس - سوريا
*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس - سوريا

Study of the effect of accelerator tube cavities dimensions on the resonant frequency of a 10MeV accelerator designed at Raja Ramanna Center for Advanced Technology

Dr : Adnan Ali Ahmad *

Dr : Faten Ahmad Alahmad **

Ghena Ali Meary***

(Received 16/8/2022.Accepted 3/10/2022)

□ABSTRACT □

This paper deals with the study of the effect of some cavity parameters on the resonant frequency of a 10 MeV linear accelerator by modeling the equation that describes this frequency using MATLAB. The results are compared with those achieved for an accelerator with the same output power in China. These accelerators with 10MeV output power are recent and are being demonstrated as a simple compact structure far from complex.

Keywords: Accelerator, resonant frequency, cavity, accelerator tube.

* Lecturer at the Faculty of Technical Engineering - Tartous University – Syria

** Lecturer in the Department of Physics - Faculty of Science - Tartous University – Syria

***Postgraduate Student (Master) - Department of Physics - Faculty of Science - Tartous University - Syria

مقدمة

يشير مصطلح المسرع الخطي إلى أي جهاز يقوم بتسريع الجسيمات وفق خط مستقيم [1,2]. يوجد للمسرعات تطبيقات عديدة منها الطبية حيث تُستخدم مسرعات الأمواج الراديوية ذات التردد (3000 – 4000 MHz) من أجل تسريع-الالكترونات-إلى-طاقات-حركية (4 – 25 MeV) ، والتي تستخدم لمعالجة الأورام القريبة من السطح، أو يتم صدم حزمة الإلكترونات المسرعة بمادة هدف لإنتاج حزم فوتونية بطاقات (4 – 25 MeV) ، ومنها الصناعية حيث تُستخدم مسرعات الأمواج الراديوية ذات التردد (2856 MHz) لتسريع الالكترونات لطاقة 10MeV. واستخدامها في حفظ الأغذية والتشعيع للمنتجات الزراعية والتعقيم [3]. اختلفت البنية الداخلية للمسرعات وتعددت حتى تتلائم مع التطبيق وطاقة الخرج المرجوة .

هدف البحث وأهميته

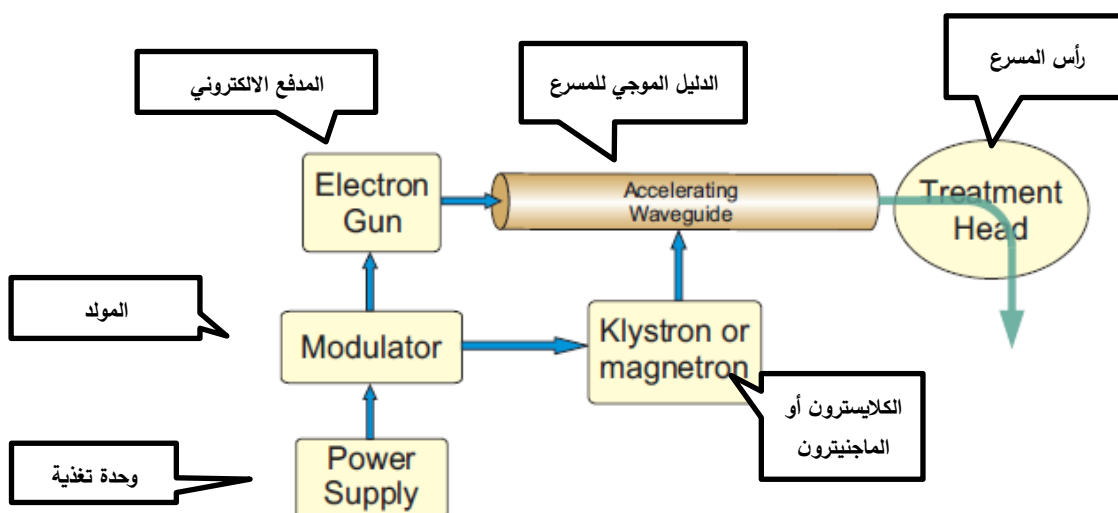
يهدف البحث إلى دراسة تأثير بعض البارامترات الهندسية لتجاويف التسريع على تردد الطنين في مسرع خطي مُصمم من قبل KULKARNI وزملائه في Raja Ramanna Centre for Advanced Technology في الهند [4] ومقارنته مع الدراسة المنجزة من قبل Zhang وزملائه في الصين لمسرّع بنفس طاقة الخرج وبنية مشابهة [5] بغية ضبط الأبعاد للحصول على التردد المطلوب .

تكمُن أهمية البحث بالدراسة الفيزيائية للمسرعات بأقسامها والتركيز على البنية الداخلية لأنبوبة التسريع ومناقشة الأثر الفيزيائي لهذه البنية على تردد الطنين [5] .

طريقة البحث ومواده

نمذجة علاقة تردد الطنين لمسرّع صُمم من قبل KULKARNI ومقارنتها مع نتائج نُمذجت من قبل Zhang لمسرّع بنفس طاقة الخرج ومناقشة أهمية هذه العلاقة.

لنتعرف في البداية على المسرع الخطي وأقسامه [6] : يوضح الشكل (1) أدناه أقسام المسرع :



شكل (1): أقسام المسرع

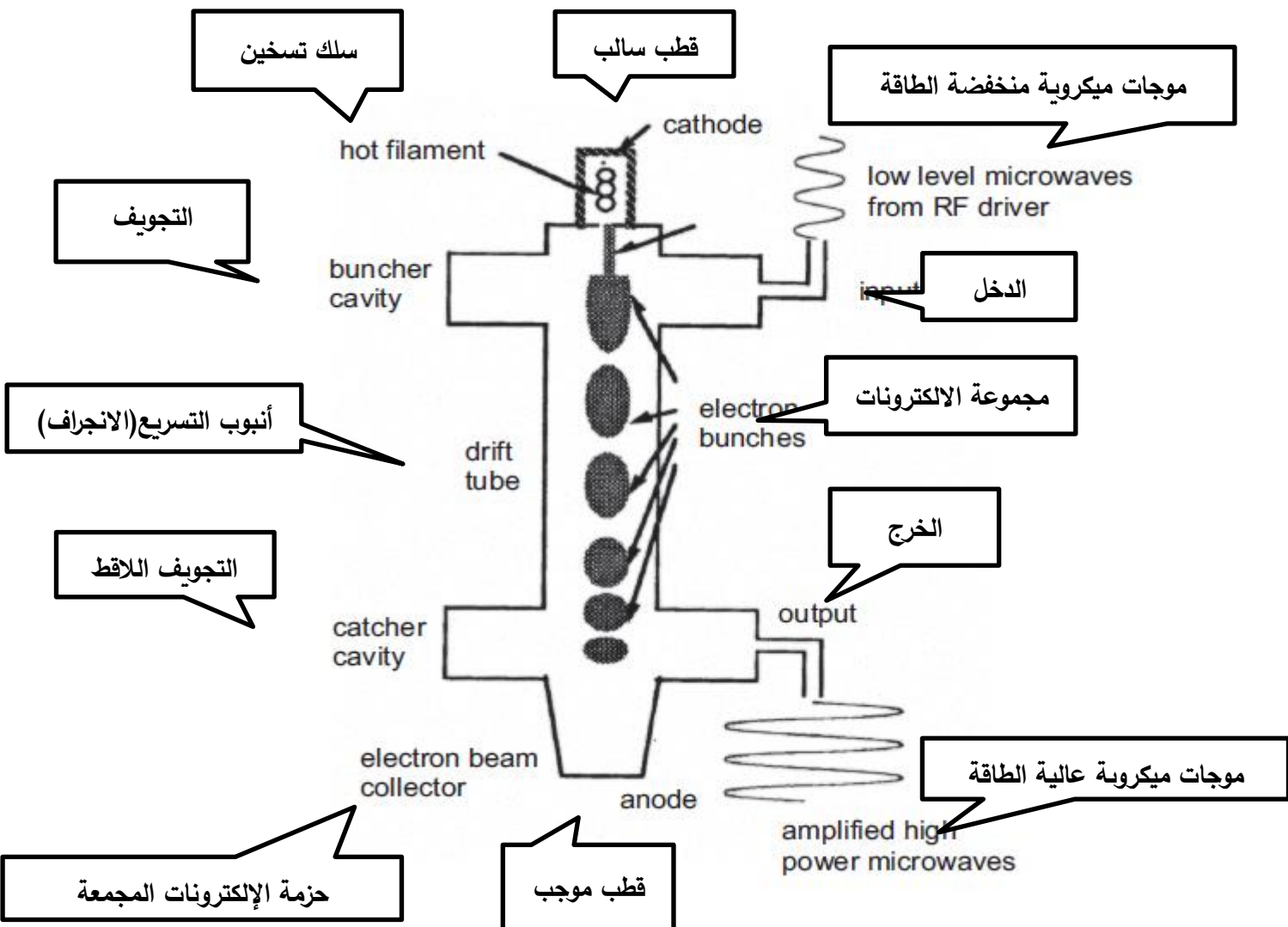
1- مولد الموجات الميكروية [7]:

يقوم بتوليد الأمواج الميكروية المستخدمة لتسريع الإلكترونات. يوجد نوعين من مولدات الأمواج: (الماجنيترون Magnetron و الكلايسترون Klystron) وسنركز على الكلايسترون الذي تم اختياره في تصميم المسرع .

2- الكلايسترون Klystron [8]:

لا يُعد الكلايسترون مولدًا للأمواج الراديوية بل هو مضخم لها. يجب أن يتم تغذيته بواسطة مولد موجات ميكروية منخفضة الطاقة. تُسرّع الإلكترونات الناتجة من المهبط بواسطة نبضات من الجهد في التجويف الأول الذي يُدعى بالمجمع، والذي يُزود بالطاقة عبر الموجات الميكروية [9].

تقوم الموجات الميكروية بإنشاء مجال كهربائي عبر التجويف، فتتغير سرعة الإلكترونات بفعل هذا المجال لدرجات مختلفة بطريقة تعرف بعملية تعديل السرعة (Velocity Modulation) . بعض الإلكترونات تُسرّع بينما الأخرى تُبطئُ والبعض الآخر لا يتأثر. ينتج عن هذا تجميع للإلكترونات، فتمر الحزمة عبر أنبوب الانجراف (drift tube) لتصل إلى التجويف اللاقط (Cather Cavity). في هذا التجويف تُولد الإلكترونات مجال كهربائي مُثبّت مما يجعل الإلكترونات تُعاني من تباطؤ فتتحول طاقتها الحركية إلى موجات ميكروية عالية الطاقة كما يوضح الشكل (2).



الشكل(2): آلية التسريع ضمن الكلايسترون

3- المدفع الالكتروني (electron gun): وهو بمثابة مولّد للإلكترونات التي سيتم تسريعها.

4- الدليل الموجي للمسرّع (accelerating waveguide): يتكون من مجموعة من التجاويف المختلفة

في التصميم حسب نوع المسرّع وطاقة الخرج المراد الحصول عليها وتتم فيه عملية نقل الطاقة من الأمواج المحقونة إلى الجسيمات لتسريعها.

آلية التسريع [10]: تُحقن الإلكترونات الصادرة عن المدفع الإلكتروني ضمن أنبوبة التسريع وفق مجموعات

(bunches) بالتزامن مع حقن الأمواج الراديوية. تُسرّع الإلكترونات من خلال دفعها بواسطة الحقل الكهربائي للأمواج الراديوية بعملية مشابهة لركوب أمواج البحر.

إن الكترونات المجموعة الواحدة لا تمتلك نفس المقدار من الطاقة والسرعة لذلك فإن عملية تزامن حقن

الإلكترونات والأمواج الراديوية ضمن أنبوبة التسريع مهمة للغاية.

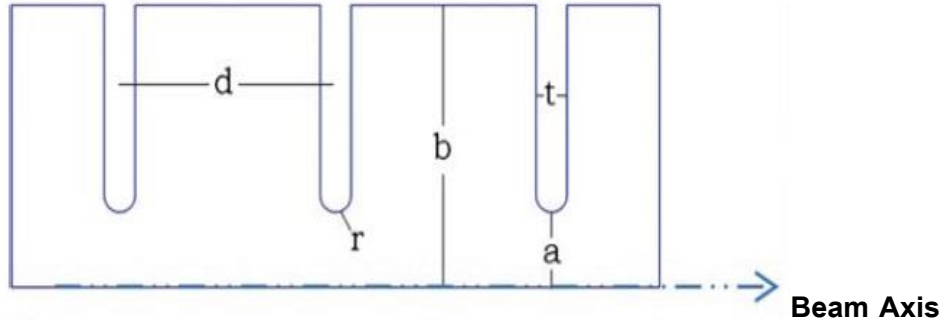
تدخل مجموعة الالكترونات إلى أنبوبة التسريع عندما لا يكون للمجال الكهربائي قيمة عظمى، وهذا لأن الالكترونات التي لديها طاقة أكبر ستدخل أولاً وبالتالي لن يتم دفعها بنفس المقدار الذي تُدفع فيه الالكترونات التي تصل متأخرة. بالإضافة إلى ذلك، فإن أبطأ الالكترونات المجموعة ستدخل أنبوبة التسريع عندما يكون للمجال الكهربائي قيمة عظمى، وسيتم دفعها بقوة أكبر، وستلحق بالالكترونات الأسرع. تُكرر هذه العملية على طول أنبوبة التسريع للحصول على الطاقة المطلوبة.

لنوضح الآن دور التجاويف في أنبوبة التسريع وبعض التفاصيل المهمة في عملية نقل الطاقة

للجسيمات المراد تسريعها :

بالنسبة للمسرّع المدروس هنا فهو بطاقة خرج قدرها 10 MeV ، يتميز بوجود أقراص صلبة دورية بين التجاويف ، فالتجاويف الفارغة ليست مناسبة لتسريع الجسيمات والسبب أن سرعة الطور تفوق سرعة الضوء [7] ولكي تتم عملية التسريع يجب تحقيق التزامن بين الأمواج والالكترونات عن طريق إبطاء الموجات وذلك بوضع عوائق دورية على شكل أقراص والتي تحدد الخلايا المقترنة مع بعضها بواسطة فتحة (اقتران كهربائي) [11]، المصممة كي يكون التردد للموجات ضمن التجاويف بحدود 2856MHz وهو تردد الطنين المطلوب.

يُظهر الشكل أدناه رسم تخطيطي لثلاث خلايا في المسرع الكهروني بأموّاج [4] traveling wave



الشكل (3): رسم تخطيطي لثلاث خلايا

هذه الخلايا تعمل عند وضع $2\pi/3$ وذو ممانعة ثابتة .

إن طول الخلية d الموضح في الشكل تم اختياره وفق العلاقة $\frac{\beta\omega\lambda}{3}$ حيث :

β : تمثل سرعة الطور للموجة الكهرومغناطيسية المنتقلة ضمن الهيكل .

λ : تمثل طول الموجة الكهرومغناطيسية .

علاقة تردد الطنين بتابعية الأبعاد المعطاة أعلاه هي [4] :

$$\mathcal{F}_{res} = \frac{2.405c}{2\pi b} \sqrt{1 + k(1 - e^{-\xi t} \cos\theta)} \quad (1)$$

حيث :

$$k = \frac{4a^3}{3\pi J_1^2(2.405)b^2(d-t)}$$

k : مقدار متعلق بالأبعاد الهندسية a و b و d و t

J_1 : تابع ببسل من الدرجة الأولى

ولدينا:

$$\xi = \sqrt{\left(\frac{2.405}{a}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2}$$

ξ : مقدار متعلق بالبعد a

وهذه الأبعاد هي :

$2a$: قطر الفتحة.

$2b$: القطر الداخلي للخلية.

d : طول الخلية .

القيمة 2.405 هي حل تابع ببسل من الدرجة الأولى والذي يعطى بالعلاقة التالية

$$J_n(z) = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{(-1)^x}{(n+s)!s!} \left(\frac{z}{2}\right)^{n+2x}$$

في الإحداثيات الاسطوانية.

حيث $x \in [0, \infty]$ و $n=1$ و $z=2.405$.

في هذه الدراسة قمنا بنمذجة علاقة تردد الطنين باستخدام MATLAB 2014a ومن ثم درسنا تأثير قيم الأبعاد الهندسية (a, b, d) على تردد الطنين.

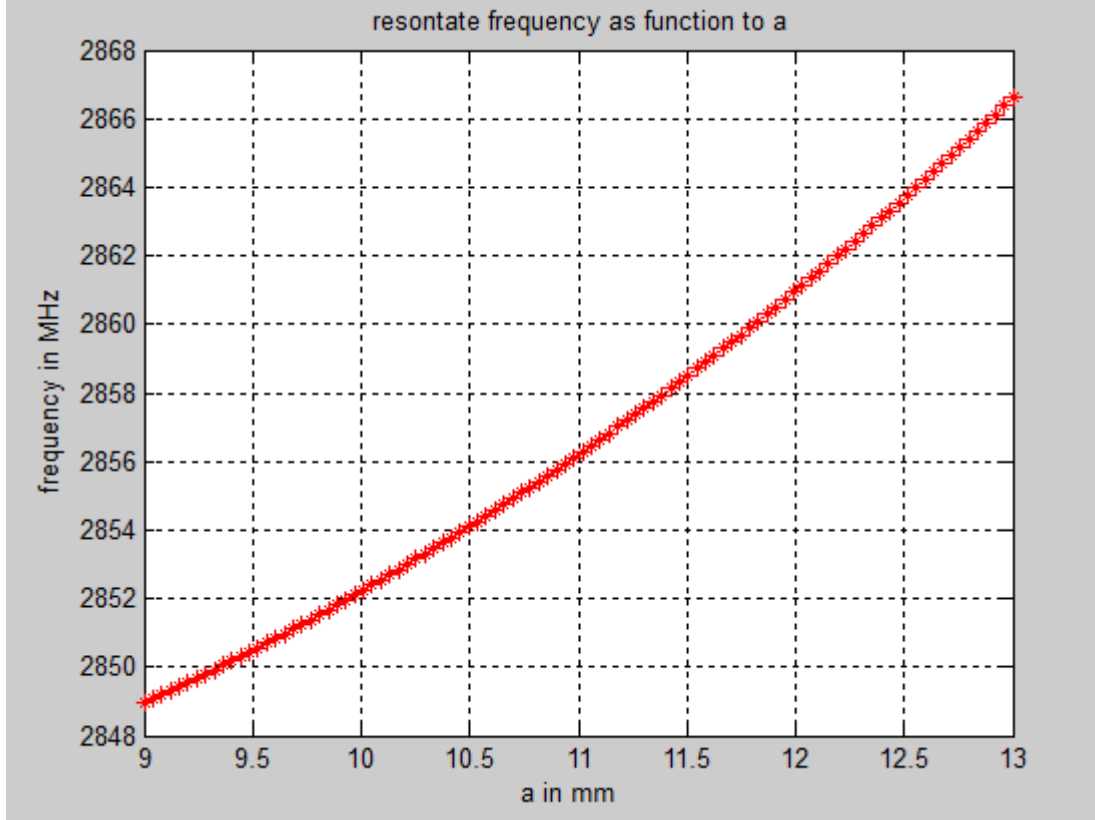
قيم الأبعاد الهندسية التي انطلقنا منها في دراستنا هي ($2a=22$ mm) و ($2b=82.26$ mm) و ($d=34.955$ mm) وهي القيم المعتمدة من قبل المرجع [4] للحصول على تردد الطنين بقيمة 2856MHZ.

النتائج والمناقشة:

(1) - تأثير تغير نصف قطر فتحة الخلية على تردد الطنين :

يوضح الشكل (4) تأثير نصف قطر الفتحة، والشكل (5) تأثير طول الخلية، والشكل (6) تأثير نصف القطر

الداخلي للخلية على تردد الطنين .



الشكل (4): العلاقة بين نصف قطر الفتحة وتردد الطنين

لندرس تغير تردد الطنين بتابعة نصف قطر الفتحة من الشكل (4) وفق الجدول (1):

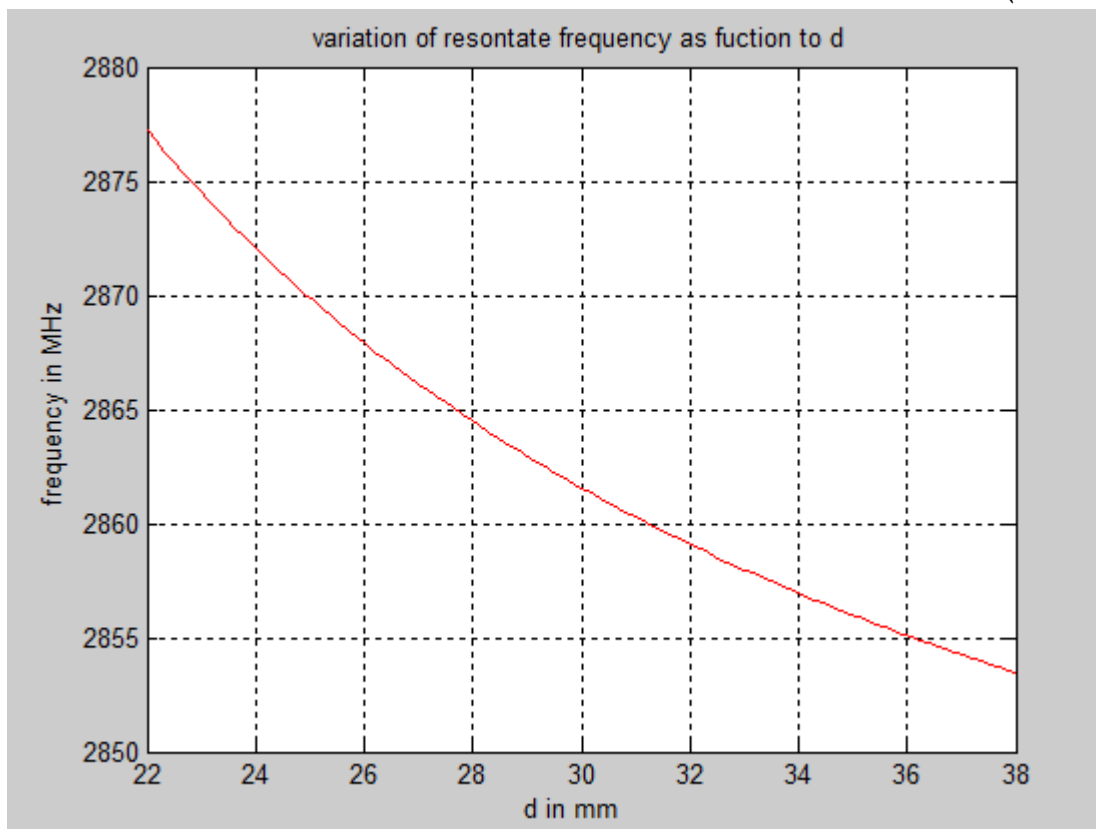
جدول (1) تغير تردد الطنين بتغير نصف قطر الفتحة

a(mm)	f(Mhz)	$ \Delta a $	$ \Delta f $
9	2849	2	7
9.5	2850	1.5	6
10	2852	1	4
10.5	2854	0.5	2
11	2856	0	0
11.5	2858	0.5	2
12	2861	1	5
12.5	2864	1.5	8
13	2866	2	10

نلاحظ من الشكل (1) تزايد تردد الطنين بازدياد نصف قطر الفتحة .

$$\text{فينتج } \frac{|\Delta f|}{|\Delta a|} = 4.4 \text{ MHz/mm}$$

(2)- تأثير تغير طول الخلية على تردد الطنين :



الشكل (5):العلاقة بين طول الخلية وتردد الطنين

لندرس تغير تردد الطنين بتابعة طول الخلية من الشكل (5) وفق الجدول (2) :
جدول (2) : تغير تردد الطنين بتغير طول الخلية.

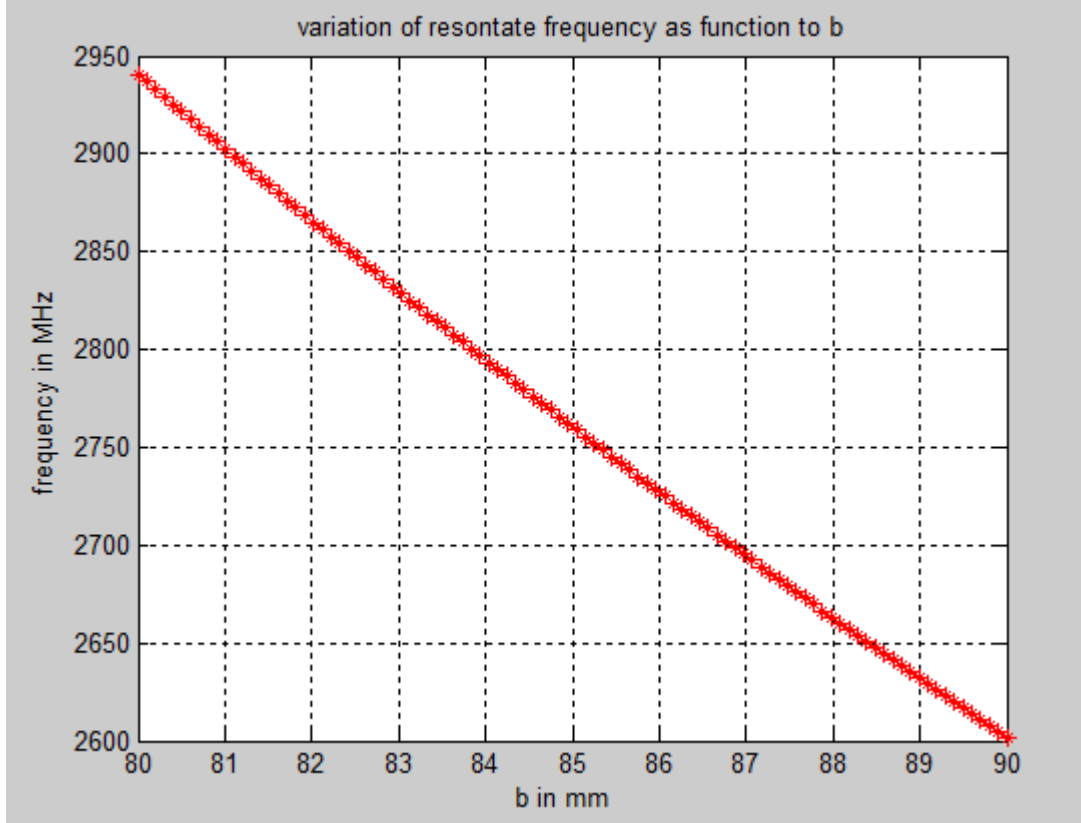
d(mm)	f(Mhz)	$ \Delta d $	$ \Delta f $
22	2877	12	21
24	2872	10	16
26	2868	8	12
28	2865	6	9
30	2862	4	6
32	2859	2	3
34	2856	0	0
36	2855	2	1
38	2854	4	2

نلاحظ من الشكل (5) تناقص تردد الطنين بازياد طول الخلية.

فينتج من الجدول :

$$\frac{|\Delta f|}{|\Delta d|} = 1.4583 \text{ MHz/mm}$$

(3)- تأثير تغيير نصف القطر الداخلي للخلية على تردد الطنين :



الشكل (6): العلاقة بين نصف القطر الداخلي للخلية وتردد الطنين

لندرس تغير تردد الطنين بتابعية القطر الداخلي للخلية من الشكل (6) وفق الجدول :

جدول (3) :تغير تردد الطنين بتغير نصف القطر الداخلي للخلية.

b(mm)	f(Mhz)	$ \Delta b $	$ \Delta f $
80	2948	2	92
81	2900	1	44
82	2856	0	0
83	2827	1	29
84	2799	2	57
85	2752	3	104
86	2725	4	131
87	2699	5	157
88	2655	6	201
89	2630	7	226
90	2600	8	256

نلاحظ من الشكل (6) يتناقص تردد الطنين بزيادة نصف القطر الداخلي للخلية .

$$\frac{|\Delta f|}{|\Delta b|} = 31.6347 \text{ MHz/mm}$$

جدول (4) : المتوسط الحسابي لتغيرات تردد الطنين بتابعية الأبعاد الهندسية

$\frac{ \Delta f }{ \Delta a }$ (MHz/mm)	$\frac{ \Delta f }{ \Delta d }$ (MHz/mm)	$\frac{ \Delta f }{ \Delta b }$ (MHz/mm)
4.4	1.4583	31.6347

بمقارنة الخطوط المبينة في الأشكال (6-5-4) مع الخطوط البيانية في المرجع [5] نلاحظ تطابق النتائج المدروسة مع نتائج المرجع .

بملاحظة الجداول والرسوم البيانية نجدها موافقة لما ورد في المرجع [5] بالنسبة لتردد المسرع المدروس مقارنة مع تردد المسرع في المرجع من حيث التغيرات في تردد الطنين بالنسبة للأبعاد الهندسية المذكورة .

4 (تأثير عمق تغلغل الحقول ضمن مادة المعدن :

قمنا بحساب تحليلي لعامل الجودة Q [12] بناءً على اختلاف طول الخلية في المجمعين الأول والثاني وخلايا

التسريع [13] باستخدام العلاقة [4] :

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \frac{\beta_{\omega} \left[1 - \left(\frac{t}{d} \right) \right]}{n + 2.61 \beta_{\omega} \left[1 - \left(\frac{t}{d} \right) \right]} \quad (2)$$

t : سماكة القرص

d : طول الخلية

n : عدد الخلايا

λ : طول الموجة

β_{ω} : سرعة الطور

δ : يمثل تغلغل المجال الكهرومغناطيسي والتيارات السطحية داخل المعدن [14] ويعطى بالعلاقة :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi F_{res} \mu_0 \sigma}} \quad (3)$$

حيث F_{res} : تردد الطنين.

σ : الموصلية وهي قيمة مرتبطة بالمادة المستخدمة في صناعة التجويف .

μ_0 : النفاذية المغناطيسية .

وفق القيم المبينة بالجدول [4] :

جدول (5) : قيم الأبعاد الهندسية للمسرّع المدروس في خلايا التجميع والتسريع

parameters	Buncher1	Buncher2	Accelerating
t(mm)	5	5	5
d (mm)	19.594	31.4905	34.955
n(mm)	2	3	45
λ (mm)	105042.016	105042.016	105042.016
β_{ω}	0.56	0.9	0.999
δ (mm)	1.5	1.5	0.13765

أخذنا بعين الاعتبار قيم δ المختلفة في كل تجويف والغير موضحة في المرجع [11] وكانت قيم عامل الجودة بالاعتماد على القيم السابقة كالتالي :

parameters	Buncher1	Buncher2	Accelerating
Q	9456.825	10654.716	13831

وهي قيم مطابقة لما جاء في المرجع [4].

تبين الدراسة أعلاه أهمية الأبعاد الهندسية في تصميم المسرع وأثرها الكبير على البارامترات الأساسية فيه كتردد الطنين وعامل الجودة. بالحصول على التردد المطلوب يمكننا ضبط عملية التسريع في التجاويف والمنتضمنة نقل الطاقة من الأمواج إلى الجسيمات المشحونة. تُبين الخطوط البيانية (6-5-4) تأثير تغير الأبعاد الثلاثة على تردد الطنين، نلاحظ أن التأثير الأكبر عليه هو للقطر الداخلي للخلية والذي تم ضبطه بأخذ قيم متغيرة له حتى الحصول على التردد المطلوب ويتبين ذلك بنمذجتنا للعلاقة (1) بواسطة Matlab والحصول على نتائج مطابقة لما ورد في المرجع [5] .

بالنسبة لعامل الجودة الموصوف بالعلاقة (2) من خلال حساباتنا وجدنا أن قيمه تتأثر بأبعاد التجويف الموضحة بزيادة البعد بين الخلايا وهذا مطابق لما ورد في المرجع [4] ، لكن لم ينوه لتأثير δ من ضمن الأبعاد، بالحسابات تم ملاحظة تأثير تغلغل المجال الكهرومغناطيسي والتيارات السطحية داخل المعدن. إن δ مرتبط بتواتر الطنين بالعلاقة (3) ومرتبطة بعامل الجودة بالعلاقة (2) فبنقصان قيمة تزداد قيمة عامل الجودة والتي تشير إلى انخفاض معدل خسارة الطاقة وهذا جوهر التصميم للمسرعات الهادف للوصول إلى طاقة الخرج المطلوبة .

الاستنتاجات والتوصيات :

- ١- بالاعتماد على علاقة تردد الطنين يمكننا ضبط البارامترات الموافقة لتردد طاقة الخرج المطلوبة بإجراء دراسة تحليلية لها مع إمكانية نمذجة العلاقة وتوضيح أهمية البارامترات وهذا ما طبقناه في دراستنا المنجزة لنمذجة علاقة تردد الطنين بتابعة البارامترات الهندسية ومقارنتها مع المرجع [5] .
- ٢- يمكن تحسين جودة التسريع باختيار مادة تساعد على خفض الضياع في الطاقة لأن عامل الجودة مرتبط بعمق تغلغل الحقول ضمن مادة المعدن المصنوع منها هيكل التسريع وهنا تبرز أهمية الموصلية للمواد عند اختيار مادة التصنيع .

References

- 1- WANGLER, T.P. 1998, *RF Linear Accelerators*, New York. <https://doi.org/10.1002/9783527618408>.
- 2- LAPOSTOLLE, P.M; SEPTIER, A.L, 1970, *Linear Accelerators*, Amsterdam.
- 3- MILLER, R, B, 2005, *Electronic Irradiation of foods – An Introduction to the technology* .
- 4- KULKARNI N; DHINGRA R; KUMAR V, 2016, *Physics design of a 10 MeV, 6 kW travelling wave electron linac for industrial applications. Indian Academy of Sciences India*, Indore 452 013, 2-4.
- 5- Zhang Y; PEI Y; SHENG L; SONG Y, 2017, *Research of L-band disk-loaded waveguides travelling wave accelerating structures for a high power Linac. Journal of Physics: Conference Series china*, Ser. 874 012018.
- 6- Karzmark, J; Neil P, 1973, *Electron linear accelerators for radiation therapy: history, principles and contemporary developments. Physics in Medicine & Biology* , 18.(3).
- 7- Shi J; Grudiev A; Wuensch W, 2013, *Tuning of X-band traveling-wave accelerating structures, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 704 p. 14- 18.
- 8- Pond H, 2008 , *The Tube Guys*. Russ Cochran, p.31-40
- 9- Khan M; Gibbons J, 2014, *Khan's the physics of radiation therapy*.
- 10- Greene D, 1997, *Linear accelerators for radiation therapy*.
- 11- Lapostolle P ; Weiss M , 2000, *FORMULAE AND PROCEDURES USEFUL FOR THE DESIGN OF LINEAR ACCELERATORS*. CERN-PS- Switzerland .
- 12- Jensen E, 2010, *Cavity basics in Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: RF for Accelerators*, Denmark, pp. 259–275, arXiv:1201.3202.
- 13- Gerigk F, 2011, *Cavity types, in Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: RF for Accelerators*, , Denmark, pp. 277–298, arXiv:1111.4897.
- 14- Bailey R, , 2016, *Free Electron Lasers and Energy Recovery Linacs*, Germany, CERN Yellow Reports: School Proceedings, Vol. 1/2018.