

دراسة بعض الخصائص الفيزيائية الرئيسية في تصميم مسرعات (10 MeV)

غنى مرعي*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٤ / ٦ / ٢٣ - تاريخ النشر ٢٠٢٤ / ٧ / ٢٥)

□ ملخص □

تتناول الأبحاث المتعلقة بالمسرعات المستخدمة في التعقيم عدة جوانب فيزيائية وهندسية مهمة وفي هذا البحث تم توضيح أثر عمق تغلغل الحقل الكهرومغناطيسي في مادة المعدن المختارة (النحاس النقي) للدليل الموجي على جودة عمل مسرع 10MeV وربطها بعلاقة تردد الرنين، كما تم دراسة مخطط التشتت الذي يربط بين التردد وثابت الانتشار، ومفاهيم سرعة الطور وسرعة المجموعة للأمواج المنتشرة داخل الدليل الموجي. تم ضبط الأبعاد الهندسية للمسرّع بحيث تعطي كفاءة تسريع عالية لاحظنا أن عمق تغلغل المجال الكهرومغناطيسي يقل بدءاً من خلايا التجميع وصولاً لخلايا التسريع وهذا يعني توهيناً أقل أي نقل طاقة أكبر من الأمواج للإلكترونات المسرعة خلال مرورها في هيكل التسريع، وزيادة تردد الأمواج يقل التوهين وبالتالي تتخفض خسارة الطاقة والتشتت على الجدران الموصلة وتكون كفاءة عمل المسرع أكبر.

الكلمات المفتاحية: مسرع ، تردد الرنين ، تجويف ، عمق تغلغل ، سرعة الطور .

*حاصلة على الماجستير باختصاص فيزياء إشعاعية-كلية العلوم- جامعة طرطوس.

Study of Some Important Physical Properties In The Design Of 10MeV Accelerators

Ghena Meary*

(Received 23/6/2024.Accepted 25/7/2024)

□ABSTRACT □

Research related to accelerators used in sterilization addresses several important physical and engineering aspects. In this research, the effect of the depth of penetration of the electromagnetic field in the chosen metal material (pure copper) for the waveguide on the quality of work of the 10MeV accelerator was clarified and linked to the resonant frequency relationship. The scattering diagram that connects the Frequency, propagation constant, and concepts of phase velocity and group velocity for waves propagating within a waveguide. The geometric dimensions of the accelerator have been adjusted to give high acceleration efficiency. We noticed that the depth of penetration of the electromagnetic field decreases from the collection cells to the accelerator cells, and this means less attenuation, that is, the transfer of greater energy from the waves to the accelerated electrons during their passage through the accelerator structure. As the frequency of the waves increases, the attenuation decreases, and thus the loss decreases. The energy is dissipated on the conductive walls and the efficiency of the accelerator's work is greater.

Keywords: Accelerator, resonance frequency, cavity, Depth of penetration, Phase speed.

* Master's degree in radiation physics - Faculty of Science - University of Tartous

مقدمة

تشهد الدراسات الحالية تطوراً سريعاً في مجال المسرعات الخطية لما لها من تطبيقات واسعة في المجالات الصناعية والطبية أدى إلى الاهتمام بدراساتها بشكل مفصل، والتطبيق السائد والمستخدم بكثرة لمسرعات الإلكترونات هو التعقيم حيث يعطل الشعاع الإلكتروني الكائنات الحية الدقيقة من خلال تخريب حمضها النووي بفضل الطاقة العالية التي يحملها. حيث يمكن إجراء التشعيع مباشرةً بواسطة حزمة الإلكترونات أو عن طريق الأشعة السينية الناتجة عنها.

تعرف المسرعات الخطية بأنها أي جهاز يقوم بتسريع الجسيمات وفق خط مستقيم ولعل أهمها مسرعات 10MeV التي تستخدم الطاقة الكهرومغناطيسية، والتي توافق الترددات الميكروية، في تجايف الرنين لتسريع الإلكترونات دون الحاجة إلى الحفاظ على جهود كهربائية كبيرة جداً. ونظراً لصلتها باستبدال المصدر المشع، فإنها تُستخدم لإنشاء حزم إلكترونية تتراوح من 1 إلى 10MeV.

تبدأ جميع مصادر الإلكترون بمهبط تنبعث منه الإلكترونات. وفي مسرع خطي، يكون المهبط جزءاً من "مدفع" إلكتروني يصدر إلكترونات يتم تسريعها بعد ذلك عبر مجال كهربائي. ولتسريع هذه الإلكترونات إلى الطاقات المطلوبة، يستخدم المسرع الخطي دليلاً موجياً متسارعاً بواسطة المجالات الكهرومغناطيسية لإنتاج طاقات حركية أعلى. لذا لا بد من دراسة عملية التسريع بشكل دقيق بسبب أهمية الدليل الموجي للمسرّع الذي يُعد من أهم أجزاءه من حيث اختيار شكله وضبط أبعاده للحصول على طاقة الخرج المطلوبة 10MeV.

أهمية البحث وأهدافه

يهدف البحث لتوضيح الخلفية الفيزيائية لبعض بارامترات المسرعات المستخدمة في التعقيم وأهمية ضبط أبعادها الهندسية للحصول على طاقة خرج مناسبة.

مواد وطرائق البحث

دراسة تأثير عمق تغلغل الحقول الكهرومغناطيسية في مادة المعدن على جودة عمل المسرع ونمذجة علاقة تردد الرنين بدلالة معامل التوهين بواسطة Matlab 2014a.

1- بدايةً نوضح أنواع هياكل التسريع [1]: يمكننا توضيح آلية التسريع في الهيكل التي تنتشر فيها الأمواج المتحركة عن طريق تصنيف هيكل التسريع إلى نوعين :

❖ النوع الأول: هياكل الممانعة الثابتة (Constant Impedance Structures).

سُمي بهذا الاسم لثبات البارامترات الهندسية داخله، بالتالي يمكن دراسة جودة التسريع عن طريق معامل التوهين داخل هيكل طوله L يُعطى بالعلاقة التالية:

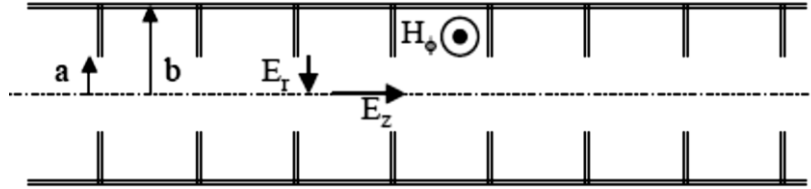
$$\tau = \alpha \cdot L = \frac{\omega \cdot L}{2\theta_g Q} \quad (1)$$

τ : معامل التوهين في وحدة الطول للخلية.

$$E_a(z) = E_0 e^{-\alpha z} \quad (2) \quad \text{يمكن التعبير عن حقل التسريع بالعلاقة:}$$

$$P_t = P_0(z) e^{-2\alpha z} \quad (3) \quad \text{و الطاقة المنقولة بالعلاقة:}$$

تقل الطاقة المنقولة والجهد المتسارع على طول الهيكل وفقاً لعلاقة حقل التسريع بتابعية التوهين. يمكن العمل على تقليل التوهين بتغيير بعض الأبعاد الهندسية داخل الهيكل مثل نصف القطر الداخلي لفتحة التجويف a حيث تؤدي التغييرات الصغيرة لتغييرات كبيرة في سرعة المجموعة والطاقة المنقولة [2]. يوضح الشكل (1) بعض الأبعاد الهندسية:



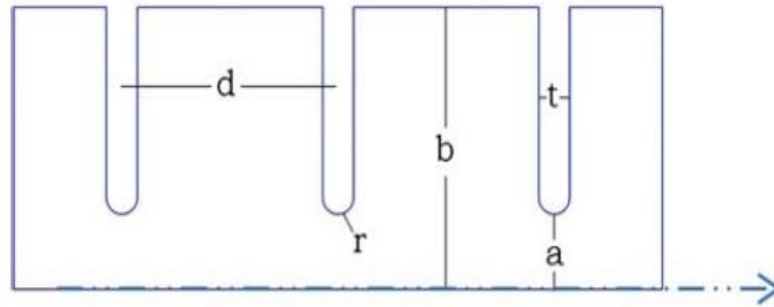
الشكل (1) البنية الهندسية للدليل الموجي [2]

❖ النوع الثاني: هياكل التدرج (التناقص) الثابت [3] (Constant Gradient Structure).

سُمي بهيكل التدرج الثابت لأن مشكلة نصف القطر الداخلي للخلية تمت معالجتها بتقليصها بشكل صحيح على طول هيكل التسريع لمنع تناقص المجال المتسارع وتعويض التوهين الميداني عن طريق زيادة الطاقة المخزنة لكل وحدة طول. وبشكل عام تكون هياكل التدرج الثابت أكثر كفاءة من هياكل الممانعة الثابتة بسبب التوزيع المنتظم لقدرة التردد الراديوي في الاتجاه الطولي.

تم تصميم المسرع المختار في مركز Raja Ramann للتكنولوجيا المتقدمة بتردد عمل 2856MHz [4] وهيكل التسريع فيه يوافق هيكل التدرج الثابت والأبعاد الهندسية فيه ضبطت بحيث تكون طاقة الخرج 10MeV.

لنوضح بدايةً الأبعاد الهندسية لهيكل التسريع المختار:



الشكل (2) الأبعاد الهندسية لهيكل التسريع [4]

وقيمها الموضحة في الجدول (1) [4]:

الجدول (1)، الأبعاد الهندسية لهيكل التسريع

القيم المعتمدة	البعد (mm)
2a	22
2b	82.26

D	34.955
---	--------

حيث :

2a : قطر الفتحة.

2b : القطر الداخلي للخلية.

d : طول الخلية.

لتوضح تأثير تغلغل الحقل الكهرومغناطيسي في الهيكل لابد من توضيح علاقة عامل الجودة Q بناءً على اختلاف طول الخلية في المجمعين الأول والثاني وخلايا التسريع باستخدام العلاقة [4]:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \frac{\beta_{\omega} \left[1 - \left(\frac{t}{d} \right) \right]}{n + 2.61 \beta_{\omega} \left[1 - \left(\frac{t}{d} \right) \right]} \quad (4)$$

t : سماكة القرص

d : طول الخلية

n : عدد الخلايا

λ : طول الموجة

β_{ω} : سرعة الطور

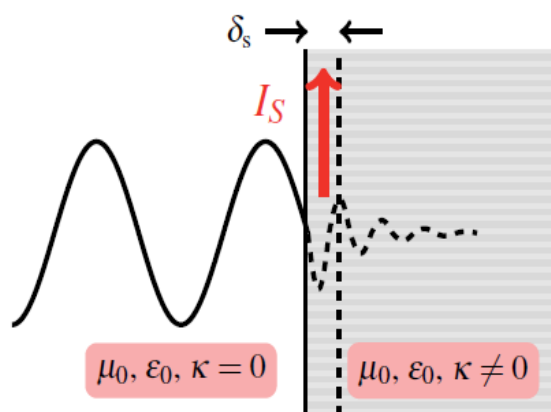
δ : عمق تغلغل المجال الكهرومغناطيسي والتيارات السطحية داخل المعدن [4] ويُعطى بالعلاقة:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_{res} \mu_0 \sigma}} \quad (5)$$

حيث f_{res} : تردد الرنين. μ_0 : النفاذية المغناطيسية.

σ : الموصلية وهي قيمة مرتبطة بنوع المادة المستخدمة في صناعة التجويف.

يوضح الشكل (3) عمق تغلغل الحقل في مادة موصلة:



الشكل (3) عمق تغلغل الحقل داخل المادة الموصلة [5]

تمت دراسة قيم δ تحليلياً وغير الموضحة في المرجع [4] بتعويض قيم الأبعاد الهندسية المختلفة وأثرها عليها بدءاً من خلايا التجميع وحتى خلايا التسريع.

وفق القيم المبينة بالجدولين (2) و(3):

جدول (2): 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

فكانت قيم δ كالتالي:

جدول (3) قيم عمق التغلغل تحليلياً:

parameter	Buncher1	Buncher2	Acceleratin
s			g
Q	9456.82	10654.71	13831
	5	6	
δ (mm)	1.5	1.5	0.13765

النتيجة: عند ضبط الأبعاد الهندسية للمسرّع بحيث تعطي كفاءة تسريع عالية نلاحظ أن عمق تغلغل المجال الكهرومغناطيسي يقل بدءاً من خلايا التجميع وصولاً لخلايا التسريع وهذا يعني توهيناً أقل أي نقل طاقة أكبر من الأمواج للالكترونات المسرّعة خلال مرورها في هيكل التسريع [6].
تُبين الدراسة أعلاه أهمية الأبعاد الهندسية في تصميم المسرّع وأثرها الكبير على البارامترات الأساسية فيه كتردد الرنين وعامل الجودة.

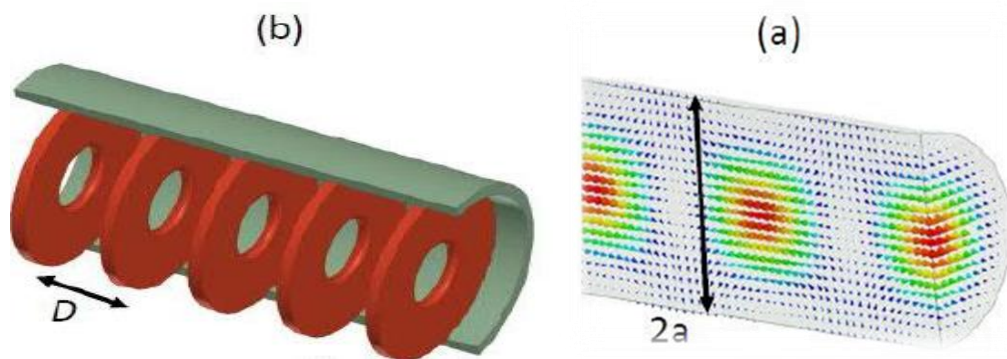
تؤكد حساباتنا أن قيمة عامل الجودة تتأثر بأبعاد التجويف، وخاصةً بزيادة البعد بين الخلايا، وهذا مطابق للدراسة الواردة في المرجع [4]. لم تتم الإشارة لتأثير δ كجزء من الأبعاد، ولاحظنا من خلال الحسابات تأثير عمق تغلغل المجال الكهرومغناطيسي والتيارات السطحية داخل المعدن على قيمة عامل الجودة.

إن δ مرتبط بتواتر الرنين بالعلاقة (5) ومرتبطة بعامل الجودة بالعلاقة (4)؛ فبقصان قيمته تزداد قيمة عامل الجودة، التي تشير إلى انخفاض معدل خسارة الطاقة وهذا جوهر التصميم للمسرّعات الهادف للوصول إلى طاقة الخرج المطلوبة

أولينا الاهتمام لهياكل الموجة المنتشرة لأنها المفضلة في التطبيقات الصناعية التي تحتاج طاقة خرج 10 MeV وأكثر بينما هياكل الموجة المستقرة فهي جيدة للتطبيقات التي تحتاج طاقة خرج أقل من 10 MeV.

لا بد من توضيح مقطعين لدليلين موجيين أحدهما مفرغ الشكل (4a) والآخر مزود بأقراص متقوية المركز

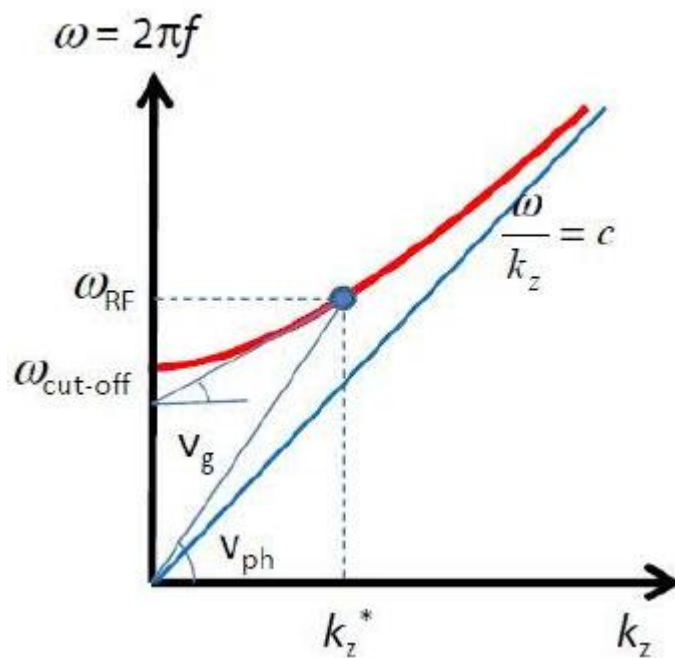
(الشكل 4b):



الشكل (4) مقاطع للدليل الموجي بأنواعه [7]

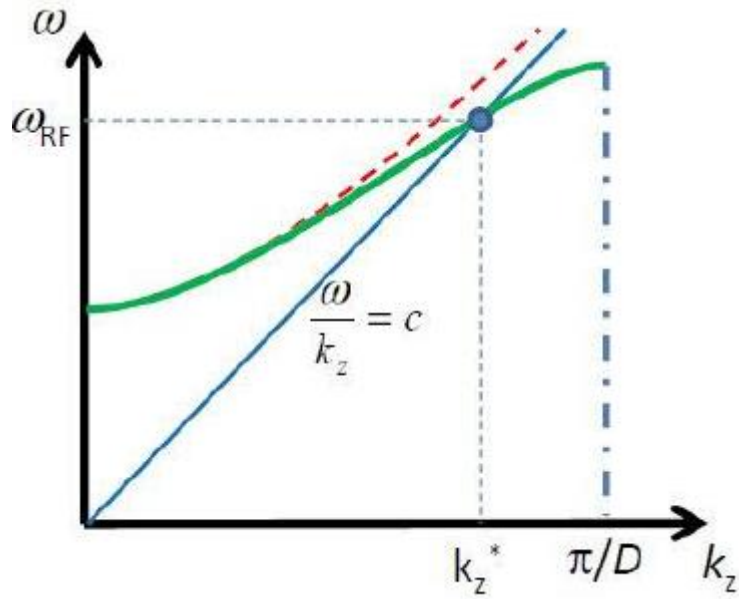
تكون سرعة الطور للأمواج في الشكل (4a) أكبر من سرعة الضوء وهذا يؤدي لتبديد الطاقة وضياعها دون الاستفادة منها في تسريع الجسيمات دورياً وبوقت مثالي. تمت معالجة هذه المشكلة هندسياً بوضع أقراص ذات قزحية على مسافات متساوية داخل الهيكل الشكل (4b) تضمن تساوي سرعة الطور مع سرعة الضوء، وبالتالي عملية تسريع الجسيمات للمسافات بعيدة وهذا مطبق في المسرع المدروس.

ويمكن توضيح سرعة الطور في حالتها الدليل الموجي المفرغ والمزود بأقراص كما في الشكلين (5,6):



الشكل (5) مخطط التشتت لدليل موجي مفرغ [7]

يوضح الشكل مخطط التشتت لدليل موجي مفرغ يطابق الشكل 4a فتمر الأمواج خلاله دون تطبيق شرط للمزامنة بينها وبين الجسيمات المشحونة وهي أن تكون سرعة الطور مساوية لسرعة الضوء.



الشكل (6) مخطط التشتت لدليل موجي مزود بأقراص دورية [7]

إن التعديل في البنية الهندسية للدليل والمطابق للشكل 4b أدت للحصول على سرعة طور مساوية لسرعة الضوء ومفيدة في عملية التسريع .

2- علاقة ثابت الانتشار للأموح بالتردد:

تمت دراسة العلاقة التي تربط ثابت الانتشار للأموح كدالة للتردد لتوضيح أهمية إدخال أقراص دورية داخل هيكل المسرع بالاستعانة بقيم المسرع المختار 10 MeV فالعلاقة التي تربط ثابت الانتشار بالتردد [4]:

$$\frac{\omega}{k} = c \quad (6)$$

حيث c : سرعة الضوء .

$$k = k_1 + \frac{2\pi n}{d} \quad \text{ويعطى ثابت الانتشار بالعلاقة}$$

$$k_1 = \frac{1}{c} \sqrt{\omega_{RF}^2 - \omega_{cut}^2} \quad \text{حيث}$$

$$\omega_{cut} = \frac{cp_{01}}{a} \quad \text{و}$$

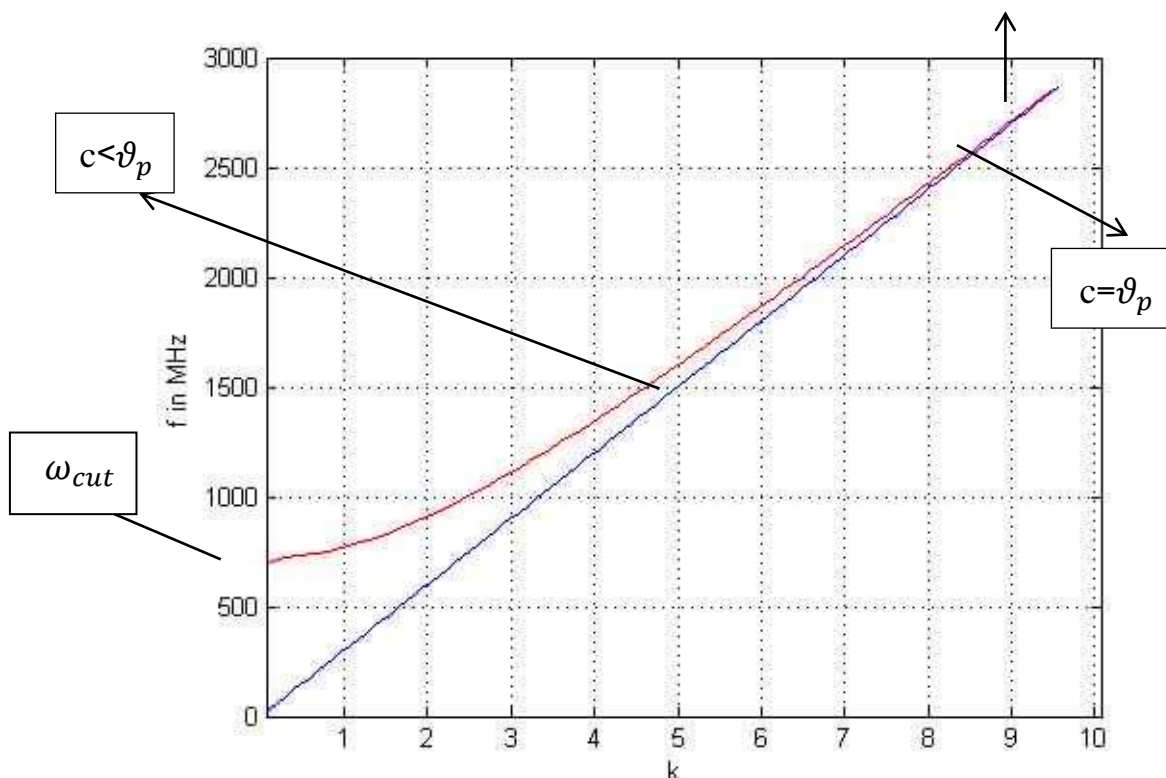
والقيم العددية نأخذها كالتالي [22 – 38] $d \in$

$$n \in [0 - 1]$$

$$a \in [9-13] \text{ لدينا } P_{01} = 2.405$$

وكانت النتيجة الحصول على المخطط الموضح في الشكل (7) والذي يطلق عليه اسم مخطط التشتت

$$\omega_{RF}$$



الشكل (7) مخطط التشتت لقيم المسرع 10 MeV

يطابق الخط البياني هنا الخط البياني المبين في الشكل (6) ويوضح تردد القطع للمسرع وتردد التشغيل 2856 MHz، وتم الحصول على الشرط المطلوب لنقل الطاقة بكفاءة من الأمواج للجسيمات حيث $v_{ph} < c$ نتيجة اختيار الأبعاد الهندسية المناسبة للأقراص وخلايا التسريع.

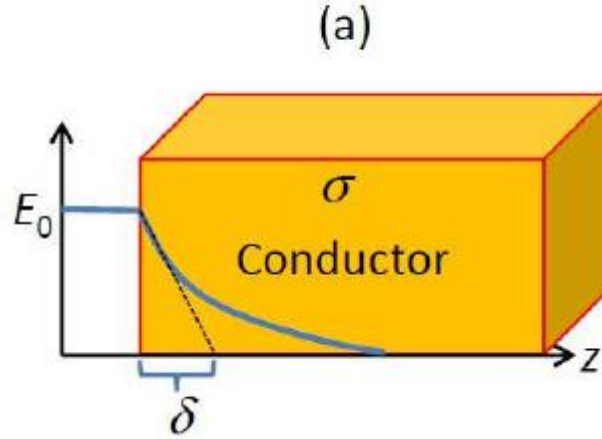
نلاحظ من الشكل (7) أن تردد القطع يطابق القيمة 655MHz وغير المحسوبة في المرجع [4] ويمكننا حسابه تحليلياً باستخدام العلاقة [4]: $\omega_{cut} = \frac{cp_{01}}{a} = \frac{2.405 \cdot 3 \cdot 10^8}{11} = 655 \text{ MHz}$ وهي قيمة مطابقة لما ورد في الشكل (7). يمثل تردد القطع فلتره لكافة الترددات الأقل منه والسماح للأمواج ذات الترددات الأعلى بالانتشار داخل الدليل الموجي المحمل بأقراص، وهو العامل الرئيسي في مزامنة الأمواج مع الجسيمات المشحونة بسبب دورها في تبطين حركة الأمواج.

3- نمذجة علاقة معامل التوهين بدلالة التردد [7][8]:

اختيار المادة المصنوع منها هيكل التسريع مهم جداً لضمان جودة عمل عالية للمسرع، وفي المسرع المدروس المادة المختارة ذات موصلية ممتازة وهي النحاس النقي ومن مميزاته سهولة التصنيع وأداء جيد عند التدرج العالي للتسارع.

يمكننا تبعاً لعمق تغلغل الموجات الكهرومغناطيسية تحديد كفاءة نقل الطاقة داخل أنبوبة التسريع.

يوضح الشكل (8) مفهوم عمق التغلغل:



الشكل (8) عمق التغلغل وعلاقته بالحقل [7]

يرتبط معامل التوهين بالتردد بالعلاقة:

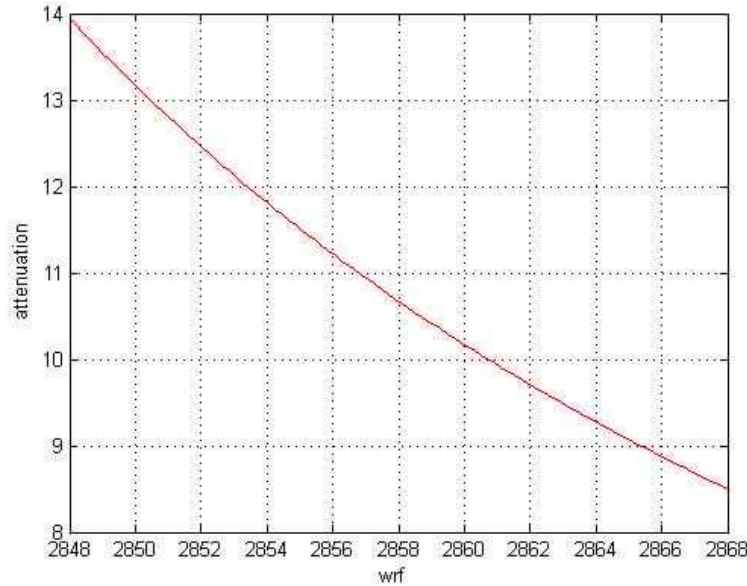
$$\alpha = \frac{\omega_{RF}}{2\vartheta_g Q} \quad (7)$$

حيث Q (عامل الجودة) يأخذ قيم وفق المجال:

$$Q \in [9456 - 13831]$$

بخطوة قدرها 2 أخذنا مجال الترددات $\omega_{RF} \in [2848-2868]$ وأخذنا قيم سرعة المجموعة

$\vartheta_g \in [0.0108 - 0.0122]$ وكاننت النتائج كما موضحة في الشكل البياني (8):



الشكل (8) علاقة التوهين بتردد الطنين

نستنتج من هذا المنحني البياني أنه بزيادة تردد الأمواج يقل التوهين وبالتالي تتخفض خسارة الطاقة والتشتت على الجدران الموصلة وتكون كفاءة عمل المسرع أكبر [9].

الاستنتاجات:

١. عند ضبط الأبعاد الهندسية للمسرّع بحيث تعطي كفاءة تسريع عالية نلاحظ أن عمق تغلغل المجال الكهرومغناطيسي يقل بدءاً من خلايا التجميع وصولاً لخلايا التسريع وهذا يعني توهيناً أقل أي نقل طاقة أكبر من الأمواج للإلكترونات المسرّعة خلال مرورها في هيكل التسريع.
٢. تعديل البنية الهندسية للدليل أدت للحصول على سرعة طور مساوية لسرعة الضوء ومفيدة في عملية تسريع الحزمة الإلكترونية في المسرع الخطي.
٣. زيادة تردد الأمواج الكهرومغناطيسية يقلل التوهين، وبالتالي تتخفف خسارة الطاقة والتشتت على الجدران الموصلة وتكون كفاءة عمل المسرع أكبر.

التوصيات:

١. مواصلة العمل على تطوير النماذج الرقمية لأنابيب تسريع الجسيمات على الرغم من أن هذه النماذج تُعد تحدياً بسبب التعقيد الهندسي والفيزيائي لهذه الأنابيب وتأثير تردد الرنين على جودة عملها.
٢. التركيز على تحسين التفاصيل الدقيقة للنماذج الرقمية، ودقة النتائج المتوقعة، وذلك من خلال مقارنة نتائج النمذجة الرقمية مع البيانات التجريبية المتاحة.

References

- 1- WANGLER, T.P. 1998, *RFLinear Accelerators*. New York.
- 2- FARKAS, Z.D. 1986, *Unified Formulation for Accelerator Design*, SLAC-PUB-3981.
- 3- SEKUTOWICZ, J. 2010, *Superconducting linear accelerator for the European XFEL, presentation at the International Workshop on X-ray Diagnostics and Scientific Application of the European XFEL*, Ryn, Poland.
- 4- KUMAR, K.D. 2016, *Physics design of a 10 MeV, 6 kW travelling wave electron linac for industrial applications*, India.
- 5- Wolski, A. 2010, *Theory of electromagnetic fields, CAS RF Engineering*, Ebeltoft, Denmark.
- 6- CARTER, R. 2005, *Review of RF power sources for particle accelerators, in Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School*, Radio Frequency Engineering, Seeheim, Germany, 107.
- 7- ALISINS, D. 2018, *liner accelerator technology*, Frascati, Italy, 90.
- 8- MCKEOWN, J. 1995, *Industrial Material Processing Electron Linear Accelerator*, U.S. Patent.
- 9- MILLER, R.B. 2003, *A High-Power Electron Linear Accelerator for Food Irradiation Applications*.