مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (4) – 2025: 354-366

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (4) -2025: 354-366

دراسة تحليلية محوسبة لماص الأمواج المايكروية الهرمي الشكل

عبد المعين أحمد الرفاعي[1*]

*[1]. أستاذ مساعد، دكتور، مهندس، الجامعة الوطنية الخاصة بحماة، كلية الهندسة، الكترونيات واتصالات.
abdoulmouen.alrifai@wpu.edu.sy

تاريخ الإيداع: 2023/5/7
تاريخ القبول: 2023/6/8

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

الملخص:

توجد العديد من الشروط (العوامل) التي تؤثر على أداء ماص الأمواج المايكروية الهرمي الشكل Pyramidal Microwave Absorber والتي يجب أخذها بعين الاعتبار عند استخدامه كمكون أساسي في تصميم الغرف الماصة رادارياً Anechoic Champers. وهذه العوامل هي: أماكن توضع البوابة، مساحة البوابة، زاويا ورود الموجة الكهرطيسية إلى الماص الهرمي، المسافة بين البوابة والماص الهرمي.

سوف يتم تبيان تأثير تلك العوامل على الأداء من خلال دراسة معامل الانعكاس S_{11}. حيث سيتم تنفيذ ذلك بواسطة المحاكاة الحاسوبية المنفذة بواسطة البيئة الحاسوبية CSTMWS وباستخدام مادة ذات ثابت عزل $\varepsilon_r = 2.9$.

مع العلم بأن المواص الهرمية تصمم لتعمل بشكل فعال ضمن المجال الترددي من $(1 \div 20)GHz$.

الكلمات المفتاحية: ماص الأمواج المايكروية الهرمي الشكل، الغرف الماصة رادارياً، معامل الانعكاس S_{11}، CSTMWS، التوافق الكهرطيسي EMC، المقطع الراداري RCS، الانعكاسية R، معامل الانكسار n، الماص الهرمي القياسي TDK-ICT-030.

ISSN (online): 2789-6854
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Analytical and Computer-Aided study of Pyramidal Microwave Absorber

Abdoulmouen Ahmed Alrifai*[1]

*[1]. Associated Professor, Eng, Dr in the Department of Communications Engineering of College of Engineering - Al Wataniya Private University.
abdoulmouen.alrifai@wpu.edu.sy

Received: 7/5/2023
Accepted: 8/6/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a

CC BY- NC-SA

Abstract:

There are many conditions that affect the performance of absorbent microwave pyramidal shape, which must be taken into account when using it as an essential component in the design of the Anechoic Champers, and these factors are: position the gate are placed, at the gate area, incident angles of electromagnetic wave to the microwave pyramidal absorber, the distance between the gate and the microwave pyramidal absorber. It will be shown who these conditions impact of these cases on the performance by studying the reflection coefficient S_{11}. This will be implemented by means of computer simulations carried out by the program CSTMWS and using fixed-isolating material which has permeability coefficient $\varepsilon_r = 2.9$.

It is worth to note that the microwave pyramidal absorber designed to operate effectively within the frequency range of $(1 \div 20)$ GHz.

Keywords: Pyramidal wave absorber, Anechoic chamber, reflection factor S_{11}, CSTMWS software, electromagnetic compatibility EMC, Radar Cross Section RCS, reflectivity R, refractive index n, Standard Pyramidal wave absorber TDK-ICT-030.

المقدمة (Introduction):

يقع نطاق ترددات الأمواج المايكروية ضمن المجال300GHz ~ 300MHz. تُصَنع المواد الماصة في هذا المجال عادة من مجموعة من المواد، التي تؤمن امتصاص الموجات الواردة إليها وتقليل الانعكاسات عنها. يمكن أن تأخذ المواص أشكالاً مختلفة منها: الهرمي pyramidal، والوتدي wedge، والمائل oblique، والملتوي convoluted ...الخ (Fawwaz et al.,1994,518). يتم تصنيع المواص حالياً وبشكل واسع عن طريق تلقيح الكربون الناقل إلى وسط بلاستيكي إسفنجي مثل البولي يوريثان أو البوليستيرين (Balanis,2016,931)، (Harrington,1961,520). وبما أن الماص الأساسي المستخدم ضمن المجال الترددي المذكور هو الماص الهرمي الشكل، فقد كرست أغلب الدراسات العلمية على هذا الماص كمكون رئيسي في الغرف الماصة رادارياً (Hayati,2022,5)، (Leland et al.,2018,219)، (Orakwue et al.,2019,4)، (Jian et al.,2000,5).

يوجد نوعان من الغرف الماصة: غرف مانعة للصدى "صوتية" وغرف ماصة رادارياً. الغرفة الماصة رادارياً: هي عبارة عن غرفة مشلدة تغطى جدرانها الداخلية بمواد ماصة للموجات الكهرطيسية تمنعها من الانعكاس. تستخدم الغرف الماصة رادارياً بشكل أساسي لتنفيذ ما يلي: قياس المخطط الإشعاعي للهوائي، دراسة التوافق الكهرطيسي EMC (Electro-Magnetic Compatibility)، قياس المقطع الراداري RCS (Radar Cross Section). الخ (Hayat et al.,2001,597).

إن تطوير واختيار الشكل المناسب للماص الراديوي يجب أن يتم بناءً على المتطلبات التالية: قيمة معامل الانعكاس بالطويلة والصفحة وذلك عند زوايا مختلفة لورود الموجات الكهرطيسية وفي حالتي الاستقطاب الأفقي والعمودي.

تُعَبر الانعكاسية R عن الأداء الامتصاصي للمادة، وهي تعتمد على خواص المادة (ثابت النفوذية المغناطيسية وثابت السماحية الكهربائية)، وعلى تردد الموجة. يعبر عن معامل الانعكاس بنسبة طويلة الموجة المنعكسة إلى طويلة الموجة الواردة.

1. الدراسات المرجعية (Literature Review):

على مدى السنوات القليلة الماضية تم نشر الكثير من الدراسات والمقالات حول المواص الهرمية الشكل المستخدمة في الغرف الماصة رادارياً. حيث قام Orakwue et al (2019) بمحاكاة وتصنيع ماص للأمواج المايكروية هرمي الشكل باستخدام مادة البولي يوريثين والكربون لاستخدامه في الغرف الماصة رادارياً بتكلفة أقل من الماص التقليدي. حيث أثبتت نتائج المحاكاة أن له أداءً امتصاصيًا جيدًا مماثل لذلك الموجود في الماص التقليدي مع خفض التكلفة بأكثر من 60٪. أما Yohandri et al (2018) فقد قام بمحاكاة وتصميم ماص هرمي الشكل باستخدام مادة كربونية مع ثابت عزل كهربائي يساوي 2.9 للتطبيق في الغرف الماصة رادارياً، وذلك على مجال ترددي عريض النطاق، حيث كان ارتفاع الهرم والقاعدة يساوي 132 mm و20 mm على الترتيب. حيث أظهرت نتائج المحاكاة استيفاء خسارة الانعكاس وخسارة الإرسال للماص الهرمي الشكل. كما قام Sittakul et al (2015) بتقديم تصميم بنية جديدة لماص للأمواج الكهرطيسية من الفرايت ذو أبعاد (W×L×H) 1.1m × 2.1m × 0.8m (عرض × طول × ارتفاع) على المجال الترددي الممتد من 40MHz إلى 1 GHz. كما قام Shu et al (2005) بدراسة تأثير زاوية الرأس بين المواص الهرمية الشكل على الامتصاصية. حيث لوحظ أن انعكاسات الموجات الكهرومغناطيسية بين المواص تزداد مع انخفاض زاوية الرأس وتتحسن خسارة الموجات الكهرطيسية. كما قام Nornikman et al (2008) بدراسة تأثير تغير البارامترات الهندسية للماص الهرمي الشكل على أداءه الامتصاصي. وقام Ibrahim et al (2008) بتحديد التأثير الامتصاصي باستخدام الكربون كمادة ماصة لتجنب انعكاسات الموجة الكهرطيسية عن جدران الغرفة الماصة رادارياً. وللتحقق

من الأداء الامتصاصي للماص، تم إجراء قياس لتحديد معدل الامتصاص ضمن المجال الترددي 1-10 GHz. حيث أظهرت النتائج أن الكربون مادة جيدة لامتصاص الموجات الكرطيسية المايكروية.

يلاحظ مما سبق أن جميع الأبحاث قد ركزت على تأثير نوع المادة التي يصنع منها الماص الهرمي الشكل وأبعاده الهندسية على أداء الماص، باستثناء ما قام به Shu et al (2005) الذي درس تأثير زاوية الرأس على الأداء الامتصاصي.

وبسبب إغفال معظم الدراسات التي تناولت المواص الرادارية لتأثير انتشار الموجة في الوسط وسلوكها عند الانتقال بين حد فاصل بين وسطين (في حالتنا بين الفراغ والماص الهرمي الشكل)، كان الاتجاه في هذا البحث لدراسة ذلك إن كان من حيث زاوية الورود أو المسافة أو التموضع المتبادل للمواص الهرمية الشكل ولمنبع الموجات الكهرطيسية وبالتالي تحديد العوامل التي تؤثر على أداء ماص الأمواج المايكروية الهرمي الشكل، مما يمكننا من الوصول إلى الحالة الأفضل للعلاقة بين المواص الهرمية الشكل ومنبع الإشارة الكهرطيسية التي تؤمن نسبة عالية من الامتصاص وبالتالي انعكاسات أقل وهذا يؤدي لنتائج دقيقة عند استخدامه كمكون أساسي في الغرف الماصة رادارياً.

2. مواد البحث وطرائقه Materials and Methods

2.1 – الدراسة العلمية:

على الرغم من أن الحقل الكهربائي يمكن أن يكون مستمراً في الأوساط المختلفة المتجاورة، إلا أنه يمكن أن يصبح غير مستمر عند الحدود بين الوسطين.

نقول عن الشروط التي يجب أن يحققها الحقل عند الحد الفاصل بين وسطين بالشروط الحدية، حيث تساعدنا هذه الشروط على تحديد الحقل في أي من جوانب الحد الفاصل، إذا كان الحقل على الجهة الأخرى من الحد الفاصل معلوماً. حيث أن هذه الشروط تتعلق بخصائص المواد المصنوعة منها تلك الأوساط، وبالتالي يمكن فهم توزع الحقل الكهربائي حول هوائي أو أي بنية أخرى من خلال فهم تلك الشروط. توجد ثلاث حالات للشروط الحدية هي:

1- عازل كهربائي (ε_{r1}) – عازل كهربائي (ε_{r2}).

2- ناقل – عازل كهربائي (ε_r).

3- ناقل – فراغ حر (ε_0).

وبما أنه في بحثنا هذا نناقش انتشار الموجة الكهرطيسية في وسط عازل (الفراغ) ويصطدم بوسط عازل آخر هو عبارة عن الماص الهرمي الشكل، بالتالي سنناقش الحالة الأولى وهي سلوك الحقل عندما ينتشر الحقل بين وسطين عازلين.

ولتحديد الشروط الحدية، نستخدم معادلتي ماكسويل (Hayat et al.,2001,597):

$$\oint \vec{E}.\overrightarrow{dl} = 0 \qquad (1)$$

$$\oint \vec{D}.\overrightarrow{ds} = Q_{encl} \qquad (2)$$

أيضاً نحتاج لتحليل شدة الحقل إلى مركبتين متعامدتين: المركبة المماسية للحقل $\vec{E}_t$ والمركبة الناظمية للحقل $\vec{E}_n$.

نعتبر أن الحقل يتواجد في منطقة تتألف من عازلين مختلفين يتميزان:

بـ

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0\varepsilon_{r1}$$

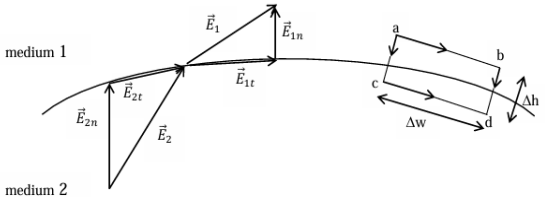
و

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0\varepsilon_{r2}$$

حيث أن الحقل E_1 و E_2 موجودين في الوسط الأول والوسط الثاني على الترتيب. يمكن تحليل مركبات كل منهما على النحو التالي:(3)

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{1t} + \vec{E}_{1n} \qquad (3)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{2t} + \vec{E}_{2n} \qquad (4)$$



الشكل (1) الحقل الكهربائي عند حد فاصل عازل –عازل

نطبق العلاقة (1) على المسار المغلق abcda وبافتراض أن المسار صغير جداً ومع مراعاة تغيرات الحقل نحصل على:

$$0 = E_{1t}\,\Delta w - E_{1n}\,\frac{\Delta h}{2} - E_{2n}\,\frac{\Delta h}{2} - E_{2t}\,\Delta w + E_{2n}\,\frac{\Delta h}{2} + E_{1n}\,\frac{\Delta h}{2} \qquad (5)$$

عندما $\Delta h \to 0$ فإن العلاقة (5) تأخذ الشكل التالي:

$$0 = E_{1t}\,\Delta w - E_{2t}\,\Delta w \Rightarrow E_{1t} = E_{2t} \qquad (6)$$

هذا يعني أن المركبات المماسية للحقل الكهربائي هي نفسها على كلا جانبي الحد الفاصل، وبكلمات أخرى نقول بأن E لا يخضع للتغير على الحد الفاصل وأنه مستمر خلاله.

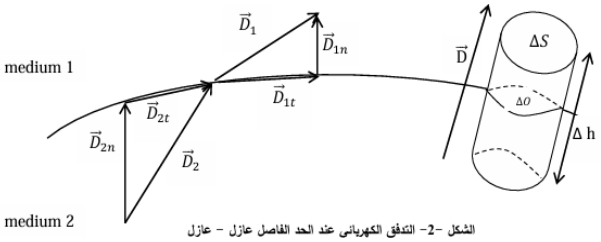
وبما أن: $\vec{D} = \varepsilon\vec{E} = \vec{D}_t + \vec{D}_n$

فإن العلاقة (6) يمكن كتابتها كالتالي:

$$\frac{\vec{D}_{1t}}{\varepsilon_1} = \vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t} = \frac{\vec{D}_{2t}}{\varepsilon_2} \qquad (7)$$

وبالتالي فإن المركبة المماسية لـ D تخضع لبعض التغيرات خلال الحد الفاصل ويقال بأن D غير مستمر خلال الحد الفاصل.

وبشكل مشابه نطبق العلاقة (2) على السطح الغاوصي كما هو موضح بالشكل التالي:



الشكل(2) التدفق الكهربائي عند الحد الفاصل عازل – عازل

$$\Delta Q = \rho_s.\Delta S = D_{1n}\,\Delta S - D_{2n}\,\Delta S$$

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s \qquad (8)$$

وفي حالة عدم وجود شحنات حرة عند الحد الفاصل فإن العلاقة (8) تأخذ الشكل التالي:

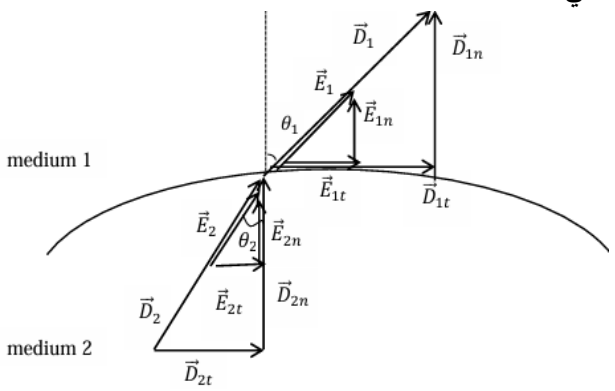
$$D_{1n} = D_{2n} \qquad (9)$$

وبالتالي فإن المركبة الناظمية لـ D مستمرة عند الحد الفاصل، أي لا تخضع D لتغير عند الحد الفاصل.

$$D = \varepsilon E \Longrightarrow \varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n} \qquad (10)$$

تبين العلاقة (10) بأن المركبة الناظمية للحقل E غير مستمرة عند الحد الفاصل بين وسطين عازلين مختلفين.

يمكننا استخدام الشروط الحدية لتحديد انكسار اشعة الحقل عند الحد الفاصل. إذا أخذنا بعين الاعتبار أن D_1 (أو E_1) وD_2 (أو E_2) يصنعوا زوايا θ_1 وθ_2 مع الحد الفاصل، كما في الشكل التالي:



الشكل(3) انعكاس D أو E عند الحد الفاصل عازل –عازل

وباستخدام العلاقة (6) نحصل على:

$$E_1\sin\theta_1 = E_{1t} = E_{2t} = E_2\sin\theta_2$$

وبشكل مشابه بتطبيق العلاقة (9) أو العلاقة (10) نحصل:

$$\varepsilon_1 E_1\cos\theta_1 = D_{1n} = D_{2n} = \varepsilon_2 E_2\cos\boldsymbol{\theta_2} \qquad (12)$$

م العلاقة (11) على العلاقة (12) نحصل:

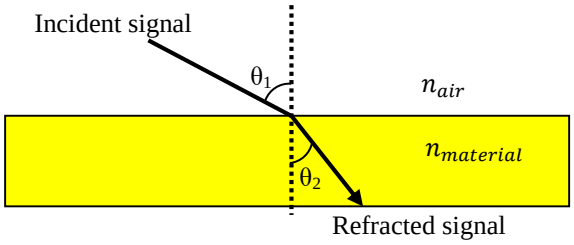
$$\frac{\tan\theta_1}{\varepsilon_1} = \frac{\tan\theta_2}{\varepsilon_2}$$

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \qquad (13)$$

تعبر هذه العلاقة عن قانون انكسار أشعة الحقل الكهربائي، والذي يفهم نها أن الحد الفاصل بين وسطين عازلين يسبب انحناء (انكسار) في خطوط التدفق. عندما تعبر الإشارة من

وسط ما، في حالتنا الهواء، إلى وسط آخر، في حالتنا الماص الهرمي، بزاوية معينة فإن سرعتها ستتغير وهذا يؤدي إلى انحرافها عن مسارها المستقيم تسمى هذه الظاهرة بالانكسار. يعبر معامل الانكسار n لوسط ما عن مقدار تناقص سرعة الموجة ضمن الوسط. يساوي معامل انكسار الهواء القيمة 1.00029، بينما هو أكبر بالنسبة للماص الهرمي.

يبين الشكل (4) قانون سنل Snell's Law، الذي يقدم علاقة تربط بين زاوية ورود وانكسار الموجة الساقطة على الحد الفاصل بين وسطين وذلك عند قيم مختلفة لمعامل الانكسار. تبين العلاقة (14) قانون سنل حيث: θ_1 – زاوية الورود، θ_2 – زاوية الانكسار، V– سرعة الموجة. يحدث الانعكاس الداخلي الكلي عندما تمر الإشارة عبر حد فاصل بين وسطين: الأول $n_{material}$ ذو معامل انعكاس أكبر من الثاني n_{air} $(n_{material} < n_{air})$ بشرط ورودها بزاوية $\theta_1 > \sin^{-1}\left(\frac{n_{material}}{n_{air}}\right)$ بالنسبة للناظم.



الشكل(4) قانون سنل

$$\frac{sin\theta_1}{sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_{material}}{n_{air}} \quad (14)$$

2.2 تحديد ثابت العزل Define Dielectric Constant:

تتميز المواد العازلة بالمقدرة على تخزين الطاقة وذلك عند تطبيق حقل كهربائي خارجي عليها.

ثابت السماحية الكهربائية المطلق للعازل**ε**: هو عبارة عن معيار للطاقة الالكتروستاتيكية المخزنة ضمنه وهي تعتمد على نوع المادة، ويكافئه ثابت العزل المنسوب (ε_r) إلى ثابت العازلية للفضاء الحر (ε_0).

يمكن حساب معامل الانعكاس لمادة ماصة ما إذا استطعنا حساب الناقلية الكهربائية العقدية، النفوذية المغناطيسية العقدية، وناقليتها.

توجد طرق عديدة للحصول على ثابت عزل مادة ما، نذكر منها:

Free Space ،NRL Arch Free Space ،Transmission Line and Resonant Cavity methods

تعتمد الطريقة التي يتم اعتمادها لقياس ثابت العزل على شكل المادة: سائلة، صلبة، هشة، أو غازية.

الطريقة المستخدمة في هذا البحث لتحديد ثابت العزل هي طريقة Free Space وهي تتطلب التجهيزات التالية:

1- Agilent E8362B PNA Network Analyzer.
2- Agilent 85071E Material Measurement Software.
3- Two Horn Antennas.
4- Coaxial Cable, connector.
5- Agilent 85052 D 3.5mm Calibration Kit and Connectors.

3.3 تصميم ماص الأمواج المايكروية Microwave Absorber Design:

3.3.1 تصميم ماص الأمواج المايكروية الهرمي الشكل Design Pyramidal Microwave Absorber:

تم في هذا البحث تصميم الماص المايكروي بواسطة البرنامج الحاسوبي CSTMWS. حيث تم إختيار شكل الماص على هيئة هرم. النوع الهرمي هو النوع الأساسي لماص الأمواج المايكروية حيث أنه الشكل الأكثر إستخداماً في الأسواق التجارية حالياً.

وبما أن الهدف في هذا البحث هو إيجاد الشروط التي تؤمن نسبة جيدة من الإمتصاص فقد تم اعتماد القيمة $\varepsilon_r = 2.9$ لأن هذه القيمة تؤمن امتصاصية جيدة ضمن المجال الترددي من 1GHz ~ 20GHz.

في البداية لا بد من القيام بالمحاكاة لبعض المواص المعروفة عالمياً على نطاق واسع والتي تم قياس معامل الامتصاص لها

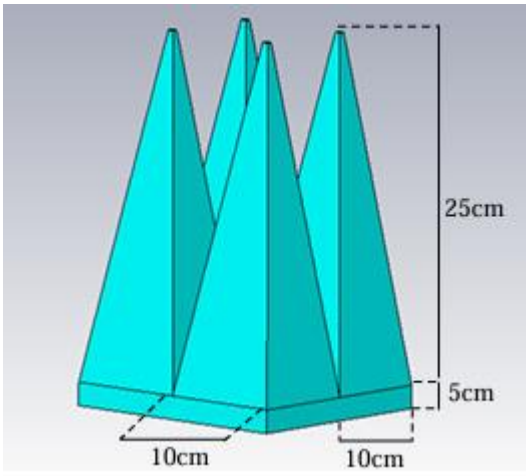
وذلك للتأكد من صحة تنفيذ المحاكاة الحاسوبية. من هذه المواص النموذجين التاليين:

1- TDK-ICT-030 High Power Absorber.
2- EMC-24CL Ultra Broadband Microwave Absorber.

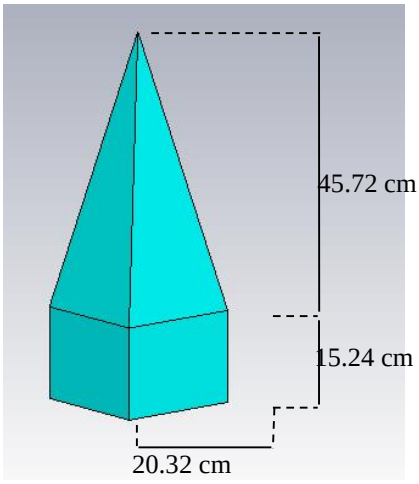
يبين الشكل (5) النموذج الأول TDK-ICT-030، بينما يظهر في الشكل (6) النموذج الثاني EMC-24CL.

القيمة المتوسطة لمعامل الإنعكاس في المرجعيات العلمية المستخدمة في تصميم الغرف الماصة هي $S_{11} = -32dB$ للنوع الأول (TDK RF Solution,2018,79)، و $S_{11} = -40dB$ للنوع الثاني (ETS.LINDGREN,2017,82).

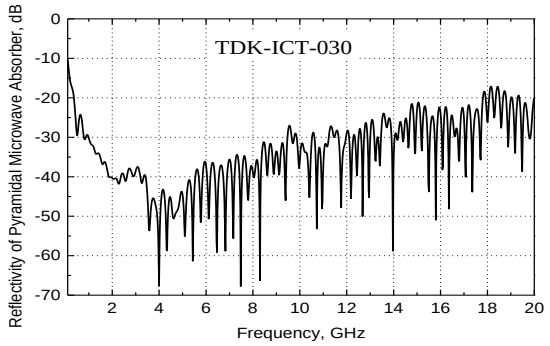
وتفسير الإختلاف في القيم للنموذجين المدروسين، هو بأن الإمتصاص يزداد بزيادة أبعاد الجسم الماص خاصة ضمن الترددات الدنيا. وقد تأكد لنا ذلك من خلال عملية المحاكاة وحساب متوسط معامل الإنعكاس على مجال ترددي واسع (أنظر الأشكال 7 و 8)، حيث تم الإكتفاء فقط بمحاكاة المجال الترددي GHz (0.06÷12) بالنسبة للماص الهرمي EMC-24CL لكبر حجمه ولما يتطلب ذلك من مقدرات حاسوبية كبيرة إن كان من حيث الذاكرة أو السرعة.



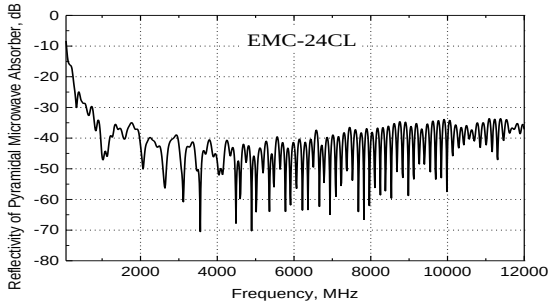
الشكل (5) الماص الهرمي TDK-ICT-030 (TDK RF Solution,2018,35)



الشكل (6) الماص الهرمي EMC-24CL (ETS.LINDGREN,2017,52).



الشكل (7) معامل الإنعكاس S_{11} للماص الهرمي من النوع TDK-ICT-030 القيمة المتوسطة لمعامل الانعكاس: $S_{11} = -33\ dB$



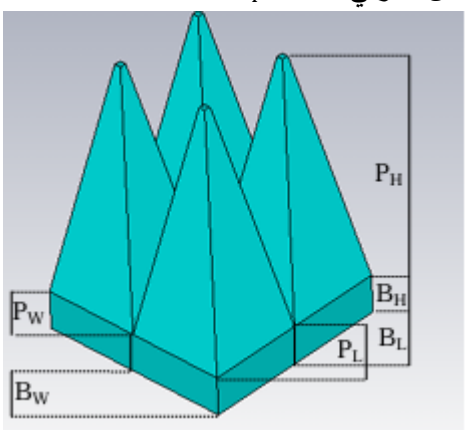
الشكل (8) معامل الإنعكاس S_{11} للماص الهرمي من النوع EMC-24CL، القيمة المتوسطة لمعامل الانعكاس: $S_{11} = -41\ dB$

يعتمد التصميم في هذا البحث على النموذج المرجعي TDK ICT-030.

إن أبعاد TDK ICT-030 هي: height lengthx30cm widthx10cm 10cm كما هو واضح من الشكل (5).

لكن في هذا البحث فإنه سيتم تخفيض الأبعاد:

heigh 14cm x 5cm length x 5cm width لسهولة تنفيذ المحاكاة الحاسوبية عند أبعاد صغيرة للماص الهرمي. ثابت عزل الماص الهرمي: $E_r = 2.9$



الشكل(9) مجموعة الماص الهرمي

الجدول (1) أبعاد الماص الهرمي

Part	Symbol	Dimension (cm)
Pyramid Width	P_W	5
Pyramid Length	P_L	5
Pyramid Height	P_H	12
Base Width	B_W	5
Base Length	B_L	5
Base Height	B_H	2

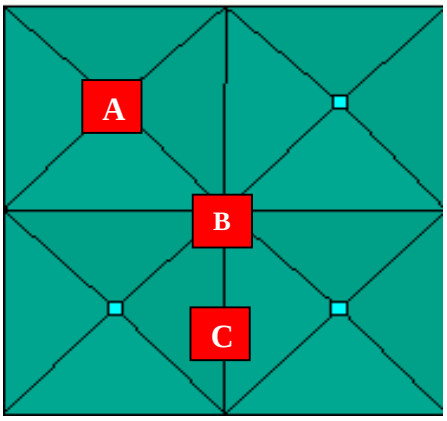
3.3.2الأوضاع النسبية بين الجسم الماص ومصدر الإشارة Port Condition:

إن مصدر الإشارة المستخدم عبارة عن فتحة دليل موجة، يمكن أن تؤخذ بمساحات مختلفة وعلى مسافات مختلفة ايضاً. كذلك يمكن دراسة تأثير الوضع الزاوي ما بين الفتحة والجسم الماص. يبين الجدول (2) الحالات الأربعة التي سيتم دراستها والمتعلقة بمصدر الإشارة (البوابة) والماص الهرمي الشكل.

الجدول (2) الأوضاع النسبية المتبادلة بين الماص ومصدر الإشارة

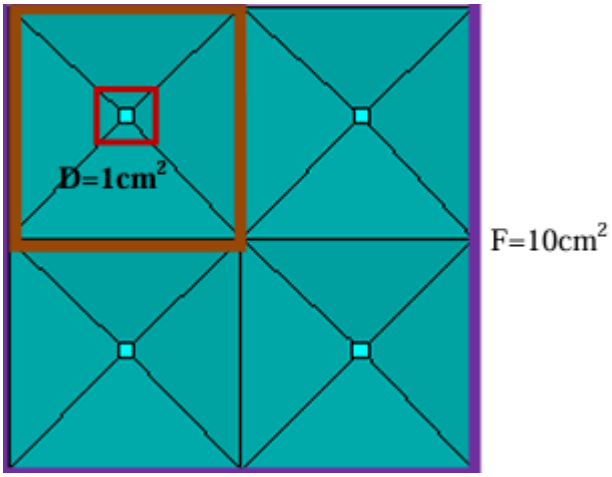
Port condition	Angle (^{0})	Distance (cm)	Areas (cm^2)
1	0	30	1
2	0	30	1,5,10
3	0,30,45	30	10
4	0	30,60,90	10

يوضح الشكل (10) الحالة الأولى، حيث تستخدم ثلاثة مواضع مختلفة للبوابة Port A, و B و C. تتموضع البوابة A على قمة الهرم، بينما تتموضع البوابة B بين المواص الأربعة، والبوابة C بين الهرمين الماصيين. المسافة بين البوابة ومنتصف الماص 30cm بينما الزاوية بين البوابة والهرم هي 0^0، ومساحة البوابة هي 1 cm^2



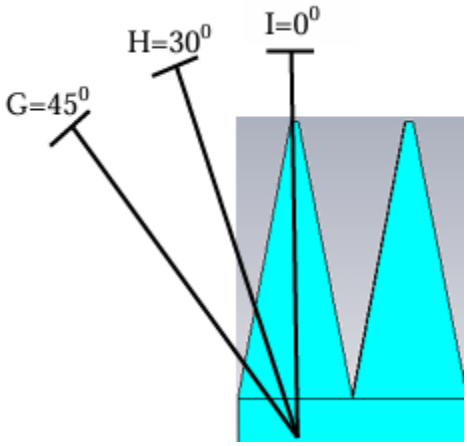
الشكل (10) مواضع مختلفة للبوابة على الماص الهرمي

الحالة الثانية هي مساحات مربعة مختلفة للبوابة, $1cm^2$, $5cm^2$, $10cm^2$. الزاوية والمسافة مثبتة كما في الحالة الأولى. تغطي البوابة F كامل المساحة 100% بينما تغطي البوابة E 25% والبوابة D تغطي 1% من الماص الهرمي، كما هو موضح على الشكل (11).



الشكل (11) مساحات مختلفة للبوابة

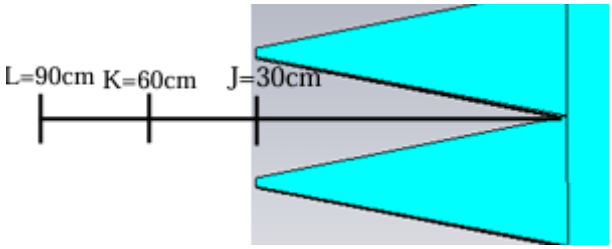
يبين الشكل (12) الحالة الثالثة: وهي زوايا مختلفة للبوابة: G، H و I بزوايا 45^0، 30^0، 0^0 على الترتيب. تستخدم هذه الحالة نفس المسافة كما في الحالة الأولى من أجل جميع البوابات.



الشكل(12) زوايا مختلفة للبوابة

يبين الشكل (13) الحالة الرابعة والأخيرة وهي مسافات مختلفة بين البوابة والهرم الماص: J، K و L بمسافات مختلفة 30cm، 60cm، 90cm على الترتيب.

مساحة البوابة 10 cm^2 والزاوية 0^o.



الشكل (13) مسافات مختلفة للبوابة

4. النتائج والمناقشة: Results and Discussion

إن الهدف من المحاكاة هو إيجاد الأداء الأفضل لماص الأمواج المايكروية الهرمي الشكل.

يجب أن يمتلك الماص معامل انعكاس S_{11} أقل من -10dB لكي يتم اعتباره ذو أداء جيد (Huang et al.,2019,6).

يمكن بواسطة البرنامج الحاسوبي CSTMWS الحصول على قيمة S_{11}.

تبين الجداول (3÷6) معامل الانعكاس S_{11} عند حالات مختلفة لمصدر الإشارة.

لا يمكن أن تُعَبر أكبر قيمة لـ S_{11} على الأداء الكلي للماص، حيث أنها تعبر عن مجال ضيق من الترددات، أما المعدل المتوسط فهو الذي سوف يعطي تصور كامل لأداء الماص.

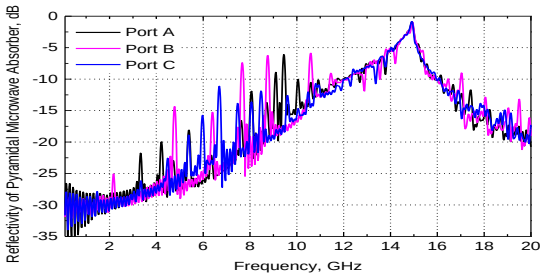
تستخدم قيمة معدل الانعكاس R_A في العلاقة (15) لإعطاء المعدل المتوسط للماص الهرمي على كامل المجال الترددي من 0.02 GHz إلى 20GHz.

$$R_A = \frac{\sum(R_{f_{0.02}} + R_{f_{0.04}} + \cdots + R_{f_{20.0}})}{1000} \qquad (15)$$

يبين الشكل (14) والجدول (3) أداء الماص وقيمة معامل الانعكاس S_{11} عند مواضع مختلفة بين البوابة والماص. حيث يتضح بأن تغيير مكان البوابة لا يؤدي لتغير ملحوظ على الأداء.

الجدول (3) قيم ومعدل معامل الانعكاس S_{11} عند مواضع مختلفة للبوابة

Port	S_{11} (dB)	
	Best	Average
A	-30.6	-17.8
B	-30.7	-17.10
C	-30.6	-17.08



الشكل (14) معامل الانعكاس S_{11} عند مواضع مختلفة بين البوابة والماص الهرمي

يبين الشكل (15) والجدول (4) أداء الماص الهرمي وقيمة معامل الانعكاس S_{11} عند مساحات مختلفة للبوابة. تعطي الحالة E أفضل قيمة لمعامل الانعكاس S_{11} بين البوابات الثلاث وهو -64.4 dB، لكن هذا لا يعني الأداء الحقيقي للماص حيث يبين فقط الأداء عند التردد 16.4GHz، بينما

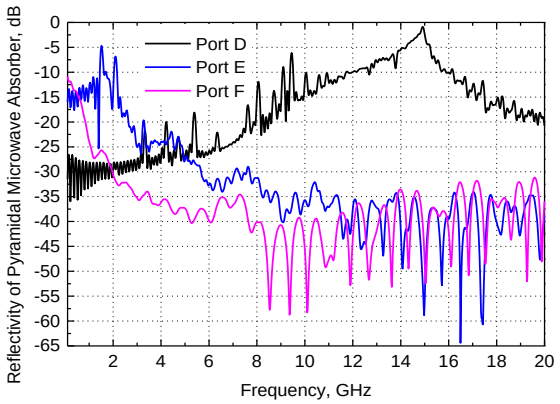
متوسط الانعكاس ضمن المجال الترددي 0.1÷20 GHz هو -32.6dB وهو أسوأ من الأداء في الحالة F الذي هو -37.5. تلعب مساحة البوابة عامل رئيسي ومؤثر على الأداء الامتصاصي، حيث تؤدي مساحات أكبر إلى ازدياد الأداء الامتصاصي. هذا بسبب أن إشارات أكثر يمكن أن ترسل عبر البوابات ذات المساحات الأكبر.

إن الفرق في قيمة معامل الانعكاس بين البوابة D ذات المساحة $1cm^2$ والبوابة F ذات المساحة $10cm^2$ هو dB 22.1- وهذا فرق كبير في الامتصاص.

أسوأ أداء هو عند مساحة $1cm^2$ مقارنة بالحالة F و E. المتوسط بالنسبة للحالة D هو -17.8dB. وهذه المساحة لا تلبي المتطلب -10dB ضمن المجال 12÷16 GHz. أسوأ نقطة للحالة D تعطي -2dB عند التردد 14.5GHz.

الجدول (4) قيم ومعدل معامل الانعكاس S_{11} عند مساحات مختلفة للبوابة

Port	Angle	S_{11} (dB)	
		Best	Average
G	45	-41.5	-10
H	30	-39	-15.5
I	0	-58.7	-37.5



الشكل (15) معامل الانعكاس S_{11} عند مساحات مختلفة للبوابة

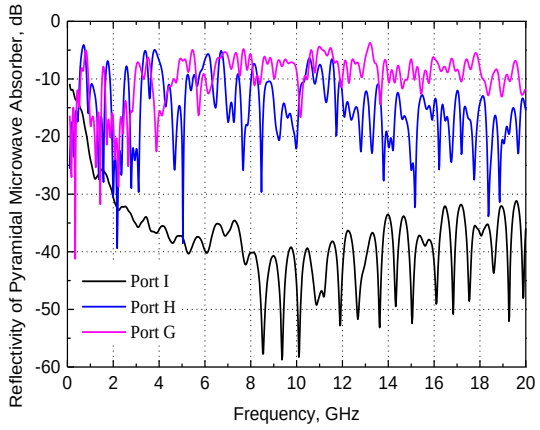
يبين الشكل (16) والجدول (5) أداء الماص الهرمي وقيمة معامل الانعكاس S_{11} عند زوايا مختلفة بين البوابة والماص الهرمي.

تعطي الزاوية المباشرة (0^0) أفضل أداء مقارنة بالزوايا المائلة، تعطي الحالة I متوسط انعكاسية 37.5 كما تعطي أفضل قيمة S_{11}=-58.7dB.

بتطبيق العلاقة (14) يتضح بأن سرعة الإشارة داخل الماص الهرمي والقادمة من البوابة I أكبر منها في حالتي البوابة G والبوابة H. لذا فإنها ستؤثر على الامتصاص الكلي للإشارة إلى الماص الهرمي. يمكن أن تؤدي إشارة أسرع داخل الماص الهرمي لقيم S_{11} أكبر.

الجدول (5) قيم ومعدل معامل الانعكاس S_{11} عند زوايا مختلفة بين البوابة والماص

Port	Areas (cm^2)	S_{11} (dB)	
		Best	Average
D	1	-30.6	-17.8
E	5	-64.4	-32.6
F	10	-58.7	-37.5



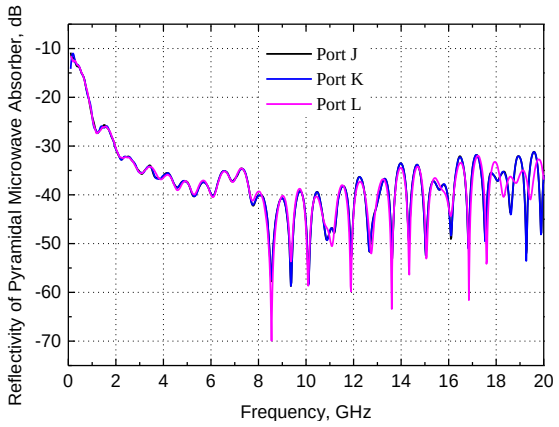
الشكل (16) معامل الانعكاس S_{11} عند زوايا مختلفة بين البوابة والماص

يبين الشكل (17) والجدول (6) الحالة الرابعة والأخيرة وهي عند مسافات مختلفة بين البوابة والماص الهرمي.

تبين بأنه عند المسافة 30cm فإنه يتم الحصول على أفضل متوسط وقيمة لـ S_{11}=-37.7dB، بينما الحالة الأسوأ هي عند مسافة 90cm بقيمة S_{11}=-37.5dB. تؤدي إشارة أكثر بعداً من البوابة إلى أداء أكثر سوءاً. هذا بسبب عند هذا الشرط تصبح الإشارة ضعيفة عند وصولها للماص مقارنة بالشرط عندما تكون أكثر قرباً.

الجدول (6) قيم ومعدل معامل الانعكاس S_{11} عند مسافات مختلفة بين البوابة والماص

Port	Distance (cm)	S_{11} (dB)	
		Best	Average
J	90	-58	-37.5
K	60	-58.7	-37.6
L	30	-70	-37.7



الشكل (17) معامل الانعكاس S_{11} عند مسافات مختلفة بين البوابة والماص

5. الاستنتاجات (Discussion):

يمكن أن نستنتج مما سبق بأنه توجد العديد من العوامل التي تؤثر على أداء الماص الهرمي الشكل المستخدم في الغرف الماصة رادارياً:

1- تلعب مساحة البوابة عامل رئيسي ومؤثر على الاداء الامتصاصي للماص الهرمي الشكل، حيث تؤدي مساحات أكبر إلى معامل امتصاص أكبر (انعكاس أقل).

2- تعطي زاوية الورود المباشرة (0^0) بين مصدر الاشعاع وقمة الماص الهرمي الشكل أفضل أداء للماص مقارنة بالزوايا المائلة.

3- تؤدي زيادة المسافة بين البوابة والماص الهرمي الشكل إلى أداء امتصاصي أسوء مقارنة بالمسافات الأصغر.

4- لا يؤدي تغيير مكان البوابة لأي تغير ملحوظ في الاداء الامتصاصي للماص الهرمي الشكل.

6 . التوصيات:

أوصي بأن يتم الأخذ بعين الاعتبار عند تنفيذ القياسات العملية في الغرف الماصة رادارياً للمخطط الاشعاعي للهوائيات وللتوافق الكهرطيسي EMC/EMI وللمقطع الراداري ولأية اختبارات لها علاقة بانتشار الأمواج الكهرطيسية بأن مساحة أكبر للبوابة وزاوية ورود مباشرة ومسافة أقل بين المواص الهرمية الشكل والجهاز الذي يتم تنفيذ القياسات عليه تعطي أفضل أداء امتصاصي للماص الهرمي الشكل (أي معامل انعكاس أقل).

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

(References):

[1] S. Hayati Raad, (2022), "Analysis and Design of Absorbers for Electromagnetic Compatibility Applications", Recent Topics in Electromagnetic Compatibility. Intech Open, doi: 10.5772/intechopen.100543.

[2] Xu Q, Huang Y. Anechoic and Reverberation Chambers, (2019), "Theory, Design, and Measurements". United States: Wiley-IEEE Press;

[3] Leland H.H. (2018), "Electromagnetic Anechoic Chambers. A Fundamental design and specification guide". IEEE Press. 219 PP.

[4] Fawwaz T. Ulaby, Eric Michielssen, Umberto Ravaioli, (1994), "FUNDAMENTALS OF APPLIED, ELECTROMAGNETICS", 6/e, Prentice Hall, p.518.

[5] Orakwue SI, Onu IP, (2019), "Pyramidal microwave absorber design for anechoic chamber in the microwave frequency range of 1GHz to 10GHz". European Journal of Engineering and Technology Research. 4 (10):1-3

[6] Q. Jian, W. Xiangyuan, Z. Hangfei, W. Ruixin,(2000), "Novel Pyramidal Microwave Absorbers For Out-Door Using", 5th Antennas, Propagation, and EM Theory (ISAPE 2000).

[7] Yohandri, Z Affandi, (2018), "Optimization of pyramidal radar absorber for anechoic chamber application", J. Phys.: Conf. Ser. 1116 032043, p.1-6.

[8] Sittakul V, Hongthong S, Pasakawee S. (2015), "Design and analysis of GTEM cell using the ferrite-tile and pyramid absorbers for EMC Test in National Institute of Metrology (Thailand)". In: IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). Chiang Mai, Thailand: IEEE; pp. 1–4

[9] Park M-J, Kim S-S. (2016), "Design of wide bandwidth pyramidal microwave absorbers using ferrite composites with broad magnetic loss spectra". Electronic Materials Letters. 12(5):610-614

[10] Shu-Ping Lv, Shun-Hua Liu & Yan-Bo Zhao (2005), "Design And Analysis Of A Pyramid Absorber", Vertex Angle, Materials Technology, 20:4, 211-213, DOI: 10.1080/10667857.2005.11753140

[11] I. M. Ibrahim, N. M. Yaakob, M. N. Husain, Sian Meng Se, A. Shaaban, (2011), "The Effect of The Carbon to The S11 Measurement on The Pyramidal Microwave Absorber", IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA), pp. 141–145.

[12] Balanis, C.A. (2016), "Antenna Theory: Analysis and Design", 3 rd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA.

[13] R. F. Harrington, (1961), "Time-Harmonic Electromagnetic Fields", New York:McGraw-Hill.

[14] William H. Hayat, Jr, (2001), "Engineering Electromagnetic", 6th ed, McGraw-Hill, p. 597.

[15] TDK RF Solution Inc, (2018), "Absorber for Microwave and Millimeter Wave Test Chamber.

[16] ETS.LINDGREN, (2017), "An ESCO Technologies Company, EMC Anechoic Absorber, EMC-24CL".