

الدراسة التجريبية لمبرد ترموصوتي

الدكتور عهد محمود سليمان *

(تاريخ الإيداع 23 / 3 / 2010. قُبل للنشر في 6 / 3 / 2010)

□ ملخص □

يهتم العلم الترموصوتي بدراسة التفاعل بين الظواهر الصوتية والظواهر الحرارية، مثل تحويل الطاقة الصوتية إلى طاقة حرارية (حالة المبرد)، وبالعكس في حالة المحرك. يُترجم هذا التفاعل في حالة المبرد بانتقال الحرارة ضمن الطبقة الحدية الحرارية بشكل مواز للجدار نتيجةً لرد فعل الموجة الصوتية مع الجدار. تحدث هذه الظاهرة ضمن المبرد الترموصوتي بفضل استخدام مجدّد مؤلف من صفائح متوازية ومتراصة تدعى (Empilement) كما في حالة السيراميك، أو من حبيبات كروية تحصر فيما بينها مسامات فراغية مشكلة ما يسمى بالوسط المسامي كما في حالة رمل الصوان (Silice). يتوضع هذا المجدّد ضمن مرنان صوتي يُنتج موجة صوتية عالية المستوى عندما يتم تحريضه بتردد طنين، مسبباً حدوث الأثر الترموصوتي الذي يخلق فرقاً في درجة الحرارة بين طرفي المجدّد. إن إضافة مبادلات حرارية على كلا طرفي المجدّد يسمح باستخلاص الحرارة من جهة وتفريغها من جهة أخرى. يتضمن هذا البحث التحديد الدقيق لشروط عمل هذا المبرد ودراسة المجدّد، ثم تحديد ترددات المرنان تجريبياً، وكذلك دراسة تأثير تنوع طبيعة مادة المجدّد على هذه الترددات. يتم في المحاولات الأولية تحديد شروط عمل المبرد النموذجي، ودراسة مادة رمل الصوان على شكل حبيبات كروية. وفيما بعد يتم التحديد الأمثل للمبادلات الحرارية من أجل الحصول على مبرد ترموصوتي تام.

الكلمات المفتاحية: الأثر الترموصوتي، المرنان، المجدّد، تحويل الطاقة، المصدر الصوتي، القياسات الفيزيائية، المبادلات الحرارية.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Étude expérimentale d'un réfrigérateur thermoacoustique

Dr. Ahed Suleiman *

(Déposé le 23 / 3 / 2010 . Accepté 3 / 6 / 2010)

□ Résumé □

La thermoacoustique concerne l'étude de l'interaction entre des phénomènes acoustiques et des phénomènes thermiques: conversion d'énergie acoustique en énergie thermique (cas réfrigérateur) et inversement (cas moteur). Elle se traduit, dans le cas réfrigérateur, par un transport de chaleur dans la couche limite thermique lors de l'interaction d'une onde acoustique et d'une paroi. Dans un réfrigérateur thermoacoustique, ce phénomène est exploité au moyen d'un régénérateur constitué des empilements des plaques parallèles comme dans le cas de cordiérite, ou des grains granulaires produisant le milieu poreux comme dans le cas de l'Aérogel de silice. Ce régénérateur est placé dans un résonateur acoustique qui crée une onde acoustique de fort niveau où l'effet thermoacoustique induit une différence de température entre les extrémités du régénérateur. L'ajout d'échangeurs de chaleur de part et d'autre de l'empilement permet d'extraire la chaleur d'une part et de l'évacuer de l'autre. Le but de cette recherche est de déterminer de façon fine les modes de fonctionnement de réfrigérateur, ainsi, l'étude du régénérateur; et de déterminer expérimentalement les fréquences de résonance, ensuite l'étude de l'influence de variation de la nature de matériau du « Stack » sur ces fréquences. Enfin, les échangeurs de chaleur pourront être optimisés afin d'aboutir à un réfrigérateur thermoacoustique complet.

Mots-clés : *L'effet thermoacoustique, Résonateur, Régénérateur, Conversion de l'énergie, Source acoustique, Mesures physiques, Echangeurs thermiques.*

* Maître de conférences- Département de Génie de Force Mécanique -Faculté de Génie Mécanique et Electrique- Université Tichrine -Lattaquié- Syrie.

مقدمة:

يُعرف الأثر الترموصوتي بتحويل الطاقة الصوتية إلى طاقة حرارية (حالة المبردات) أو العكس (حالة المحركات). ينتج هذا التحويل في حالة المبردات نتيجة لرد فعل الموجة الصوتية من جدار صلب، ويترجم بانتقال الحرارة ضمن الطبقة الحدية الحرارية بشكل مواز للجدار. للاستفادة من هذه الظاهرة يجب أن يتألف المبرد الترموصوتي من مجدّد (Régénérateur)، الذي يتكون بشكل عام من مادة مسامية متوضعة ضمن مرنان صوتي (Résonateur). يسمح هذا المرنان بالعمل مع موجة صوتية قوية. يسبب التفاعل بين موجة الصوت والجدار الصلب اختلافاً في درجة الحرارة بين طرفي المجدّد. ولاستغلال هذه الظاهرة، يتم وضع مبادلين حراريين على طرفي المجدّد البارد و الساخن.

إن تصنيع الآلات الترموصوتية نال اهتمام الباحثين كونها تتميز ببعض المحاسن: مثل الوثوقية والمتانة ولا تستخدم غازات ضارة للبيئة، كذلك المستخدمة في الآلات التقليدية. كما أنها تسترجع كميات الحرارة الضائعة (على سبيل المثال بتركيب محرك ترموصوتي مع مضخة حرارية)

بعد تقديم موجزاً للدراسة المرجعية سيتم وصف تجريبي للمبرد الترموصوتي، ومن ثم استثمار القياسات المنجزة لإجراء الحسابات العددية اللازمة، باستخدام برنامج Matlab لـ (تردد المرنان فارغاً، أو بوجود مجدّد من السيراميك أو من رمل الصوان، وذلك لطولين مختلفين للمجدّد، وكذلك اختبار تأثير موقع المجدّد للمصدر الصوتي على تردد المرنان، وتحديد الاستطاعة الصوتية على كامل طول المرنان و بتوضعات مختلفة للمجدّد، وفي النهاية قياس فرق درجات الحرارة بين طرفي المجدّد عند تشغيل المبرد). كما سيتم الحديث عن الرؤية المستقبلية لهذا العمل.

أجري هذا البحث في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين بعد استثمار القياسات التي تم الحصول عليها بالاتصال الشخصي مع مخبر فيزياء الإنسان التطبيقي وبيئته (PHASE) بجامعة بول ساباتييه (Paul Sabatier)، تولوز - فرنسا.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث كونه يقدم نوعاً جديداً من آلات التبريد، التي لا تتطلب أجزاء متحركة وتملك بساطة في الصنع و محافظة على البيئة من حيث استخدامها لغازات غير ضارة بالبيئة، كذلك المستخدمة في آلات التبريد الكلاسيكية مثل CFC أو HCFC. بالرغم من تصميم عدة نماذج من آلات التبريد الترموصوتية، فإنه يلزم الكثير من البحث ضمن هذا المجال للوصول إلى التصميم الأفضل والتحديد الدقيق لشروط عمل هذا المبرد، ودراسة العنصر الأساسي فيه (المجدّد) والحصول على المردود الأمثل له مقارنة مع الآلات الكلاسيكية، وكذلك دراسة تأثير تنوع طبيعة مادة المجدّد على ترددات المرنان. ومن جهة أخرى تحديد طبيعة المبادلات الحرارية الملائمة، والواجب وضعها على طرفي المجدّد، لضمان الحصول على مبرد ترموصوتي تام.

طرائق البحث ومواده:

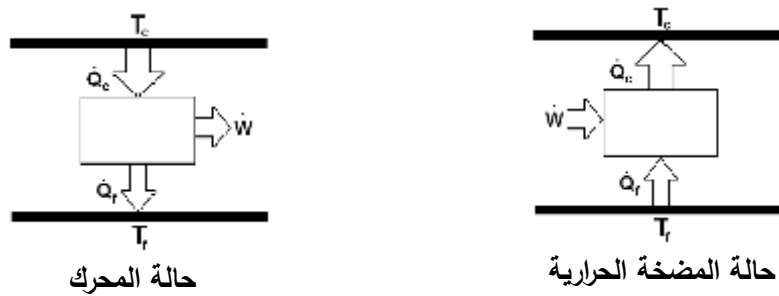
في البداية لا بد من إعطاء لمحة تاريخية عن هذه الآلات حيث تكاثفت الأبحاث في المجال الترموصوتي منذ ثمانينيات القرن الماضي. فمثلاً اهتمت وكالة الفضاء الأمريكية NASA بتصميم آلات ترموصوتية ميكروية من أجل التبريد الإلكتروني لمجمعاتها. بالإضافة لذلك أنجز فريق Swift [1] في مختبر Los Alamos National Laboratory محركاً ذا موجة مستقرة. كما أنجز خلال العشرين سنة الماضية عدة نماذج تجريبية:

- محركات ذات موجة متعاقبة [2]، [3].
- مبردات: [4]، [5].

كما مر أعلاه ينتج الأثر الترموصوتي عن تفاعل الموجة الصوتية مع الجدار الصلب، وهنا يمكن أن نميز حالتين:

1- الجدار ذو درجة حرارة متجانسة، وعلى تماس مع الموجة الصوتية، ستعطي الموجة قسماً من طاقتها للجدار وستسمح بتولد تدفقاً حرارياً ضمن وخارج الطبقة الحدية الحرارية بين طرفي الجدار، مولدة بذلك تدرجاً حرارياً، تدعى هذه الحالة بالمضخات الحرارية.

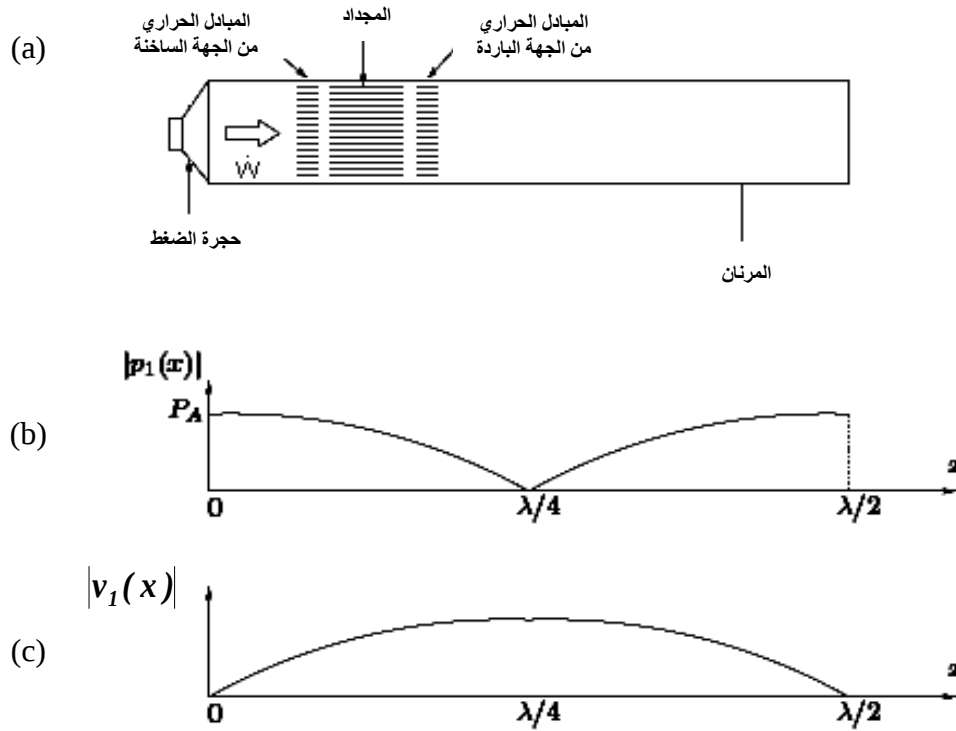
2- الجدار هو المقر لتدرج حراري مهم: الفرق الكبير في درجة الحرارة بين المنطقة الساخنة والمنطقة الباردة سيسمح بإرسال موجة صوتية، وبتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة صوتية. تدعى هذه الحالة بحالة المحركات. يختلف كلا النموذجين السابقين للآلات الترموصوتية في مستوى تدرج الحرارة الوسطي. يمكن تعريف القيمة الحدية لهذا التدرج، حيث ضمن حالة المائع المثالي تساوي النسبة بين سعة تغيرات درجة الحرارة الناتجة عن الضغط الأديباتي للموجة، والتوضع الصوتي. إذا كان التدرج الحراري الوسطي بين طرفي المجداد أصغر من تلك القيمة الحدية فإن الآلة تعمل كمبرد و في الحالة العكسية فإن الآلة تعمل كمحرك. هذين النموذجين من الآلات يخضعان لقوانين الترموديناميك، حيث المبدأ الأول (حفظ الطاقة) يعطي: $\dot{Q}_c + \dot{Q}_f + \dot{W} = 0$ والمبدأ الثاني (خفق الأنتروبي) يعطي: $\dot{Q}_c/T_c + \dot{Q}_f/T_f \leq 0$. بحسب ما هو متفق عليه في الترموديناميك فيما يتعلق بالإشارة، فالعمل يُنتج ضمن حالة المحرك و يُمتص ضمن حالة المضخة الحرارية. يمكن تمييز هذين النوعين من الآلات الحرارية كما في الشكل (1).



الشكل (1) نموذجين للآلات الحرارية: محرك حراري ومضخة حرارية

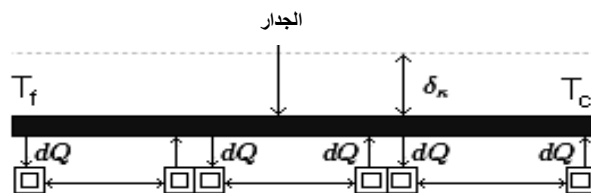
سنتناول في هذا البحث آلية عمل المبرد الترموصوتي المزود بأنبوب مغلق. يتألف هذا المبرد من مصدر صوتي، ومرنان (أنبوب مغلق) يحوي على غاز معين (هواء، أرغون، هيليوم...)، ومن مجداد مؤلف من (تراس من صفائح صلبة و وسط مسامي)، و من مبادلين حراريين (بارد وساخن). إن طول المرنان يساوي نصف طول الموجة الصوتية λ ، وذلك من أجل الحصول على موجة مستقرة، ويتوضع المجداد في الربع الأول من الأنبوب،

حيث كثافة الاستطاعة الصوتية المساوية لـ « $p.v$ » تكون أعظم ما يمكن. الحد p يوافق سعة تغيرات الضغط، و v السرعة الصوتية وتساوي $v = p/\rho c$ (ρ الكثافة الحجمية للمائع، c سرعة الصوت). يُزود هذا المبرد بموجة رنانة مستقرة، حيث بروفيلي السرعة الصوتية والضغط موضحان على الشكل (2).



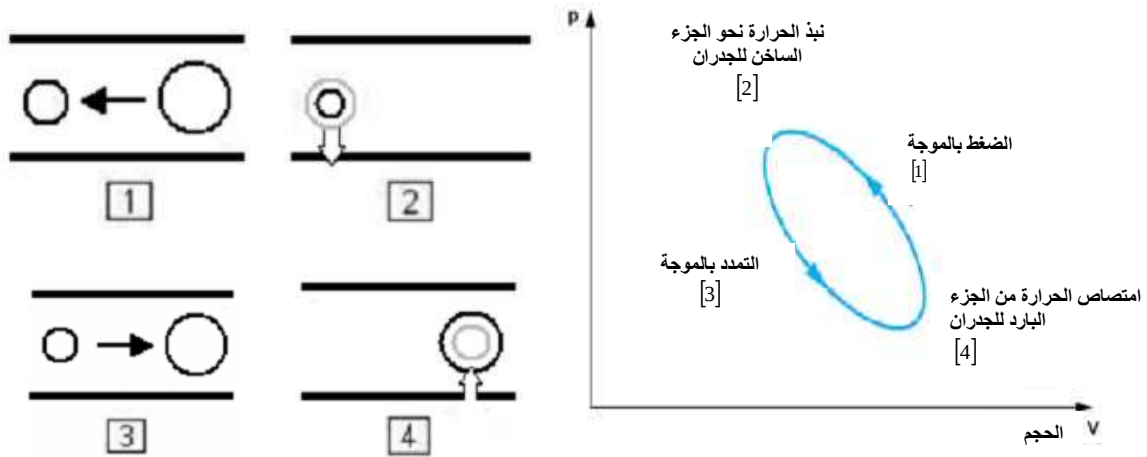
الشكل (2) (a) مبرد ترموصوتي ذو أنبوب مغلق، (b) بروفيل الضغط الصوتي، (c) بروفيل السرعة الصوتية

ينتج الأثر الترموصوتي في مستوى المجداد، خالفاً تدفقاً للحرارة موازياً للصفائح متوجهاً نحو جهة الضغط الأكبر والأقرب. من أجل إيضاح هذه الظاهرة تم وضع مبادلين حراريين على طرفي المجداد، ويصبح هذا المجداد هو المقر للتدرج الخطي لدرجة الحرارة، المُنظَّم بهذين المبادلين.



الشكل (3) انتقال الحرارة بين طرفي صفيحة بواسطة جزيئات المائع على التسلسل: حالة المبرد

يزداد التدفق الحراري (الشكل 3) بفضل حلقات (الضغط/ التمدد) التي تخضع لها جزيئات المائع ضمن الطبقة الحدية الحرارية بجوار الجدار (الشكل 4). تحت تأثير الموجة الصوتية تتضغط جزيئات المائع (1)، لتعطي جزءاً من حرارتها Q_c إلى الصفيحة (2). تتمدد الجزيئات فيما بعد (3) قبل أن تمتص كمية من الحرارة Q_f من الصفيحة (4).



الشكل (4) دورة الغاز الخاضع لموجة صوتية: التفاعل بين المانع والجسم الصلب ضمن منطقة الطبقة الحدية الحرارية

تصنيع المبرد الترموصوتي:

1- الوصف التجريبي

سيتم في هذا القسم توصيف المواد المستخدمة لتصميم المحطة التجريبية.

المرنان (Résonateur):

له شكل حلقي بطول 1.5 m من أجل الحصول على موجة رنين قوية في مستوى المجداد (الشكل 5). يتألف المرنان من قطعة حاملة لحجرات الضغط، ومن 4 أكواع من الفولاذ، تصنيع الأجزاء المستقيمة من الزجاج (plexiglas) للتمكن من قياس درجات حرارة جزيئات المائع في مستوى المجداد، وللتحكم بموقع كل من المزدوجات الحرارية والمجداد. يزود هذا المرنان بأربعة ميكروفونات ذوات قطر 13.2 mm يرتبط كل ميكروفون بالمرنان بواسطة حجرة تحوي ثقباً ذا قطر 0.6 mm. تقيس هذه الميكروفونات مستوى الضغط قبل وبعد المجداد.



الشكل (5) المحطة التجريبية

المجداد (الوسط المسامي) (Régénérateur):

في البداية تم اختبار مجدادين مصنَّعين انطلاقاً من حجرة أحادية مصنوعة من سيليكات المنغزيوم والألمنيوم (سيراميك) ($\text{Al}_3\text{Mg}_2\text{AlSi}_5\text{O}_{18}$ - cordierite)، وبطولين مختلفين 6cm و 10cm. يتكون الوسط المسامي من قنوات ذات مقطع مربع بأبعاد 0.9×0.9 mm، سماكة السطوح الصلبة 0.1 mm. أظهرت نتيجة هذا الاختبار أن السيراميك كاتم للموجة الصوتية، لذلك تم التوجه إلى استخدام مادة أخرى لتصنيع المجداد. والمجداد الجديد عبارة عن أنبوب من البلاستيك (PVC) بقطر 37 mm وبطولين مختلفين 6cm و 10cm، مملوء بحبيبات من رمل الصوان (Aérogel de silice)، وتحصر فيما بينها فراغات مشكَّلة الوسط المسامي. هذه المادة تقدم خاصيتين مهمتين: تحوز على سطح تبادل مهم (مائع وجسم صلب) حيث إنَّها مُكوَّنة من الهواء بنسبة 80%، كما أن لها عامل توصيل حراري ضعيف (0.02 W/m/K). تم وضع قطعة من الحرير الشفاف للموجة الصوتية على كلا طرفي الأنبوب لمنع حبيبات الرمل من الخروج عبر المبادلين الحرارين المتوضعين على طرفي المجداد والمكونين من شبكتين نحاسيتين ملحومتين على أسواره من النحاس لهما قطر الأنبوب نفسه (37mm). تحصر هاتان الشبكتان فراغاً مربع الشكل قدره ($4 \times 4 \text{ mm}$). يبين الشكل (6)، المجداد مع المبادلين الحرارين وحبيبات رمل الصوان.



الشكل (6) المجداد المصنَّع من (PVC) مع المبادلات الحرارية (على اليمين)، و حبيبات رمل الصوان (سيليس) (على اليسار).

المصدر الصوتي (Source acoustique):

مؤلف من ثلاث حجرات للضغط استطاعة كل منها 100W، وموصولة على التوازي من أجل توقيت إشارتها. هذه الحجرات محمية بوساطة قواطع ومقياس أمبير ومقادة بوساطة الكمبيوتر.



الشكل (8) قياس درجات الحرارة



الشكل (7) المصدر الصوتي، مكوّن من ثلاث حجرات للضغط موصولة على التوازي

2 - المقادير المقاسة تجريبياً

أ- قياس المقادير الصوتية (Mesure des grandeurs acoustiques):

يمكننا بمساعدة الميكروفونات قياس مستوى الضغط الصوتي بالديسبل (dB). حيث يُحدد الضغط من العلاقة الآتية:

$$P = 20 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) ; \quad P_{ref} = 2.10^{-5} Pa$$

P_{ref} : الضغط المرجعي.

تتصل هذه الميكروفونات بسلسلة قياس مكوّنة من مكبرات ومن جهاز لقياس الجهد (Oscilloscope). يتوضع اثنان من هذه الميكروفونات قبل المجداد، والاثنان الآخران متوضعان بعد المجداد، وبفضل هذه السلسلة يمكن رفع قيمة السرعة الصوتية على جانبي المجداد، ورفع كثافة الاستطاعة الصوتية (p.v) في مستوى المجداد. تم إحكام السد في مستوى مأخذ الضغط بواسطة مادة التيفلون (téflon)، وذلك لمنع التسربات من داخل المرنان عبر الثقوب ذات قطر 0.6 mm. تم استخدام الهواء كوسيط عامل ضمن هذا المرنان لبساطته واستخدامه ولتخفيض الكلفة المادية، غير أنه من الممكن استخدام غازات أخرى كالهيليوم والآرغون. في الواقع إن استخدام غاز ذي عدد براندل أصغر من عدد براندل للهواء يسمح بتحسين المردود [6].

ب- قياس درجات الحرارة (Mesure des températures):

من أجل قياس الاختلاف في درجة الحرارة بين طرفي المجداد الناتج عن الأثر الترموصوتي، تم وضع 4 مزدوجات حرارية مُعايرة من نوع K على شبكتي النحاس المتوضعين على طرفي المجداد، اثنان على كل شبك (في مركزه وعلى محيطه). تُسجل درجات الحرارة بواسطة وحدة اقتناء (HP3497A) عن طريق الحاسب بواسطة جهاز مقياس للجهد مدمج ضمن وحدة الاقتناء، يقيس هذا الجهاز قيمة الجهد بين طرفي المزدوجة الحرارية، يتمكن الحاسب من قيادة وحدة الاقتناء وحساب درجة الحرارة كناتج لفرق الجهد، بواسطة كرت الربط (AT-GPIB).

النتائج والمناقشة:

بما أن حقل السرعة معقّد ضمن المجداد، ممّا يجعل قياس التدفقات الصوتية ضمنه معقّداً، بينما يمكن حساب الممانعة، وكذلك الخصائص المميزة للحقل الصوتي. من أجل تحديد تردد المرنان، تم استخدام طريقة قياس الممانعة

كتاب للتردد بمساعدة ميكروفونين [7] و [8]. في البداية تم تحديد التردد للمرنان فارغاً وبعدها للمرنان مع نوعين للمجداد (سيراميك أحادي الحجرة - رمل السيليس)، وذلك لطولين مختلفين للمجداد (6cm و 10cm).

1.4 تحديد تردد الرنين للمرنان الفارغ (بدون مجداد)

يستخدم مرنان حلقي وله المواصفات الآتية:

- طول الموجة: $\lambda = 2L_r = 3 \text{ m}$
- العدد الموجي: $k = 2\pi/\lambda = 2.09 \text{ m}^{-1}$
- سرعة الصوت: $c_0 = 331.45\sqrt{T/273} = 344.5 \text{ m/s}$ عند درجة الحرارة (T=295 K).
- التردد: $f = c_0/\lambda = 114.8 \text{ Hz}$
- نبض الموجة الصوتية: $\omega = 2\pi f = 721.6 \text{ s}^{-1}$

قبل تقديم النتائج سيتم وصف طريقة حساب الممانعة: نقوم بتطبيق تردد من 50 إلى 1000 Hz (chirp) خلال زمن قدره (2 s)، مع تردد للعينة و قدره 25000 Hz ، يقيس كل ميكروفون الإشارة كتابع للضغط و السرعة. يُمكن جهاز قياس الجهد (Oscilloscope) من رسم هذه الإشارات كتابع للزمن، ومن ثم نطبق تحويل فورييه لكل إشارة (s_1 و s_2).

$$s_1 = \alpha p + \beta \rho c v$$

$$s_2 = \gamma p + \delta \rho c v$$

حيث $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ بارامترات تعتمد على الشكل الهندسي للنظام المدروس. نشير إلى الممانعة بـ $Z = p/v$ و إلى $y = s_2/s_1$ بنسبة الإشارات. نستطيع بالنهاية من تحديد الممانعة ضمن حالة المرنان الفارغ من العلاقة التالية [7]:

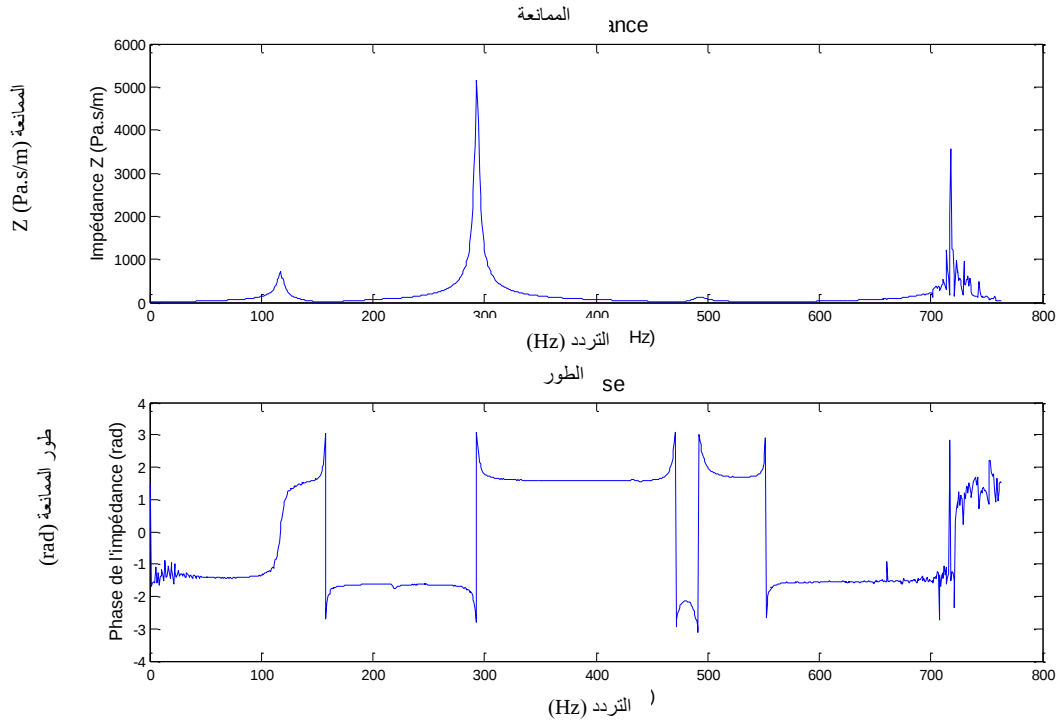
$$Z(\omega) = -i\rho c \left(\frac{ck}{\omega} \right) \frac{y \sin(kL_1) - \sin(kL_2)}{y \cos(kL_1) - \cos(kL_2)} \quad (1)$$

حيث L_1 و L_2 يمثلان بعد الميكروفونين لنقطة مرجعية. إن حساب الممانعة يتطلب معرفة عدة بارامترات:

- المسافة الحرة الوسطية للزجة للمائع: $I_v = 3.986 \times 10^{-8} (1 + 4.73 \times 10^{-3} (T - 273))$
- المسافة الحرة الوسطية الحرارية للمائع: $I_h = 5.61 \times 10^{-8} (1 + 5.13 \times 10^{-3} (T - 273))$
- تابع الضياع: $\varepsilon = \frac{1}{R_a} \sqrt{\frac{c_0}{4\pi f}} (\sqrt{I_v} + 0.402 \sqrt{I_h})$ ، حيث R_a نصف قطر الأنبوب.
- العدد الموجي: $k = \frac{\omega}{c_0} (1 + \varepsilon - i\varepsilon)$
- سرعة الصوت: $c = \frac{c_0}{1 + \varepsilon}$

نحدد ترددات الرنين وذلك بمرور الطور عند القيمة صفر والموافقة لظهور نتوء حدي بارز للممانعة Z . يبين الشكل (9) التردد الأول للمرنان الذي يساوي 117 Hz، والذي يكون في الواقع قريب جداً من القيمة النظرية و البالغة:

$$f = c/\lambda \approx 115 \text{ Hz}$$

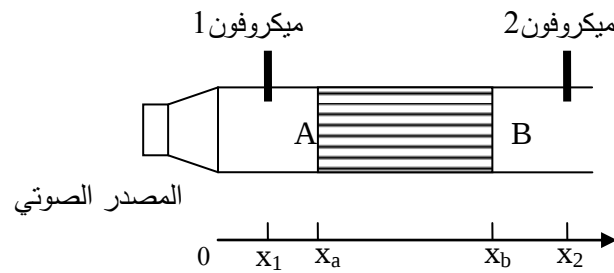


الشكل (9) الممانعة والطور كتابع للتردد ضمن حالة المرنان الفارغ

2- تحديد تردد الرنين للمرنان بوجود مجداد

إن وجود المجداد يعقّد حساب الممانعة، وكذلك تردد المرنان. نحدد في البداية قيم الضغط P_1 و P_2 كتابع للزمن في مستوى الميكروفونين انطلاقاً من قيم الجهد s_1 و s_2 بعد ضربهما بنسبة مساحة السطحين ($S_{\text{microphone}}/S_{\text{trou}}$)، اللذين يمثلان مساحة سطح الميكروفون على مساحة سطح الثقب ضمن الحجرة المخصصة للميكروفون ضمن المرنان، وكذلك بحساسية الميكروفونين بوحدة الـ (mV/Pa). و نحصل على قيم الضغط كتابع للتردد بعد تحويل فورييه. نحدد فيما بعد الممانعة بالاستناد إلى [9] على النحو الآتي:

$$Z(\omega) = \frac{P_A - P_B}{P_A} Z_A$$



الشكل (10) المحطة التجريبية

P_B, P_A يمثلان الضغط في بداية و نهاية المجداد، ويحددان من حل نظام المعادلات الآتية:

$$P_A = Ae^{-ikx_a} + Be^{-ikx_a}$$

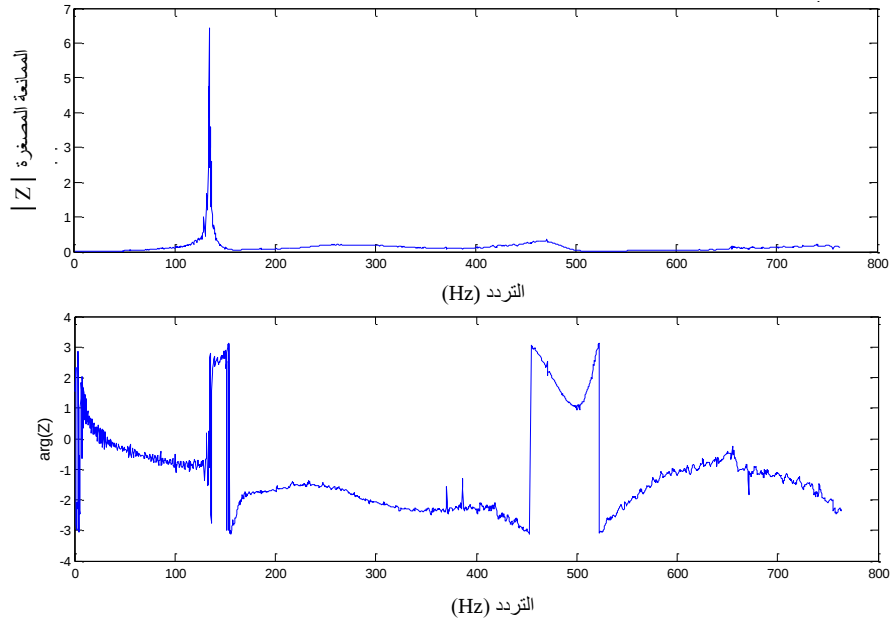
$$P_B = Ae^{-ikx_b} + Be^{-ikx_b}$$

حيث x_a, x_b يمثلان المسافة التي تفصل طرفي المجداد عن المصدر الصوتي. أما الممانعة في بداية المجداد فتحدد من العلاقة (1).

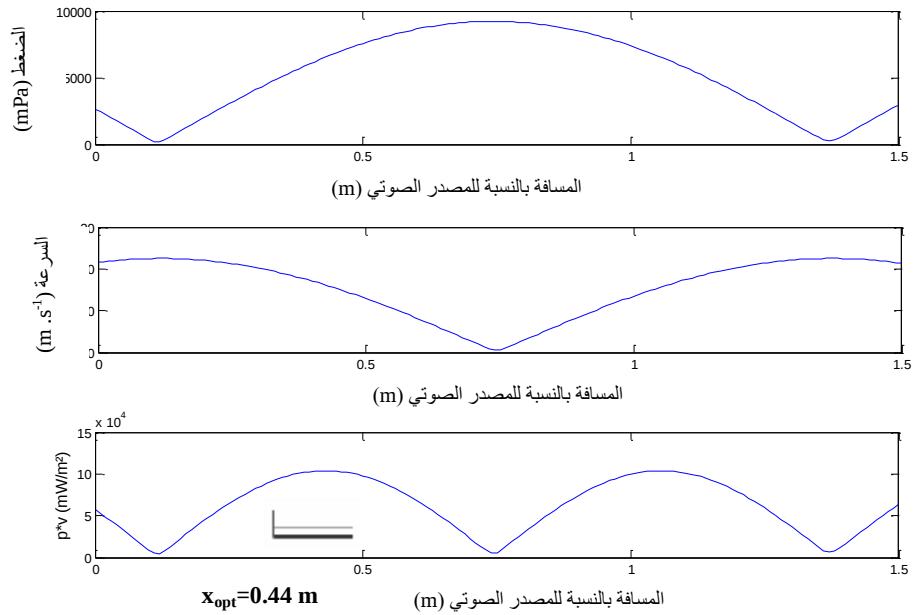
2-1- المجداد من السيراميك

تم اختبار طولين للمجداد من السيراميك هما 6cm و 10cm، كما تم تغيير موضع المجداد ضمن المرنان، وذلك لعدة مسافات متغيرة من 32 cm إلى 39 cm بين بداية المجداد و المصدر الصوتي، وذلك من أجل دراسة تأثير موقع المجداد على التردد. قمنا برسم الممانعة المصغرة و الطور كتابع لتردد الموجة الصوتية، وكذلك قيم الضغط والسرعة والاستطاعة الصوتية كتابع للمسافة عن حجرات الضغط، وذلك على كامل طول المرنان. تظهر الأشكال (11-18) تردد الرنين والتوضع الأمثل للمجداد الذي يجب أن يوافق قدر الإمكان لـ (الاستطاعة الصوتية $p.v$ الأعظمية).

يظهر الشكل (11) أن قيمة الممانعة عند التردد الأول (134.51 Hz) أكبر من قيمتها عند التردد الثاني (452.8 Hz). وهذا ما يُفسر بكتامة مجداد السيراميك للموجة الصوتية عند زيادة التردد.

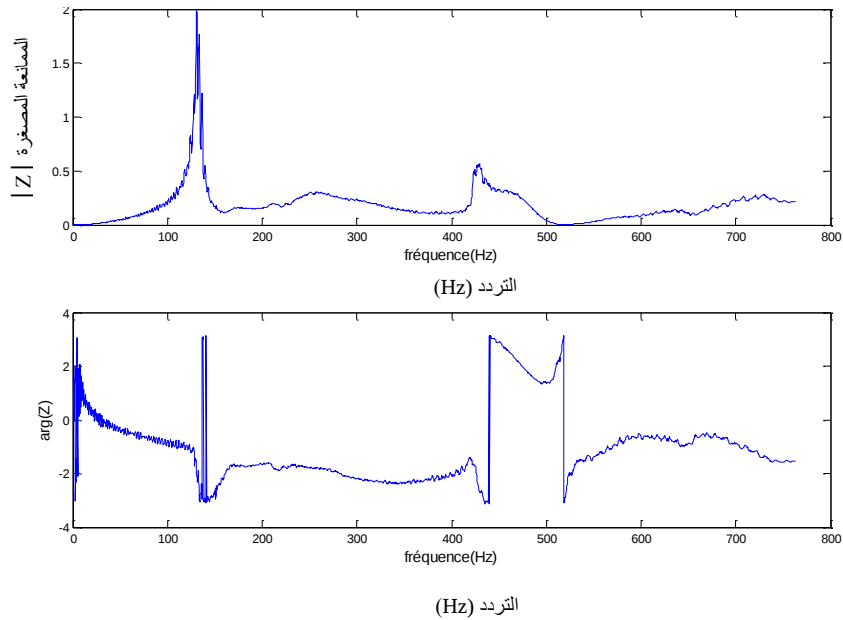


الشكل (11) قيم الممانعة المصغرة والطور كتابع للتردد على كامل طول المرنان
(حالة المجداد من السيراميك 6 cm وتبعد بدايته 34 cm من المصدر الصوتي)



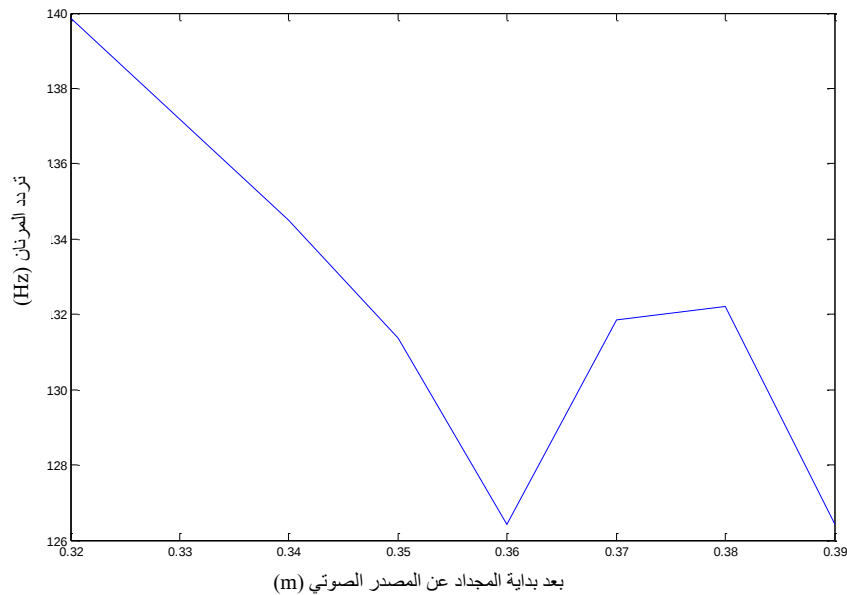
الشكل (12) الضغط، السرعة و الاستطاعة الصوتية (x_{opt} : يمثل الموقع الأمثل للمجداد ضمن المرنان)
(حالة المجداد من السيراميك 6 cm وتبعد بدايته 34 cm من المصدر الصوتي)

من أجل دراسة تأثير طول المجداد، تم اختبار المجداد ذي الطول 10cm، وذلك بوضعه ضمن المرنان بالبعد السابق نفسه عن المصدر الصوتي ($x_A=34$ cm). يظهر الشكل (13) أن ذروة الممانعة هنا أعرض و قيمتها أصغر من سابقتها عند التردد الأول للمرنان، وهذا يعني أن المجداد ذا الطول 10cm أكثر كثامة للموجة الصوتية.



الشكل (13) قيم الممانعة المصغرة والطور كتابع للتردد على كامل طول المرنان
(حالة المجداد من السيراميك 10 cm وتبعد بدايته 34 cm من المصدر الصوتي)

يبين الشكل (14)، قيم التردد الأولية لحالة مجداد السيراميك ذي الطول 6cm، وذلك لتوضعات المجداد كافة للمصدر الصوتي. نلاحظ أن تردد المرنان متغير تبعاً لموقع المجداد ضمن المرنان.

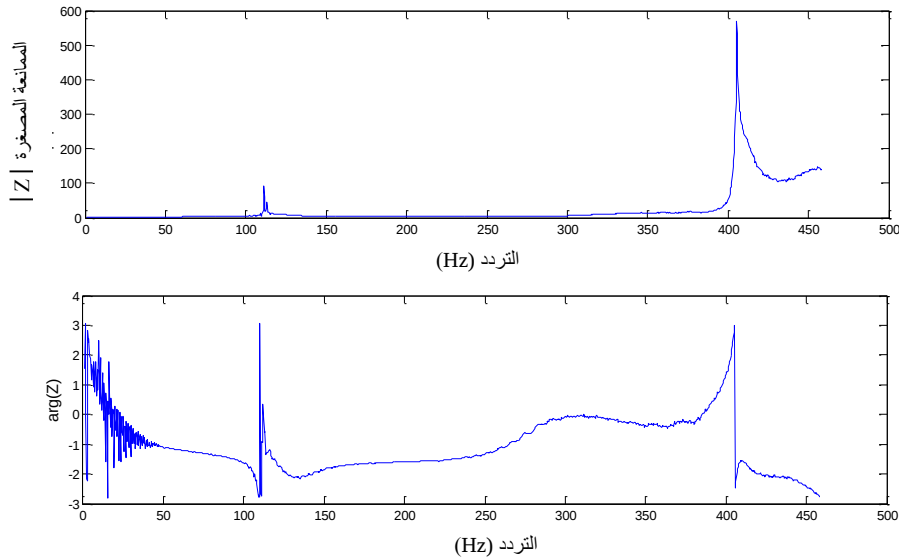


الشكل (14) قيم تردد المرنان كتابع لموقع بداية المجداد عن المصدر الصوتي ($x_A=32-39$ cm)

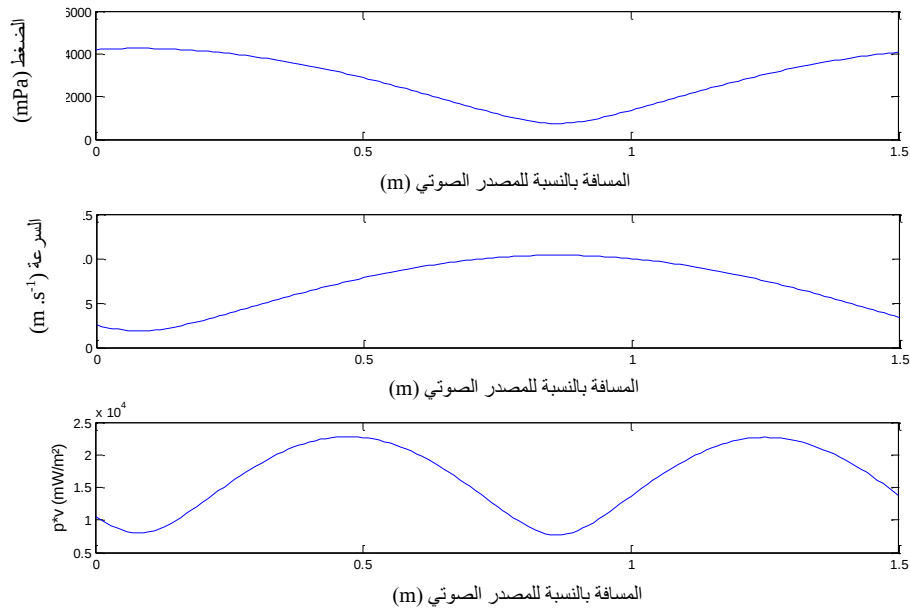
2-2- المجداد من حبيبات رمل الصوان

أظهرت النتائج أن رمل الصوان يسبب اضطراباً أصغر بكثير للموجة الصوتية بالمقارنة مع السيراميك، كما يمكن وبوضوح تمييز الترددات الأولية للمرنان. غير أن الترددات الثانية تبدو أكثر وضوحاً من الأولى. في الواقع إن مسامية رمل الصوان المتعرجة تلعب كمصفاة للموجات الصوتية عند التردد الأول ولا تسمح إلا للموجات التي تملك تردد أعلى من تردد العبور f_c بالانتشار ضمن المجداد، فالموجات التي ترددها مخالف تُهدى منذ دخولها للوسط المسامي [10]، [11].

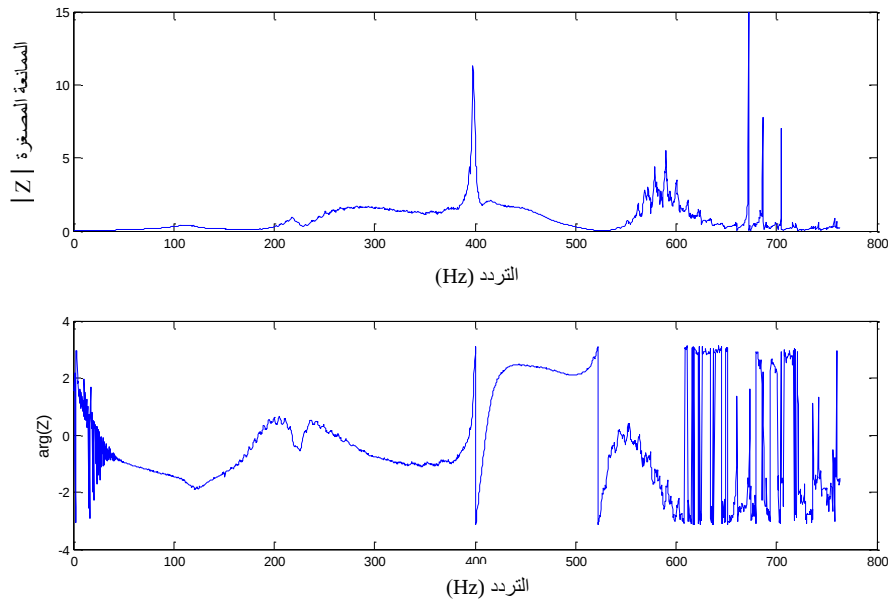
بمقارنة الشكلين (11) و(15)، نلاحظ أن المجداد من رمل الصوان يقدم ممانعة أعلى بحوالي 20 مرة من تلك الناتجة مع مجداد السيراميك (عند التردد الأول للمرنان). [12] يشير إلى أنه يمكن الحصول على أفضل مردود مع قيم أعلى للممانعة، لأن قيم الضغط ترتفع والسرعات الصوتية تنخفض، حيث يكون هناك تبادل في الطاقة بين المائع والجسم الصلب. ولكن لا يجب أن تكون هذه الممانعة مرتفعة وممتدة (واسعة)، لأن المجداد يصبح مرآة عاكسة للموجة الصوتية.



الشكل (15) قيم الممانعة المصغرة والطور كتابع للتردد على كامل طول المرنان
(حالة المجداد من رمل الصوان 6 cm وتبعد بدايته 34 cm من المصدر الصوتي)



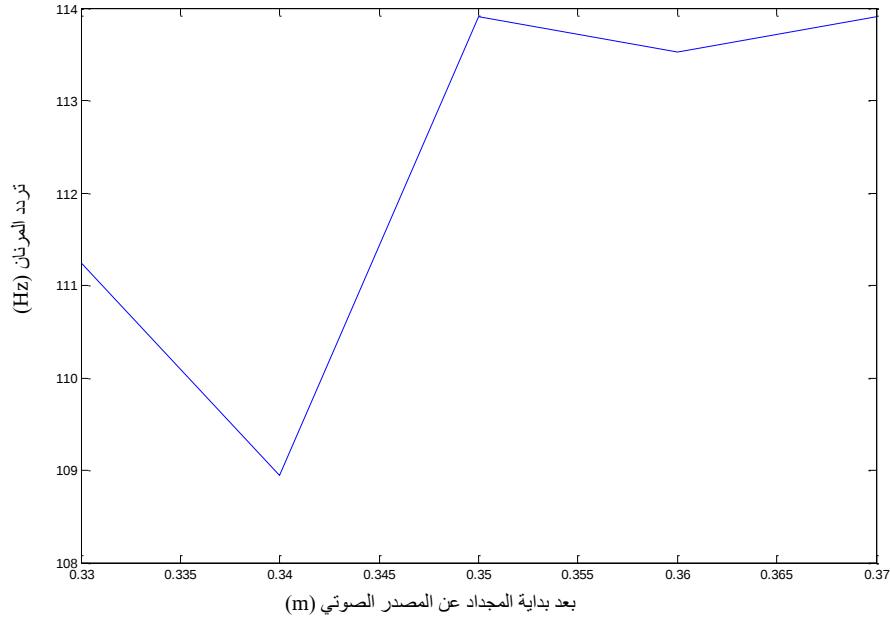
الشكل (16) الضغط، السرعة و الاستطاعة الصوتية
حالة المجداد من رمل الصوان 6 cm وتبعد بدايته 34 cm من المصدر الصوتي



الشكل (17) قيم الممانعة المصغرة والطور كتابع للتردد على كامل طول المرنان
حالة المجداد من رمل الصوان 10 cm وتبعد بدايته 34 cm من المصدر الصوتي

يُلاحظ من الشكل (17) أن الإشارة بدأت بالاضطراب انطلاقاً من التردد 580 Hz وهذا ما يُفسّر بأخطاء القياس (توضع سيء للميكروفون) أو عن الضجيج الصادر من الوسط المحيط كالمحادثة بين شخصين.

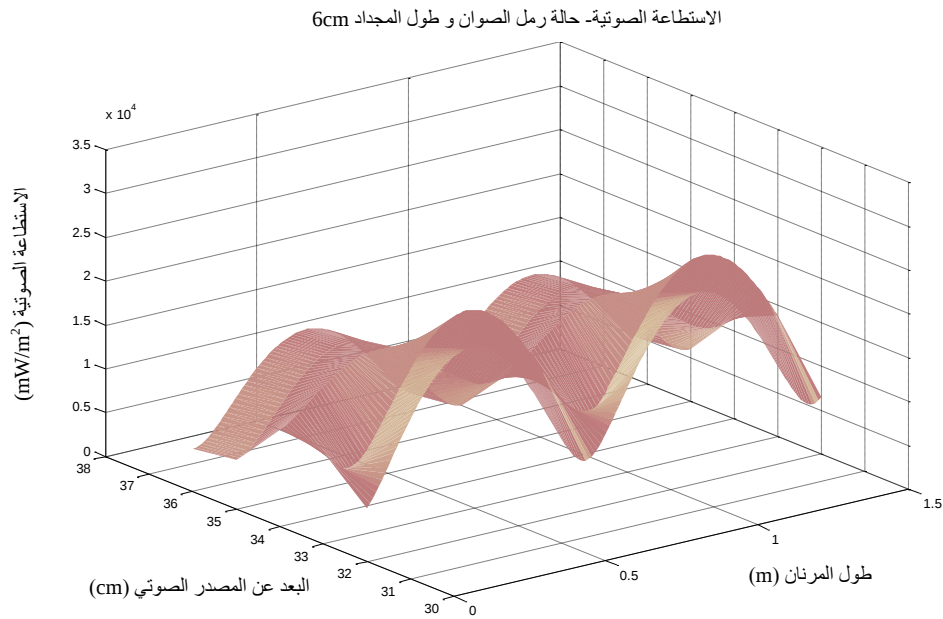
يظهر الشكل (14) قيم التردد الأولية لمجداد من رمل الصوان ذي طول 6 cm ، وذلك من أجل مختلف أبعاد المجداد عن المصدر الصوتي.



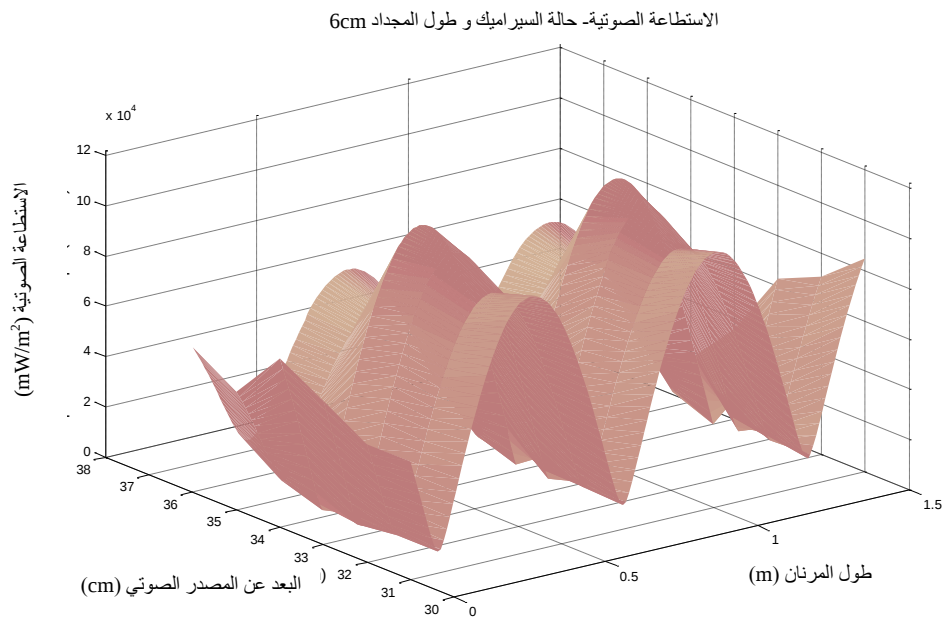
الشكل (18) قيم تردد الرنين كتابع لموقع بداية المجداد عن المصدر الصوتي ($x_A=33-37$ cm)

3- مقارنة الاستطاعات الصوتية

قمنا بحساب الاستطاعة الصوتية (p.v) على كامل طول المرنان ولمختلف توضع المجداد عن المصدر الصوتي، وذلك لنوعين من المجداد (سيراميك- رمل الصوان)، ولطول واحد للمجداد (6 cm). إن الاستطاعة العظمى ضمن حالة السيليس تبلغ $20(W/m^2)$ ، وهذه القيمة أصغر بخمس مرات من حالتها في السيراميك عند التوضع للمجداد نفسه (مقارنة الشكلين 19 و 20). إذاً يمكننا القول إن المجداد من السيليس يُخزن الطاقة أكثر من السيراميك فهو مادة ممتازة للاستخدام ضمن المبرد الترموصوتي.



الشكل (19) قيم الاستطاعة الصوتية على طول المرنان ضمن حالة المجداد من رمل الصوان



الشكل (20) قيم الاستطاعة الصوتية على طول المرنان ضمن حالة المجداد من السيراميك

4- الدراسة التجريبية

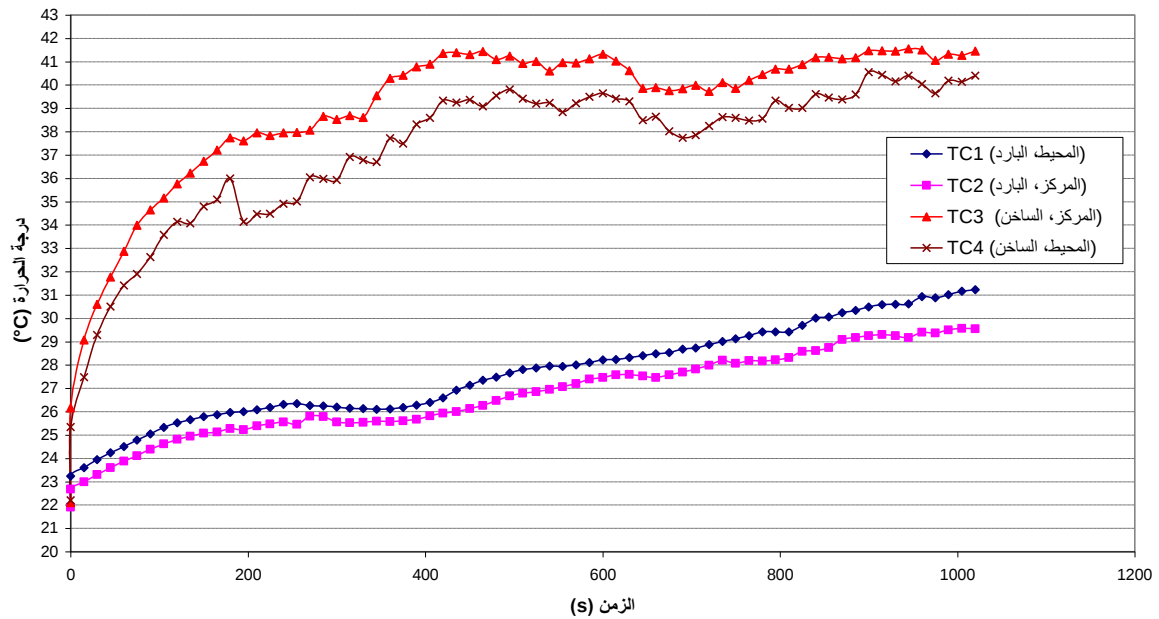
إن الاختبارات المتكررة أظهرت أهمية استخدام التردد الثاني للمرنان، حيث تم الحصول على فارق في درجة الحرارة مع التردد الأول ($f \approx 115 \text{ Hz}$) وقدره 1°C فقط، ويمكن القول إن رمل الصوان يُعدّ كاتماً للموجة الصوتية عند التردد الأول. إن نتيجة التجارب المتعددة تمكننا من القول:

- المرنان الحلقي يعمل بشكل جيد عند $\lambda/2$ وهذا ما لم يكن مؤكداً سابقاً.
- يقدم المجداد من رمل الصوان ممانعة أكبر بكثير من تلك الناتجة من السيراميك.
- بالرغم من قسافة (هشاشة) رمل الصوان غير أنه يبقى مرشحاً مهماً كمادة للمجداد.

تم إجراء تجارب مع مجداد من رمل الصوان ذي الطول 6cm الذي تبعد بدايته ($x_A=35$ cm)، عن المصدر الصوتي، هذا المجداد له تراس جيد للحبيبات ذات قطر 3mm للحد من حركتها واحتكاكها، كما تم إغلاق هذا المجداد من الطرفين بقطعة من الحرير الواقع بين الحبيبات والمبادلات الحرارية لمنع خروج حبيبات رمل الصوان.

إن تشغيل المبرد مع التردد الثاني للمرنان الذي يساوي (405.3 Hz)، يمكننا من الحصول على فارق أعظمي في درجات الحرارة بين طرفي المجداد وقدره (15.5°C) ب زمن قدره (6.5 min). إن درجة حرارة كلا الطرفين للمجداد أكبر من درجة حرارة الوسط المحيط، وذلك بسبب عدم وجود دورة تبريد للمبادل الحراري من الجهة الساخنة، وذلك بهدف تقريب الحرارة خارج المرنان من الجهة الساخنة من أجل تخفيض درجة حرارة الجهة الباردة والحصول على التبريد ضمن المرنان.

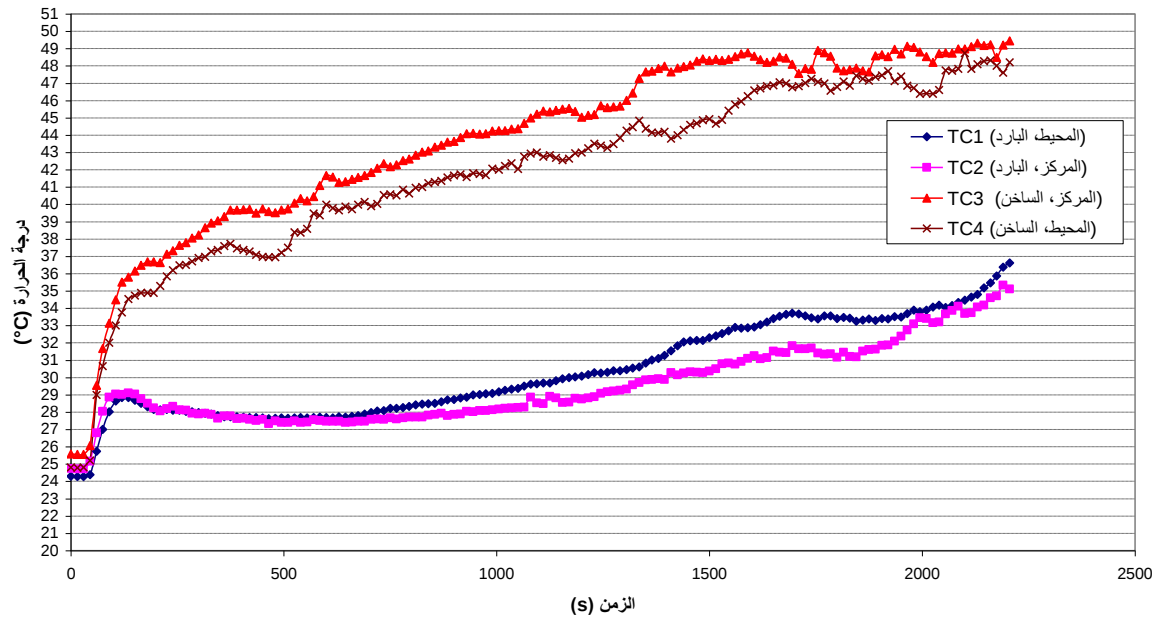
تطور درجات الحرارة كتابع للزمن وعند تردد (405,3 Hz)



الشكل (21) بروفيل درجات الحرارة على طرفي المجداد عند التردد الثاني للمرنان

تتوضع المزدوجتين الحراريتين (TC1, TC2) على شبك النحاس (المبادل الحراري) من الجانب البارد للمجداد في مركزه وعلى محيطيه على الترتيب، بينما المزدوجتين الحراريتين (TC4, TC3) متوضعتين على الشبك النحاسي الثاني من الجانب الساخن للمجداد عند مركزه ومحيطيه على الترتيب. يبين الشكل (22) فرق درجات الحرارة الناتج عند العمل مع التردد الثالث للمرنان، والذي يساوي (701.7 Hz)، حيث تم الحصول على فارق أعظمي في درجات الحرارة بين طرفي المجداد قدره (16.6°C)، ولكن ب زمن أكبر من السابق وقدره (22 min).

تطور درجات الحرارة كتابع للزمن وعند تردد (701,7 Hz)



الشكل (22) بروفيل درجات الحرارة على طرفي المجداد عند التردد الثالث للمرنان

الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال هذه الدراسة تبين ما يأتي:

1. إمكانية عمل المرنان بشكل جيد عند طول موافق لنصف طول الموجة، أي $(\lambda/2)$.
 2. إن رمل الصوان يسبب اضطراباً للموجة الصوتية أصغر بكثير من السيراميك.
 3. يمكن الحصول على فرق درجات الحرارة بين طرفي المجداد جدير بالاهتمام.
 4. إن المحطة التجريبية غير مكتملة لأن المبادلات الحرارية لم تُزوّد بدورة تبريد من الماء أو الكحول من أجل تفريغ الحرارة خارج المرنان من الجهة الساخنة وتخفيض درجة حرارة الجهة الباردة إلى درجة أقل من درجة حرارة الوسط المحيط والحصول على التبريد ضمن المرنان.
- تعمل الدراسة اللاحقة إذاً: على وضع تلك الدارة للمبادلات الحرارية والتوضيح الجيد لهذه المبادلات، وإجراء كافة الحسابات الحرارية اللازمة عبر المجداد والمبادلات الحرارية.

المراجع:

- [1] SWIFT, G. W. *Thermoacoustic engines*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 84, No. 4, 1988, 1145-1180.
- [2] BACKHAUS, S.; SWIFT, G. W. *A thermoacoustic-Stirling heat engine : detailed study*, J. Acoust. Soc. Am., Vol.107 , No. 6, 2000, 3148-3166.
- [3] PENELET, G. *Etude expérimentale et théorique des processus non linéaires de saturation dans un générateur d'ondes thermoacoustique annulaire*, Mémoire de thèse de doctorat de l'Université du Maine, 2004, 129.
- [4] WHEATLEY, J.; HOFER, T.; SWIFT, G. W.; MIGLION, A. *An intrinsically irreversible thermoacoustic heat engine*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74 , No. 1, 1983, 153-170.
- [5] ATCHLEY, A.; HOFER, T.; MICHAEL, L.; MUZZERALL, M.; KITE M.; AO, C. *Acoustically generated temperature gradients in short plates*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 88 , No. 1, 1990, 251-263.
- [6] TIJANI, M.; ZEEGERS, J.; ATAM, W. *The prandtl number and thermoacoustic refrigerators*, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 112 , No. 1, 2002, 134-143.
- [7] GIBIAT, V.; LALOE, F. *Acoustical impedance measurements by the tow-microphone-three-calibration (TMTC) method*, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 88 , No. 6, 1990, 2533-2545.
- [8] CHUNG, J. Y.; BLASER, D. A. *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theor*, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 68 , No. 3, 1980, 340-344.
- [9] ZHAO, B.; JEBALI, F.; FRANCOIS, M. *Mesure des propriétés acoustiques d'un régénérateur utilisé dans une machine thermo-acoustique*, Acte du 4^{ème} congrès français d'Acoustique, 2 : 739-742, 14-18 Avril 1997.
- [10] ROYER, D. DIEULESANIT, E. *Onde élastique dans les solides*, Tome 1, 1996, 328.
- [11] LEWY, S. *Acoustique industrielle et aérocoustique*, 2001, 556.
- [12] CEPERLEY, P. H. *A pistonless Stirling engine - The traveling wave heat engine*, J. Acoust. Soc. Am., Vol.65 , No. 5, May 1979, 1508-1513.