

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية

أوس علي ابراهيم^{1*} طاهر رجب قدار²

*. طالب دكتوراه في هندسة تكنولوجيا النسيج ومعالجاتها، قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، الجمهورية العربية السورية.

aousaliibrahimsy86@Damascusuniversity.edu.sy

². أستاذ، دكتور، مهندس، رئيس قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، الجمهورية العربية السورية . dr.t-kadd@Damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

شكلت مسألة الضجيج أثراً هاماً على الصعيد البيئي في الآونة الأخيرة، حيث استحوذ تطوير تقانات العزل والامتصاص الصوتي للأبنية الحديثة في العمل والمنزل مقعداً متقدماً ضمن اهتمامات الدول الصناعية والغربية، فبدأ البحث عن أفق جديد لآليات العزل الصوتي لتصبح في دائرة تقانة وعلوم النانو بما يسمى العزل الذكي للأبنية الحديثة. سنسطل الضوء في هذا البحث العلمي على مفاهيم الصوت والضجيج وانتشار الأصوات والعزل الصوتي في الأبنية والمنشآت، كما سندرس الدور الذي تلعبه المواد النسيجية والمركبة منها في عزل الضجيج الصوتي من خلال امتصاص موجة الصوت أو انعكاسها أو تشتتيتها ضمن بنية المادة العازلة، كما سنبحث نظرياً وتجريبياً إمكانية تحسين أداء المواد النسيجية المركبة للعزل الصوتي من خلال إضافة مواد وحبوبات نانوية البنى والأبعاد إلى مصفوفة المادة النسيجية والمركبة منها، باستخدام أرخص أنواع المواد وأكثرها تداولاً في السوق الصناعية والمحلية، والتطبيق الهدف يصب في خدمة تطوير العزل الصوتي للأبنية الحديثة.

تم في هذا البحث تحضير ست عينات من المواد النسيجية المركبة والمعززة بالحبوبات النانوية ومادة فوم البولي يوريثان الصلب مغلق الخلايا، ثم تم حماية المواد بطبقة من الإيبوكسي المستخدم في الطلاءات، تم اختيار الأقمشة والألياف (الزجاجية نوع (E) والبازلتية) التي تحتوي في بنيتها على نسب مرتفعة من أوكسيد السيليكون (SiO₂)، استخدمت أقمشة ثلاثية وثنائية الأبعاد، ومن الدراسات المرجعية اعتمدت النسبة (7% وزناً) لكمية الحبوبات النانوية والمسامية البنية من السيليكا، كنسبة كافية وفعالة وظيفياً واقتصادياً لرفع معدل امتصاص الصوت حتى النسبة (99%)، كما لعبت السماكة دور كبير في العزل الصوتي، بما يتواافق مع متطلبات الدليل الشامل لمنتجات عزل الأبنية.

الكلمات المفتاحية: المواد النسيجية المركبة، الأقمشة، الألياف التقنية، تقانات النانو، العزل الصوتي، الامتصاص الصوتي، انتشار الصوت، موجة الصوت.

تاريخ الارسال: 16/2/2023

تاريخ القبول: 2023/5/3



حقوق النشر: جامعة دمشق -
سورية، يحفظ المؤلفون حقوق
النشر بموجب CC BY-NC-SA

Enhancing Acoustic Insulation in Modern Buildings Using Textile Composites Reinforced with Nano Particles

Aous Ali Ibrahim^{*1} Taher Rajab Kaddar²

^{*1}. PhD student, Textile Technology Engineering, Department of Textile Industries Mechanical Engineering and Their Techniques Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria.

aousaliibrahimsy86@Damascusuniversity.edu.sy

². Prof. Univ. Dr. Eng. Head of Department of Textile Industries Mechanical Engineering and Their Techniques Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syrian Arab Republic

dr.t-kadd@Damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

The issue of noise has had an important impact on the environmental level in recent times, as the development of insulation and acoustic absorption technologies for modern buildings at work and at home has occupied an advanced seat among the interests of industrialized and Western countries, so the search for a new horizon for sound insulation mechanisms has begun to become in the circle of nanotechnology and science with what is called smart insulation for modern buildings.

In this scientific research, we will shed light on the concepts of sound and noise, the spread of sounds, and sound insulation in buildings and facilities. We will also study the role that textile and composite materials play in isolating sound noise by absorbing, reflecting, or dispersing the sound wave within the structure of the insulating material. We will also examine theoretically and experimentally the possibility Improving the performance of composite textile materials for sound insulation by adding materials and granules of nanostructures and dimensions to the matrix of the textile material and its composite, using the cheapest types of materials and the most widely circulated in the industrial and local market, and the objective application is in the service of developing sound insulation for modern buildings.

In this research, six samples of composite textile materials reinforced with nanoparticles and closed-cell rigid polyurethane foam were prepared, then the materials were protected with a layer of epoxy used in coatings. E-glass and Basalt chopped strands and fibers with high percentages of silicon oxide (SiO_2), three-dimensional and two-dimensional fabrics were used, and from the reference studies, the percentage (7% by weight) was adopted for the amount of nano-grained and porous structure of silica, as a sufficient, functionally and economically effective percentage to raise the sound absorption rate up to (99%), as well. Thickness plays a major role in sound insulation, in compliance with the requirements of the Guide of Acoustic and Thermal insulation Products in Building.

Keywords: textile composite materials, technical textiles/fibers, nano techniques, acoustic insulation, acoustic absorption, sound propagation, sound pressure level.

Received: 16/2/2023

Accepted: 3/5/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

ابراهيم، قدار

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية
المقدمة:

مكوناتها منفردة، وأهم مكوناتها مصفوفة المادة الداعمة (الألياف، منسوجات، حبيبات) المسؤولة عن الأداء الوظيفي للمادة المركبة، ومصفوفة مادة الريزين (إيبوكسي، بوليستر، فوم) المسؤولة عن ربط باقي المكونات ونقل الإجهادات بتجانس في البنية، (Nesrin et al., 2017,88)، ومع استحضار تكنولوجيا النانو لخواص الألياف والحببيات، ستضيّع موجة الصوت بين تلك السطوح البنائية النانوية الأبعاد ، وسيسهل وبالتالي امتصاصها. لكن حتى نتمكن من الانطلاق في خوض غمار هذه التقانة، لابد من الإحاطة بمفهوم الصوت والضجيج والآلية انتشار موجة الصوت.

1- الدراسات المرجعية:

1- Acoustic and Thermal Insulation of Nanocomposites for Building Material:

هدف هذا البحث إلى تعزيز خصائص العزل الحراري والصوتي لمادة مركبة بوليميرية، مصنوعة من خليط من (الإيبوكسي وبوليستر) كمادة أساس، ومدعمة بكل من الصوف الصخري والحببيات النانوية بنسبة وزنية (5-7.5) %. أوضحت نتائج اختبار مستويات شدة الصوت أن الخليط المثالي الذي يحوي (7.5) % وزناً، يمتلك أفضل قيمة للعزل الصوتي، (Shanaz et al., 2020,500).

من هنا، ولأسباب اقتصادية ولتحقيق عزل صوتي جيد، تم اعتماد النسبة الوزنية (7%) لمادة حبيبات السيليكا النانوية مسامية البنية من وزن الخليط، كما سنرى في الفقرة (2-1-2) والجدول (2).

2- Sound Absorption of Sustainable Polymer Nanofibrous Thin Membranes Bonded to a Bulk Porous Material:

تم في هذه الدراسة تسليط الضوء على دور إحدى تقانات علم النانو، (الغزل الكهربائي spinning-electro)، في تحسين أداء العزل الصوتي، فاستُخدمت في التجارب مواد بوليميرية (بولي أميد PA6، وبولي فينيل الكحول PVA)، (Tomáš et al., 2020,3-4)، لتحضير أغشية من ألياف نانوية غير منسوجة بسمكّات وكثافات مختلفة، والتي استُخدمت كمواد تغطية لفوم بنية مسامية، مما ساعد في رفع قدرة العازل على امتصاص

كما يعد الصوت وسيلة للتواصل والتعبير والتبيه في الوسط المحيط سواء بين البشر أو مع الآلات ، فهو يُعد سبباً للإجهاد والضغط المستمر في الحياة، من هنا برزت شركات صناعية عديدة متخصصة في مجال العزل الصوتي للأبنية ومرافقها وللآلات والمركبات، (Seyed et al., 2022,1)، وبدت الحاجة البيئية ملحة، للتدخل في مجال العزل الصوتي للأبنية والمنشآت، بهدف الاستعاضة عن مواد العزل التقليدية كالصوف الصخري والألياف الزجاجية والألياف السيراميكية، والتي تمتاز بأدائها الجيد وسهولة متناولها لكن لها عدة مساوى ومضار بالأخص بيئية لا يمكن التغاضي عنها، منها الكثافة العالية ($2.56-3.4 \text{ gr/cm}^3$) والوزن الكبير، وسهولة تناولها في الوسط المحيط وأديتها الصحية الكبيرة على الإنسان والبيئة، بالإضافة إلى صعوبة إتلافها كمخلفات صناعية فهي عبارة عن أكسيد لامعدنية لاعضوية، عدا عن تصنيف بعضها كمواد محترمة دولياً (كالأسبستوس). هنا برز علم النانو وتقانة النانو، (Bharat, 2004,1)، وتدخلها في علم النسيج وصناعة الألياف النانوية، (Sawhney et al., 2009,1)، بطريقة الغزل الكهربائي والطرد المركزي، وتشكيل بنية شبكة نانوية الأبعاد ذات مساحة سطح نوعي كبيرة (m^2/gr)، ومحضرة من مواد أولية قد تعد صديقة للبيئة وللإنسان، أو يمكن إتلافها أو إعادة تدويرها بآليات أسهل وأقل كلفة، كمواد مثل (1)
(PLA, PVA, PA, PP, PE)، أو إضافة حبيبات نانوية الأبعاد مسامية البنية يشكل الهواء النسبة الأعظم من حجمها، يمكنها التعلق على سطوح الألياف الميكروية أو بين جزيئات المادة الحامية لها كالطلاء (الإيبوكسي والبولي يوريثان).

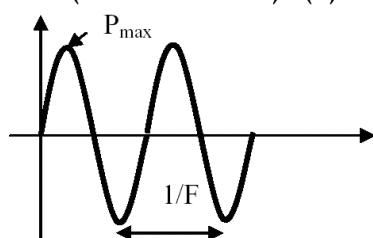
تعني كلمة نانو للوهلة الأولى أبعاد أصغر من (100 nm)، (Kartik et al., 2021,1)، إذاً ستشكل هذه الألياف والبنية النانوية مع الألياف الميكروية كالزجاجية (E-glass) والبارلتية (BCF)، سطواحاً لانهائيّة من المادة بأبعاد صغيرة، هنا يأتي دور المواد النسيجية المركبة التي تنتج عن اجتماع مادتين على الأقل للوصول إلى مادة بخواص جديدة لم تكن موجودة في

(1) : بولي إيتلن، PP: بولي بروبيلين، PA: بولي أميد، PVA: بولي فينيل الكحول، PLA: بولي لاكتيك أسيد.

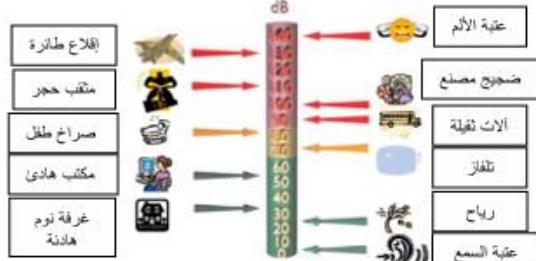
ابراهيم، قدار

إن شدة التواتر الصوتي (F)، الشكل (2)، الذي يمكن للإنسان سمعاه يتراوح بين (20 Hz و 20000 Hz)، وعليه يمكن

تقسيم الأمواج إلى تحت صوتية تواترها أقل من (20 Hz) وأمواج منخفضة الحدة، تواترها (20-350 Hz)، وأمواج متوسطة الحدة، تواترها (351-1500 Hz) وأمواج شديدة الحدة، تواترها (1501-20000 Hz)، إذاً فإن الأمواج الصوتية التي يجب أخذها بالاعتبار عند دراسة العزل الصوتي في الأبنية الحديثة تواترها ضمن المجال (100-5000 Hz) تقريباً. كما هو مبين في الشكل (3). (Arval, 2009,111).



الشكل (2) يعبر عن تردد وتواتر اهتزاز موجة الصوت،
(Arval, 2009,111)



الشكل (3) رسم توضيحي يعبر عن مقياس مستوى الضجيج الصوتي، (Arval, 2009,112).

للننظر لمفهوم الضجيج الناشئ عن الأصوات في الحياة المدنية من منظور مختلف عن المفاهيم المعتادة التي يعبر عنها بين العامة باليسيبل، أي شدة الضجيج (dB)، أي (مستوى تأثير ضغط طاقة الصوت)، فيمكن للأذن البشرية التقاط الأصوات والضجيج ذي الضغط ($2 \times 10^{-5} - 20 \text{ Pa}$)، الشكل (5)، فيقياس مستوى الضغط الناشئ عن الأصوات بمقاييس

لوغاريتمي يُعطى بالعلاقة (1):

$$L_p = 20 \log \frac{P_{eff}}{P_0} \dots\dots\dots (1)$$

حيث أن: (Arval, 2009,111).

(P_{eff})

يعبر عن تأثير ضغط موجة الصوت، ($P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$).

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية طاقة الصوت، مع خفض السماكة، مما خفض استهلاك الطاقة.

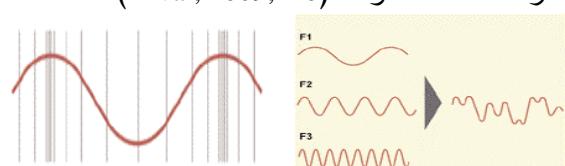
تم الانطلاق من نتيجة هذه الدراسة في إثبات صحة نتائج هذا البحث، في الأثر والفارق الذي يحدثه استخدام تقانة النانو في تطبيقات العزل الصوتي، وأن زيادة سماكة طبقات النسيج سيحسن أكثر من امتصاص الصوت بسبب زيادة كثافة البنية، لكنه سيسبب زيادة في الوزن والكلفة، وهذا غير مرغوب، خاصة عندما يكون الفارق الذي يحدثه إضافة نسبة ضئيلة من مادة نانوية، كافياً من حيث الأداء ومحبلاً من حيث الكلفة. (Tomáš et al., 2020,13)

3- Recent Advances in Woven Spacer Fabric Sandwich Composite Panels: A Review:

ساعدت هذه الدراسة في توصيف بنية وتركيب النسيج ثلاثي الأبعاد (Woven Spacer Fabric WSF) (Yeran et al., 2022,1)، وكيفية استخدام طريقة التضييد (hand lay-up) لطبقات هذا النسيج مع مادة بوليمرية كالايبوكسي، واستخدام مواد الفوم داخل فراغات هذا النسيج، لإكساب السماكة لمادة العازل الصوتي، كما شكلت كلا المادتين (الايبوكسي والفوم) نسبة (70%) من مصفوفة المادة المركبة، وبالتالي أثبتت هذه الدراسة تحسن الخواص الميكانيكية لبنية المادة العازلة، بوجود هذا النسيج، مع حبيبات نانوية. (Yeran et al., 2022,16).

3- مفهوم الصوت والضجيج:

الصوت عبارة عن طاقة، أي ضغط مستمر على شكل أمواج طافية، الشكل (1)، تعبر الأجسام والأوساط الصلبة والسائلة والغازية، كلاً حسب كثافته وخواصه، وتشاء هذه الطاقة من مصادر نتيجة اهتزازات متسرعة لجزئيات المادة، هذه الاهتزازات لها تواتر معين يؤدي إلى تواتر اهتزاز لموجة الصوت، الشكل (2)، الذي يسبب ضغطاً هو الضجيج الذي يعبر عن شدته باليسيبل (dB). إذاً كلما ازداد تواتر الموجة كلما ازدادت حدة الصوت. (Arval, 2009,110)



الشكل (1) يعبر عن موجة الصوت، التي قد تتشكل من اجتماع عدة أصوات، (Arval, 2009,110)

ابراهيم، قدار

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد الفانوية في الشكل (4)، مثال يبين ما نقصد به من إضافة مستويات متعددة للضغط الناجم عن الأمواج الصوتية في البيئة المدنية، وبمقاييس الديسيبل (dB)، وهذا ما يمكن ملاحظة كونه مفهوم جديد ومغاير للتعريف التقليدي للضجيج.

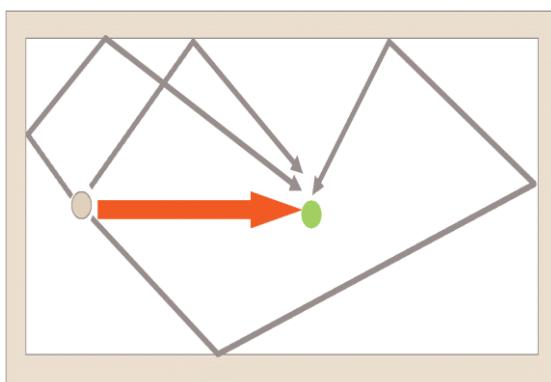
والتكاثر الغير منتظم لطاقة الأمواج الصوتية يسبب الضجيج الصوتي فضلاً عن تعدد مصادر اباعاث الصوت، الشكل (6). (Arval, 2009,115).

3-2- امتصاص الصوت:

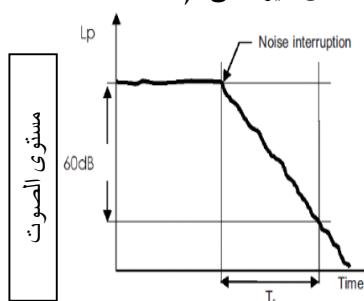
يعبر عن امتصاص الصوت بالرمز (a_{Si}) كما في العلاقة (2)، والذي يرتبط بزمن ارتداد الصدى، اللازم لتخفيض مستوى شدة الصوت (dB). (Arval, 2009,116). الشكل (7). (60 dB).

$$T_r = \frac{0.16 \times V}{\sum_i^0 S_i \times a_{Si}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

حيث: (T_r) زمن ارتداد الصدى، (V) حجم الحيز المغلق (الغرفة مثلاً)، (S_i) مساحة سطح الجدار (i)، (a_{Si}) معامل امتصاص الصوت الخاص بمادة الجدار (i)، وتتراوح قيمةه بين (0) و (1) حيث تعبر (0) عن سطح عاكس تمام للصوت صدى تمام الطاقة الموجية)، بينما (1) فتعبر عن سطح كلي الامتصاص لطاقة الموجة.



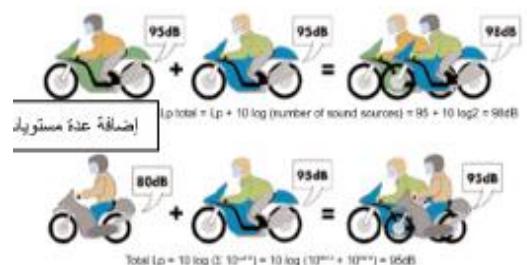
الشكل (6) رسم توضيحي يعبر عن تكاثر الضجيج بانتشار الأمواج الصوتية ضمن حيز مغلق، (Arval, 2009,115).



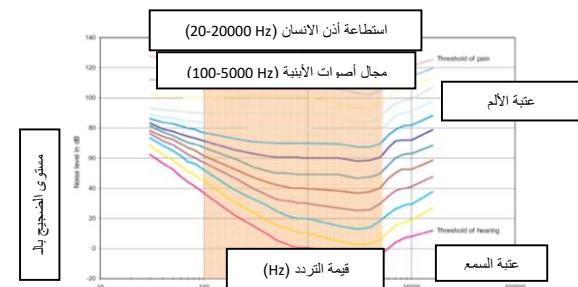
الشكل (7) مخطط بين زمن ارتداد الصدى، (Arval, 2009,116).

3-3: مصادر الأصوات في الأبنية الحديثة:

عندما يدرس العزل الصوتي في الأبنية الحديثة، يكون الهدف الرئيسي عزل تلك الأبنية عن الوسط الخارجي، الذي يعتبر



الشكل (4) مثال يعبر عن مستويات الضغط الناجم عن طاقة موجة الصوت، (Arval, 2009,111).



الشكل (5) مخطط (Fletcher-Munson) البياني الذي يبين شدة الأصوات التي يمكن للأذن البشرية سماعها تبعاً لنواتر اهتزازها، (Arval 2009,113).

3-1: انتشار الصوت:

تشاً الأمواج الصوتية من اهتزاز السطوح، وتنتشر موجة الصوت في الهواء الطلق في جميع الاتجاهات بسرعة تصل (340 m/sec)، وتبدأ طاقة الموجة بالانخفاض كلما ابتعدنا عن المصدر، أي تخفّ حدة الصوت، لكن عندما يكون المصدر الذي تتبعه الأمواج الصوتية في بيئة مغلقة (بناء مثلاً)، سوف طاقة الأمواج بشكل غير منتظم، يعود للسطح التي ستتصدم بها تلك الأمواج حتى تصلك للمستقبل في النهاية، وبطاقة أقل بكثير عن تلك التي تتجه مباشرة بكمال طاقتها نحو المستقبل، عند عدم وجود حواجز تعيقها. (Arval, 2009,115).

إن انخفاض طاقة تلك الأمواج الصوتية تدريجياً يعود إلى امتصاص جزء منها واختراق جزء آخر لتلك السطوح (جدران أسقف، أرضيات) ضمن ذاك الحيز المغلق (غرفة، مكتب، حوض سباحة، مدرسة، معمل)، وبالتالي إن هذا الانتشار

ابراهيم، قدار

المعيار الدولي (EN ISO 140-6)، لاختبار أداء العازل الصوتي لأرضية بين غرفتين طابقيتين أحدهما يحوي منبع صوتي (نتيجة ارتطام جسم بالأرضية) والآخر مستقبل للصوت، الشكل (9)، ومنها يمكن قياس مؤشر عزل الصوت (L_n) كما تبين ذلك المواصفة القياسية (EN ISO 717-2).

(Arval, 2009,118-119)



الشكل (9): رسم توضيحي لطريقة اختبار كفاءة عزل الصوت (9). وفق EN ISO 140-6 وفق EN ISO 140-3 (Arval, 2009,118-119).

الجدول (1) أمثلة عن معامل (مؤشر) عزل الصوت لبعض المواد وفق EN ISO 717-1 (Arval, 2009,118).

معامل عزل الصوت (R_w %) لعدة مواد عزل تقليدية

R_w examples for different material:

Partition	R_w
IN227, 49 kg/m ²	54
CIN323L, 25 kg/m ²	44
Concrete 16 cm thick, 390 kg/m ²	56
Concrete 8 cm thick, 390 kg/m ²	45
Solid brick, 2 cm, 480 kg/m ²	57
Hollow breeze block 16 cm thick, 230 kg/m ²	48
Earthenware tile, 56 kg/m ²	16

وفقاً للمعايير (article 235.2.11-Law of 30.08.1990) المعتمدة في عزل صالات المعامل والمنشآت، الشكل (10)، وعندما تكون شدة الضجيج أكبر من (85 dB)، يجب أن تمتاز الجدران الداخلية لتلك المنشآت بأعلى درجات الامتصاص الصوتي، بما يخفف من شدة الضجيج الداخلي ضمنها، ومستوى الصوت المسموح به ضمن حدود ملكية المنشأة، ويحقق الرضا من المحيط المجاور، من هنا تبدأ انطلاقه

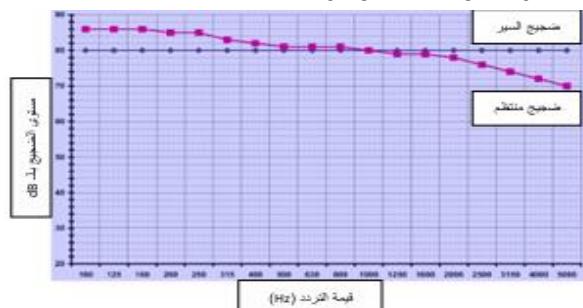
تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد الفانوية المنبع الرئيسي لطاقة الأمواج الصوتية المسببة للضغط (الضجيج)، وبباقي المصادر تعتبر ثانوية: (Arval, 2009,117).

-1 (Outdoor airborne sound): الضجيج الصادر عن الطرقات وحركة السير والأبنية والمنشآت المجاورة.

-2 (Indoor airborne sound): الضجيج الصادر عن المحادثات والآلات والمعدات داخل البناء أو المنشأة.

-3 (Impact sound): الضجيج الصادر عن اصطدام الأجسام بالأسطح كمشي الأفراد أو حركة الأثاث، أو اهتزاز الآلات، أو الضجيج الصادر عن المنشآت الرياضية...

-4 الضجيج الصادر عن المرافق الخدمية الخاصة بالأبنية، كالмарاجل والمكبات وغيرها...



الشكل (8): مخطط شدة الضجيج الناجم عن مصادر الصوت الرئيسية والثانوية، (Arval, 2009,117).

الشكل (8) مخطط شدة الضجيج الناجم عن مصادر الصوت الرئيسية والثانوية، (Arval, 2009,117).

يبين المخطط البياني في الشكل (8) شدة الضجيج بالديسيبل الناجم عن بعض تلك المصادر.

بالنسبة للضجيج الصادر عن المحيط (Airborne sound) يتم اعتماد المعيار الدولي (EN ISO 140-3)، لاختبار أداء العازل الصوتي بين غرفتين أحدهما يحوي منبع صوتي والآخر مستقبل للصوت، الشكل (9)، ومنها يمكن قياس مؤشر عزل الصوت (R_w) كما تبين ذلك المواصفة القياسية (EN ISO 717-1)، حيث يعبر المؤشر ($R_w + C$) عن عزل الصوت الصادر عن المنابع داخل المنشأة، والمؤشر ($R_w + C_{tr}$) يعبر عن عزل الصوت الصادر عن المنابع خارج المنشأة. الجدول (1).

أما بالنسبة للضجيج الصادر عن الاصطدام بالسطح أو حركة الأجسام أو مشي الأشخاص (Impact sound)، فيتم اعتماد

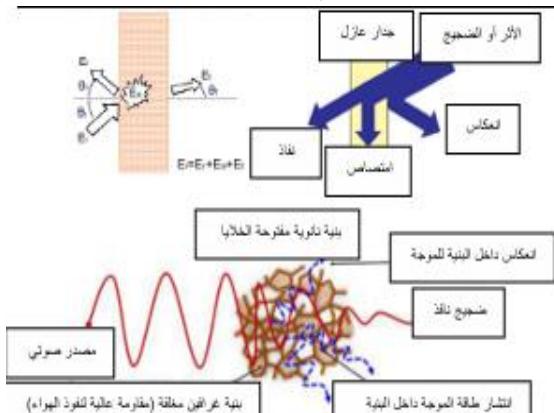
ابراهيم، قدار

أو تخفف من شدة وتواتر تلك الأمواج من أحد وجهي المادة إلى الوجه الآخر. (Alice, 2019,2)

عندما تصادم موجة صوتية بطاقة (E_i) سطحاً ما، فإن جزءاً من طاقة تلك الموجة (E_a) يتم امتصاصها، وجزء آخر من الطاقة (E_t) ينتقل عبر المادة، وجزء آخر من الطاقة (E_r) ينعكس عنها، الشكل (11)، وباستخدام بعض القوانين النظرية التي تأخذ بالاعتبار سرعة الموجة بالورود والامتصاص والانعكاس وزوايا أشعتها الطاقية. يمكن حساب مردود نقل الطاقة بال العلاقة $(E_t/E_i = \tau)$ ، إذاً كلما كانت الطاقة الممتصة أكبر كانت الطاقة المنتقلة أقل، أي كلما كانت المادة العازلة للصوت أقل نقلًا لطاقة الموجة الصوتية كانت أفضل، أي يصبح مردود امتصاص الطاقة $(\alpha = E_a/E_i)$ أكبر ما يمكن، ومردود نقلها (τ) أقل ما يمكن. (Alice, 2019,3). أما من حيث البنية، فكلما زادت مسامية بنية المادة كلما قلت الجسيمات الصادرة لطاقة موجة الصوت أي ساءت جودة عزلها، وكلما زادت كثافة المادة كلما تحسن عزلها الصوتي. لكن لو كانت المادة مغلقة المسام نسبياً وذات مساحة سطح نوعي عالي فوق $(200 m^2/gr)$ وأبعاد المسامات من رتبة النانومتر، فستلقي موجة الصوت تحديات كبيرة حتى تخترق بنية المادة حتى لو كانت مسامية ومنخفضة الكثافة.

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية أو مواد عازلة للأسطح والجدران والأرضيات قادرة على تحقيق المتطلبات البيئية المذكورة. (Arval, 2009,120)

. (Anthony et al., 2018,8)

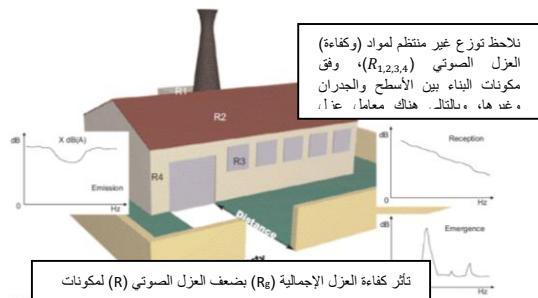


الشكل (11) يوضح مفهوم عزل الصوت ضمن البنية النانوية (Alice, 2019,9 ، Anthony et al., 2018,8)

بالتالي يمكن التعبير عن العزل الصوتي، بالمؤشر (R_w) والذي يحسب بالعلاقة: (Alice, 2019,9).

$$R_w = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

..... (4)



الشكل (10) رسم توضيحي بين توزيع مناطق عزل الصوت للمعامل والمنشآت، (Arval, 2009,120).

أما بالنسبة للصالات والمنشآت الرياضية فيتم اعتماد المعيار (NF P 90.207) والذي يضمن:

- 1 العزل الصوتي الذي يحقق حجاً للضجيج الداخلي (أكبر من 30 dB) من الخروج للمحيط الخارجي.
- 2 متوسط زمن ارتداد الصدى يعطى بالقيمة $(Tr \leq 0,14xV1/3)$ حيث أن:

$$T_{-r} = (T_{-(r - 125 Hz)} + T_{-(r - 250 Hz)} T_{-(r - 500 Hz)} + T_{-(r - 1000 Hz)} + T_{-(r - 2000 Hz)} \llbracket + T \rrbracket_{-(r - 4000 Hz)})/6$$

. (Arval, 2009, 121) (3)

وبالنسبة للمرافق الخدمية والبني التحتية كالمدارس والمستشفيات والفنادق والمؤسسات، فيتم اعتماد المعيار الدولي (law of 25.04.2003)، والذي يوصف متطلبات العزل الصوتي لهذه الأبنية.

أيضاً هناك المعايير (/ law of 28.10.1994 (NRA) / 01.01.2000 الخاصة بعزل المنازل السكنية في الأرياف. (Arval, 2009,121)

4: الصوت والعزل الصوتي:

يُعرف العزل الصوتي بأنه مقدرة مادة ما طبيعية كانت أو صناعية على امتصاص الأمواج الصوتية أو عكسها، أي تمنع

ابراهيم، قدار

Jae-Chul et al.,) : (6) x_2 ، هذا كما في المعادلة (6) : (6) (2008,1469).

$$I_i(f) = \frac{S_{11}(f) \left\{ 1 + |H_{12}(f)|^2 - 2 \operatorname{Re}[H_{12}(f)] \cos k(x_1 - x_2) \right.}{\left. + 2 \operatorname{Im}[H_{12}(f)] \sin k(x_1 - x_2) \right\} \frac{4 \rho c \sin^2 k(x_1 - x_2)}{...} (5)$$

$$I_r(f) = \frac{S_{22}(f) \left\{ 1 + |H_{12}(f)|^2 - 2 \operatorname{Re}[H_{12}(f)] \cos k(x_1 - x_2) \right.}{\left. - 2 \operatorname{Im}[H_{12}(f)] \sin k(x_1 - x_2) \right\} \frac{4 \rho c \sin^2 k(x_1 - x_2)}{...} (6)$$

حيث: (c) و (f) هما سرعة وتعدد موجة الصوت في الهواء، أما (ρ) فهي كثافة الهواء عند درجة حرارة الاختبار، بينما (Im) و (Re) فهما معاملان لانتقال الصوت نظرياً (Imaginary) و عملياً (Real).

كما يعبر عن رقم موجة الصوت (K) بالقيمة $(2\pi f/c)$ بينما (ρc) يوصف طبيعة وخواص هواء الاختبار داخل الأنابيب. ثم بطريقة تجريبية لحساب $(E_a/E_i) = \alpha$ ، يمكن قياس النسبة بين الموجة الواردة والمنعكسة بالعلاقة: (مصطفى، 2009، 71)

$$\aleph = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{(A + B)}{(A - B)} (7)$$

حيث: (A) غزارة الموجة الواردة على سطح العينة، (B) غزارة الموجة المنعكسة عنها.

ثم يمكن حساب معامل امتصاص الصوت بالعلاقة:

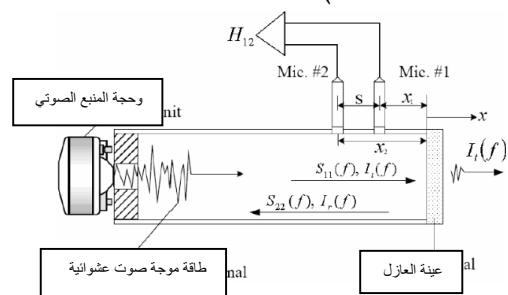
$$(Moustafa, 2009, 71) \quad \alpha = 4\aleph / (\aleph + 1)^2 (8)$$

5: الجزء العملي:

تم في القسم العملي تحضير واختبار عينات مواد نسيجية مركبة محسنة باستخدام تقانة النانو لتطبيقها في العزل الصوتي للأبنية الحديثة، لتكوين التجربة خير برهان، حيث أمكن للمادة العازلة ببنيتها النانوية والميكروية، زيادة نسبة امتصاص طاقة موجة الصوت التي ضاعت بين السطوح البينية الكثيرة لتلك البنية النانوية، مما حسن من جودة أداء العزل الصوتي للمادة العازلة.

5-1: المواد الأولية والأدوات المستخدمة وتحضير العينات:

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية من جهة أخرى يمكن القول إن هناك عدة عوامل تؤثر على أداء المادة العازلة للصوت على مستوى النانو، أهمها كثافة المادة ودرجة سامتتها وقوتها، وسمakanة العازل، ومساحة السطح النوعي للبنية ودرجة تجانسها. هناك دراسات أخرى توصلت لطرق وقياسات مخبرية لتعبير عن العزل الصوتي من خلال معدل فقدان انتقال الصوت عبر بنية المادة العازلة، والذي يعرف بأنه الفرق بين مستوى طاقة موجة الصوت الواردة على سطح العازل وطاقة موجة الصوت المنتقلة عبره، ورمزه (STL) sound transmission loss)، أي معدل امتصاص الصوت، والذي يمكن قياسه مخبرياً من خلال استخدام جهاز بسيط المبدأ، عبارة عن أنابيب معزولة عن الوسط الخارجي، وفي بدايته مضخم صوت (عبارة عن مصدر مرسل للموجة الصوتية)، وقبل نهايته توضع العينة وقبل العينة يوجد حساسان لقياس شدة موجة الصوت المنعكسة عن سطح العازل، وفي نهايته (أي بعد العينة) يوجد حساس يستشعر شدة موجة الصوت المنتقلة عبر سماكة مادة العازل، الشكل (12). Jae-Chul et al., 2008,1468



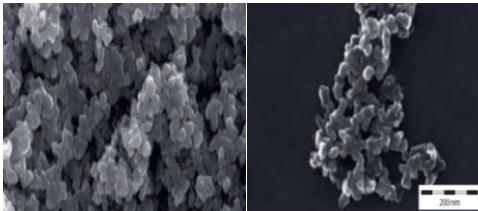
الشكل (12) رسم توضيحي لجهاز اختبار عزل الصوت (Jae-Chul et al., 2008,1469)

هنا تعتبر المسافات (x_1, x_2) بين سطح العينة وحساسى القياس قبلها، والمسافة (s) بين حساسي القياس نفسها. نظرياً، يُعبر عن شدة موجة الصوت الواردة من المصدر (المضخم) بالرمز $(I_i(f))$ المعادلة (5)، وشدة موجة الصوت المنعكسة عن سطح العينة بالرمز $(I_r(f))$ المعادلة (6)، (Jae-Chul et al., 2008,1469)، والتي يمكن حسابها من معامل انتقال الصوت $(H_{12}(f))$ بين الأبعاد (x_1, x_2) ، حيث يُعبر عن معامل (magnetic spectral density function) عند البعد (x_1) وبالرمز $(S_{11}(f))$ عند البعد (x_1) و $(S_{22}(f))$ عند البعد (x_2)

ابراهيم، قدار

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية

تأمينها من السوق المحلية، منشأ الصين، يبين الشكل (13) صورة ماسح الكتروني (SEM) خاص بهذه المادة. (Evonik, 2015,36).



الشكل (13) صورة ماسح الكتروني (SEM) و(TEM) لحببات (Aerosil200)، (Evonik, 2015,36).

- مادة الإيبوكسي الطلائية (coating epoxy): تتكون من خليطين (الريزن والمقسى)، نسبة الخلط الوزنية (1:1)، من السوق المحلية.
- مادة فوم البولي يوريثان الصلب: يتكون من خليطين هما (البوليول poly-yol والإيزوسيلانات iso-cyanat)، نسبة الخلط الوزنية (1:1)، تُصب المادة بعد الخلط المتجانس في قالب لتصلب بدرجة حرارة الجو، كثافته (250 كغ/م³)، من السوق المحلية.

5-2: تحضير وتوصيف العينات:

تم تحضير ست عينات، موصفة في الجدول (2) ومبينة في الشكل (14)، من المواد النسيجية المركبة والمعززة بالحببات النانوية ذات المسامية العالية (80% من حجمها هواء)، والألياف الميكروية (زجاجية وبازلتية)، لاختبار كفاءة عزلها الصوتي للأبنية، (أسطوانية قطرها 8.5 cm، سماكتها 4 cm)، تم التشكيل ضمن قالب أسطواني معدني، بنفس الأبعاد، أو بقص العينة وفق تلك الأبعاد.

وطريقة تحضير العينات تبينها في الوصف التالي:

تم خلط المواد النانوية مع مادة البوليول (polyol) ثم خلط مادة الإيزوسيلانات (isocyanate) لتفعيل المزيج، فيساعد القوام على إغلاق مسامات السيليكا النانوية التي يشكل الهواء (80% من حجمها)، وفي عينات أخرى تم إضافة طبقة من شبكة الألياف الميكروية المقطعة (زجاجية أو بازلتية)، من هنا أتى تأثير علم النانو في زيادة مساحة السطح النوعي للبنية بالنسبة لواحدة الوزن (m²/gr)، فزادت قدرة بنية العازل على تشتت وامتصاص طاقة موجة الصوت بين جدرانها وسطوتها نانوية الأبعاد، ثم تضاف طبقات من النسيج ثنائي أو ثلاثي الأبعاد،

تم تحضير ست عينات، الشكل (14)، من المواد النسيجية المركبة من الألياف والنسيج التقنية الزجاجية والبازلتية مع فوم البولي يوريثان الصلب مغلق الخلايا (close cell)، والمعززة بشبكة من المواد والحببات النانوية من السيليكا (SiO₂) ذات المسامية العالية (80% من حجمها هواء) والسيليكا المفقومة، (Aerosil200)، المستخدمة في دهانات الإيبوكسي كمادة مثخنة ومقاومة، ثم يستخدم طلاء الإيبوكسي لحفظ تلك المواد من الاحتكاك بالوسط الخارجي. كما تم توزيع مكونات تلك العينات، الجدول (2)، انطلاقاً من نتائج الدراسات المرجعية.

5-1: توصيف المواد الأولية المستخدمة في تصنيع العينات:

- ألياف زجاجية مقطعة (chopped strands): قطرها (9 ميكرون) طولها (8-12 مم)، صينية المنشأ، متوفرة من السوق المحلية.
- قماش زجاجي (Stitch Bonded Mat) غير منسوج: مصنوع من ألياف زجاجية نوع (E)، وزن المتر المربع (300 gr/m²)، تم تأمينها من السوق المحلية، والمنشأ صيني.
- نسيج زجاجي: ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (10 مم)، وزن المتر المربع (1480 gr/m²)، التركيب النسيجي (plain 1/1)، منشأ صيني.
- نسيج زجاجي: ثنائي الأبعاد نوع (woven roving) E-glass 1/1 type (plain 1/1) سماكته (0.4 مم)، وزن المتر المربع (300 gr/m²)، التركيب النسيجي سادا (plain 1/1)، تم تأمينها من السوق المحلية، منشأ صيني.
- ألياف بازلتية مقطعة (Basalt chopped fibers): قطرها (9 ميكرون) طولها (8-5 مم)، صناعة محلية.
- مادة حبيبات السيليكا النانوية (nano-silica particles): الاسم التجاري (Aerosil 200)، كثافتها (50 m²/g)، مساحة السطح النوعي للبنية (220 m²/g)، أبعاد الحبيبات (20-12 نانومتر)، محبة للماء، تستخدم في صناعة الدهانات والمواد المركبة كمحسن لزوجة ومثخن للطلاءات، تمتلك خواص حرارية عالية، تتأثر بالرطوبة وتناثر بسهولة في الوسط إذا ما حفظت ضمن حيز أو كيان أو بنية مغلقة، تم

ابراهيم، قدار

- 4- العينة الرابعة: مادة فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³)، مدعة بحبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-) Basalt silica powder (اللياف بازلتية مقطعة) chopped fibers قطرها (9 ميكرون) طولها (5-8 مم) والمحفوظة بطبقة طلاء من مادة الايبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمخابر.
- 5- العينة الخامسة: اللياف بازلتية مقطعة Basalt (اللياف بازلتية مقطعة) chopped fibers قطرها (9 ميكرون) طولها (8-5 مم) ، مدعة بحبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica) powder (اللياف بازلتية مقطعة) ، والمحفوظة بطبقة طلاء من مادة الايبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمخابر.
- 6-العينة السادسة: مادة فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³) المعزز باللياف الزجاجية المقطعة، المستخدم في تصنيع ألواح العزل.

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية بغرض إكساب البنية الجسأة والمرنة الكافية لحاجة التطبيق (جدران، أسقف، أنابيب)، أو تم حقن خليط من الإيبوكسي والحببات السيليكا داخل فراغات النسيج ثلاثي الأبعاد والمفرغ (ذى السماكة 10 مم).

وتوصيف هذه العينات كما يلى:

- 1- العينة الأولى: نسيج زجاجي غير منسوج نوع (nonwoven E-glass) كثافته (250 كغ/م³)، مدعة بحبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder) وألياف ميكروية زجاجية نوع (E)، والمحفوظة بطبقة طلاء من مادة الايبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمخابر.
- 2- العينة الثانية: نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (10 مم)، مدعة بحبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder) زجاجية مقطعة (E-glass) قطرها (9 ميكرون) طولها (12-8 مم)، والمحفوظة بطبقة طلاء من مادة الايبوكسي.

- 3- العينة الثالثة: نسيج زجاجي شائي الأبعاد نوع (woven roving plain 1/1 type E-glass) سماكته (0.4 مم)، مادة فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³)، مدعة بحبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder) زجاجية مقطعة (E-glass) قطرها (9 ميكرون) طولها (12-8 مم) ، والمحفوظة بطبقة طلاء من مادة الايبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمخابر.

التركيب (w%) نسبة وزنية								
E-glass fibers	Basalt fibers	Epoxy resin	nano silica powder	PU ¹	nonwoven E-glass	3D spacer fabric E-glass	woven roving plain E-glass	
1	0	36	7	36	20	0	0	1
1	0	20	7	32	0	40	0	2
1	0	36	7	36	0	0	20	3
0	20	37	7	36	0	0	0	4
0	20	73	7	0	0	0	0	5
0	0	0	0	100	0	0	0	6

¹PU: Poly Urethane

تم استخدام الأدوات التالية في تحضير العينات:

1. عبوات بلاستيكية لخلط مواد الايبوكسي والفوم.
2. ميزان دقيق، بمجال خطأ رتبة (0.1 gr).
3. فرشاة لإشباع النسيج بالخلانط المحضرة.
4. قالب معدني أسطواني بالأبعاد (4 cm, 8.5 cmØ).

تم اختبار العينات في جامعة حلب- كلية الهندسة الميكانيكية- قسم هندسة الغزل والنسيج، على الجهاز المصمم والمنفذ وفق المرجع رقم [13]، الشكل (14)، الذي يعمل وفق المعايير القياسية رقم (ASTM C384-04)، ثم مقارنة كفاءة العزل الصوتي ($R_w\%$) لكل من العينات الخمس مع العينة السادسة المعبرة لأكثر تفاصيل عزل الصوت التقليدية انتشاراً (الواح العزل من الفوم البولي يوريثان الصلب المعزز بالياف الزجاجية المقاطعة).

5-2-2: جهاز اختبار امتصاص الصوت وكفاءة العزل الصوتي (R_w): الشكل (15):

يتكون جهاز قياس امتصاص الصوت الذي تم توضيح مبدأ عمله العام وفق الشكل (12)، من الأجزاء التالية: (مصطفى، 2009، 66).

1-طاولة خشبية ثابتة مستوية يتوضع عليها الجهاز دون أي

اهتزازات (مزودة بمحمدات).

2-علبة مغلفة (30x30 cm) عازلة للصوت.

3-أنبوب مبطن عازل للصوت.

4-سماعات ذات حساسية عالية.

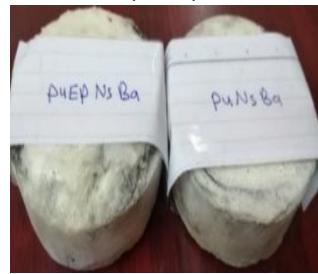
5-جهاز مضخم للصوت. 6-سدادة خشبية.



العينة الثانية



العينة الأولى



العينة الرابعة



العينة الثالثة



العينة الخامسة

الشكل (14) صور العينات المحضرة
لاختبار كفاءة العزل الصوتي وامتصاص الصوت

5-1-3: توافق العينات مع الدليل الشامل للعزل الحراري والصوتي في الأبنية

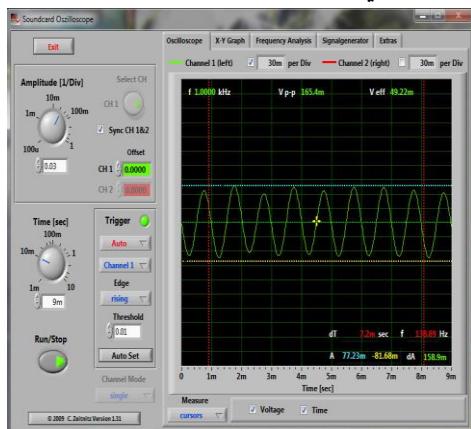
من الدليل، نجد أن أعلى المنتجات العازلة ذات كثافة منخفضة ويشكل الهواء النسبة الأعظم من بنيتها، وتمتلك سماكات كبيرة، (Arval, 2009,26-54)، لذا تم عند تحضير هذه العينات، ومقارنتها بمنتجات ذلك الدليل، مراعاة أن تتراوح السماكة (35-100 مم)، مأخذناً بالاعتبار عامل الكفاءة، فكانت سماكة العينات (40 مم).

5-2: التجهيزات المستخدمة في التحضير والاختبار:

5-2-1: الأدوات المستخدمة في تحضير العينات:

ابراهيم، قدار

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد الفانوية



الشكل (16) واجهة البرنامج (Sound card oscilloscope)

لتجهيز اختبار عزل الصوت

(مصطفى، 2009، 69)

3-3: النتائج:

يبين الجدول (3)، نتائج اختبار كفاءة عزل الصوت لكل عينة، من خلال قياس طول موجة الصوت الصفرية، والموجة التي يلقطها ميكروفون استقبال الإشارة عند كل عينة، بتردد (1000 Hz)، ثم بنسبة الفرق بينهما إلى طول موجة الصوت الصفرية (276.2 متر)، الشكل (17)، نحصل على معدل امتصاص العينة للصوت ($R_w\%$).

يبين الشكل (17)، صورة لقطة شاشة لموجة الصوت الصفرية، التي تعبّر أنبوبة الاختبار دون وجود عازل صوتي، بينما يبيّن الشكل (f, e, d, c, b, a18) صورة لقطة شاشة لموجة الصوت التي تعبّر أنبوبة الاختبار بوجود العينات من الأولى وحتى السادسة وبالتالي.

الجدول (3) نتائج اختبار عزل الصوت لتردد (1000 Hz)

نسبة العزل) (R _w % امتصاص الصوت	طول موجة الصوت (متر)، الملتقطة بوجود عينة العزل	رقم العينة
97.85	5.941	1
99.56	1.188	2
98.75	3.465	3
96.94	8.455	4
92.37	21.085	5
85.55	39.92	6



علبة خشبية مغلقة معزولة جيداً
تحوي أربع فتحات لثبت الأنابيب
من الأمام وتوضع السماعات
المحدثة للصوت من الخلف والأمام

طاولة خشبية، ثابتة
مزودة بمخدمات اهتزاز



أنبوب عازل للصوت مصنوع من مادة (PVC) بقطر (12.5 سم)
وطول (2 م) وسمك (3 مم)



مضخم الصوت يقوم باستقبال
الإشارة الصوتية وتضخيمها
وإعادتها عبر السماعات

AHUJA®



سماعات لإصدار الصوت
بتردد معين وبشدة مطال
محددة

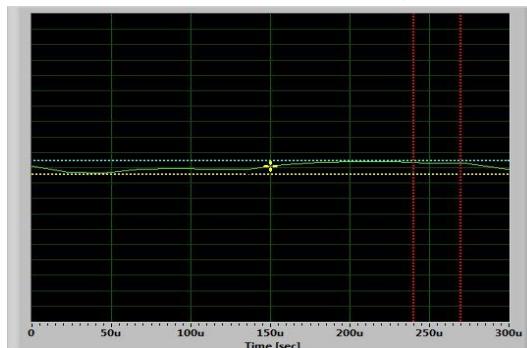


السداقة الخشبية
الإشارة الصوتية المنعكسة
من العينة

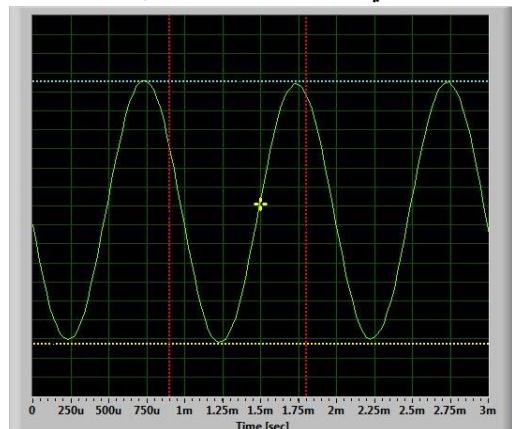
الشكل (15) أجزاء جهاز اختبار امتصاص الصوت وكفاءة العزل الصوتي، (مصطفى، 2009، 69-66)

3-2-3: برنامج قراءة امتصاص الصوت:

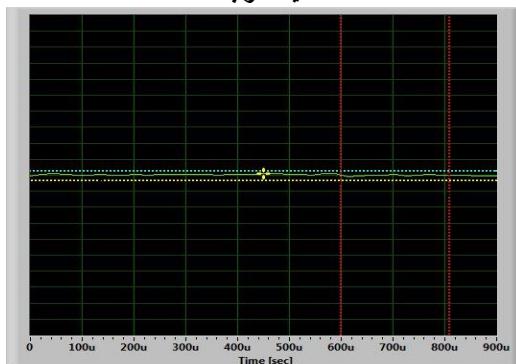
وهو عبارة عن برنامج حاسبي لقراءة وتحليل امتصاص الصوت، اسمه (Sound card oscilloscope) من شركة (Christian Zeitnitz) الألمانية، يوضح الشكل (16) واجهة البرنامج، حيث يقوم بحساب شدة الموجة الصوتية المنعكسة بمعرفة شدة الموجة الصوتية الواردة، ثم باستخدام العلاقات (7) و (8) يمكن حساب معامل امتصاص الصوت لكل عينة، ومنه باستخدام العلاقة (4)، يمكن حساب مؤشر العزل الصوتي (R_w) للعينات المختبرة. (مصطفى، 2009، 69)



الشكل (d18): لقطة شاشة لموجة الصوت الخاصة باختبار العينة الرابعة



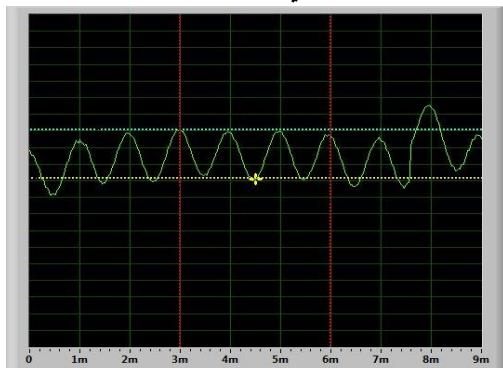
الشكل (17): لقطة شاشة لموجة الصوت الصفرية



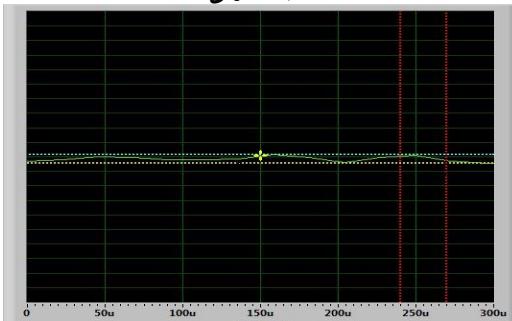
الشكل (e18): لقطة شاشة لموجة الصوت الخاصة باختبار العينة الخامسة



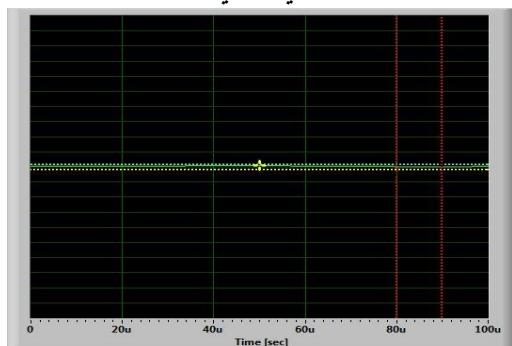
الشكل (a18): لقطة شاشة لموجة الصوت الخاصة باختبار العينة الأولى



الشكل (f18): لقطة شاشة لموجة الصوت الخاصة باختبار العينة السادسة



الشكل (b18): لقطة شاشة لموجة الصوت الخاصة باختبار العينة الثانية



الشكل (c18): لقطة شاشة لموجة الصوت الخاصة باختبار العينة الثالثة

من نتائج الاختبارات الخاصة بهذا البحث، الجدول (3)، نجد أن أفضل العينات المحضرة هي العينة الثانية حيث انخفض مطال موجة الصوت الواردة بالتردد (1000 Hz) حتى 1.188 م، ووصلت نسبة عزل الصوت حتى (99.56%)، وهي كفاءة عزل مرتفعة لتردد يعتبر متوسط الحدة، مقارنةً بالدراسات المرجعية. وتكون هذه العينة من (نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع 3D spacer fabric type E-glass) سمكها (10 مم)، مدعمة بحببيات من السيليكا النانوية مسامية البنية، والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder).

5-4: النتائج:

ابراهيم، قدار

الأبعاد والمفرغ (E-glass fabric type spacer) (3D)، حيث كفاءة العزل حتى (99.56%)، ولكنه أفضل من استخدام القماش الزجاجي الغير منسوج كما في العينة الأولى، حيث كانت كفاءة العزل حتى (97.85%).

هذا في حال استخدام باقي المكونات (فوم، إيبوكسي، الألياف مقطعة، حبيبات سيليكا نانوية) بنفس النسب الوزنية في هذه العينات الثلاث، لكن سوف يتحسن أداء العينات عند زيادة نسبة الألياف الميكروية (زجاجية، بازلتية)، أو زيادة عدد طبقات القماش المنضد على وجهي كل عينة، بسبب زيادة كثافة مادة العازل، لكن ذلك سوف يسبب زيادة في الوزن والكلفة، كما أن زيادة نسبة الحبيبات النانوية من السيليكا فوق النسبة (7%) سوف يزيد من الكلفة من جهة، وهو غير محمود حتى النسبة (15%) وفقاً لنتائج الدراسات المرجعية، (J. Yan, 7)، ومن جهة أخرى فإن تحسن كفاءة العزل الذي أبدته العينات الخمس التي شكلت حبيبات السيليكا النانوية (7%) من مكوناتها، ممتاز مقارنةً بعينة العزل التقليدي رقم (6)، حيث وصلت نسبة العزل الصوتي حتى (99%) وهو عزل شبه تام، كما أن الاختبار تم باستخدام طاقة موجة صوتية بتردد (1000 Hz)، وهو تردد متوسط الحدية، مما أعطى دقة في النتائج، فإجراء اختبار كفاءة العزل الصوتي عند أصوات بترددات منخفضة يعطى دقة أكبر، (مصطفى، 2009، 77؛ Bihola et al., 2015, 9).

تعتبر الأقمشة الغير منسوجة أقل كلفة وأسهل تطبيقاً على المستوى الصناعي، من تلك المنسوجة سواء كانت ثنائية أو ثلاثة الأبعاد، أي أن كلفة استخدام الأقمشة الزجاجية نوع (-Glass) الغير منسوجة، في العزل الصوتي أقل بكثير من كلفة استخدام نسيج زجاجي منسوج ثانوي أو ثلاثي الأبعاد، كما يبين الجدول (4) ذلك، وبنفس الوقت فقد كان الفارق الذي أحدهه استخدام نسيج ثانوي أو ثلاثي الأبعاد ضئيل (0.9-0.71%) (كتحسن بنسبة العزل الصوتي) مقارنة باستخدام قماش غير منسوج.

عند المقارنة بين نتائج كفاءة العزل، الجدول (3)، لعينات الألياف الزجاجية (1,2,3) من جهة وعينات الألياف البازلتية (4,5) من جهة أخرى، نلاحظ كفاءة الأداء الذي يمنحه

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة (E-glass) قطرها (9 ميكرون) طولها (8-12 مم)، والمحفوظة بطبقة طلاء من مادة الإيبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمختبرات. ونظراً للكثافة المنخفضة للحبيبات النانوية (5 g/L)، ومساحة السطح النوعي لبنيتها الداخلية (225 m²/gr)، (Evonik, 2015,36)، وبالعودة للمراجع والدراسات المرجعية، في بداية هذا البحث، الفقرة (2)، نلاحظ أن أفضل نسبة وزنية لإضافة الحبيبات والممواد ذات البنية النانوية هي (7%)، (Shanaz et al., 2020,495 J. Yan, 7)، وهي النسبة التي تم اعتمادها والانطلاق منها في هذا البحث، وهي متوفرة في السوق المحلية، وقد كانت نسبة كافية لتحسين نسبة العزل الصوتي للعينات إلى أكبر من (92%) كما بينت النتائج، في الجدول (3)، كما أن استخدام مادة فوم البولي يوريثان الصلب مغلق الخلايا أمر ضروري للغاية في جميع العينات، نظراً لأنخفض كثافته وكلفته وبنيته المسامية الميكروية الأبعاد، بالإضافة إلى كثرة انتشاره في السوق المحلية، ومن جهة أخرى، وبالعودة للدليل الشامل لمنتجات العزل الصوتي والحراري، (Arval, 2009,26-54)، لتكون سماكة العازل (35-65 mm)، كما أن وجود مادة الفوم في بنية العازل خفض من الكلفة كما بينت المقارنة بين العينتين (4 و 5) ذلك، الجدول (4)، بالإضافة لأنخفض وزن العازل كون كثافة مادة الفوم (0.25 gr/cm³)، بينما كثافة مادة الإيبوكسي (1.17 gr/cm³) والتي شكلت نسبة (73%) من تركيب العينة رقم (5).

عند استخدام نسيج زجاجي يحوي بتركيبته أكسيد لامعدي ولاعضوية، ومن أهمها أوكسيد السليسيوم (SiO₂) الذي يشكل نسبة (55%) من تركيبة هذه الألياف، تعززت الألفة الكيميائية بين الألياف الزجاجية وحبيبات السيليكا النانوية (SiO₂)، مما كان سبباً إضافياً في اختيار الألياف الزجاجية والسيليكا النانوية كمكونات رئيسية للمادة النسيجية المركبة في تحضير عينات العزل الصوتي.

يبدو واضحاً أن لاستخدام النسيج الزجاجي ذي النوع (-Glass) المنسوج بتركيبة السادة (1/1)، تأثيراً يعتبر مقبولاً في العينة الثالثة حيث كانت كفاءة العزل حتى (98.75%)، ولكنه ضئيل مقارنة بالعينة الثانية والتي استخدم فيها النسيج ثلاثي

ابراهيم، قدار

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية

معدات وتقنيات خاصة للعمل مثل (ساحبات هوائية ينتهي خرجها بأسطح مائية لالتقاط الحبيبات المتناثرة، معدات حماية شخصية). يمكن طحن مخلفات تلك المواد واستخدامها من جديد كمكونات في المواد المركبة، وبالتالي يمكن خفض الأثر السلبي لتلك الحبيبات على البيئة، والذي تمت مراعاته أيضاً عند تحضير عينات هذا البحث، باستخدام مادتي النسيج والفوم كحافظة بنوية ميكروية الأبعاد لحبوبات السيليكا النانوية، وكذلك شكل طلاء الإيبوكسي طبقة حامية للفوم وحبوبات السيليكا معاً من عوامل الوسط الخارجي (رطوبة، أشعة الشمس)، لكن إعادة تدوير هذه المواد وقابلية استخدامها لاحقاً في تطبيقات مماثلة للعزل الصوتي يتطلب أبحاثاً أخرى مستقلة.

إن تقانات تطبيق علم النانو عديدة، منها عالية الكلفة التي تستخدم لتطبيقات نوعية ومخبرية، ومنها منخفضة الكلفة (مثل تقانة (sol-gel))، حيث يمكن الحصول على مادة السيليكا النانوية المستخدمة في هذا البحث بتقانة (sol-gel)، وبتقانة (spry-dry) وهي مكلفة، (Evonik, 2015,8)، هناك أنواع تجارية متعددة من حبوبات السيليكا النانوية (Aerosil)، (Evonik, 2015,60)، وكل منها تطبيق وخصائص وكيفية مختلفة.

من خلال حساب كلفة كل عينة من العينات الخمس وفقاً لأسعار السوق المحلية، (الجدول 4)، نبين الوفر الاقتصادي على مستوى السوق المحلية بنسبة حتى (18%) لأفضل العينات (العينة 2) التي بلغت كلفتها حتى (25 دولار أمريكي للمتر المربع)، بالمقارنة مع أسعار ألواح العزل من مادة الفوم (Foam Sandwich Panel 30\$/sqm))، وتغير عنها العينة (6) في هذا البحث، فضلاً عن توافر المواد الأولية في السوق المحلية.

الجدول (4) يبين كلف العينات

رقم العينة	الكلفة \$ بالметр المربع
1	9.35
2	25
3	17.06
4	5.75
5	6.8

استخدام الألياف الزجاجية في عزل الصوت، لكن استخدام الألياف البازلتية أقل كلفة، الجدول (4)، ويعطي المنتج العازل خواصاً ميكانيكية أعلى مما تمنحه الألياف الزجاجية، كون معاملات الشد والمتانة الخاصة بالألياف البازلتية أعلى من تلك لدى الألياف الزجاجية نوع (E)، (Jianxun, 2020,882)؛ (Basfiber®، Yeran, 2022,3)، إذاً يمكن المفاضلة بين العينتين الأولى والرابعة (الزجاجية والبازلتية)، من حيث الكلفة عندما تُهمل الكثافة العالية للألياف البازلتية، واستخدامها لعزل الأرضيات على سبيل المثال.

6: الخلاصة:

تعتبر المواد النسيجية المركبة نانوية البنى بدعة خلاقة في مجال صناعة العزل الصوتي الذي للأبنية الحديثة والمعاصرة، وذلك بالمقارنة مع تقانات العزل التقليدية، حيث تعمل المواد والحبوبات النانوية دور المادة الفعالة التي ترفع من سوية الأداء الوظيفي في العزل، بينما مصفوفة المواد الداعمة تكون عبارة عن ألياف ميكروية أو نانوية موزعة عشوائياً في بنية المادة المركبة أو نسيج (woven/non-woven) تُحمل عليه هذه الحبوبات النانوية، ومن ثم تأتي المادة البوليمرية الرابطة كإيبوكسي والبولي إستر و الفينيل إستر لتجمع بين المكونات السابقة بتقنية الغمر والتشريب (Lay-up/Spray-up/Pre-Preg) أو التغطية (Coating).

من نتائج هذا البحث، نلاحظ التأثير الكبير الذي يلعبه إضافة النسيج ثلاثي الأبعاد والمفرغ الذي يحوي فراغات مسامية من رتبة المليمتر، وإضافة حبوبات السيليكا النانوية ذات البنية المسامية من رتبة المتر، وشم تعزيز البنية بالألياف الميكروية، حيث اجتمعت معاً في خدمة تحسين الأداء الوظيفي لا وهو العزل الصوتي، بإكساب بنية العازل مساحة سطح نوعي أكبر من ($200 m^2/gr$)، وبالتالي سطوح وأجسام أكثر لتصطدم بها موجة الصوت التي امتصتها البنية وتشتت بين زواياها، فتزداد نسبة امتصاص الصوت وبالتالي كفاءة العزل الصوتي.

من مساوى استخدام المواد النانوية في هذا البحث، هو مخاطر التعامل معها وإعادة تدويرها، كونها دقيقة الأبعاد وسهلة التناول في المحيط، وهي أكسيد لامعدنية لاعضوية، مما يتطلب توفر

ابراهيم، قدار

تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة المعززة بالمواد النانوية

في الختام، لابد من القول إن اختيار العزل الصوتي الأنسب للأرضيات والأسقف والجدران يتطلب اعتبار كل ما ذكر أعلاه، هناً بالسوق (فعندهما تدعو الحاجة إلى تحقيق عزل صوتي شبه تام بنسبة تقارب (100%)، سيصبح تأثير الكلفة ثانوياً)، وخطاً لا حياد عنه موازيًا في هذا البحث لخط استحضار تكنولوجيا النانو لمواد وحبيبات مسامية البنى تدخل في تركيب المادة العازلة بنسب كافية لإحداث الفرق من حيث الأداء دون التأثير على الكلفة.

تم في هذا البحث تسليط الضوء على الدور الفعال الذي يلعبه استحضار أبسط تقانات علم النانو ومواده، واتحادها مع المنسوجات والألياف التقنية (رجاجية بازلتية) ميكروية الأبعاد، وتحسين خواص المواد النسيجية المركبة، كبنية متكاملة قادرة على رفع جودة العزل الصوتي في الأبنية الحديثة، وتأمين بيئة عمل مريحة وهادئة.

بطاقة شكر:

نتوجه بالشكر للسادة القائمين على تصميم وتصنيع الجهاز المستخدم في التجربة (جهاز قياس امتصاص الصوت) في قسم هندسة الغزل والنسيج في جامعة حلب، والذي ساعد في معرفة كفاءة العزل الصوتي لكل عينة محضرة في هذا البحث، واستند فيه على المواصفة القياسية (ASTM C384-04).

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

References:

1. Seyed Hassan Paknejad and Morteza Vadood, (2021), Effective Parameters, Modeling, and Materials in Sound Absorption: A Review, Journal of Textiles and Polymers, Vol. 10, No. 1, P-P: 3-21, Yazd, Iran, ITAST.
2. Bharat Bhushan, (2004), Springer Handbook of Nanotechnology, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, SPRINGER, P: 1258.
3. A.P.S. Sawhney and B. Condon, K.V. Singh, S.S. Pang and G. Li, David Hui, (2009), Modern Applications of Nanotechnology in Textiles, Textile Research Journal, Vol 78(8), P-P: 731–739, Los Angeles, USA, SAGE.
4. V Kartik Ganesh, (2021), Nanotechnology in Civil Engineering, ACADEMIA, Department of

- ابراهيم، قدار المعززة بالمواد الفانوية 13. الرشيد الأحمد، مصطفى. (2009)، العوامل المؤثرة في درجة امتصاص الصوت في المنسوجات، هندسة الغزل والنسيج، كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب، سوريا. ص: 104.
14. Evonik Industries, (2015), Aerosil®-Fumed Silica, Technical Overview, Hanau-Wolfgang Germany, P: 104.
15. ASTM standard C384-04, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustic Materials by Impedance Tube Method.
16. J. Yan, J.C.Lee, C.W.Lee, D.W.Kang, Y.J.Kang, and S.H.Ahn, Soundproof Effect Of Nanoclay Reinforced Polypropylene Composites, School of Mechanical and Aerospace Engineering and Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul National University, Seoul, South Korea, P: 9.
17. Jianxun Liu, Meirong Chen, Jianping Yang, and Zhishen Wu, (2020), Study on Mechanical Properties of Basalt Fibers Superior to E-Glass Fibers, Journal of Natural Fibers, Volume 19, 2022-Issue 3, P-P: 882-894, London, UK., Taylor &Francis.
18. Basfiber®, Kamenny Vek, Advanced Basalt Fiber, Dubna, Moscow reg., Russia.
19. Liangang Zheng, Mohamed Amine Aouraghe, Kun Zhang, Fujun Xu, (2020), Ultra-light 3D fabric Reinforced Composite with Distinct Thermal Insulation and Superior Sound-absorbing Properties, Journal of Physics: Conference Series, 1790 (2021) 012065, P-P: 1-6, Shanghai, PR China, IOP Publishing.
20. D.V. Bihola, H N Amin,V D Shah, (2016), Application of Nano Material to Enhance Acoustic Properties, International Journal of.
21. Engineering Science and Futuristic Technology, IJESFT 12 (2015), P-P: 001-009, Gujarat, India, A D Publication.
22. Chang Penga, Mengyue Chena, James B. Spicerb, and Xiaoning Jiangc, (2021), Acoustics at the nanoscale (nanoacoustics): A comprehensive literature Review, ScienceDirect, S0924424721001825, P: 116, Raleigh, and Baltimore, USA, Elsevier.
- تحسين العزل الصوتي للأبنية الحديثة باستخدام المواد النسيجية المركبة Civil Engineering, SRM University Kattankulathur, Chennai-603203, P-P: 1-11, INDIA, Academia.
5. Nesrin Sahbaz Karaduman, Yekta Karaduman,Huseyin Ozdemir and Gokce Ozdemir, (2017), Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications, Edited: Nesrin Sahbaz Karaduman, Textiles for Advanced Applications, Chapter 4, P-P: 87-133, Yozgat, Turkey, INTECH OPEN.
6. Shanaz Hussein Ahmad, Rana Mahdi Salih, (2020), Acoustic and Thermal Insulation of Nanocomposites for Building Material, Baghdad Science Journal, 17(2), P-P: 494-501, Baghdad, Iraq, Baghdad Science Journal.
7. Tomáš Ulrich, and Jorge P. Arenas, (2020), Sound Absorption of Sustainable Polymer Nanofibrous Thin Membranes Bonded to a Bulk Porous Material, Sustainability 2020, 12, 2361, P-P: 1-15, Liberec, Czech Republic, MDPI.
8. Yeran Wang, Junmei Liu, Lixia Jia and Zhenhong Chen, (2022), Recent Advances in Woven Spacer Fabric Sandwich Composite Panels: A Review, Polymers 2022, 14, 3537, P-P: 1-19, Shijiazhuang, China, MDPI.
9. Arval, (2009), Acoustic and thermal guide (A guide for energy saving and noise comfort in buildings), ArcelorMittal, P: 130.
10. Anthony Zander, Md Ayub, Benjamin Cazzolato, Carl Howard, Md Julker Nine, Dusan Losic, David Huang, Diana Tran, and Hywel Bennett, (2018), Acoustics at the Nanoscale, Acoustics 2018, 7-9 November, P-P: 1-18, Adelaide, Australia, The University of Adelaide.
11. Alice Elizabeth González, (2019), How Do Acoustic Materials Work? Edited: Alice Elizabeth González, Acoustics of Materials, Chapter, P-P: 1-17, Montevideo, Uruguay, INTECH OPEN.
12. Jae-Chul Lee, Young-Sun Hong, and co-authors, (2008), Soundproofing effect of nano particle reinforced polymer composites, Journal of Mechanical Science and Technology, P-P: 1468-1474, Seoul, Korea, KSME & Springer.

23. Xiuhong Li, Yujie Peng, Youqi He, Chupeng Zhang, Daode Zhang, and Yong Liu, (2022), Research Progress on Sound Absorption of Electrospun Fibrous Composite Materials, *Nanomaterials* 2022, 12, 1123, P-P:1-20, Wuhan, and Beijing, China, MDPI.
24. Xiao Qi Jia, Song Yu Li, Hong Jiang Miu, Tuo Yang, Kun Rao, Dong Yang Wu, Bao Ling Cui, Jun Lang Ou and Zu Chao Zhu, (2020), Carbon Nanomaterials: A New Sustainable Solution to Reduce the Emerging Environmental Pollution of Turbo-machinery Noise and Vibration, *Frontiers in Chemistry*, August 2020 | Volume 8 | Article 683, P: 1-6, Hangzhou, China, Frontiers.
25. NAIMA, (2009), Building Insulation, Pub. No.NCA101 1/14, P-P: 1-9, Ottawa, Canada.
26. Isover, (2019), The Insulation Handbook; Acoustic and thermal insulation solution guide, P: 50.
27. Tiasa, (2001), Thermal Insulation Handbook, The Thermal Insulation Association of Southern Africa, Lyttelton, Southern Africa, The AAAMSA Studio, P: 60.