الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

"أُسسُ تصميمِ وتصنيعِ موادٍ نسيجيةٍ مركَّبة باستخدامِ تكنولوجيا النانو للعزلِ الحراريّ والصوتيّ"

أطروحة مُقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة تكنولوجيا النسيج

إعداد

أوس علي إبراهيم

إشراف

الأستاذ الدكتور المهندس طاهر رجب قدّار

دمشق (2023)

ا

الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

قرار لجنة الحكم على بحث دكتوراه لطالب الدراسات العليا...أوس علي ابراهيم...

استناداً إلى اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم الجمهوري رقم /250/ لعام 2006، وقرار مجلس جامعة دمشق رقم 2411/15 ص تاريخ 2022/05/10 بشأن إجراءات القيد والمناقشة العلنية ومنح الدرجات العلمية في جامعة دمشق، وقرار مجلس جامعة دمشق رقم /1587/ ص.م تاريخ 2023/6/7 بشأن الموافقة على تسجيل بحث الدكتوراه لطالب الدراسات العليا **أوس علي ابراهيم**، لنيل درجة الدكتوراه في اختصاص "تكنولوجيا النسيج". بعنوان:

"أسس تصميم وتصنيع مواد نسيجية مركبة باستخدام تكنولوجيا النانو للعزل الحراري والصوتي"

"Foundations for Designing and Manufacturing Composite Textile Materials by Using Nano Technology for Thermal and Acoustic Insulation"

وتسمية الأستاذ الدكتور المهندس **طاهر رجب قدار** مشرفاً علمياً، واستناداً إلى أحكام المادتين 163 و164 من اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم الجمهوري رقم /250/ تاريخ 2006/7/10، وإشارةً إلى قرار مجلس الكلية رقم /2498/ تاريخ 2023/7/30 باقتراح تشكيل لجنة الحكم والمصادق عليه بقرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم /5466/ م. ب. د المتخذ في الجلسة رقم /23/ المنعقدة بتاريخ 2023/8/21، المتضمن تشكيل لجنة الحكم من السادة:

1	أ. د. وجيه ناعمة	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق اختصاص: (دكتوراه في هندسة التبريد وتطبيقاتها)	عضواً
2	أ. د. طاهر رجب قدار	أستاذ في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق اختصاص:(هندسة تكنولوجيا النسيج).	عضواً ومشرفاً
3	أ. م. د. راميه جابر المحمد	أستاذ مساعد في قسم هندسة الغزل والنسيج بكلية الهندسة الكيميائية والبترولية بجامعة البعث اختصاص: (الأتمتة والتحكم في الصناعات النسيجية).	عضواً
4	أ.م. د. باسل يونس	أستاذ مساعد في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق اختصاص:(برمجة عمليات الإنتاج في الصناعات النسيجية).	عضواً
5	د. بلال زعرور	المدرس في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية اختصاص: (تقانة المواد الغير منسوجة).	عضواً

اجتمعت لجنة الحكم في جلسة علنية لمناقشة بحث الدكتوراه الذي تقدم به طالب الدراسات العليا **أوس علي ابراهيم** في الساعة 11:00 صباحاً من يوم الخميس الموافق 2023/10/05، وبعد الاستماع إلى دفاع طالب الدراسات العليا والمناقشة التي تمت، أوصت اللجنة بما يلي:

1- قبول الأطروحة والحكم على أهلية طالب الدراسات العليا **أوس علي ابراهيم** لنيل درجة الدكتوراه في هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية باختصاص "تكنولوجيا النسيج".

- وبذلك منح طالب الدراسات العليا أوس علي ابراهيم درجة الدكتوراه بعد المناقشة العلنية بتقدير/ امتياز / وعلامة قدرها / 88 / ثمان وثمانون درجة فقط.

دمشق في 05 / 10 / 2023

توقيع السادة أعضاء لجنة الحكم

الدكتور	الأستاذ المساعد الدكتور	الأستاذ المساعد الدكتورة	الأستاذ الدكتور	الأستاذ الدكتور
بلال زعرور	باسل يونس	راميه جابر المحمد	طاهر رجب قدار	وجيه ناعمة

جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

الأستاذ الدكتور عميد كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الموضوع: تعهد بإجراء التعديلات المطلوبة من قبل أعضاء اللجنة على أطروحة الدكتوراه

استناداً إلى قرار جامعة دمشق /1587/ص.م تاريخ 2021/6/7، المتضمن الموافقة على تسجيل رسالة الطالب المهندس **أوس علي ابراهيم** لدرجة الدكتوراه، "اختصاص تكنولوجيا النسيج" في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق، موضوع البحث بعنوان:

"أسس تصميم وتصنيع مواد نسيجية مركبة باستخدام تكنولوجيا النانو للعزل الحراري والصوتي"

"Foundations for Designing and Manufacturing Composite Textile Materials by Using Nano Technology for Thermal and Acoustic Insulation"

وبإشراف الأستاذ الدكتور المهندس **طاهر رجب قدار**.

وإلى قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم/5466/ بالجلسة رقم /23/ تاريخ 2023/8/21 والذي يتضمن الموافقة على تأليف لجنة الحكم على أطروحة الدكتوراه لطالب الدراسات العليا المهندس **أوس علي ابراهيم**، والمؤلفة من السادة:

1	أ. د. وجيه ناعمة	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق اختصاص: (دكتوراه في هندسة التبريد وتطبيقاتها)	عضواً
2	أ. د. طاهر رجب قدار	أستاذ في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق اختصاص:(هندسة تكنولوجيا النسيج).	عضواً ومشرفاً
3	أ. م. د. راميه جابر المحمد	أستاذ مساعد في قسم هندسة الغزل والنسيج بكلية الهندسة الكيميائية والبترولية بجامعة البعث اختصاص: (الأتمتة والتحكم في الصناعات النسيجية).	عضواً
4	أ.م. د. باسل يونس	أستاذ مساعد في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق اختصاص:(برمجة عمليات الإنتاج في الصناعات النسيجية).	عضواً
5	د. بلال زعرور	المدرس في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية اختصاص: (تقانة المواد الغير منسوجة).	عضواً

وإلى قرار لجنة الحكم في الجلسة العلنية لمناقشة بحث الدكتوراه الذي تقدم به طالب الدراسات العليا المهندس أوس علي ابراهيم في الساعة 11:00 صباحاً من يوم الخميس الموافق 2023/10/05، بقبول الأطروحة والحكم على أهلية الطالب أوس ابراهيم (بعد إجراء التعديلات) لنيل درجة الدكتوراه في هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية باختصاص "تكنولوجيا النسيج".

لقد قام الطالب أوس ابراهيم بإجراء التعديلات المطلوبة من قبل أعضـــاء اللجنة على أطروحة الدكتوراه، ولا نرى مانعاً من منحه درجة الدكتوراه في هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية باختصاص "تكنولوجيا النسيج".

أعضاء لجنة الحكم

الدكتور	الأستاذ المساعد الدكتور	الأستاذ المساعد الدكتورة	الأستاذ الدكتور	الأستاذ الدكتور
بلال زعرور	**باسل يونس**	**راميه جابر المحمد**	**طاهر رجب قدار**	**وجيه ناعمة**

دمشق في
2023/10/17

رئيس قسم ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

الأستاذ الدكتور المهندس طاهر رجب قدار

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصا أو مضمونا خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).
2. أنه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

الاسم والتوقيع

شكرٌ وتقدير

لله الحمد ولأوليائه الفضل والمنة. . .الذي هدانا ووفقنا وأعاننا لنصبح على ما نحن عليه

يُشرّفني أولاً أن أتوجه بالشكر وفائق الاحترام والتقدير لأستاذي الفاضل المشرف العلمي على أطروحة الدكتوراه، لما قدمه من توجيهاتٍ وإرشاداتٍ علميةٍ وأكاديمية، كانت منارةً وبوصلةً لي نحو هدفي:

الأستاذ الدكتور المهندس طاهر رجب قدّار

رئيس قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

وأن أتوجه بالشكر الجزيل لأعضاء اللجنة الموقرة جميعاً، الأساتذة المحترمين،

على قبولهم مناقشة أطروحة الدكتوراه

وجزيل الشكر والامتنان لكل من تعاون وساهم في تقديم التسهيلات وتذليل العقبات

لاتمام هذا البحث العلمي

وأخيراً وليس آخراً، وفي كل وقت وحين:

دُعاءَ والدي حفظه الله

زوجتي واخواتي

نبضتيّ قلبي طفليّ محمد وجوري

أُهدي ثمرة هذا النجاح لروح والدتي رحمها الله

الفهرس

فهرس المحتويات Table of Contents

الفهرس	**1**
الملخص	**13**
الفصل الأول: الإطار العام للبحث:	**14**
1.1. مقدمة:	14
2.1. الإشكالية البحثية وأهمية البحث:	18
3.1. هدف البحث ومبرراته:	19
4.1. مصطلحات البحث:	19
5.1. مناهج البحث وأدواته:	21
6.1. حدود البحث:	22
7.1. الدراسات المرجعية والتقانات السابقة:	22
8.1. مكونات البحث:	36
الفصل الثاني: مفهوم العزل الصوتي والحراري للأبنية:	**37**
1.2. العزل الصوتي للأبنية الحديثة:	37
1.1.2. تمهيد:	37
2.1.2. مفهوم الصوت والضجيج:	37
3.1.2. انتشار الصوت:	41
4.1.2. مفهوم العزل الصوتي:	42
2.2. العزل الحراري للأبنية الحديثة:	46
1.2.2. مفهوم العزل الحراري:	46
2.2.2. مفهوم العزل الحراري للأبنية والمنشآت ومرافقها:	48
3.2.2. آلية قياس معامل انتقال الحرارة بالتوصيل λ ومعامل انتقال الحرارة الكلي U:	49
3.2. المعايير العالمية لعزل الأبنية الحديثة:	54
4.2. مصادر الأصوات في الأبنية الحديثة:	56
5.2. مفهوم فقدان نقل الصوت في عزل الأبنية (Sound Transmission Loss):	59

6.2. حساب فقدان نقل الصوت (Sound Transmission Loss STL):	60
7.2. تصنيف فئات نقل الصوت في الأبنية (Sound Transmission Class STC):	61
8.2. تفسير ظاهرة فئات نقل الصوت (STC):	62
9.2. فقدان الصوت الداخل (توهين الصوت) (Sound Insertion Loss):	63
10.2. فقدان انتقال الصوت عبر الأسقف (Ceiling Sound Transmission Loss):	63
1.10.2. تحديد التوهين الصوتي للسقف:	63
2.10.2. تصنيف فئة التوهين الصوتي للسقف ((Ceiling Attenuation Class (CAC):	64
3.10.2. تحسين أداء السقف في العزل الصوتي:	64
11.2. اعتبارات تصميم العزل الصوتي ومتطلباته في الأبنية الحديثة:	65
1.11.2. تأثير الصوت:	66
2.11.2. تحديد التأثير الصوتي وانتقال الضوضاء:	67
3.11.2. تصنيف فئة العزل:	67
4.11.2. زيادة تأثير عزل الضجيج الصوتي (الضوضاء):	68
5.11.2. التحكم في الضوضاء البيئية (إبعاد ضوضاء البيئة الخارجية):	69
6.11.2. تحديد فقد نقل الصوت (Sound Transmission Loss STL) لبناء مركب:	69
7.11.2. زيادة الكتلة:	70
8.11.2. استبدال مكونات الجدار:	71
9.11.2. كسر مسار الاهتزاز:	71
10.11.2. مواد الإحكام ومنع التسرب:	71
11.11.2. الأبواب:	72
12.11.2. النوافذ:	72
13.11.2. الكهرباء:	72
14.11.2. السباكة وتوصيلات المياه:	73
15.11.2. القنوات الهوائية والتكييف:	73
16.11.2. ضوضاء المعدات:	73

الفصل الثالث: المادة النسيجية المركبة وعلم النانو:	**74**
1.3. المادة النسيجية المركبة:	74
1.1.3. تمهيد:	74
2.1.3. خواص المواد المركبة:	76
2.3. مصفوفة المادة النسيجية الداعمة:	78
1.2.3. الألياف الميكروبة والخيوط المقطعة (Chopped Strand):	79
2.2.3. الأقمشة غير المنسوجة (Nonwoven Fabrics):	84
3.2.3. الأقمشة المنسوجة ثنائية الأبعاد (2D–Woven Fabrics):	85
4.2.3. الأقمشة المنسوجة ثلاثية الأبعاد (3D–Woven Fabrics):	87
3.3. مصفوفة مادة الريزين بوليمير (PMC):	92
1.3.3. وظيفة مادة الريزين:	93
2.3.3. اختيار مادة الريزين المناسبة:	94
4.3. دور علم النانو وتقاناته في صناعة النسيج:	95
1.4.3. تعريف تكنولوجيا النانو:	95
2.4.3. تطور صناعة الألياف والنُّسُج ومعالجاتها باستخدام تكنولوجيا النانو:	96
3.4.3. تعريف ببعض المنتجات النسيجية باستخدام تكنولوجيا النانو:	98
5.3. دور تكنولوجيا النانو في عزل الأبنية الحديثة:	100
1.5.3. مجالات تطبيق تكنولوجيا النانو في الهندسة المدنية:	101
2.5.3. دور علم النانو في المواد النسيجية المركبة بغرض العزل الحراري والصوتي للأبنية:	104
6.3. فرضيات تصميم وتصنيع المواد النسيجية المركبة نانوية البنى للعزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة:	107
1.6.3. سلوك التوصيل الحراري ضمن بنية مسامية نانوية الأبعاد (Mesoporous-Ns):	107
2.6.3. سلوك الطاقة الصوتية ضمن بنية مسامية نانوية الأبعاد (Mesoporous-Ns):	110

الفصل الرابع: توصيف المواد وتصميم العينات وتحضيرها:	**112**
1.4. تمهيد:	112
2.4. تحضير المواد الأولية وتوصيفها:	113
1.2.4. المواد النسيجية والليفية والحبيبات الداعمة لبنية المادة النسيجية لمركبة:	113
2.2.4. المواد الرابطة (ريزينات، راتنجات):	113
3.2.4. المواد الأولية المستخدمة في تحضير الحبيبات النانوية ذات البنية المسامية لعزل الأبنية:	114
3.4. توصيف الأدوات والمعدات المستخدمة:	115
4.4. توصيف التجهيزات وأدوات الاختبار:	116
1.4.4. جهاز اختبار امتصاص الصوت (كفاءة العزل الصوتي):	116
2.4.4. جهاز قياس معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (كفاءة العزل الحراري):	118
3.4.4. جهاز اختبار الكثافة والمسامية:	119
4.4.4. جهاز التحليل الطيفي للبنية بحيود أشعة إكس بطريقة المساحيق:	120
5.4.4. جهاز تحليل البنية بالماسح الالكتروني الضوئي:	121
6.4.4. جهاز الاختبارات العامة (متانة الشد، ومقاومة الانحناء):	122
7.4.4. جهاز اختبار مقاومة الانضغاط والانحناء:	123
8.4.4. جهاز تحمل العوامل الجوية المُسرَّعة:	123
5.4. تحضير البنية النانوية:	124
1.5.4. البنية النانوية غير المسامية (Aerosil®200):	124
2.5.4. تحضير البنية النانوية المسامية (Ns-Nanoporous):	125
3.5.4. تحضير البنية النانوية شبه المسامية (Mesoporous):	131
6.4. تصميم العينات وتحضيرها:	132
1.6.4. الدراسة الإحصائية لتصميم العينات، وفق برنامج (Design Of Experiments DOI):	132
2.6.4. تحضير العينات وتوصيفها:	139
3.6.4. توافق العينات مع الدليل الشامل للعزل الحراري والصوتي في الأبنية:	142
4.6.4. خطوات تحضير العينات وتصنيعها:	143

الفصل الخامس: توصيف العينات وتحليلها واختبارها:	**145**
1.5. تمهيد:	145
2.5. تحليل خواص البنية النانوية:	145
1.2.5. تحليل الكثافة ودرجة المسامية والخواص الحرارية:	146
2.2.5. التحليل باستخدام الماسح الإلكتروني الضوئي (SEM):	148
3.2.5. التحليل الطيفي لحيود أشعة إكس بطريقة المساحيق (X-Ray Diffraction XRD):	151
3.5. اختبار العازلية الصوتية والحرارية:	154
1.3.5. اختبار كفاءة العزل الحراري:	155
2.3.5. اختبار كفاءة العزل الصوتي:	156
4.5. اختبار الخواص الميكانيكية:	161
1.4.5. اختبار متانة الشد (Tensile Strength):	162
2.4.5. اختبار مقاومة الانضغاط (Compressive Strength):	164
3.4.5. اختبار مقاومة الانحناء (Flexural Strength):	165
5.5. اختبار التقادم المُسرَّع:	166
6.5. الخلاصة والإضافة العلمية:	168
1.6.5. أسس التصميم والتصنيع المقترحة التي تم التوصل إليها في هذا البحث:	168
7.5. الدراسة الاقتصادية:	171
الخاتمة Conclusion:	**173**
6. مناقشة النتائج:	173
7. المقترحات والتوصيات:	176
8. المراجع:	178
الملاحق Appendices:	**183**
الملحق رقم (1): الجداول الخاصة بالمعايير العالمية، وتصنيف التوهين الصوتي وفقد نقل الصوت (STC)	183
الملحق رقم (2): الجداول الخاصة بالتركيب والنسب الوزنية لمكونات عينات البحث	186
الملحق رقم (3): للاستفاضة بصور ونتائج تحليل الماسح (SEM) للحبيبات النانوية، واختبار عزل الصوت	198
الملحق رقم (4): جداول خواص بعض المواد، وصور بعض الاختبارات والأجهزة	209

قائمة الجداول List of Tables

الجدول (1): خواص عازل البوليستايرين المعزز ببودرة الغرافيت.	27
الجدول (2): خواص ألواح العزل المُفرغة.	28
الجدول (3): أهم خواص الطلاء بالحبيبات النانوية العازلة للأبنية.	31
الجدول (4): يبين بعض بارامترات الاختبار الخاصة بالجهاز (TAURUS TCA500-P) الذي يعمل وفق هذه التقنية.	51
الجدول (5): يبين بعض بارامترات الاختبار الخاصة بالجهاز (Netzsch HFM 446 Lambda Small) الذي يعمل وفق هذه التقنية.	52
الجدول (6): أمثلة عن معامل (Rw) عزل الصوت لبعض المواد.	58
الجدول (7): يبين بعض الخواص المميزة للألياف الكربونية.	80
الجدول (8): يبين بعض الخواص المميزة للألياف الزجاجية بأنواعها.	82
الجدول (9): يبين أسماء المتغيرات التي تعبر عن المواد الأولية الداخلة في كل عينة	133
الجدول (10): يبين باختصار أسماء المواد الأولية النسيجية والليفية الداعمة لبنية المادة النسيجية المركبة، وخواصها.	140
الجدول (11): يبين باختصار أسماء المواد الأولية من بوليميرات وريزينات رابطة وحبيبات نانوية، وخواصها.	141
الجدول (12): نتائج قياس الكثافة والمسامية ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل لعينات حبيبات نانو سيليكا منفردة ثم مع مادة الإيبوكسي كوسط حامل للحبيبات.	146
الجدول (13): يبين نسبة الفاقد الوزني بعد المعالجة الحرارية حتى الدرجة (1150 C°) ولمدة (2–3) ساعة.	147
الجدول (14): نتائج اختبار كفاءة العزل الحراري.	155
الجدول (15): نتائج اختبار كفاءة العزل الصوتي.	156
الجدول (16): يبين طول موجة الصوت النافذة عبر كل عينة من عينات العزل الصوتي المحضرة.	157
الجدول (17): نتائج اختبار مقاومة الشد.	163
الجدول (18): نتائج اختبار مقاومة الانضغاط.	164
الجدول (19): نتائج اختبار مقاومة الانحناء.	165
الجدول (20): يُبين نتائج اختبار التقادم (لمدة عام كامل) لأهم العينات.	166
الجدول (21): يبين مجال تطبيق كل عينة من عينات هذا البحث في عزل الأبنية صوتياً وحرارياً.	169
الجدول (22): يبين الكلفة التقديرية للمتر المربع الواحد لأفضل عينات هذا البحث	172

قائمة الأشكال والرسوم البيانية List of Figures

الشكل (1): صورة لمخطط يبين مدى اهتمام الاقتصاد العالمي بمستقبل تكنولوجيا النانوي.	15
الشكل (2): يبين تطبيقات تكنولوجيا النانو لاستحضار مواد عزل عالية الأداء.	23
الشكل (3): صورة لبنية مسامية ثلاثية الأبعاد نانوية لمواد وحبيبات السيليكا (SiO_2).	24
الشكل (4): رسم يبين طبقات عازل البوليستايرين المعزز ببودرة الغرافيت.	27
الشكل (5): يوضح تطبيق VIPs المعزز بالحبيبات النانوية في العزل الحراري للأبنية.	29
الشكل (6): رسم توضيحي يعبر عن طول موجة الصوت الذي ينتقل خلال فترة زمنية محددة لاتمام دورة واحدة (One Cycle).	38
الشكل (7): رسم توضيحي يعبر عن مستوى الضجيج الصوتي، وفق الدليل: (Armacell GmbH, 2017)	39
الشكل (8): رسم توضيحي يعبر عن مستوى الضجيج الصوتي، وفق الدليل: (Index, 2009)	40
الشكل (9): مخطط (Flechter-Munson) البياني الذي يبين شدة الأصوات التي يمكن للأذن البشرية سماعها تبعاً لتواتر اهتزازها.	41
الشكل (10): يعبر عن انقسام طاقة موجة الصوت وتوزعها ضمن بنية المادة العازلة.	43
الشكل (11): يوضح مفهوم عزل الصوت ضمن البنية النانوية.	43
الشكل (12): يبين مخططاً توضيحياً لجهاز قياس معدل امتصاص طاقة موجة الصوت لمادة عازلة.	44
الشكل (13): يبين رسماً توضيحياً لأشكال انتقال الحرارة في الأبنية.	46
الشكل (14): يبين رسماً توضيحياً لمفهوم الموصلية الحرارية المعبر عنها بكمية انتقال الحرارة (q) عبر واحدة المساحة لوجود فارق محدد بدرجات الحرارة بين وجهي الجدار.	47
الشكل (15): يبين رسماً توضيحياً لآلية اختبار الموصلية الحرارية لمادة ما.	49
الشكل (16): يبين رسماً توضيحياً لاختبار الموصلية الحرارية لمادة ما باستخدام تقنية (Guarded Hot Plate Technique).	50

الشكل (17): يبين رسماً توضيحياً لاختبار الموصلية الحرارية لمادة ما باستخدام تقنية (Calibrated Hot Plate Technique).	52
الشكل (18): يبين واجهة البرنامج الخاص بالجهاز (Tci 25 C-Therm) لقياس الخواص الحرارية لمادة ما.	53
الشكل (19): رسم توضيحي يبين مصادر الضجيج في الأبنية.	56
الشكل (20): رسم توضيحي يبين مواقع توزع العزل الصوتي (الملونة) في الأبنية.	57
الشكل (21): رسم توضيحي لطريقة اختيار منابع الضجيج لاختبار كفاءة عزل الصوت للأبنية.	58
الشكل (22): رسم توضيحي يعبر عن اختبار قياس معامل فقدان انتقال الصوت وفق المواصفة (ASTM E 90).	59
الشكل (23): رسم بياني يعبر عن المعامل (STC) كطريقة لتقييم أداء نقل الصوت الداخلي (Airborne Sound)، عبر الجدار الداخلي أو منظومة كاملة من سقف/أرضية.	61
الشكل (24): يبين مناطق توضع تقانات العزل في الأبنية الحديثة.	66
الشكل (25): مخطط بياني يعبر عن تأثير آلية تصنيف العزل الصوتي.	68
الشكل (26): رسم توضيحي يبين تأثير المنابع الصوتية داخل البناء على الأرضية، حيث ينتقل الاهتزاز من حيز لآخر (غرفة لأخرى)، عبر الجدران والأسقف والأرضيات.	69
الشكل (27): مخطط رسومي بياني يمكن من خلاله تحديد قيمة (STC) لبناء مركب.	70
الشكل (28): يبين صورة ماسح إلكتروني ضوئي توضح مكونات المادة المركبة والسطوح البينية بينها، وصورة نسيج زجاجي بتركيب سادا (1/1).	74
الشكل (29): تحديد متانة الشد ومعاملاتها لأكثر المواد المركبة شيوعاَ.	75
الشكل (30): يبين بعض الأنواع المميزة للألياف الكربونية بأنواعها من اليسار لليمين (نسيج، خيوط، ألياف مقطعة).	80
الشكل (31): يبين بعض الأنواع المميزة للألياف الزجاجية بأنواعها من اليسار لليمين (خيوط، قماش منسوج، قماش غير منسوج، ألياف مقطعة).	81
الشكل (32): يبين بعض الأنواع المميزة للألياف البازلتية بأنواعها.	83

الشكل (33): تصاميم نسيجية أساسية، ومشتقاتها.	85
الشكل (34): يبين توضع طبقات النسيج وفق زوايا توجيه محددة.	86
الشكل (35): أقمشة نسيجية ثنائية الأبعاد متعددة الطبقات.	87
الشكل (36): يبين كيفية انتقال الحرارة عبر بنية القماش ثلاثي الأبعاد.	89
الشكل (37): يبين الأقمشة (3D Woven Spacer Fabrics WSF).	90
الشكل (38): يبين تصاميم الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمفرغة، وبعض خواصها.	91
الشكل (39): يبين كيفية تطبيق مادة الريزين بالرول والفرشاة على النسيج ضمن قالب لتصنيع مادة نسيجية مركبة.	92
الشكل (40): تغير قطر الليف وفقاً للتكنولوجيا المستخدمة.	96
الشكل (41): إدخال تكنولوجيا النانو في صناعة النسيج ومواده المركبة.	98
الشكل (42): صور توضح بعض تقنيات العزل المحضرة بتقنية النانو للأبنية الحديثة.	103
الشكل (43): تبين الصورة الأولى رسماً توضيحياً لأبعاد الحبيبات والمسامات النانوية، وتبين الصورة الثانية من اليسار مسحاً الكترونياً ضوئياً (SEM) لبنية المادة العازلة المكونة من الألياف والايبوكسي والحبيبات النانوية، في حين الصورة الثالثة من اليمين فتبين كيفية تطبيق ذلك العازل المعزز بالحبيبات النانوية في العزل الحراري للأبنية.	104
الشكل (44): مقارنة بالسماكة والموصلية الحرارية بين تقنية عزل تقليدية وأخرى مطورة باستخدام تقانة النانو.	105
الشكل (45): يبين كيفية التوصيل الحراري ضمن المادة النانوية ذات البنية المسامية.	109
الشكل (46): يبين الفرق بين سلوك الظاهرة الفيزيائية (انتقال موجة الصوت) في مادة مسامية (100% مفتوحة الخلايا كمادة البولي يوريثان PU) (الصورة العلوية)، ومادة شبه مسامية (Mesoporous).	111
الشكل (47): مخطط توضيحي لمكونات المواد النسيجية المركبة بدءاً من عملية تحضير عينات باستخدام إحدى تقنيات النانو لتحضير حبيبات وألياف نانوية والتي تشكل نسبة (1–10%) في حين تشكل الأنسجة التقنية تشكل (50–60%) والمادة الرابطة تشكل نسبة (30–40%).	112
الشكل (48): صورة تجمع الأدوات والمعدات المستخدمة.	116

الشكل (49): أجزاء جهاز اختبار امتصاص الصوت وكفاءة العزل الصوتي	117
الشكل (50): واجهة البرنامج (Sound card oscilloscope) لجهاز اختبار عزل الصوت	118
الشكل (51): جهاز اختبار الناقلية الحرارية (TCI 25 C–therm)	119
الشكل (52): جهاز تحليل الكثافة والمسامية	120
الشكل (53): جهاز التحليل الطيفي XRD	121
الشكل (54): جهاز التحليل الطيفي SEM	121
الشكل (55): صورة جهاز الاختبارات العامة	122
الشكل (56): جهاز اختبار مقاومة الانضغاط والانحناء	123
الشكل (57): يبين صور جهاز التقادم المسرع	124
الشكل (58): (a) صورة (SEM)، و (b) صورة (TEM) لحبيبات (أيروسيل200)،	125
الشكل (59): مخطط يوضح خطوات تفاعل الحلمهة والتكاثف لتحضير الحبيبات النانوية، مع غمر الألياف الميكروية منذ مراحل التصنيع الأولى.	126
الشكل (60): مخطط مفصل يبين مراحل تحضير حبيبات السيليكا النانوية المسامية	128
الشكل (61): مخطط توضيحي لتقنية المحلول في تحضير حبيبات النانو كإحدى تقانات علم النانوتكنولوجي في تطوير العزل الذكي للأبنية الحديثة	129
الشكل (62): يبين البيشر الأيمن محلول تفاعل الحلمهة، ويبين البيشر الأيسر محلول تفاعل التكاثف ضمن الايثانول.	130
الشكل (63): يبين حبيبات السيليكا النانوية مسامية البنية، بعد التجفيف والمعالجة بالفرن.	130
الشكل (64): يبين صور عينات المواد النانوية بأساس السيليكا والتي حُضِّرت وفق تقنية النانو الـ(Sol–Gel).	131
الشكل (65): يبين ألواح العزل من مادة نسيجية مركبة معززة بحبيبات السيليكا النانوية المحضرة بتقنية (Sol–Gel) وآليات تحميل المادة الرابطة (الريزين) على المادة النسيجية.	131
الشكل (66): إدخال العناصر (المواد الأولية) ومجال قيمها.	133

الشكل (67): إدخال محددات اختبار الأداء الوظيفي لـ 130 عينة	134
الشكل (68): تحليل بيانات العناصر ومعاملات تأثيرها.	135
الشكل (69): إنشاء الموديل.	135
الشكل (70): إظهار أعلى قيمة للعناصر (المواد الأولية).	136
الشكل (71): إظهار أدنى قيمة للعناصر (المواد الأولية).	137
الشكل (72): يُلاحظ من تحليل الموديل مقاربة القيم العملية للنظرية المتوقعة، ومن ثم الاستجابة مرتفعة.	138
الشكل (73): يبين الحصول على R-Squared=0.88.	138
الشكل (74): يبين مكونات كل عينة محضرة كمادة نسيجية مركبة.	140
الشكل (75): صور العينات المحضرة، في هذا البحث بغرض العزل الصوتي والحراري في الأبنية.	142
الشكل (76): مخطط توضيحي لمكونات المادة النسيجية المركبة المحسنة باستخدام تقانة النانو للعزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة.	145
الشكل (77): صور الماسح (SEM) لعينات حبيبات النانو سيليكا المسامية.	148
الشكل (78): يبين نتائج تحليل صور الـ (SEM) باستخدام البرنامج (SEM Analysis Image J) ويظهر في الزاوية اليمنى السفلية أبعاد المسامات في البنية النانوية.	149
الشكل (79): يبين نتائج تحليل صور الـ (SEM) باستخدام البرنامج (SEM Analysis Image J) ويظهر في الزاوية اليمنى السفلية أبعاد المسامات في البنية النانوية.	150
الشكل (80): مخطط تحليل طيفي (XRD) لعينة مرجعية لحبيبات نانو سيليكا.	151
الشكل (81): نتيجة تحليل طيفي (XRD) لعينة حبيبات نانو سيليكا المحبة للماء.	152
الشكل (82): نتيجة تحليل طيفي (XRD) لعينة حبيبات نانو سيليكا الكارهة للماء.	153
الشكل (83): يبين الأجهزة المستخدمة في اختبار كفاءة العزل الصوتي والحراري للعينات بغرض عزل الأبنية الحديثة.	154
الشكل (84): مخططات اختبار امتصاص الصوت لمجموعة العينات الأولى، طول الموجة الصفرية (276.5م).	158

الشكل (85_1): مخططات اختبار امتصاص الصوت لمجموعة العينات الثانية، طول الموجة الصفرية (346.5م). 159

الشكل (85_2): مخططات اختبار امتصاص الصوت لمجموعة العينات الثانية، طول الموجة الصفرية (346.5م). 160

الشكل (86): صور اختبار الشد. 162

الشكل (87): مخطط (إجهاد الشد/الانفعال) لعينات الشد المختبرة. 163

الشكل (88): اختبار الانضغاط. 164

الشكل (89): صور شاشة اختبار مقاومة الانضغاط للعينات. 164

الشكل (90): اختبار مقاومة الانحناء. 165

الشكل (91): يبين صور عينات اختبار التقادم المسرع وتحمل العوامل الجوية. 167

قائمة الرموز والمصطلحات List of symbols and terms

Symbol (الرمز)	Discerption (الوصف)	
E-glass	Chopped glass fibers type E	ألياف زجاجية مقطعة نوع E
Ba	Basalt Fibers	ألياف بازلتية مقطعة
BCF	Basalt chopped fibers	ألياف بازلتية مقطعة
Ep	Epoxy Resin	ريزين الإيبوكسي
PU250	Poly Urethane Rigid Foam With density (250 kg/m³)	فوم بولي يوريثان صلب كثافة (250 كغ/سم³)
PU50	Poly Urethane Rigid Foam With density (50 kg/m³)	فوم بولي يوريثان صلب كثافة (50 كغ/سم³)
Mate	Tow-Dimensional Nonwoven E-Glass	قماش ثنائي البعد زجاجي غير منسوج
2DE	Tow-Dimensional Woven Fabric E-Glass	قماش ثنائي البعد زجاجي منسوج
3DE10	Three-Dimensional Woven Spacer Fabric E-Glass 10 mm Thickness	قماش زجاجي ثلاثي الأبعاد ومُفرَّغ، سماكة 10 مم
3DE20	Three-Dimensional Woven Spacer Fabric E-Glass 20 mm Thickness	قماش زجاجي ثلاثي الأبعاد ومُفرَّغ، سماكة 20 مم
Ns	Nano Silica Particles	حبيبات السيليكا النانوية
SEM	Scanning Electron Microscopy	المسح الإلكتروني الدقيق
XRD	X-Ray Diffraction	حيود أشعة إكس
Rw	Acoustic Insulation Coefficient [%]	معامل العزل الصوتي
STL	Sound Transmission Loss	فقدان نقل الصوت
STC	Sound Transmission Class	تصنيف فقدان نقل الصوت
Rt	Thermal Resistance [Rt=1/U=X[inch]/ λ]	المقاومة الحرارية
λ	Thermal Conductivity [W/m.K]	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل
U	Rate of Heat Transfer [W/m².K], U= λ /X[m]	معامل انتقال الحرارة الكلي
E	Young Modulus [MPa]	معامل يونغ
σ	Stress [MPa]	الإجهاد
ε	Strain [%]	الانفعال
υ	Poisson	معامل بواسون
ρ	Density [kg/m³]	الكثافة

الملخص

الملخـص

لم يعد بالإمكان التجاهل أو التغاضي عن أهمية توفير الطاقة في العصر الحديث، وبالأخص عندما تتجه الأبحاث نحو تطوير تقانات وصناعات العزل الحراري والصوتي، بهدف تأمين بيئة عمل مريحة وهادئة. وفقاً لمعاهدة كيوتو (Kyoto Protocol)، يُشكل حجم الانبعاثات الكربونية من ثاني أوكسيد الكربون الناجمة عن المباني السكنية (25%) من حجم التلوث الإجمالي في العالم، وهذا يعني ضرورة البحث عن حلول حقيقية للحد من غازات الدفيئة التي تسببها الكثافات السكانية، هذا إن لم يتم الحديث عن التلوث الناجم عن المنشآت الصناعية ومرافقها.

يُقدم هذا البحث رؤية علمية وتصميمية لإمكانية تحضير بدائل حقيقية لمنتجات حالية عازلة للأبنية والمنشآت ومرافقها، باستخدام مواد مركبة من الأقمشة التقنية ثنائية وثلاثية الأبعاد، والمصنعة من الألياف الزجاجية والبازلتية، مع مواد رابطة من الإيبوكسي والبولي يوريثان الصلب، والمعززة بنيوياً بحبيبات نانوية الأبعاد بأساس السيليكا. تم تحليل خواص تلك الحبيبات النانوية ومواصفاتها وأبعاد المسامات فيما بينها، باستخدام الماسح الإلكتروني الضوئي (SEM)، والتحليل الطيفي لحيود أشعة إكس بطريقة المساحيق (XRD)، بعد إنتاج عينات للمنتج العازل المصمم، اختُبرت كفاءة العزل الصوتي حيث وصلت إلى (99.7%)، وتم اختبار كفاءة العزل الحراري بناقلية حرارية من رتبة (0.024 W/m.K)، بالإضافة إلى إجراء اختبارات التقادم المُسرَّع وتحمُّل هذا العازل للعوامل الجوية، لوضع الأسس التصميمية والتصنيعية لتلك المواد النسيجية المركبة، باستخدام تقانة النانو المناسبة وبتكاليف مقبولة، بما يلبي متطلبات العزل الصوتي والحراري في مجال البناء الحديث، وبما يناسب خطة إعادة الإعمار الخاصة ببلدنا الحبيب سورية، وصولاً إلى خفض استهلاك الطاقة، والحد من التلوث البيئي.

الكلمات المفتاحية:

المواد النسيجية المركبة، علم النانو، الأقمشة ثلاثية الأبعاد، الأقمشة ثنائية البعد، حبيبات السيليكا النانوية، الألياف الزجاجية، الألياف البازلتية، العزل الصوتي، العزل الحراري.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

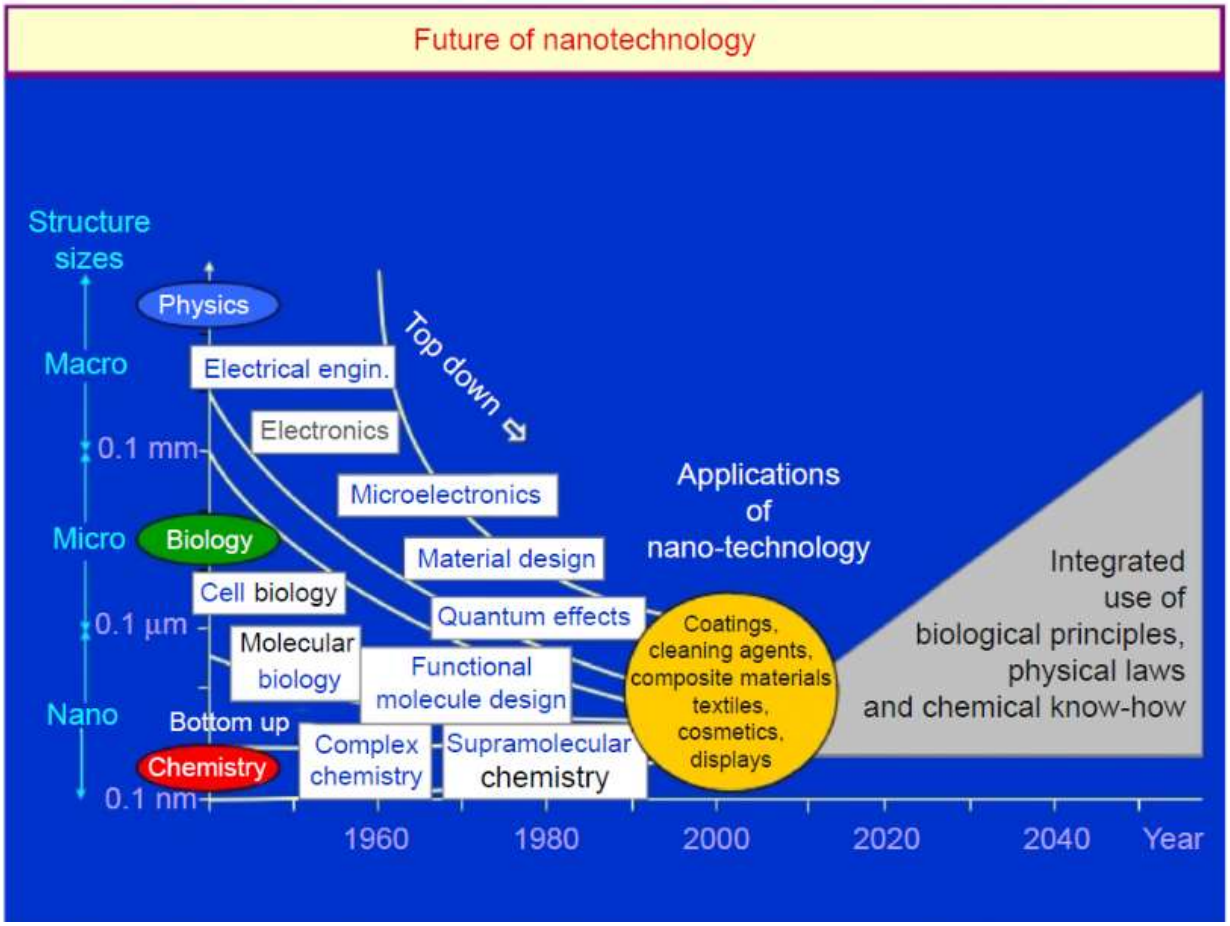
1. الإطار العام للبحث:

1.1. مقدمــة:

تُعدُّ تقانة النانو موضوعًا مهماً في الأبحاث العلمية المعاصرة، والذي حدده ((Drexler (1981) على أنه تصنيع المنتجات باستخدام أبعاد ودقة تتراوح بين (0.1 و100) نانومتر. مع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنه قبل عقدين من عمل دريكسلر، ألقى العالم الفيزيائي الأمريكي ريتشارد فينمان ومنذ خمسينيات القرن الماضي، محاضرة مميزة في اجتماع عام (1959) للجمعية الفيزيائية الأمريكية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا؛ ألقى خطاباً عرَّف فيه أول تعريف لعلم النانو في العالم وبعبارة مقتضبة (''There's Plenty of Room at the Bottom'')، ويقصد بها أن هناك فسحة من الفراغ في مكان ما صغير غير مرئي بالعين، أي هناك عالم آخر ضمن تلك الأبعاد الصغيرة من رتبة النانو متر. ويُعدُّ هذا بداية عصر تكنولوجيا النانو. (A.P.S. Sawhney *et al.*, 2009). وفي عام (1981)، لم تكن مجموعة الخبراء التي عينتها المفوضية الأوروبية قادرة على الاتفاق على تعريف دقيق لتقنية وعلم النانو، لكنها توصلت إلى تعريف عملي لعلم وتقنية النانو (NST Nano Science &Technology)، على أنه "التلاعب أو النسب الدقيق أو القياس أو النمذجة أو التصنيع على مقياس نانومتري أي من 100 نانومتر". (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

يتضح التطور السريع للأبحاث العلمية في هذا المجال من خلال معدل زيادة الأوراق المنشورة ببادئة "nano" في العنوان في الفترة بين (1992) و(2023)، والتي زادت أضعافًا مضاعفة. لا تزال التقديرات الاقتصادية المتعلقة بالتطورات في تكنولوجيا النانو أكثر إثارة للإعجاب، فمن المتوقع أن تصل المنتجات والخدمات المتعلقة بتكنولوجيا النانو إلى مئات عدة من المليارات من اليورو بحلول نهاية العقد الحالي، لدى العشرات من البلدان، والتي بدأت استراتيجيات وطنية في تنفيذ خطط لتكنولوجيا النانو. كما تحاول البلدان إنشاء موقع متميز لهذه التقانة، بحيث عندما تبدأ تطبيقات التكنولوجيا النانوية في إحداث تأثير كبير في الاقتصاد العالمي، الشكل (1)، ستكون تلك البلدان قادرة على استغلال هذه الفرص الجديدة بالكامل. لذا خصصت أوروبا (4.865) مليار يورو لعلوم

النانو وتقنياتها، والمواد وتقنيات الإنتاج الجديدة للفترة (2007–2013م)، ثم ومنذ بداية عام (2022) تضاعفت هذه الأرقام عشرات المرات في العقد الأخير. أما في الولايات المتحدة، فقد تم توقيع قانون مخصص لتقانة النانو، وخُصّص (3.679) مليار دولار من التمويل منذ الفترة (2005–2008م) لدعم هذه التقانة المعاصرة. كما حددت الصين تقانة النانو كمجال ذي أولوية في جدول أعمالها الوطني لتطوير العلوم والتكنولوجيا، وزادت الاستثمار في البحث والتطوير في هذا المجال. ومن ثمَّ برزت الصين من اللاعبين العالميين الرئيسيين في مجال النانو، إذ أنتجت ثاني أكبر عدد من الأوراق البحثية بعد الولايات المتحدة. (Z. M. Zhang, 2020).



الشكل (1): صورة لمخطط يبين مدى اهتمام الاقتصاد العالمي بمستقبل تكنولوجيا النانو، (P.M. Visakh *et al.*, 2017).

ليست تقنية النانو خالية تمامًا من المخاطر، فقد أثيرت بالفعل مشكلات فيما يتعلق بالسمية المحتملة للجسيمات النانوية، والمشكلة الجديدة للتخلص من النفايات النانوية، وعلى الرغم من هذه المخاطر، فقد ذكر كبير مستشاري تكنولوجيا النانو لمؤسسة العلوم الوطنية أن "المكاسب المبكرة ستأتي في مجال الإلكترونيات وتكنولوجيا المعلومات والطب والصحة". بالرغم من أن الحاجة حقاً ملحة، لكن استخدام تطبيقات تكنولوجيا النانو حاليًا مازال ضيقاً جدًا في قطاع البناء، والذي يبدو في الواقع أنه تم إهماله إلى حد ما من خلال أبحاث تكنولوجيا النانو حتى الآن. كشف البحث عن المصطلحين "تقنية النانو" و "البناء الفعال بيئيًا" في المجلات المدرجة في (Scopus) عن خمسة أوراق بحثية فقط حتى العام (2013م)، وجميعها تتعلق بالأسمنت والخرسانة، لكنها تضاعفت في السنوات العشر الأخيرة. بالطبع، نُشر العديد من الأوراق البحثية التي تتناول دور تقنية النانو في الأسمنت؛ ومع ذلك، فإن العدد منخفض جدًا مقارنة بالمجالات الرئيسية الأخرى ذات الصلة بالبحث الحالي. علاوة على ذلك، هناك حاجة إلى مزيد من العمل لضمان الوصول إلى النتائج عالية الجودة في استخدام تكنولوجيا النانو، خاصة في تطبيقات الأسمنت والعزل ضمن قطاع البناء في السوق العالمية، لذلك يجب أن تكون أولويات تقنية النانو مدفوعة بأهداف "أعلى"؛ وعلى وجه الخصوص، يجب أن يكون تطبيق تقانات النانو في عزل الأبنية، محور الاهتمام الرئيسي، وهدف الأمم المتحدة المتعلق بالاستدامة البيئية. ومن ثمَّ، يجب أن تكون صناعة البناء أيضًا في صميم جهود البحث والتطوير في مجال تكنولوجيا النانو، ولكونها واحدة من أكبر القطاعات وأكثرها نشاطًا في العالم، فإنها ستستمر في النمو بوتيرة سريعة خلال العقود القادمة، والأهم من ذلك أن لها تأثيراً بيئياً كبيراً، فهي مسؤولة عن استنفاد كميات كبيرة من الموارد البيئية الغير متجددة وانبعاثات غاز أكسيد الكربون .(Z. M. Zhang, 2020).

تؤدي صناعة البناء في العصر الحديث ومجالات تطويرها دوراً فاعلاً على مسرح الدراسات والأبحاث المعاصرة، بما يؤمن الراحة والأداء الأفضل للمستهلك والبيئة والكلفة بالوقت ذاته، لذا تسابقت الدول الحديثة في أوروبا لتكون السباقة في هذا المجال، وعليه أدخلت انكلترا علم وتكنولوجيا النانو في مجال البناء والهندسة المدنية منذ تسعينيات القرن الماضي، أي يُعدّ الدور الذي تؤديه تقانة علم النانو في هذا الإطار حديثاً ومازال قيد البحث والتطوير، بدءاً من تحسين الخلطات الأسمنتية وإحداث تغيير جذري في قضبان التدعيم والتسليح الأسمنتي (استبدال

المعدن بالمواد النسيجية المركبة من الألياف الزجاجية)، وصولاً إلى تحسين أداء مواد العزل الحراري وتقنياته للأبنية والمنشآت ومرافقها، بهدف تسليط الضوء على آخر ما توصل إليه العلم الحديث المتعلق بتقانة النانو وتطبيقاتها في صناعة الألياف والأقمشة وموادها المركبة، وبسبب المتطلبات والظروف البيئية التي تؤثر في خواص التطبيق الهدف (صناعة البناء وإعادة الإعمار).

شكلت مسألة الضجيج أثراً مهماً على الصعيد البيئي في الآونة الأخيرة، إذ 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. كما يصعب تحديد الأصول الحقيقية للعزل الحراري، إذ لبس البشر في عصور ما قبل التاريخ الصوف وجلد الحيوانات وقاموا ببناء منازل من الخشب والحجر والتراب، في حين استخدم الرومان وسكان إسبانيا الأوائل الفلين كمواد عازلة للأسقف، واستُخدمت الألياف المعدنية من الرواسب البركانية لأول مرة من قبل سكان هاواي الأصليين لتغطية أكواخهم، ولكن لم يكن التطبيق التجاري للعزل الحراري شائعًا إلا مع (Cabot's Quilt) في عام (1891) حتى الثورة الصناعية. فمنذ ذلك الحين، ظهر الصوف الصخري والزجاجي والبوليستايرين، كعوازل حرارية في المباني. ويرجع التقدم الأخير في تطوير عوازل حرارية عالية الأداء، إلى التقدم في تقانة النانو وعلوم المواد والبوليميرات، وهذا يسمح بتكييف المبادئ النظرية المعروفة للفيزياء الحرارية في الممارسة العملية. (F. Pacheco,2013).

سيُسلط الضوء في هذا البحث العلمي على مفاهيم الصوت والضجيج، وانتشار الأصوات والعزل الصوتي والحراري في الأبنية والمنشآت، كما سيُدرس الدور الذي تؤديه المواد النسيجية والمركبة منها في عزل الضجيج الصوتي، من خلال امتصاص موجة الصوت أو انعكاسها أو تشتيتها ضمن بنية المادة العازلة، كما سيُبحث نظرياً وعملياً إمكانية تحسين أداء المواد النسيجية المركبة للعزل الصوتي والحراري من خلال إضافة مواد وحبيبات نانوية البنى والأبعاد إلى مصفوفة المادة النسيجية والمركبة منها، باستخدام أرخص أنواع المواد وأكثرها تداولاً في السوق الصناعية والمحلية.

2.1. الإشكالية البحثية وأهمية البحث:

قد تُمكّن الهياكل الدقيقة والنانوية لعلوم المواد والهندسة الخاصة بالمواد النسيجية المركبة، وذات الخصائص الحرارية والصوتية الفريدة، من السماح بتعزيز معدل تدفق الحرارة أو تقليله بشكل كبير. لذلك، فإن معرفة انتقال الحرارة من مقياس الماكرومتر فالميكرومتر وصولاً إلى مقياس النانومتر، والخصائص الحرارية للبنى النانوية، ذات أهمية حاسمة للنمو التكنولوجي والصناعي والبيئي في المستقبل. ومن الأمثلة على ذلك ليس فقط في مجال البناء، فهناك التحليل الحراري وتصميم الأجهزة الدقيقة والنانوية، وأجهزة الاستشعار والمشغلات الحرارية الدقيقة، والكهرباء الحرارية في الهياكل النانوية، والبلورات الضوئية، والأجهزة الحرارية الكهروضوئية الدقيقة، والإدارة الحرارية للبطارية، وما إلى ذلك. (Z. M. Zhang, 2020).

هناك جانب آخر ذو صلة بالتأثير البيئي الكبير لصناعة البناء، وهو التلوث الناجم عن حوامل الطاقة، وضرورة تأمين بيئة عمل مريحة حرارياً للإنسان والآلة، لذا لا بد من العمل على تطوير تقانات العزل الحراري والصوتي (محور هذا البحث)، وعزل الرطوبة، كونه يتعلق بارتفاع استهلاك الطاقة في المباني (ويمثل (30%) ثلث استهلاك الطاقة في العالم)، وهو المسؤول عن نسبة كبيرة من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية. أما في أوروبا، فتكون المباني مسؤولة عن (40%) من استهلاك الطاقة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتُعدّ كفاءة الطاقة مسألة ذات أهمية حاسمة. حيث اعتُمدت صياغة لتوجيه أداء الطاقة للمباني من قبل البرلمان الأوروبي ومجلس الاتحاد الأوروبي (EPBD Energy Performance of Buildings Directive -European Union)، في (19) أيار (2010). كما حُددت إعادة الصياغة عام 2020، كموعد نهائي لجميع المباني الجديدة ليكون "صفر طاقة تقريبًا"؛ بالنسبة للمباني العامة، ولذلك فإن التقنيات والأساليب لتحسين كفاءة الطاقة مطلوبة لضمان البناء الفعال بيئيًا. (Z. M. Zhang, 2020).

3.1. هدف البحث ومبرراته:

تتجلى الأهمية الحقيقية والدافع وراء هذا البحث، في الحاجة إلى دراسة أسس تحضير وتوصيف عينات ومواد من الألياف والنُسُج التقنية، مع مواد نانوية مسامية البنى بأبعاد النانومتر (Mesoporous)، بوجود مواد بوليميرية رابطة، داخل منظومة متكاملة من المواد النسيجية والمركبة منها، ليُستعاض بها عن طرائق العزل التقليدية، ولتحسين تقانة العزل الحراري والصوتي للمستوى الأفضل، من خلال استحضار أبسط تقانات النانو وأقلها كلفةً، بهدف المساعدة في تأمين بيئة العمل المريحة، وحل مشكلات الطاقة، التي تحدث في التقنيات المعاصرة والمستقبلية، وبما يخص صناعة العزل في البناء الحديث في سورية، وإعادة الإعمار على وجه الخصوص.

4.1. مصطلحات البحث:

يتضمن هذا البحث مجموعة من المصطلحات الرئيسية الهامة التي تعبر عن مضمونه، ويمكن تلخيصها فيما يلي:

1. **تعريف العزل:** يوفر العزل مستوى معيناً من مقاومة التدفق للحرارة أو الضوضاء، ويمكن إنشاء هذا المستوى من المقاومة باستخدام أي مادة عازلة. لتأمين بيئة العمل المريحة. (ICANZ, 2012).
2. **عُمرُ العزل:** يُعدُّ كل من الصوف الزجاجي والصوف الصخري عوازل حرارية ذات عمر استخدام طويل. ولهما مزايا، كما يأتي:

• الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وهذا يقلل أيضًا من تلوث الهواء.
• تُصنّع اللفائف العازلة من مصادر متجددة (رمل وصخور بازلتية) ومحتوى معاد تدويره (حتى 80٪).
• مثبتة بشكل صحيح، وستزيد من عمر المبنى.

لكن من أهم مساوئها هو الأثر السلبي على صحة الإنسان والحيوان والبيئة، فهي نفايات لاعضوية لا تتحلل بسهولة، ومؤذية للجلد والرئتين. (ICANZ, 2012),

3. **خصائص العزل الحراري:** القاعدة الأولى التي يجب تذكرها عند الحديث عن انتقال الحرارة، هي أن الحرارة ستنتقل دائمًا من منطقة ساخنة إلى منطقة باردة، وكلما زاد الاختلاف في درجة الحرارة كلما كان معدل نقل الحرارة أسرع. فبتركيب عازل حراري، فإنك تقلل من انتقال الحرارة وهذا يؤدي إلى توفير في فواتير الطاقة بنسبة لا تقل عن (30%)، فضلاً عن زيادة الراحة الحرارية للإنسان. (Z. M. Zhang, 2020).

4. المقاومة الحرارية "قيمة R": هو رمز لمصطلح المقاومة (كفاءة العزل الحراري)، وهي وحدة قياس مقبولة دوليًا لمقاومة المادة لتدفق الحرارة. كلما زادت قيمتها، قل انتقال الحرارة، وكان العزل أكثر فاعلية. (ICANZ, 2012).

$$R = \frac{t[m]}{\lambda[w/m.k]} = \frac{1}{U\ [w/m^2.k]} \text{.....(1)}$$

t: سماكة العازل، (m). λ: معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لمادة العازل، (W/mK).

U: معامل انتقال الحرارة الكلي للعازل، (W/m^2K).

تستند قيم (R_{total}) الإجمالية إلى مجموع قيم (R) الخاصة بالمكونات المنفردة لمنظومة العزل ونظام المبنى ككل، بما في ذلك القنوات الهوائية الداخلية والخارجية والمساحات بين الأرضيات والأسقف المستعارة، وقد لا تحافظ بعض مواد العزل على قيمة (R_{total}) المثبتة على مدى عمر المنتج بسبب استقرار الغبار على العوازل العاكسة مثلاً، أو نفث الغازات في عوازل الفوم وحركة المنتج عند التركيب والاستثمار والصيانة. (ICANZ, 2012).

5. خصائص العزل الصوتي وقياس الصوت: تعمل مواد العزل مثل الصوف الزجاجي والصوف الصخري، كالإسفنج، للمساعدة في امتصاص الطاقة الصوتية. عندما تواجه الموجات الصوتية هذا العزل، فإنها تنحرف جزئيًا عن طريق كثافة المنتج، ويجري امتصاصها جزئيًا بسبب ملايين الجيوب الهوائية المترابطة.يقاس ضغط الصوت بالديسيبل، ويُقاس أداء العزل الصوتي لنظام الجدار أو الأرضية أو السقف بوساطة مؤشر خفض الصوت ($R_w\%$)، فهو تصنيف صوتي ذو رقم واحد يأخذ بالحسبان تقليل الصوت عند عدد من الترددات المختلفة، ويستخدم بسهولة لمقارنة أنواع مختلفة من عزل الإنشاءات، فكلما زاد معدل ($R_w\%$)، كان أداء العزل الصوتي أفضل. (ICANZ, 2012).

6. المادة النسيجية المركبة: تُعرَّف المادة المركبة، بأنها مزيج أو خليط بنيوي لمادتين على الأقل معاً لإنتاج منتج جديد وبمواصفات محسنة لا يمكن توافرها في مكونات المادة المركبة في حال كانت منفردة، أي تمتاز المادة المركبة بخواص لا يمكن توافرها في الطبيعة. يمكن تقسيم مكونات المادة المركبة إلى مفهومين رئيسين، هما مصفوفة المادة الداعمة (نسيج، قماش غير منسوج، خيوط، ألياف، حبيبات، مكونات صلبة كالأخشاب والمعادن والمواد البلاستيكية)، ومصفوفة المادة الرابطة (الريزين/بوليمير). (Xiao-Su Yi *et al.*,2018).

5.1. مناهج البحث وأدواته:

1. تم في هذا البحث إجراء دراسة نظرية عن مفهوم ومعايير كل من العزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة، وعن المادة النسيجية المركبة، ومختلف أنواع الأقمشة والألياف التقنية التي تدخل في تركيبها، وعن علم النانو ودوره في صناعة المواد النسيجية والمواد العازلة للأبنية.
2. تم في هذا البحث اعتماد منهجية علمية تجريبية، بحيث تم تصميم عينات من مواد نسيجية مركبة من مختلف أنواع الاقمشة ثنائية وثلاثية الأبعاد، المنسوجة وغير المنسوجة، مع مواد رابطة من الفوم والإيبوكسي، والمعززة بحبيبات نانوية بأساس من السيليكا.
3. وفقاً لدراسات مرجعية ذات الصلة بموضوع هذا البحث، تم تحضير عينات من مسحوق مادة نانوية من السيليكا، وخلطها مع مسحوق حبيبات سيليكا تجارية مستوردة.
4. تم توصيف تلك الحبيبات المحضرة، وتوصيف عينات المواد النسيجية المركبة العازلة، وذلك باستخدام معدات وتجهيزات مخبرية وفق مواصفات عالمية.
5. تم اختبار الأداء الوظيفي لعينات هذا البحث، وكفاءة كل منها للعزل الصوتي والحراري في الأبنية، ثم تم دراسة تحملها لتأثير القوى الخارجية، ولتأثير العوامل الجوية بالتقادم المسرع.
6. تم مناقشة النتائج لتلك الاختبارات، ومن ثم وضع الأسس التصميمية والتصنيعية لمواد نسيجية مركبة محسنة باستخدام مواد نانومترية للعزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة.

6.1. حدود البحث:

يمكن تأطير محتوى ونتائج هذا البحث ضمن المحدوديات والمجتمعات الآتية المنفذة والمستفيدة منه:

1. قطاع صناعة البناء ومواد عزل الأبنية لتحسين أداء عمل الشركات المحلية المصنعة والمنفذة لتقانات العزل الصوتي والحراري للأبنية.
2. قطاع البحث العلمي والدراسات العلمية ذات الصلة بموضوع البحث، كجامعة دمشق.
3. الجهات والهيئات والمؤسسات ذات الصلة بصناعة النسيج، وتطويرها، كالمؤسسة العامة للصناعات النسيجية، وشركات النسيج العامة والخاصة.
4. مراكز الأبحاث والاختبارات الصناعية في وزارة الصناعة.

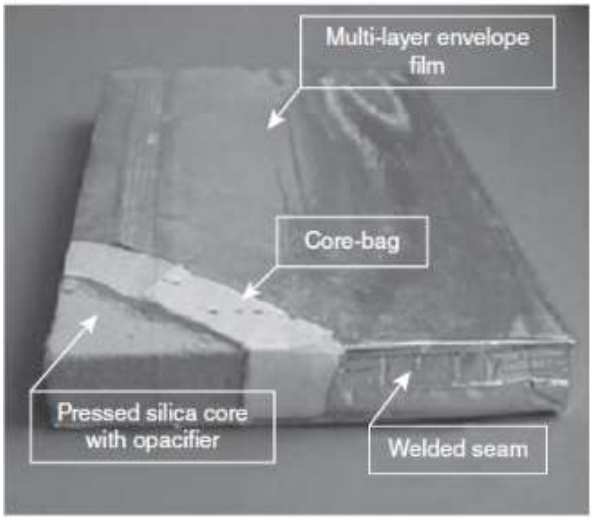
7.1. الدراسات المرجعية والتقانات السابقة:

يوجد العديد من الدراسات المرجعية ذات الصلة بموضوع البحث، ولكن معظم الدراسات الحديثة تتمحور حول تقانات العزل المعاصرة، والتي يمكن تقسيمها إلى نوعين رئيسيين، لابد من ذكرهما لصلتهما المباشرة بتطبيق واستخدام تكنولوجيا النانو والتقانات الحديثة في عزل الأبنية، وهما:

أولاً: مواد عزل حراري عالية الأداء للمباني:

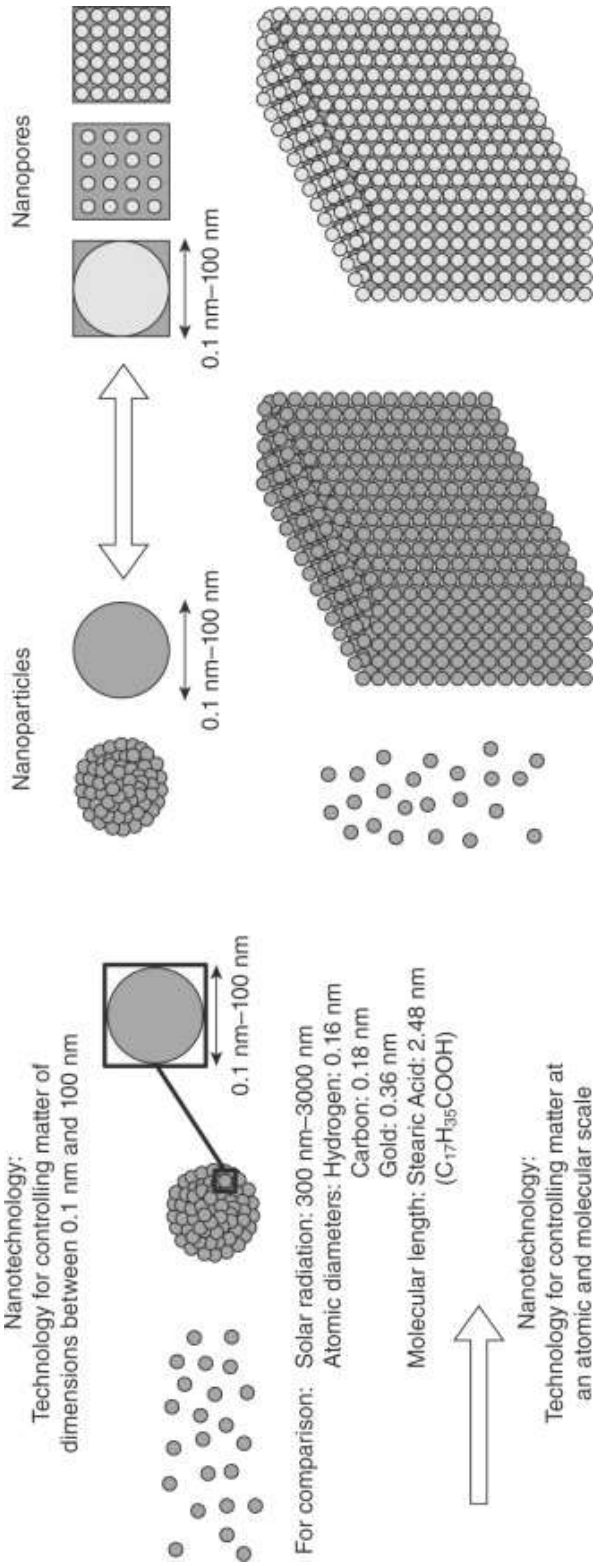
تختلف العوازل الحرارية عالية الأداء (High Performance Insulators HPIs)، عن العوازل التقليدية في المبادئ التي تأخذ بالحسبان نقل الحرارة والصوت. إذ تتميز العوازل الحرارية التقليدية بكيفية احتجازها للمواد الغازية، أي في مادة ليفية أو في مادة خلوية أو في مادة حبيبية. هذه العوازل لها موصلية حرارية ضمن المجال (0.025-0.040 W/m.K)، وتظهر حدًا أقل لتوصيلها الحراري وأقرب للموصلية الحرارية للغاز المحاصر. على هذا النحو، تُعرّف العوازل الحرارية عالية الأداء عمومًا، بأنها عازل بموصلية حرارية أقل حتى من (0.02 W/m.K). تتميز العوازل الحرارية الحالية عالية الأداء بكيفية تحقيقها لخلخلة الغاز، أو من خلال بنية صلبة مسامية نانوية الأبعاد، في حين يتم تحقيق أفضل النتائج باستخدام مزيج من الاثنين. إن استغلال النظرية الفيزيائية لانتقال الحرارة

في المواد النانوية مسامية البنية، هو السبب في أن تكنولوجيا النانو قد حققت طفرة في العوازل الحرارية في العقد الماضي، كما تم تلخيصها في الشكل (2). (F. Pacheco,2013).



صورة تبين ألواح العزل (VIPs)

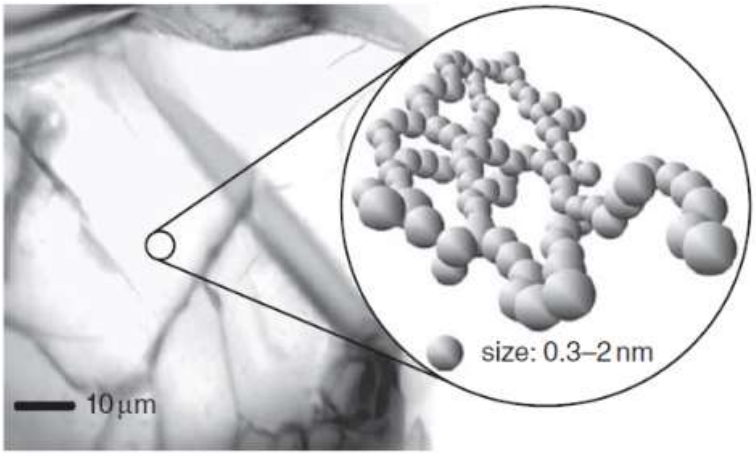
صورة تبين نسيج زجاجي عازل مشبع بحبيبات السيليكا



الشكل (2): يبين تطبيقات تكنولوجيا النانو في مواد عزل عالية الأداء، (F. Pacheco,2013).

ثانياً: عوازل حرارية مسامية نانوية البنية (Nanoporous Thermal Insulators NTI):

نظرًا لأن معظم العوازل الحرارية التي تستخدم تفريغًا جزئيًا تستخدم مادة ذات مسام نانوية، فسيتم معالجة العوازل الحرارية المسامية نانوية الأبعاد ضمن هذا السياق، أي إنَّ مواد العزل الحرارية النانوية المسامية البنية هي حبيبات السيليكا المحفوظة ضمن ألواح العزل المفرغة (Vacuum Insulation Panels VIPs)، كما هو مبين في الشكل (3)، وحبيبات السيليكا المُرسَّبة الصغيرة التي يسهل اختراقها. تُستخدم السيليكا عامة كمواد أساسية للدهانات وللعوازل الحرارية الفراغية (VIPs)، ويتم معالجتها لاحقًا. يجري امتصاص الصوت لمادة ما مع زيادة مساحة السطح الذي يُواجه الصوت، لذا فإن المواد الحبيبية ذات البنى المسامية والأبعاد النانوية، عاكسات استثنائية للصوت المسموع، وهذا يجعلها مواد حاجزة ممتازة. إذ من خلال الجمع بين طبقات متعددة ذات أحجام حبيبية مختلفة، وباختبارات تم التوصل فيها إلى متوسط توهين قدره −60 ديسيبل عند سماكة إجمالية تبلغ 0.07 متر فقط. تتمتع ألواح العزل الخاصة (VIPs)، بمسامية عالية للغاية وتوزيع حجم المسام عال ومنتظم، عند درجة الحرارة والضغط القياسيين، وهذا يجعلها عازلًا حراريًا عالي الأداء. تُحدد الخصائص الفريدة لألواح العزل المفرغة (VIPs) من خلال تركيبها، والتي يمكن تقسيمها إلى ثلاث خطوات: تحضير حبيبات السيليكا، ملء الغاز الخامل وحبس الضغط، تغليف الألواح برقائق من الألمنيوم. (F. Pacheco,2013).



الشكل (3): صورة لبنية مسامية ثلاثية الأبعاد نانوية لمواد وحبيبات السيليكا (SiO_2)، (F. Pacheco,2013).

وبناءً على ماسبق يمكن فيما يأتي تفصيل تقانات العزل التقليدية والمعاصرة للأبنية كما يلي:

أولاً: مواد العزل الحراري والصوتي التقليدية التي تستخدم في عزل الأبنية ومرافقها:

1- فوم البولي يوريثان (Polyurethane Rigid Foam):

وهو من المواد السامة، وضعيفة المقاومة للرطوبة وأشعة الشمس، ولذلك يحفظ ضمن صفائح معدنية من التوتياء أو الألمنيوم.

2- الألياف الزجاجية (Fiber Glass):

يطلق عليها أيضاً اسم الصوف الزجاجي، أو الزجاج الليفي، وتصنع من الرمل والصودا وبعض الإضافات الأخرى، والتي يجري مزجها ومن ثم صهرها في فرن عند درجة (1600) سيلزيوس، ثم يتم بثقها على شكل ألياف مقطعة. ويتميز الزجاج الليفي بمقاومته الكبيرة للاحتراق، وبقدرته العالية على عزل الحرارة والصوت. وهي مادة مشابهة لمادة الصوف الصخري، ويُعيبها أنها تتناثر بسهولة في وسط التطبيق، فهي مؤذية للبيئة والإنسان، وقوة تحملها للضغط منخفضة جداً. (Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

3 – الصوف الصخري (Rock wool):

يُصنّع الصوف الصخري من الصخور الطبيعية كمادة خام، وتتميز مادة الصوف الصخري بمقاومة عالية للحريق وقدرة عالية على عزل الصوت، ويُعيبها قابليتها العالية لامتصاص الماء والرطوبة والمقاومة الضعيفة جداً للانضغاط. (Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

4 – ألواح الجيبس:

تستخدم في الأبنية المؤقتة وتمتاز بجسارتها، لكنها تتأثر بالرطوبة كونها مغلفة بالكرتون المقوى، ومعامل امتصاص الصوت الخاص بها منخفض، سماكاتها قليلة.

5 – مواد العزل الحديثة من ((Sandwich Insulation Panels) SIP):

تتكون هذه الصفائح من مواد رغوية (فوم)، ذات مسامية عالية تكون مليئة بالهواء أو محقونة بغازات خاملة، وبسماكات مختلفة، تعدّ هذه التقانات حديثة ولكنها حساسة وخاصة في أعمال الصيانة، وذات عمر استخدام محدود، لكن أداءها جيد، كما أن سمية مواد الفوم كالبولي يوريثان، عالية ومؤذية إن لم تُراع وتُحفظ جيداً. (Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

ثانياً: مواد العزل الحراري والصوتي لعزل الأبنية الحديثة بتقانة النانو:

لا يمكن إهمال أو تجاهل تطور السوق العالمية ذات الصلة بمواد عزل الأبنية، والتي قد دخلت فيها تقانات وتطبيقات تكنولوجيا النانو، وبهدف مواكبة هذا التطور وتلبية متطلبات سوق البناء المحلية وإعادة الإعمار، بما يتناسب مع نوعية المواد الأولية المتوافرة في السوق المحلية، وجودتها.

سنذكر بعض منتجات العزل الحراري والصوتي الحديثة والشائعة في الأسواق العالمية والمعاصرة، والتي أمكن تداخل تكنولوجيا النانو معها:

1. منتجات البولي ستايرين المعزز ببودرة الغرافيت

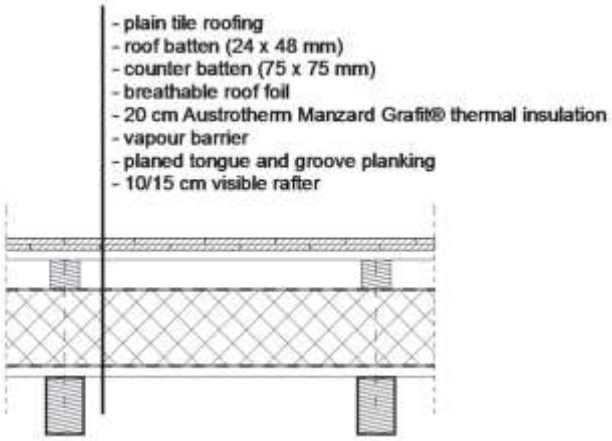
(Expanded polystyrene products including graphite powder Additive):

تُعدّ مواد العزل المصنعة من البولي ستايرين (ألواح الستيريبورد)، كما هو مبين في الشكل (4)، من طرائق العزل التقليدية وتقاناتها التي أمكن تطويرها بإدخال بودرة الغرافيت لتطبيقات الهندسة المدنية، إذ توزع حبيبات هذه البودرة بتجانس تام من خلال استخدام غاز البنتان كعامل تفويم، كما يمكن تعزيز الخواص الميكانيكية بإضافة ألياف نانوية أو ميكروية (زجاجية نوع E) مع حبيبات الغرافيت الميكروية. ساعدت هذه الطريقة على تحسين الخواص الميكانيكية بنسبة (40%)، وخفضت معامل انتقال الحرارة بالتوصيل بنسبة (20%)، أي حسنت العزل الحراري، ونذكر هنا بعضاً من خواص هذه المادة: (David, 2016).

الجدول (1): خواص عازل البوليستايرين المعزز ببودرة الغرافيت، (David, 2016).

الخواص الفيزيائية	الرمز	الواحدة	القيمة
الكثافة	ρ	Kg/m³	15-30
مقاومة قوة الضغط	σ_c	kPa	60-150
متانة الشد	σ_t	kPa	80-100
متانة الترابط	σ_b	kPa	50-120
الحرارة النوعية	c	kJ/kg K	1500
الامتصاص النوعي	W	V/V%	1-5
مقاومة بخار الماء	μ	-	20-100
انتقال الحرارة بالتوصيل	λ	W/m.K	0.031-0.032
درجة الانصهار	t	Cº	85

لكن من مساوئها اللون الأسود الغامق للعازل (بسبب حبيبات الغرافيت السوداء)، وهذا يعني امتصاص أكبر لأشعة الشمس، لذا تم اللجوء إلى طلاء الطبقة الخارجية للعازل باللون الزهري، لتجنب امتصاص الحرارة عند التعرض لأشعة الشمس المباشرة. تمتاز صفائح العزل المصنعة من البولي ستايرين المعزز بحبيبات الغرافيت الميكروية، بمقاومة ضغط حتى (100-150 KPa) ويمكن تحسينها بالتدعيم بالألياف الزجاجية. والشكل (4)، يوضح كيفية توزيع طبقات هذا العازل الحراري المطوّر على السطوح والجدران. (David, 2016).



الشكل (4): رسم يبين طبقات عازل البوليستايرين المعزز ببودرة الغرافيت، (David, 2016).

2. منتجات ألواح العزل المفرغة المحسنة بالحبيبات النانوية

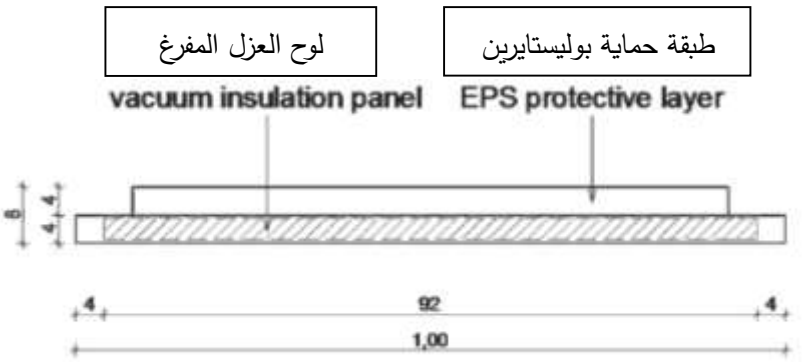
(Nanoparticle-based vacuum insulation panels (nano-VIPs)):

أول ما أُستخدمت فيه هذه المواد للعزل الحراري كان في البرادات والعربات، لكن اليوم تطورت الصناعات وأصبح بالإمكان استخدامها في مجال تطبيقات الهندسة المدنية، والجدول (2) يبين بعض خواص هذا العازل المحسن. هنا يتم حجب طريقتين من طرائق انتقال الحرارة عبر السطوح العازلة، إذ تعمل السطوح البينية لألياف الزجاج النانوي بدور حاجز مانع لانتقال الحرارة بالتوصيل، نظراً لكبر مساحة السطح النوعي وانخفاض كتل هذه الحبيبات وكثافتها، كما أنها ونظراً للفراغات المسامية التي تمنحها داخل البنية، فإنها تخلق ضغطاً يعادل تقريباً (0.05 bar)، وهذا يعمل على حجب انتقال الحرارة بالحمل عبر الوسط الغازي. (David, 2016).

الجدول (2): خواص ألواح العزل المُفرغة (VIPs)، (David, 2016).

الخواص الفيزيائية	الرمز	الواحدة	القيمة
الكثافة	ρ	Kg/m^3	150-300
مقاومة قوة الضغط	σ_c	kPa	140-250
متانة الشد	σ_t	kPa	60
الحرارة النوعية	c	kJ/kg K	800
الامتصاص النوعي	W	V/V%	0
مقاومة بخار الماء	μ	-	∞
نفاذية الماء	w	$Kg/m^2h^{0.5}$	0
انتقال الحرارة بالتوصيل	λ	W/m.K	0.005-0.010
درجة الانصهار	t	C^o	80

يمكن عادة وبوجود الحبيبات النانوية، الاستعاضة عن ألياف الزجاج الميكروية الصنعية بألياف طبيعية أو بوليميرية أخرى، لتخفيف الكلفة وتحسين الأثر البيئي، أو لإعادة تدوير بعض المواد كالبوليستر والبولي ايتيلن، وتحفظ هذه المواد الليفية المعاد تدويرها مع الحبيبات النانوية بين طبقتين صفائحيتين من الألمنيوم، فيصبح هذا العازل مناسباً للسطوح والجدران والأرضيات. علماً أن بعض شروط وسط التطبيق تتطلب توافر تقنيتي العزل السابقتين، الشكل (5).



الشكل (5): يوضح تطبيق VIPs المعزز بالحبيبات النانوية في العزل الحراري للأبنية. (David, 2016).

إذاً، تُعرَّف ألواح العزل الفراغي (VIP)، بأنها منتج أو مادة عازلة تحوي مواد مسامية البنية وبأبعاد نانوية، ومغلفة بالرقائق العاكسة والمفرغة (المُخلّاة من الهواء)، أو محقونة بغاز خامل، كعازل حراري. على هذا النحو، فإن العازل ليس مادة عزل حراري نموذجية، ولكنه يتكون من نظام من ثلاثة أجزاء، لكل منها غرضه (أغراضه) المحددة، هي المادة الأساسية مسامية البنية، ومغلف الرقائق العاكسة، والفراغ (الخلاء) المُطبَّق. يُعدّ الفراغ المثالي هو الخفض الأكثر فاعلية للتوصيل الحراري للغاز ($\varphi_{cd,g}$)، وتحقيق القيمة الحدية لـ "صفر". هذا الفراغ المثالي نقي نظريًا، لكن الضغط المنخفض (الخلاء) (P_g)، له تأثير إيجابي على نقل الحرارة بالحمل عبر الجيوب الغازية. على هذا النحو، فإن بنية هذه الصفائح (النواة) لها غرض مزدوج، أي لتحمل ضغط الفراغ الجزئي المطبق، وتقوية التأثير الحراري لهذا الفراغ من خلال توزيع حجم المسام ($f_{(\Lambda)}$). عادةً ما تكون هذه المادة الأساسية عازلًا حراريًا تقليديًا مفتوح المسام، أو عازلاً حرارياً عالي الأداء مسامياً وبأبعاد النانومتر. يعمل غلاف الرقائق فقط على الحفاظ على الفراغ الجزئي المطبق في المادة الأساسية ويتكون عمومًا من طبقة من الألومنيوم، ومن مساوئه أنه يحتاج إلى عناية كبيرة عند النقل والتطبيق والاستثمار، فأي إصابة أو ثقب سيسبب ضياع الخلاء المُطبَّق، ومن ثمّ انخفاضاً كبيراً في الأداء الحراري. أيضاً، بسبب الموصلية الحرارية العالية نسبيًا لمثل هذا الغلاف، يزداد تدفق الحرارة عند الحواف والزوايا. علاوة على ذلك، فإن غلاف الرقائق غير قادر على الحفاظ على الفراغ المطبق ثابتًا عند الضغط الأصلي بسبب الغازات وتخفيف الرطوبة من خلال طبقات الرقائق. (F. Pacheco,2013).

تتكون ألواح العزل الفراغي الحديثة الحالية من مادة أساسية من السيليكا، بكثافة حجمية تتراوح من (160-220 Kg/m^3)، ومساحة سطح محددة تتراوح من (100-400 m^2/gr)، وأقصى توزع مسامي يبلغ حجمها تقرياً (300) نانومتر، وهذا ينتج عنه موصلية حرارية فعالة تبلغ (0.020 W/m.K)، في الظروف الجوية. يبلغ التفريغ الجزئي المطبق ما يقارب (5 ميللي بار)، وهذا يقلل من التوصيل الحراري الفعال لمادة السيليكا إلى (0.004 W/m.K). تتكون الأفلام متعددة الطبقات التي يمكن استخدامها في صفائح (VIP)، من طبقات مختلفة بسماكة إجمالية تتراوح من (100 إلى 200 ميكرومتر). يُستخدم نوعان مختلفان من تلك الأفلام بشكل أساسي لتغليف صفائح (VIPs Vacuum Insulation Panels)، وهما: رقائق معدنية تتكون من طبقة حاجز من الألومنيوم المصفح بين طبقة خارجية مقاومة للخدش من البولي إيثيلين وطبقة داخلية مانعة للتسرب من البولي إيثيلين، وأفلام معدنية مصنوعة من ثلاث طبقات من الألومنيوم، محمية ضمن أغشية من البولي إيثيلين تيرفثالات (PETE) و طبقة داخلية مانعة للتسرب من البولي إيثيلين، وبالرغم من كل هذه الاحتياطات إلا أن أهم مساوئ هذه التقنية في العزل الحراري للأبنية، أنها مكلفة عند التصنيع والاستثمار، وتحتاج إلى عناية ومراقبة، وعمر الاستخدام والخدمة الخاص بها لا يتجاوز بضع عشرات من السنين، حيث يحدث التدهور عبر الزمن للمقاومة الحرارية بشكل أساسي، بسبب دخول الهواء والرطوبة من خلال غلاف اللوحة، ويعتمد ذلك على الظروف البيئية ومقاومة الرقائق للرطوبة والنقل الجوي. كما لا تزال المعرفة بالأداء طويل المدى لألواح العزل المفرغة (VIPs) محدودة، لذا كان لا بد أيضاً من البحث عن بدائل جديدة لها. (F. Pacheco,2013).

3. مواد التغطية العازلة من الطلاء النانوي (Nano thermal insulation coatings):

أول ابتكار لحبيبات الطلاء النانوية كان من قبل الباحثين (S. Komarneni, R. Roy) عام (1980م)، وذلك باستخدام تقنية المحلول (sol-gel)، إحدى تقانات علم النانو في تحضير الحبيبات النانوية، لتختفي هذه الأبحاث وتعود في العام (2000م)، وبقوة لتدخل أسواق الصناعات العالمية بغرض العزل الحراري للأبنية ومرافقها (أنابيب ومبادلات تسخين/تبريد)، والتي يجري تطبيقها بتقنية التغطية (coating) ويجري تدعيمها بالألياف

والمنسوجات الزجاجية. ثم دخلت حبيبات السيليكا مجال مواد الطلاء الداخلي والخارجي للسطوح، باستخدام فقاعات زجاجية مفرغة من الهواء (Cellular Glass Microspheres)، بأقطار ميكروية (20–120 μm)، والتي تُصنّع باتباع طرائق وتقانات تتطلب ضغوطاً ودرجات مرتفعة من الحرارة حتى (1500 °C)، ثم تُبرّد تدريجياً، فيبقى الضغط مفرّغاً داخل هذه الفقاعات الصغيرة، ثم تطورت الأبحاث ليتم إدخال هذه الحبيبات إلى بنى المنسوجات والمواد المطاطية. تمتاز هذه التقنية من العزل الحراري بقدرة منتجاتها على حجب الطرائق الثلاث لانتقال الحرارة بنسب مرتفعة، بالتوصيل (بين الجدران الكروية للفقاعات الزجاجية)، بالحمل (بين جزيئات الهواء المحبوسة داخل الفقاعات)، وبالإشعاع (بين الجدران الخارجية)، ولا بد من بعض نقاط التلامس بين السطوح البينية للفقاعات تؤدي إلى نقل الحرارة، إلا أنها قليلة بالمقارنة مع ما تقدمه هذه السطوح الكروية من عكس (60–80%) من الإشعاع الحراري. ويبين الجدول (3) أهم خواص هذه المنتجات المُطوَّرة بغرض العزل الحراري للأبنية. (David, 2016,21).

إن طريقة اختبار الأداء الوظيفي في العزل الحراري لهذه المنتجات نانوية البنى تختلف عن طرائق الاختبار المخبرية، إذ تتطلب إجراء اختبار حقلي ميداني وفق المعيار العالمي: (David, 2016).

MSZ EN 12667:2001 (Title: Thermal performance of building materials and products)

الجدول (3): أهم خواص الطلاء بالحبيبات النانوية العازلة للأبنية، (David, 2016).

الخواص الفيزيائية	الرمز	الواحدة	القيمة
(رطب) الكثافة	ρ_w	kg/m³	500-745
(جافة) الكثافة	ρ_d	kg/m³	290-410
متانة الشد	σ_t	kPa	200-300
(خرسانة) قوة اللصق	$\tau_{ad,concerte}$	kPa	460-920
(معدن) قوة اللصق	$\tau_{ad,steel}$	kPa	470-900
الحرارة النوعية	c	kJ/kg K	1080
الامتصاص النوعي	W	m/m%	20-30
مقاومة بخار الماء	μ	-	2
نفاذية الماء	w	kg/$m^2h^{0.5}$	0

انتقال الحرارة بالتوصيل	λ	W/m.K	0.016-0.20 Or 0.014 Or 0.070 Or 0.140
درجة الانصهار	T	Cº	300

بالنتيجة تمتاز هذه المواد بمرونتها وسهولة تطبيقها مع الألياف والمنسوجات الداعمة، والبوليميرات الرابطة، وهي غير سامة، وغير مؤذية للبيئة، يمكن تدويرها من جديد، مقاومة لأشعة (UV)، ومقاومة للحرائق والمواد الكيميائية (إن استخدمت معها ألياف زجاجية من نوع AR Glass fabrics)، كما يمكن تطبيقها على جميع أنواع السطوح الخشبية والمعدنية واللامعدنية، ومن ثم يمكن استخدامها للعزل الداخلي والخارجي للأبنية بوسائل بسيطة وبأمان تام، إذ يجب أولاً تنظيف السطوح جيداً (لا حاجة لطلاء السطوح بأساس بوليميري) ومن ثم خلط تلك الحبيبات النانوية مع الألياف الداعمة جيداً مع ارتداء وسائل الأمان الصناعي المناسبة، ثم تُضاف المواد البوليميرية الرابطة والمذيبات ومن ثم تُمد طبقة واحدة على السطح المراد عزله بالرذاذ أو الفرشاة أو الرول، وتترك الطبقة الواحدة لتجف مدة لا تقل عن (4-5 hours)، ثم تُمد الطبقات الآتية وهكذا حتى تحقيق السماكة المطلوبة للعزل. (David, 2015).

إن الدراسات والتقنيات السابقة لها سلبيات كثيرة، ولم توفر الحل الأنجح في عزل الأبنية عزلاً صوتياً جيداً متوافقاً مع بالكلفة الأقل والفترة الأطول للاستخدام، كما أن سماكات بعض منظومات العزل الصوتي قد تصل حتى (22 سم)، إضافة إلى مخاطر تتعلق بالأمان والصحة والسلامة المهنية والبيئة، وبعضها مواد تتفتت بسهولة عند تعرضها للوسط الخارجي لفترات طويلة، وخاصة عند أعمال الصيانة الدورية. لهذا كله كان لابد من استحضار أبسط تقانات علم النانو ومواده وأقلها كلفةً، في وضع أسس تصميم تقانات العزل الحراري والصوتي وتصنيعها وتطويرها، من مواد مركبة من المنسوجات ثنائية وثلاثية الأبعاد، مع الألياف التقنية (زجاجية بازلتية) ميكروية الأبعاد، والريزينات (الراتنجات) والبوليميرات المتصلبة بالحرارة (كالإيبوكسي والبولي يوريثان الصلب)، لتصبح بنية متكاملة قادرة على رفع جودة العزل في الأبنية الحديثة ومرافقها، وتأمين بيئة عمل مريحة وهادئة.

بناء عليه اعتُمدت مجموعة من الدراسات المرجعية الحديثة ذات الصلة بموضوع هذا البحث، واستُنِد إلى نتائجها إما كنقطة للانطلاق منها في التجارب والاختبارات وتحضير العينات، أو لمقارنة النتائج، وهي مبينة فيما يأتي:

1. **Application Of Nanotechnology-Based Thermal Insulation Materials In Building Construction:**

قدم هذا البحث تعريفاً واضحاً لعلم النانو، ودرس تأثير ودور تكنولوجيا النانو في الهندسة المدنية والمعمارية، نظراً لقدرتها على منح العازل الحراري إمكانات غير تقليدية لحجب طرائق انتقال الحرارة عبره، كما قدم طرحاً لأنواع وتقانات العزل الحراري التي تداخلت معها تكنولوجيا النانو وحسنت من أدائها في العزل. (David, 2016).

2. **Effect of the size of silica nanoparticles on the mechanical characteristics of heterogeneous epoxy resin materials:**

قدم هذا البحث دليلاً تجريبياً واضحاً لتأثير إضافة حبيبات السيليكا النانوية (أيروسيل 200) بنسبة وزنية (1.1%)، مبيناً ذلك بصور المسح الالكتروني (SEM) لأبعاد الحبيبات، والتي حسنت إضافتها لمادة الإيبوكسي من الخواص الميكانيكية لمصفوفة المادة المركبة أذ تحسنت قيم معاملات الشد بنسبة (10–20%) حتى عند تلك الإضافة الضئيلة. أُخذ بهذه الدراسة المرجعية، كدليل على حقيقة تحسن الخواص الميكانيكية للمادة النسيجية المركبة المعززة بحبيبات السيليكا النانوية. (Filippov, 2018).

3. **Ultra-light 3D fabric Reinforced Composite with Distinct Thermal Insulation and Superior Sound absorbing Properties:**

قدمت هذه الدراسة الحديثة رؤية واضحة لمزايا استخدام الأقمشة ثلاثية الأبعاد في صناعة المواد المركبة، إذ بينت نتائج التجارب تحسناً في كفاءة العزل الحراري بنسبة (34%) عن استخدام تقانات العزل التقليدية من فوم البولي ستايرين والبولي يوريثان، بالإضافة إلى التحسن الملحوظ في كفاءة معامل امتصاص الصوت للعينات التي استخدمت فيها الأقمشة ثلاثية الأبعاد. (Liangang *et al.*, 2020).

4. **Mechanical properties of nano-SiO_2 reinforced 3D-glass fiber/epoxy composites:**

قدمت هذه الدراسة تعريفاً جيداً للأقمشة ثلاثية الأبعاد والمفرغة والمصنعة من الألياف الزجاجية نوع (E) بسماكة حتى (3.3 mm)، وللمواد المركبة منها باستخدام مواد الإيبوكسي، مع ملاحظة انخفاض سماكة القماش ثلاثي الأبعاد ضمن مصفوفة المادة المركبة ككل، خاصة عند استخدام تقانة التفريغ لتشكيل المادة المركبة (Vacuum Bagging)، ثم بدراسة الخواص الميكانيكية لتلك المواد المركبة من شد وضغط ومقاومة انحناء، لوحظ أنه عند إضافة نسب معينة من حبيبات السيليكا النانوية بأبعاد (30 nm)، وتراوحت هذه النسب من (0.5, 1, 2, 3%)، أن هناك تحسناً بالخواص الميكانيكية والفيزيائية من متانة ومعاملات الشد باتجاه كل من السداء والحدف. (Ferhat et al., 2017).

5. **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 Electro Spinning)، في تحسين أداء العزل الصوتي، فاستُخدمت في التجارب مواد بوليميرية (بولي أميد PA6، وبولي فينيل الكحول PVA)، لتحضير أغشية من ألياف نانوية غير منسوجة بسماكات وكثافات مختلفة، والتي استُخدمت كمواد تغطية لفوم ببنية مسامية، وهذا ساعد في رفع قدرة العازل على امتصاص 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 سيُحسن أكثر من امتصاص الصوت بسبب زيادة كثافة البنية، لكنه سيسبب زيادة في الوزن والكلفة، وهذا غير مرغوب، خاصة عندما يكون الفارق الذي تحدثه إضافة نسبة ضئيلة من مادة نانوية، كافياً من حيث الأداء ومقبولاً من حيث الكلفة. (Tomáš *et al.*, 2020).

6. **Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies:**

درس هذا البحث تأثر الموصلية الحرارية لعينات من فوم البولي يوريثان (PU)، مختلفة الأبعاد والبنى (مغلقة الخلايا، أو مفتوحة الخلايا)، وأختُبر العزل الحراري بالمجال (30−100°C). أظهرت نتائج البحث أن البارامتر

المتعلق بحجم الخلية (مسامات مادة الفوم) له تأثير كبير على معامل انتقال الحرارة بالتوصيل، وتراوحت قيمه للعينات بين (0.028 W/m.K) وحتى (0.055 W/m.K)، كما بينت النتائج تفاوت معدل التدفق الحراري عبر السماكات المختلفة للعينات بين ($3.136\ W/m^2$) و ($41.727\ W/m^2$)، وتراوحت فروقات درجات الحرارة بين وجهي عينة الاختبار (البارد والساخن) بين (5.4) و (8.3) بالنسبة لعينات الفوم مغلق الخلايا والفوم مختلط الخلايا (مغلق ومفتوح). هنا اعتُمدت نتائج هذه الدراسة للدلالة على الأثر الذي يميز إضافة حبيبات نانوية، مسامية البنية، ولاختيار بنية العازل لتكون (مغلقة الخلايا من الفوم ومفتوحة الخلايا من البنية المسامية لحبيبات السيليكا النانوية) ومن ثم ستتحسن كفاءة العزل عما كانت عليه عن تطبيق أي عازل تقليدي آخر. (Olga et al., 2022).

7. **Acoustic and Thermal Insulation of Nanocomposites for Building Material:**

هدف هذا البحث إلى تعزيز خصائص العزل الحراري والصوتي لمادة مركبة بوليميرية، مصنعة من خليط من (الإيبوكسي وبوليستر) كمادة أساس، ومدعمة بكل من الصوف الصخري والحبيبات النانوية بنسبة وزنية حتى (5–7.5) %. حيث أوضحت نتائج اختبار معامل انتقال الحرارة بالتوصيل أن الخليط المثالي الذي يحوي مواد نانوية بنسبة(7.5) % وزناً، يمتلك أقل قيمة للتوصيل الحراري والتي هي من رتبة (0.443 W/m.K)، ويمتلك أفضل قيمة للعزل الصوتي. (Shanaz *et al.*, 2020).

الخلاصة والفائدة من الدراسات المرجعية: من هنا، ومن خلال الدراسات المرجعية المذكورة والتقانات السابقة للعزل الصوتي والحراري، لوحظ أن أفضل نسبة وزنية لإضافة مسحوق الحبيبات النانوية تتراوح بين (5% و 7,5%) وزناً، لذا ولأسباب اقتصادية ولتحقيق عزل صوتي وحراري جيد، ووفق التصميم الجديد المقترح للعينات، والتي سيتم عرضها لاحقاً في الجزء العملي لهذا البحث، اعتُمدت النسب الوزنية (1% و 3% و 5% و 7% و 10%) لإضافة مسحوق حبيبات السيليكا النانوية، كما يمكن الملاحظة من خلال النتائج التي تم التوصل لها في العمل الحالي، أن النسبة الوزنية (7%) لمسحوق مادة حبيبات السيليكا النانوية مسامية البنية من وزن الخليط، هي النسبة الأفضل من حيث تحقيق الأداء الجيد في العزل الصوتي حتى (99,79%) وتخفيض معامل انتقال الحرارة بالتوصيل حتى القيمة (0,024 W/m.K) مع الأخذ بالاعتبار عامل الكلفة.

8.1. مكونات البحث:

يتكون البحث من الفصول الآتية:

الفصل الأول: يتضمن الإطار العام للبحث، من المقدمة ومشكلة البحث وهدفه ومبرراته ومناهجه ومحدودياته، بالإضافة للدراسات المرجعية ذات الصلة بموضوع البحث، والتقانات السابقة والمعاصرة للعزل.

الفصل الثاني: يتضمن مفهوم العزل الصوتي والحراري للأبنية، والمعايير العالمية المعتمدة لذلك.

الفصل الثالث: يتضمن تعريفاً بالمادة النسيجية المركبة، ومكوناتها، ومصفوفة المادة النسيجية الداعمة بمختلف أنواعها من ألياف زجاجية وبازلتية، وأقمشة زجاجية ثنائية وثلاثية الأبعاد، سواءً كانت منسوجة أو غير منسوجة، ومواصفاتها وتراكيبها النسجية، بالإضافة إلى تعريف بعلم النانو ودوره في صناعة النسيج وعزل الأبنية، وفروض البحث، أي دراسة نظرية لأسس التصميم والتصنيع المقترحة للمواد العازلة للأبنية.

الفصل الرابع: يتضمن بداية الجزء العملي، وتوصيف المواد الأولية والمعدات والتجهيزات المستخدمة في تحضير العينات واختبارها، وتصميم العينات العازلة وفق دراسة إحصائية، ومن ثم مراحل تحضيرها، وكيفية تحضير المواد والحبيبات النانومترية.

الفصل الخامس: يتضمن توصيف وتحليل المواد والحبيبات النانومترية، واختبار خواص وأداء العينات العازلة للصوت والحرارة والمحضرة في هذا البحث. بالإضافة إلى الخاتمة والإضافة العلمية التي حققها هذا البحث، ووضع أسس التصميم والتصنيع المطلوبة لانتاج مواد نسيجية مركبة باستخدام تكنولوجيا النانو للعزل الصوتي والحراري للأبنية. والدراسة الاقتصادية.

الخاتمة: وتتضمن مناقشة النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث، والمقترحات والرؤى المستقبلية التي يوصي بها الباحث، وما يمكن دراسته لاحقاً من أبحاث تساهم في تطوير نتائج هذا البحث.

المراجع: تتضمن المراجع العربية والأجنبية ذات الصلة بموضوع البحث، والتي استند عليها في متنه.

الملاحق: تتضمن معايير بعض تقانات عزل الأبنية، ومواصفات بعض المواد والتجهيزات والاختبارت الإضافية، وجداول تفصيلية بنسب مكونات العينات المصممة والمحضرة في هذا البحث.

الفصل الثاني

مفهوم العزل الصوتي والحراري للأبنية

2. مفهوم العزل الصوتي والحراري للأبنية:

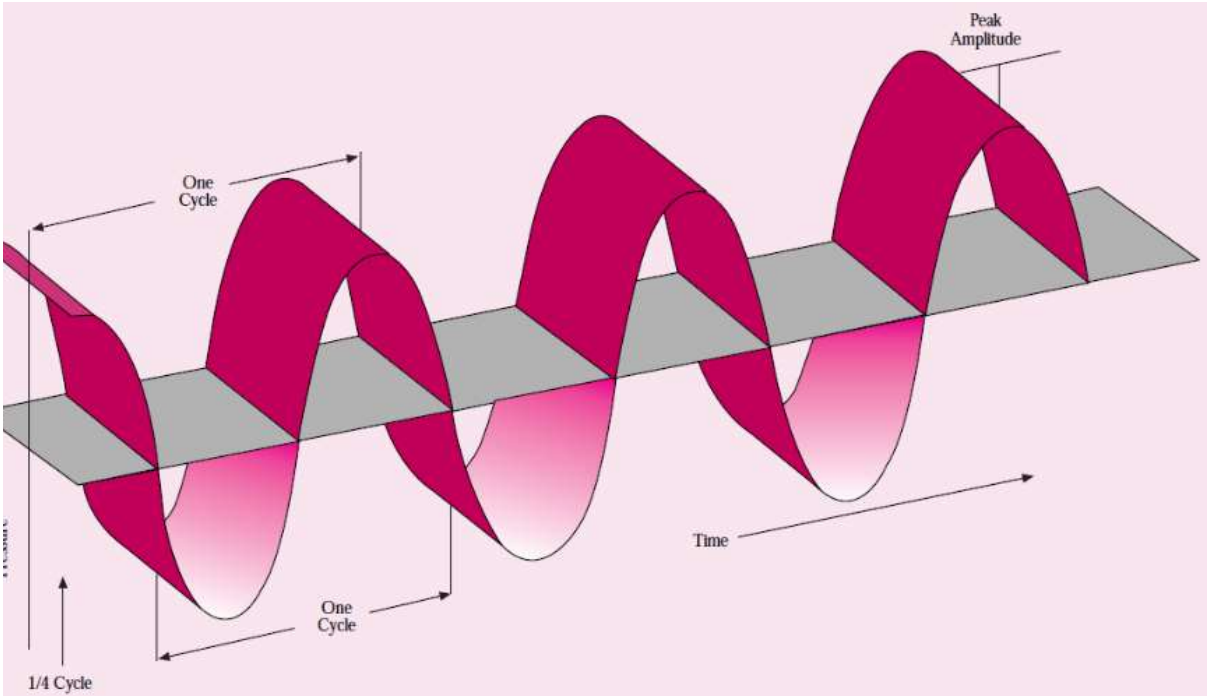
1.2. العزل الصوتي للأبنية الحديثة:

1.1.2. تمهيد:

يُعدُّ الصوت وسيلة للتواصل والتعبير والتنبيه في الوسط المحيط سواء بين البشر أو مع الآلات، فهو سبب للإجهاد والضغط المستمر في الحياة. من هنا برزت شركات صناعية عديدة متخصصة في مجال العزل الصوتي للأبنية ومرفقاتها وللآلات والمركبات، وبدت الحاجة البيئية ملحة، للتدخل في مجال العزل الصوتي للأبنية والمنشآت، بهدف الاستعاضة عن مواد العزل التقليدية كالصوف الصخري والألياف الزجاجية والبازلتية، والتي تمتاز بأدائها الجيد وسهولة متناولها لكن لها مساوئ ومضار عدة وخصوصاً بيئية لا يمكن التغاضي عنها، منها الكثافة العالية ($2560–3400\ kg/m^3$) والوزن الكبير، وسهولة تناثرها في الوسط المحيط وأذيتها الصحية الكبيرة على الإنسان والبيئة، بالإضافة إلى صعوبة إتلافها كمخلفات صناعية فهي عبارة عن أكاسيد لامعدنية لاعضوية، عدا عن تصنيف بعضها كمواد محرمة دولياً (كالأسبستوس). لكن حتى نتمكن من الانطلاق في خوض غمار هذه التقانات، لابد من الإحاطة بمفهوم الصوت والضجيج وآلية انتشار موجة الصوت. (Seyed *et al.*, 2022).

2.1.2. مفهوم الصوت والضجيج:

الصوت عبارة عن طاقة، أي ضغط مستمر على شكل أمواج طاقية، الشكل (6)، تعبر الأجسام والأوساط الصلبة والسائلة والغازية، كُلّاً بحسب كثافته وخواصه، وتُنشأ هذه الطاقة نتيجة اهتزازات متسارعة لجزيئات المادة، هذه الاهتزازات لها تواتر معين يؤدي إلى تواتر اهتزاز لموجة الصوت، الذي يسبب ضغطاً هو الضجيج الذي يعبر عن شدته بالديسيبل (dB). إذاً كلما ازداد تواتر الموجة ازدادت حدة الصوت. (Arval, 2009).



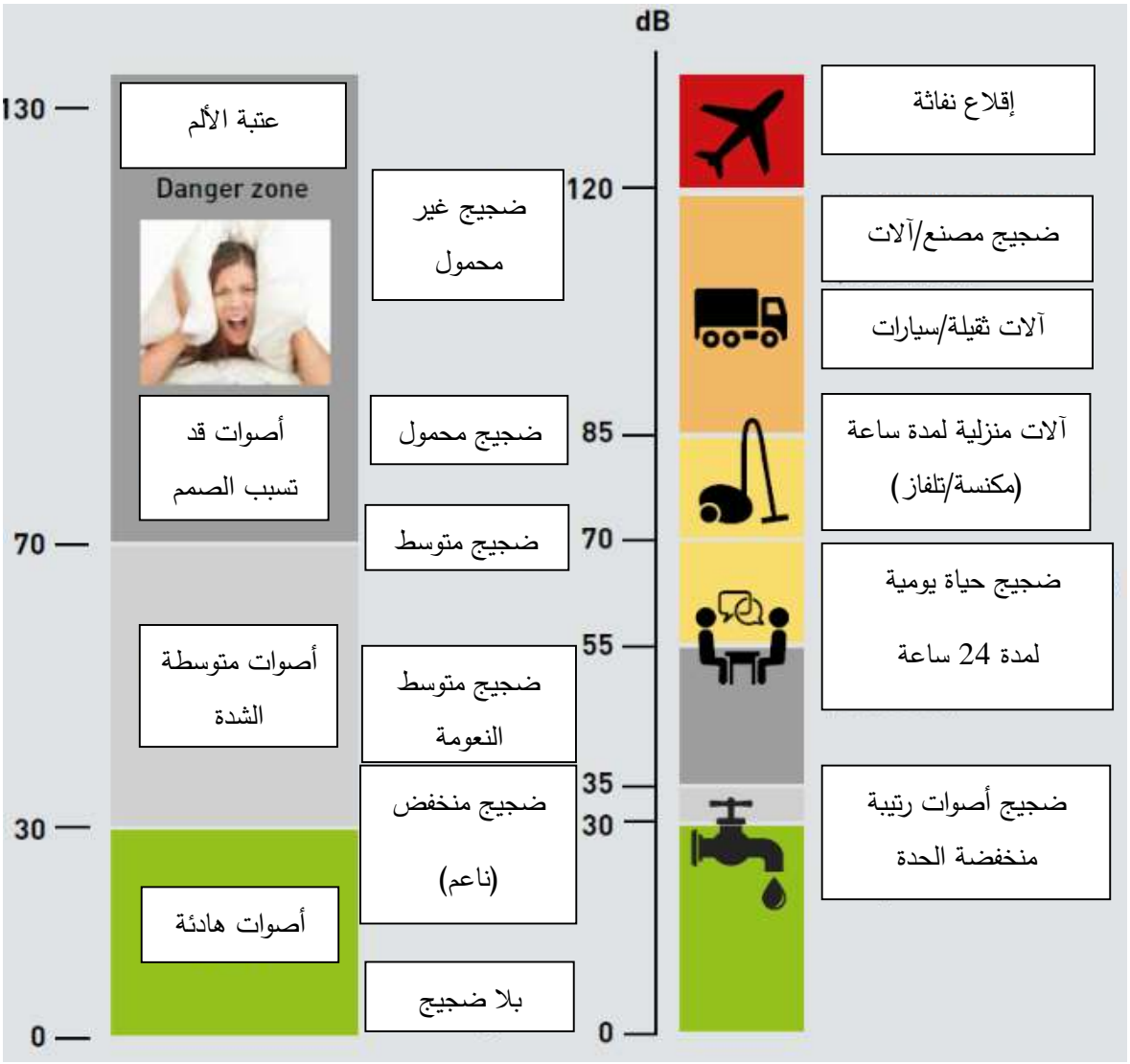
الشكل (6): رسم توضيحي يعبر عن طول موجة الصوت الذي ينتقل خلال فترة زمنية محددة لاتمام دورة واحدة (One Cycle)، (Owens Corning, 2004).

إن شدة التواتر الصوتي، الذي يمكن للإنسان سماعه يتراوح بين (20 Hz) و (20000 Hz)، وعليه يمكن تقسيم الأمواج إلى تحت صوتية تواترها أقل من (20 Hz) وأمواج منخفضة الحدة، تواترها بالمجال (20-350 Hz)، وأمواج متوسطة الحدة تواترها (351-1500 Hz)، وشديدة الحدة تواترها (1501-20000 Hz). إذاً، فإن الأمواج الصوتية التي يجب أخذها بالحسبان عند دراسة العزل الصوتي في الأبنية الحديثة، يقع تواترها ضمن المجال (100-5000 Hz) تقريباً. كما هو مبين في الشكل (9). (Arval, 2009).

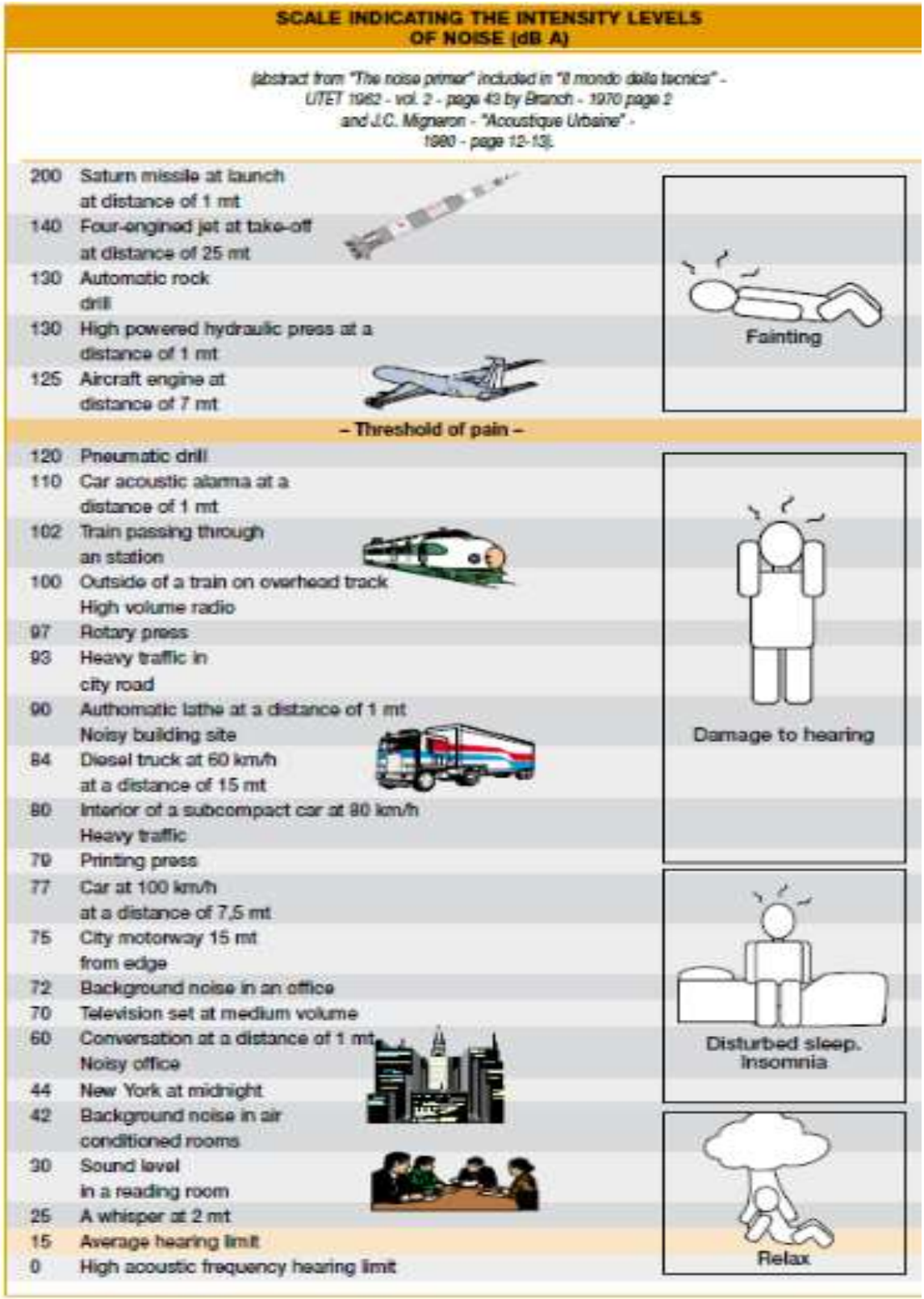
لننظر إلى مفهوم الضجيج الناشئ عن الأصوات في الحياة المدنية من منظور مختلف عن المفاهيم المعتادة التي يعبر عنها بين العامة بالديسيبل، أي شدة الضجيج (dB)، أي (مستوى تأثير ضغط طاقة الصوت)، الأشكال (7) و (8)، فيُقاس مستوى الضغط الناشئ عن الأصوات بمقياس لوغاريتمي يُعطى بالعلاقة (2)، (Arval, 2009):

$$L_P = 20\ X \log \frac{P_{eff}}{P_0} \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

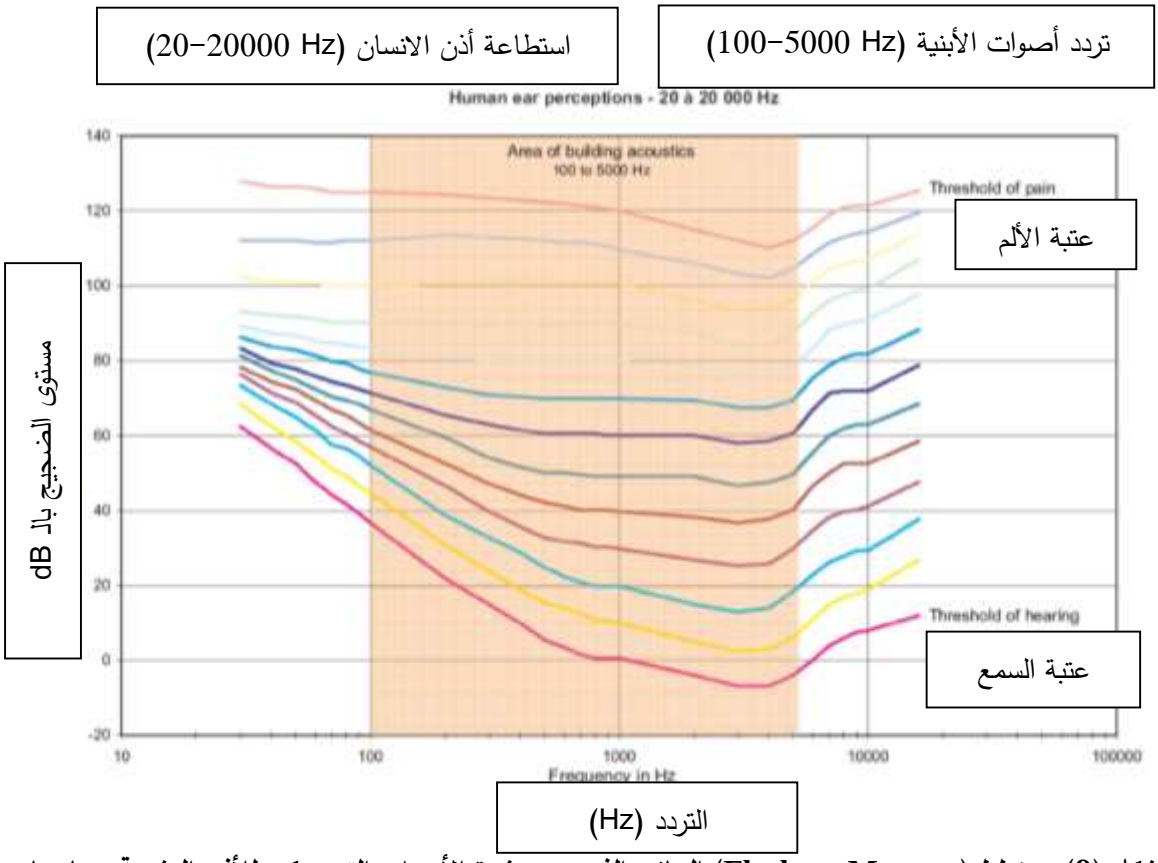
حيث أن: (P_{eff}): يعبر عن تأثير ضغط موجة الصوت، $(P_0 = 2x10^{-5}\ P_a)$.



الشكل (7): رسم توضيحي يعبر عن مستوى الضجيج الصوتي، وفق الدليل: (Armacell GmbH, 2017)



الشكل (8): رسم توضيحي يعبر عن مستوى الضجيج الصوتي، وفق الدليل: (Index, 2009)



الشكل (9): مخطط (Flechter-Munson) البياني الذي يبين شدة الأصوات التي يمكن للأذن البشرية سماعها تبعاً لتواتر اهتزازها، (Arval, 2009).

3.1.2. انتشار الصوت:

تنشأ 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 تخف حدة الصوت، لكن عندما يكون المصدر الذي تنبعث منه تلك الأمواج الصوتية في بيئة مغلقة (بناء مثلاً)، فسوف تنتشر طاقة الأمواج بشكل غير منتظم، يعود للسطوح التي ستصطدم بها تلك الأمواج حتى تصل إلى المستقبل في النهاية، وبطاقة أقل بكثير عن تلك التي تتجه مباشرة بكامل طاقتها نحو المستقبل، عند عدم وجود حواجز تُعيقها. 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). بالنتيجة إن هذا الانتشار والتكاثر غير المنتظم لطاقة الأمواج الصوتية يسبب الضجيج الصوتي، فضلاً عن تعدد مصادر انبعاث الصوت. (Arval, 2009).

4.1.2. مفهوم العزل الصوتي:

يُعرّف العزل الصوتي؛ بأنه مقدرة مادة ما طبيعية كانت أو صنعية على امتصاص الأمواج الصوتية أو عكسها، أي تمنع أو تخفف من شدة تلك الأمواج وتواترها من أحد وجهي المادة إلى الوجه الآخر. (Alice, 2019).

عندما تصادم موجة صوتية بطاقةٍ (E_i) سطحاً ما، فإن جزءاً من طاقة تلك الموجة (E_a) يجري امتصاصها، وجزء آخر من الطاقة (E_t) ينتقل عبر المادة، وجزء آخر من الطاقة (E_r) ينعكس عنها، الشكل (10)، وباستخدام بعض القوانين النظرية التي تأخذ بالحسبان سرعة الموجة بالورود والامتصاص والانعكاس وزوايا أشعتها الطاقية. يمكن حساب مردود نقل الطاقة (τ) بالعلاقة (3): (Alice, 2019).

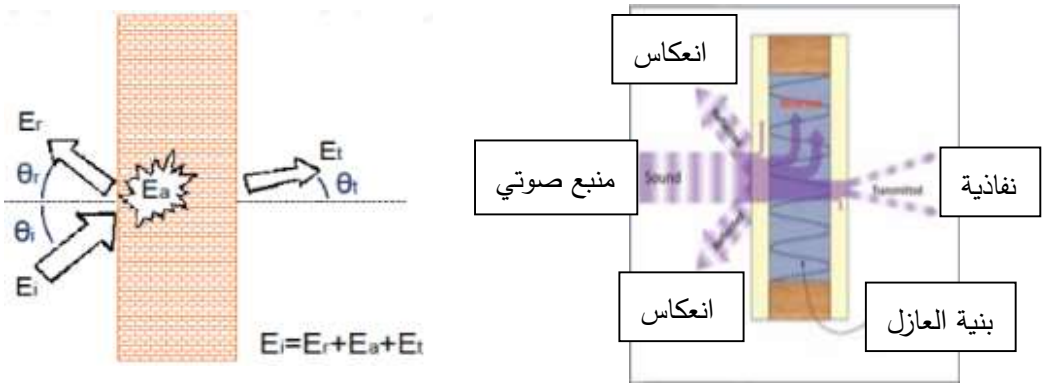
$$\tau = E_t/E_i \quad ، \quad \propto = E_a/E_i \quad .....(3)$$

إذاً كلما كانت الطاقة الممتصة أكبر كانت الطاقة المنتقلة أقل، أي كلما كانت المادة العازلة للصوت أقل نقلاً لطاقة الموجة الصوتية كانت أفضل، أي يصبح مردود امتصاص الطاقة ($\propto$) أكبر ما يمكن، ومردود نقلها (τ) أقل ما يمكن. (Alice, 2019).

أما من حيث البنية، فكلما زادت مسامية بنية المادة قلت الجسيمات الصادة لطاقة موجة الصوت أي ساءت جودة عزلها، وكلما زادت كثافة المادة تحسن عزلها الصوتي. لكن لو كانت المادة مغلقة المسام نسبياً وذات مساحة سطح نوعي عال فوق ($200\ m^2/gr$) وأبعاد المسامات من رتبة النانومتر، الشكل (11)، فستُلاقي موجة الصوت تحديات حتى تخترق بنية المادة حتى لو كانت مسامية ومنخفضة الكثافة. (Anthony *et al., 2018*).

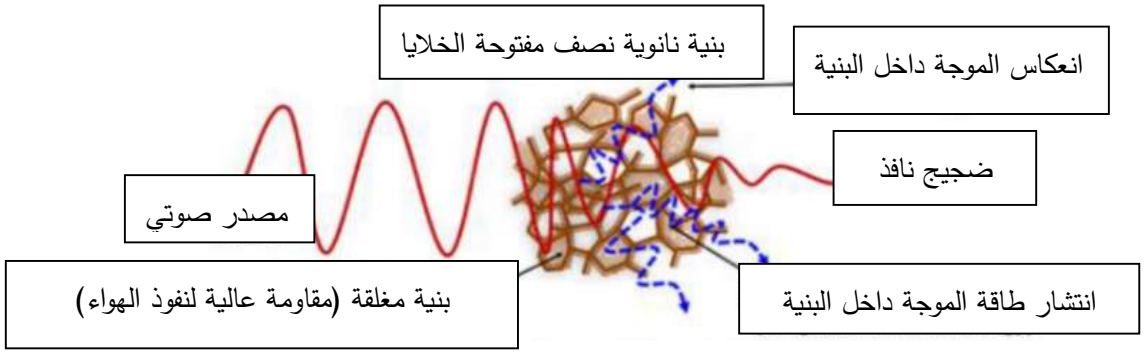
من ثم يمكن التعبير عن العزل الصوتي، بالمؤشر (R_w) والذي يُحسب بالعلاقة: (Alice, 2019).

$$R_w = 10 \log \frac{1}{\tau} .....(4)$$



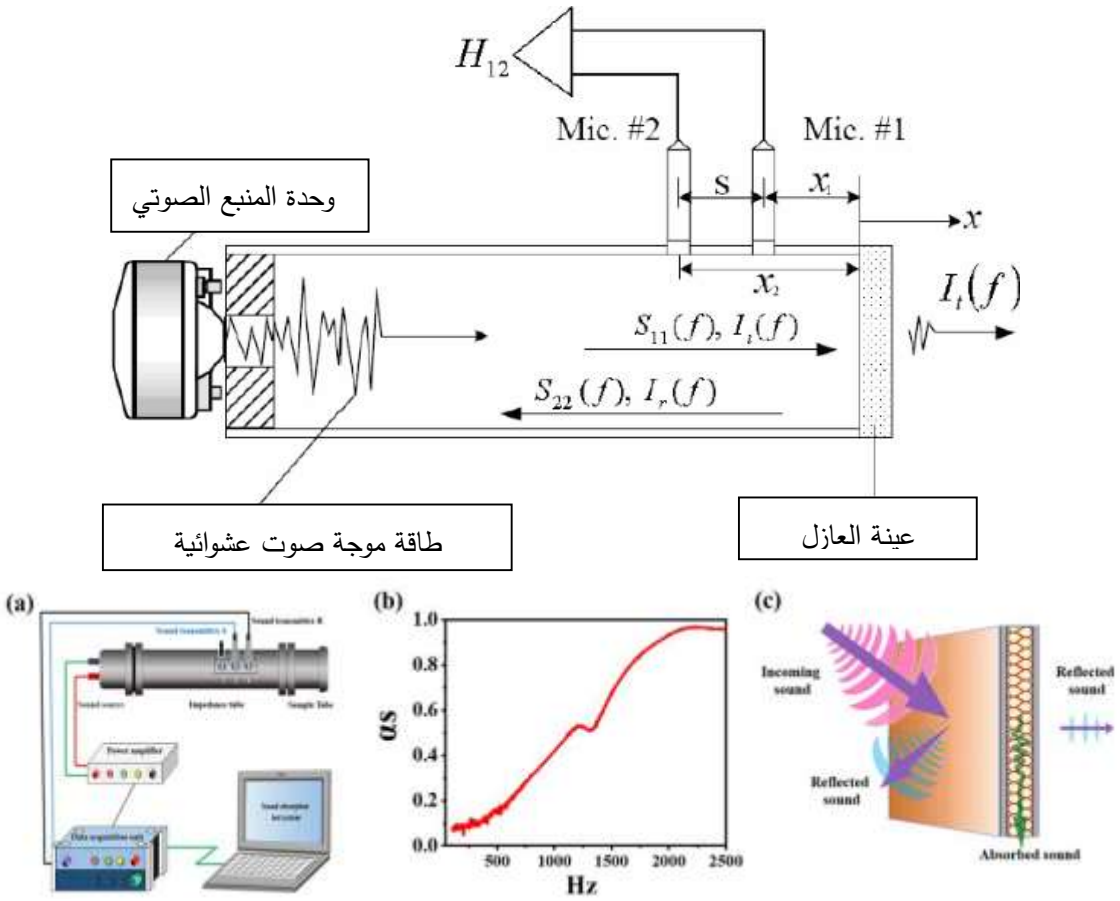
الشكل (10): يعبر عن انقسام طاقة موجة الصوت وتوزعها ضمن بنية المادة العازلة.

.(Icanz, 2012) , (Alice, 2019,9)



الشكل (11): يوضح مفهوم عزل الصوت ضمن البنية النانوية (Anthony *et al., 2018*)

من جهة أخرى يمكن القول، إن هناك عوامل عدة تؤثر في أداء المادة العازلة للصوت على مستوى النانو، أهمها كثافة المادة ودرجة مساميتها وقساوتها، وسماكة العازل، ومساحة السطح النوعي للبنية ودرجة تجانسها. هناك دراسات أخرى توصلت لطرائق وقياسات مخبرية لتعبر 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 (sound transmission loss (STL))، أي معدل امتصاص الصوت، والذي يمكن قياسه مخبرياً من خلال استخدام جهاز بسيط المبدأ، عبارة عن أنبوب معزول 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).



الشكل (12): يبين مخطط توضيحي لجهاز قياس معدل امتصاص طاقة موجة الصوت لمادة عازلة

(Jae-Chul *et al.*, 2008) ، (Liangang *et al.*, 2021)

هنا تُعدّ المسافات (x_1 , x_2) بين سطح العينة وحساسي القياس قبلها، والمسافة (s) بين حساسي القياس نفسيهما. 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)، والتي يمكن حسابها من معامل انتقال الصوت $(H_{12}\ (f))$ بين الأبعاد (x_1 , x_2).

إذ يُعبر عن معامل (magnetic spectral density function) بالرمز ($S_{11}(f)$) عند البعد (x_1)، و ($S_{22}(f)$) عند البعد (x_2)، هذا كما تبينه المعادلة (6): (Jae-Chul *et al.*, 2008).

$$I_i(f) = \frac{S_{11}(f)\begin{Bmatrix}1+|H_{12}(f)|^2-2Re[H_{12}(f)]cosk(x_1-x_2)\\ +2Im[H_{12}(f)]sink(x_1-x_2)\end{Bmatrix}}{4\rho c sin^2 k(x_1-x_2)} \quad ...(5)$$

$$I_r(f) = \frac{S_{22}(f)\begin{Bmatrix}1+|H_{12}(f)|^2-2Re[H_{12}(f)]cosk(x_1-x_2)\\ -2Im[H_{12}(f)]sink(x_1-x_2)\end{Bmatrix}}{4\rho c sin^2 k(x_1-x_2)} \quad ...(6)$$

إذ: (c) و (f) هما سرعة الصوت في الهواء وتردد موجته، أما (ρ) فهي كثافة الهواء عند درجة حرارة الاختبار، في حين (Im) و (Re) فهما معاملا الانتقال الصوتي نظرياً (Imaginary) وعملياً (Real). كما يعبر عن رقم موجة الصوت (K) بالقيمة ($2\pi f/c$) في حين (ρc) يوصف طبيعة هواء الاختبار وخواصه داخل الأنبوب.

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

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

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

ثم يمكن حساب معامل امتصاص الصوت بالعلاقة: (مصطفى، 2009)

$$\alpha = 4\aleph/(\aleph+1)^2 \ldots\ldots\ldots\ldots(8)$$

2.2. العزل الحراري للأبنية الحديثة:

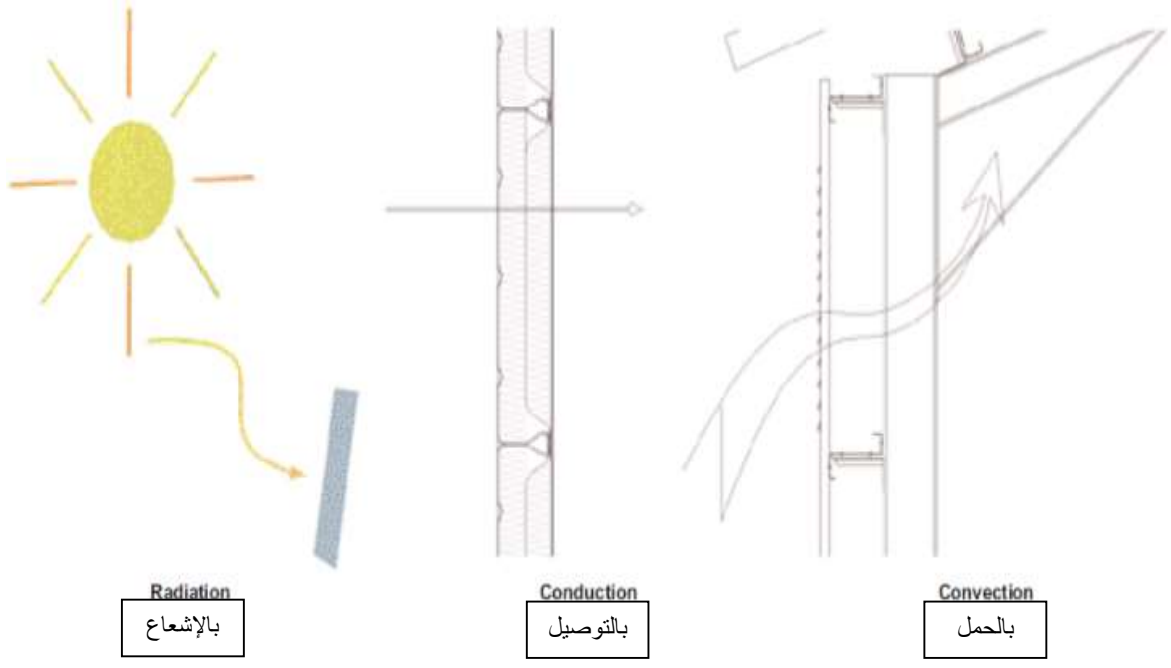
1.2.2. مفهوم العزل الحراري:

لمعرفة الدور الذي يؤديه البحث العلمي لتطوير تقانات عزل الأبنية، لابد من الإضاءة على أسس تطبيق مواد العزل الحراري لتلك الأبنية. نظرياً وبالعودة للفقرة (5.1.2.) الصفحة رقم (23)، هناك ثلاث طرائق لانتقال الحرارة عبر وسط ما أو مادة ما، الشكل (13) وهي: (Arval, 2009).

1- الانتقال بالتوصيل Thermal conduction: وينجم عن اهتزاز مستمر لجزيئات المادة الصلبة فتنقل موجات الإشعاعات الحرارية عبرها.

2- الانتقال بالحمل Heat flux: ويتم ذلك بين جزيئات الهواء أو الغاز داخل بنية المادة.

3- الانتقال بالإشعاع Thermal radiation: ويتم بين جدران السطوح البينية للأجسام.



الشكل (13): يبين رسماً توضيحياً لأشكال انتقال الحرارة في الأبنية، (Arval, 2009).

ومن ثم تُحسب الموصلية الحرارية لمادة ما استناداً إلى المعادلة (9)، الآتية (Bjørn *et al.*, 2012):

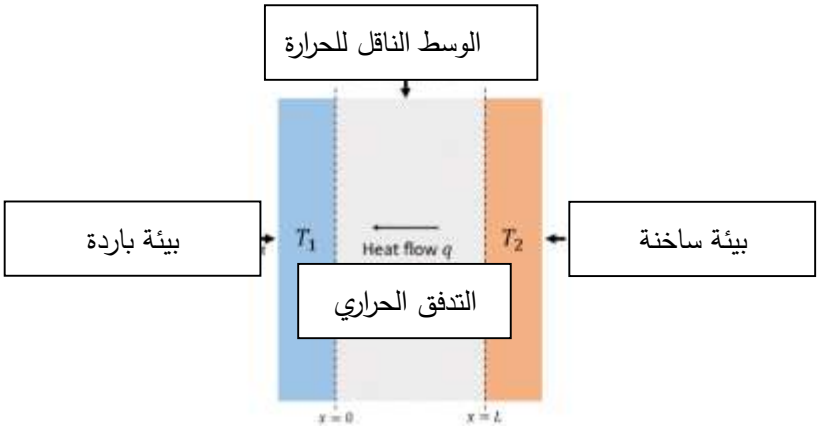
$$U_T = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \ldots\ldots (9)$$

U_T = Total overall thermal conductivity: الموصلية الحرارية الإجمالية للمادة العازلة.

λ_s = Solid state thermal conductivity: الموصلية الحرارية بالتوصيل عبر الصلب.

λ_g = Gas thermal conductivity: الموصلية الحرارية بالحمل عبر الغازات.

λ_r = Radiation thermal conductivity: الموصلية الحرارية بالاشعاع.



الشكل (14): يبين رسماً توضيحياً لمفهوم الموصلية الحرارية المعبر عنها بكمية انتقال الحرارة (q) عبر واحدة المساحة لوجود فارق محدد بدرجات الحرارة بين وجهي الجدار، (European Union, 2020)

يمكن أيضاً التعبير عن انتقال الحرارة الكلي عبر السطوح العازلة بالعلاقة (10) الآتية، (David, 2016):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_o}} \ldots\ldots\ldots (10)$$

U: معامل انتقال الحرارة الكلي للمادة العازلة وتقدر بواحدة (W/m^2K).

d_i: سماكة طبقة العازل وتقدر بواحدة (m).

λ_i: معامل انتقال الحرارة بالتوصيل الجزئي لكل طبقة من طبقات العازل على حدا وتقدر بواحدة (W/mK).

h_i: معامل انتقال الحرارة الداخلي بالحمل بين سطوح مادة العازل نفسها وتقدر بواحدة (W/m^2K).

h_o: معامل انتقال الحرارة للسطوح الخارجية بالحمل للمادة العازلة وتقدر بواحدة (W/m^2K).

2.2.2. العزل الحراري للأبنية والمنشآت ومرافقها:

يُعرّف العزل الحراري؛ بأنه مقدرة مادة أو منتج مكون من مواد عدة على مقاومة التدفق الحراري ومنعه عبره، وتعرّف الموصلية الحرارية؛ بكمية الحرارة المارة عبر واحدة السطوح خلال واحدة الزمن، عندما تتغير درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة، لانتقال الحرارة على منحى الناظم لمسافة واحدة الطول، وباتجاه مستوى الحرارة الأخفض. ويُستخدم معامل انتقال الحرارة (λ [W/m.K])، كمؤشر يدل على عزل المادة للحرارة أو نقلها للحرارة، فكلما انخفضت قيمته دل ذلك على زيادة قدرة المادة على العزل الحراري، والعكس صحيح.

يمكن باستخدام تكنولوجيا النانو حجب طريقة واحدة أو أكثر من طرائق انتقال الحرارة عبر المادة العازلة، فيضاف عندها بُعد الذكاء للعزل الحراري، ويختلف حساب كمية الحرارة المنتقلة عبر السطوح المستوية كالجدران والأسقف عن حساب تلك المنتقلة عبر جدران الأنابيب ومرافق الأبنية، وتستخدم المعادلات الآتية وفق قانون فوريه لذلك، (Christiansen, 2021) و(Gebhart, 1971):

أولاً: لعزل السطوح المستوية؛ كالجدران والأسقف (walls & roofs):

$$q_w = \mathrm{K.A.}\frac{\Delta T}{\delta} \quad [W] \ldots\ldots\ldots (11)$$

إذ إن:

q_w: التدفق الحراري عبر الجدار (W).

K: معامل انتقال الحرارة ($\mathrm{W/m.K}$).

A: مساحة سطح العازل ($\mathrm{m^2}$).

δ: سماكة جدار العازل (m).

ΔT: فرق درجات الحرارة على سطحي العازل الداخلية والخارجية ($\mathrm{K\ Kelvin}$).

ثانياً: لعزل الأجسام الاسطوانية؛ كالأنابيب (tubes & pipes):

$$q_t = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{\ln(^{d_2}/_{d_1})}{2.\pi.K_1} + \frac{\ln(^{d_3}/_{d_2})}{2.\pi.K_2}} \quad [W] \dots\dots\dots (12)$$

إذ إن:

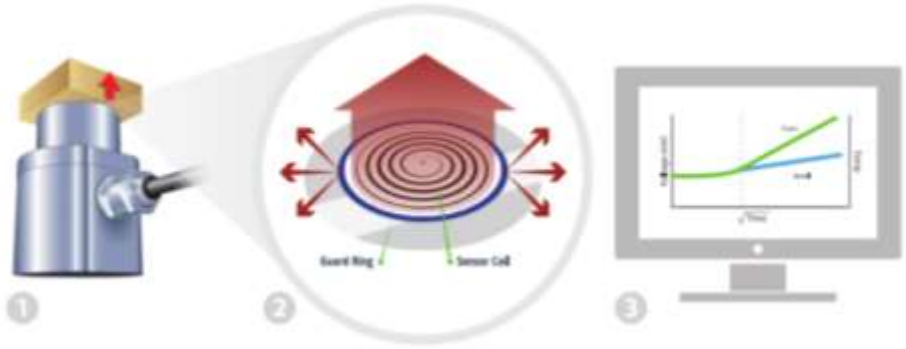
q_t: التدفق الحراري عبر جدار الأنبوب (W). K_1 , K_2 : معاملات انتقال الحرارة للعازل والأنبوب (W/m.K).

$(T_i - T_o)$: فرق درجات الحرارة بين السطوح الداخلية والخارجية (C°).

d_1: قطر مقطع الأنبوب الداخلي (m). d_2: قطر المقطع الخارجي (m). d_3: قطر مقطع الأنبوب والعازل (m).

3.2.2. آلية قياس معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (λ) ومعامل انتقال الحرارة الكلي (U):

تطورت التقانات والآليات التي تسمح بدراسة الخواص الحرارية وقياسها لأية مادة، سواء ناقلة أو عازلة للحرارة، وبناءً عليه فقد أصدرت المنظمات الدولية الخاصة بالاختبارات والمقايسة، مواصفات عالمية تميز طرائق الاختبار، والأجهزة التي يمكن استخدامها لتحقيق ذلك، وفي الشكل (15) يُبين المبدأ الأساسي في تلك القياسات.



الشكل (15): يبين رسماً توضيحياً لآلية اختبار معامل انتقال الحرارة الكلي لمادة ما، (European Union, 2020)

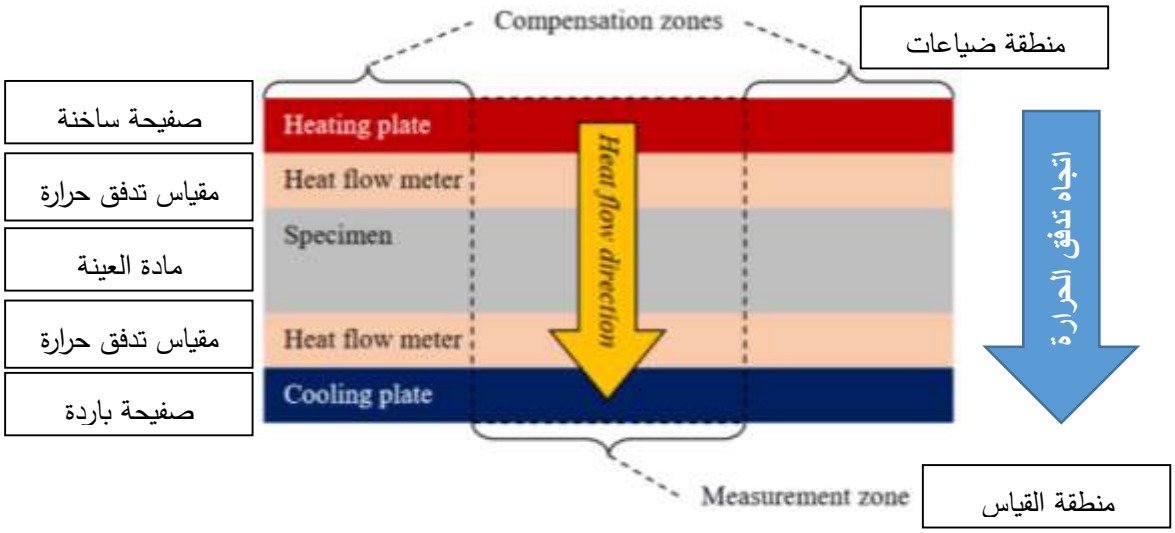
1- استخدام حساس الحرارة ووضع العينة فوقه.

2- منبع حراري يصدر الحرارة التي تعبر العينة من الحساس باتجاه بيئة الاختبار.

3- حاسب مع برنامج متخصص بقراءة الخواص الحرارية وتحليلها.

اذاً، يمكن التمييز بين تقنيتين رئيستين في اختبار الخواص الحرارية لمادة ما، وقياس موصليتها الحرارية، وهما:

1. <u>طريقة الاختبار بالصفيحة ذات التدرج الحراري (Guarded Hot Plate Technique)</u>: الشكل (16)، تعتمد هذه التقنية على طريقة (Steady-State Method) بتطبيق تدرج حراري ثابت، لاختبار معامل انتقال الحرارة (Lamda λ [W/m.K])، للمادة العازلة، من خلال فرق درجات الحرارة، (ΔT $[Kelvin]$)، وسماكة المادة العازلة (العينة) بواحدة ([meter] δ)، والتدفق الحراري ([W/m^2] Q) الذي يعبر العينة عبر مساحة الاختبار التي تحددها المواصفة، والتي تقع في وسط العينة الشكل (16)، ويبين الجدول (4) بارامترات الاختبار الخاصة بالجهاز (TAURUS TCA 500-P) الذي يعمل وفق هذه التقنية لقياس الموصلية الحرارية لمادة عازلة. كما يتم الاختبار عملاً بالمواصفة العالمية (ISO 8302:1991) والمواصفة (BS EN 12667:2001). وبتطبيق قانون فوريه بانتقال الحرارة، المعادلة رقم (11). (Hicham Johra, 2019)، (European Union, 2020).

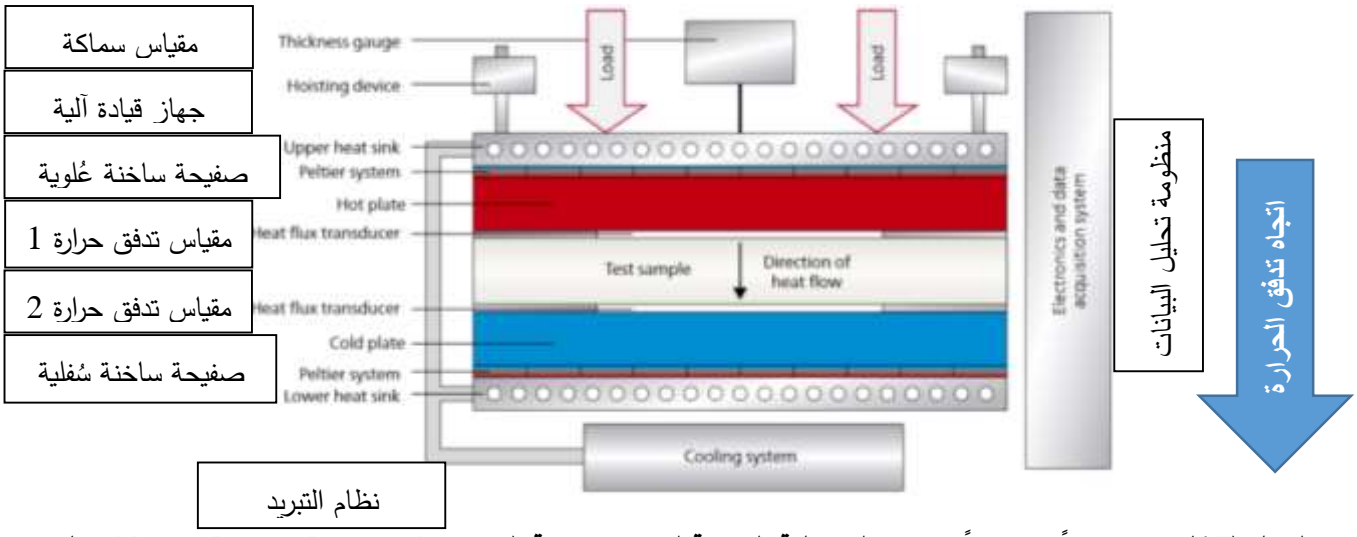


الشكل (16): يبين رسماً توضيحياً لاختبار الموصلية الحرارية لمادة ما بتقنية (Guarded Hot Plate Technique)، (European Union, 2020)

الجدول (4): يبين بعض بارامترات الاختبار الخاصة بالجهاز (TAURUS TCA500-P) الذي يعمل وفق هذه التقنية، (European Union, 2020).

إجراء القياس	يتم العمل وفق المواصفات القياسية التالية: ISO 8301, DIN 52616, DIN EN 1946-3, EN 12664, EN 12667, EN 12939
مجال القياس	0,01-0.5 W/m.K يرتبط بمدى سماكة العينة المختبرة
أبعاد العينة	300 x 300 mm حتى 500 x 500 mm بالسماكة ضمن المجال 20-200 mm
مجال درجة حرارة العينة	0 حتى 60°C
عدد مناطق القراءة	حتى 10
دقة القياس	5% وفق المواصفة ISO 8302
عدد حساسات الحرارة	10 حساسات نوع k
منطقة قياس تدفق الحرارة	300 x 300 mm
أبعاد الصفيحة الساخنة	500 x 500 mm ألمنيوم
أبعاد الصفيحة الباردة	500 x 500 mm ألمنيوم

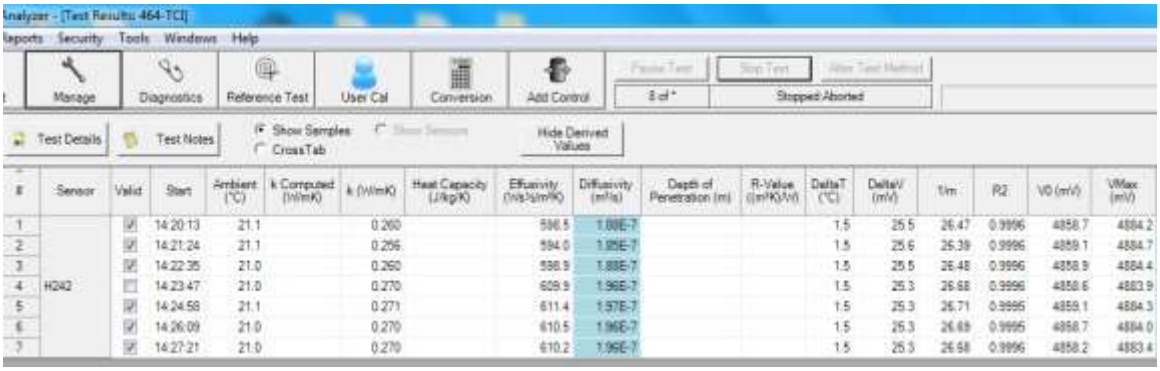
2. <u>طريقة الاختبار بالصفيحة ذات المعايرة (Calibrated Hot Plate Technique)</u>: الشكل (17)، تعتمد هذه التقنية على استخدام مقياس حرارة رقمي (Digital Thermometer)، ويوضع هذا المقياس على الصفيحة الساخنة، ويتم رفع درجة الحرارة حتى الدرجة المطلوبة، ثم تُقاس درجة الحرارة بين الحرارة على المقياس من جهة والحرارة التي تظهر على الجهة الأخرى من العينة المختبرة، وبوساطة مقياس تدفق حراري (HFM) يتم قياس التدفق الحراري (Q [W/m²]) الذي يعبر العينة عبر كامل مساحة عينة الاختبار التي تحددها المواصفة، ولا يتم إنجاز الاختبار وإظهار النتائج إلا بعد الوصول للاستقرار الحراري. ويبين الجدول (5) بارامترات الاختبار الخاصة بالجهاز (Netzsch HFM 446 Lambda Small) الذي يعمل وفق هذه التقنية لقياس الموصلية الحرارية لمادة عازلة. (European Union, 2020). وفي كلتا تقنيتي الاختبار الحراري، يتم الوصول إلى الخواص الحرارية الخاصة بعينة المادة العازلة المُختَبَرة، ويتم إظهار تلك النتائج وفق برنامج حاسوبي خاص كما في جهاز الاختبار الحراري (TCI 25 C-Therm)، الشكل (18).



الشكل (17): يبين رسماً توضيحياً لاختبار الموصلية الحرارية لمادة ما بتقنية (Calibrated Hot Plate Technique)، (European Union, 2020)

الجدول (5): يبين بعض بارامترات الاختبار الخاصة بالجهاز (Netzsch HFM 446 Lambda Small) الذي يعمل وفق هذه التقنية، (European Union, 2020).

إجراء القياس	يتم العمل وفق المواصفات القياسية التالية: ASTM C518, ISO 8301, JIS A1412, DIN EN 12667
مجال القياس	0,007-2 W/m.K
أبعاد العينة	203 x 203 mm
السماكة القصوى للعينة	52 mm
مجال درجة حرارة العينة	90°C حتى -20
دقة القياس	1-2%
عدد حساسات الحرارة	3 حساسات نوع k
عدد مناطق القراءة	حتى 10
قوة الضغط المطبقة للالتصاق التام	حتى 854 Ne



الشكل (18): يبين واجهة البرنامج الخاص بالجهاز (TCI 25 C-Therm) لقياس الخواص الحرارية لمادة ما، (European Union, 2020)

إذاً تتجلى فوائد العزل الحراري في النقاط الآتية:

1- توفير الطاقة. 2- تخفيض معدل فقد الحرارة عبر السطوح.

3- ضبط شروط الوسط حرارياً (مخبر، معمل، تفاعل كيميائي...). 4- خلق بيئة عمل مريحة.

كما أن العوامل الرئيسة التي تؤدي دور التأثير الأكبر على معامل التوصيل الحراري لسطح ما، هو:

1- سماكة العازل. 2- كثافة العازل. 3- مساحة السطح النوعي للبنية.

بالنظر للآفاق المستقبلية لتطبيق تكنولوجيا النانو في العزل الحراري للأبنية، فقد توجهت معظم شركات الدول الصناعية الكبرى في العالم، والتي تنفق مليارات الدولارات على الأبحاث العلمية، نحو تحسين متطلبات الهندسة المدنية والإنشائية، بإدخال علم النانو وتقاناته في هذا المجال، ونذكر منها بعض الشركات الأمريكية والأوروبية واليابانية أمثال (IBM, Intel, Motorola, Lucent, Boeing, Hitachi). وبحلول عام (2015م) أصبح تأثير تكنولوجيا النانو على الصناعات في السوق ما يعادل (1 trillion$)، ومن ثم لابد أن تشكل صناعة البناء حلقتها الخاصة بها ضمن سلسلة النانو. (Bharat, 2004).

يبقى نجاح أي تقنية مستخدمة في عزل الأبنية رهناً بالعامل الاقتصادي والتجاري، والعملي، أي إمكانية التطبيق على المستوى الصناعي.

3.2. المعايير العالمية لعزل الأبنية الحديثة:

انطلاقاً من هدف هذا البحث، في العمل على إيجاد الحلول الحقيقية والواقعية لمشاكل الطاقة والتلوث البيئي وإعادة الإعمار، وفق أحدث التقانات العالمية المعاصرة (تقانة النانو Nanotechnology). حلول لا يمكن تحقيق متطلباتها، أو تقييم أداء المنظومات التي ستحقق الهدف من هذا البحث، ما لم يتم العمل ضمن إطار من المقاييس والمعايير العالمية التي اعتمدتها الدول الحديثة وما زالت تستخدمها في تطوير تقانات العزل الحراري والصوتي ومنتجاتها، في أبنيتها ومنشآتها الحديثة والمعاصرة، كما أن هذه المعايير لم تكن وليدة الساعة، بل كانت نتاجاً لمجموعة من الأبحاث والاختبارات والتجارب لتوصيف بنى وخواص تلك المنتجات وتحليلها. من هذه المعايير هناك الدليلان العالميان لمنتجات العزل الحراري والصوتي في الأبنية، وهما: الدليل (Arval, 2009)، والدليل (Index, 2009)، واللذان يتضمنان شرحاً وافياً لمختلف النظريات والمفاهيم والعلاقات الرياضية والفيزيائية المتعلقة بعزل الحرارة والضجيج والرطوبة في مختلف أنواع المباني ومرفقاتها، وتوصيفاً كاملاً (وفقاً لمعايير ومقاييس تعود لمعاهد ومخابر اختبارات ومُقايسة أوروبية وأمريكية) لآخر ما توصلت إليه الصناعات الحديثة من منتجات منتشرة وشائعة الاستخدام في السوق العالمية للتطبيقات ذات الصلة، وكيفية التعامل معها، ومع الرسومات التوضيحية المرفقة بالشرح الكافي سواء للباحث أو الزبون المستهلك لتلك المنتجات.

كذلك الدليل الخاص بتوصيف خواص منتجات العزل (Guide to Insulation Product Specifications)، والذي طُوّر من قبل اللجنة التقنية للمنظمة الدولية للعزل (National Insulation Association Technical Information Committee) في شهر تشرين الثاني لعام (2016م)، والذي تم فيه تصنيف المواصفات الأمريكية (ASTM)، الخاصة بالاختبارات المتعلقة بصناعة العزل الحراري ومقاومة الحرائق، سواء كان في الأبنية السكنية أو التجارية أو الصناعية، مع توصيف المواد المساعدة في تهيئة تلك المواد والمنتجات العازلة لتناسب التطبيق الهدف. أيضاً الدليل الخاص بالعزل الصوتي وتخفيف الضجيج في الأبنية، وفق المواصفة البريطانية (Guidance on sound insulation and noise reduction for buildings/BS 8233:2014)

والصادر عام (2017)، والذي يتضمن تعريفاً شاملاً بمختلف المفاهيم والمصطلحات الصوتية والعزل الصوتي والضجيج، وكيفية إجراء المقايسات والحسابات الخاصة بكل منها.

هناك بعض المعاهد والمخابر التي تعود لشركات صناعية وتجارية خاصة تسعى إلى تحقيق الجودة في منتجاتها، ومن ثم تعمد إلى إصدار كتيبات وأدلة تقنية وتجارية متعلقة بمنتجاتها، ومنها نذكر الكتيب الشامل للعزل الحراري (Thermal Insulation Handbook) الصادر عن منظمة جنوب أفريقيا للعزل الحراري، لصناعة البناء، وهي اختصار لِـ(TIASA 2021 – The Thermal Insulation Association of Southern Africa)، (TIASA, 2001). هناك أيضاً الكتيب الشامل لمواد العزل الحراري والصوتي العائد لشركة إيسوفر البريطانية (ISOVER, Saint-Gobain, UK) البريطانية ومنتجاتها ذات الصلة بمواد عزل الأبنية الحديثة، تحت مسمى الدليل الخاص بحلول العزل الحراري والصوتي (The Insulation Handbook Acoustic and thermal insulation solution guide, Isover, 2019)، ويتضمن هذا الدليل شرحاً وتوصيفاً مفصلين لجميع منتجات العلامة التجارية (ISOVER® 1979) والمعزز بالصور التوضيحية والملونة، وفي الختام يتضمن هذا الدليل في الصفحات الثماني الأخيرة رسوماً توضيحية تبين كيفية توزيع منتجات العزل الحراري والصوتي الخاصة بالشركة ضمن أجزاء البناء وفقاً للمعايير والمواصفات البريطانية ذات الصلة.

بالعودة لجميع تلك الأدلة والكتيبات العالمية، فإن هدف تلك الشركات والمنظمات الدولية هو العمل على تطوير أغلب منتجاتها العازلة لتكون ذات كثافة منخفضة ووزن أقل وسماكة أقل ما يمكن، ومسامية أعلى، ويشكل الهواء النسبة الأعظم من بنيتها، ولا تمتلك سماكات كبيرة، (Arval, 2009)، لذا تم عند تحضير عينات هذا البحث، ومقارنةً بمنتجات ذلك الدليل، مراعاة أن تتراوح السماكة (35–100 مم)، مأخوذاً بالحسبان عامل الكلفة، فكانت سماكة العينات (40–50 مم) أيضاً وفقاً للأطلس السوري للعزل الحراري.

4.2. مصادر الأصوات في الأبنية الحديثة:

عندما يُدرس العزل الصوتي في الأبنية الحديثة، يكون الهدف الرئيسي عزل تلك الأبنية عن الوسط الخارجي، الذي يُعدّ المنبع الرئيسي لطاقة الأمواج الصوتية المسببة للضغط (الضجيج)، وباقي المصادر تُعدّ ثانوية: (Arval, 2009). الشكل (19) أدناه:

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

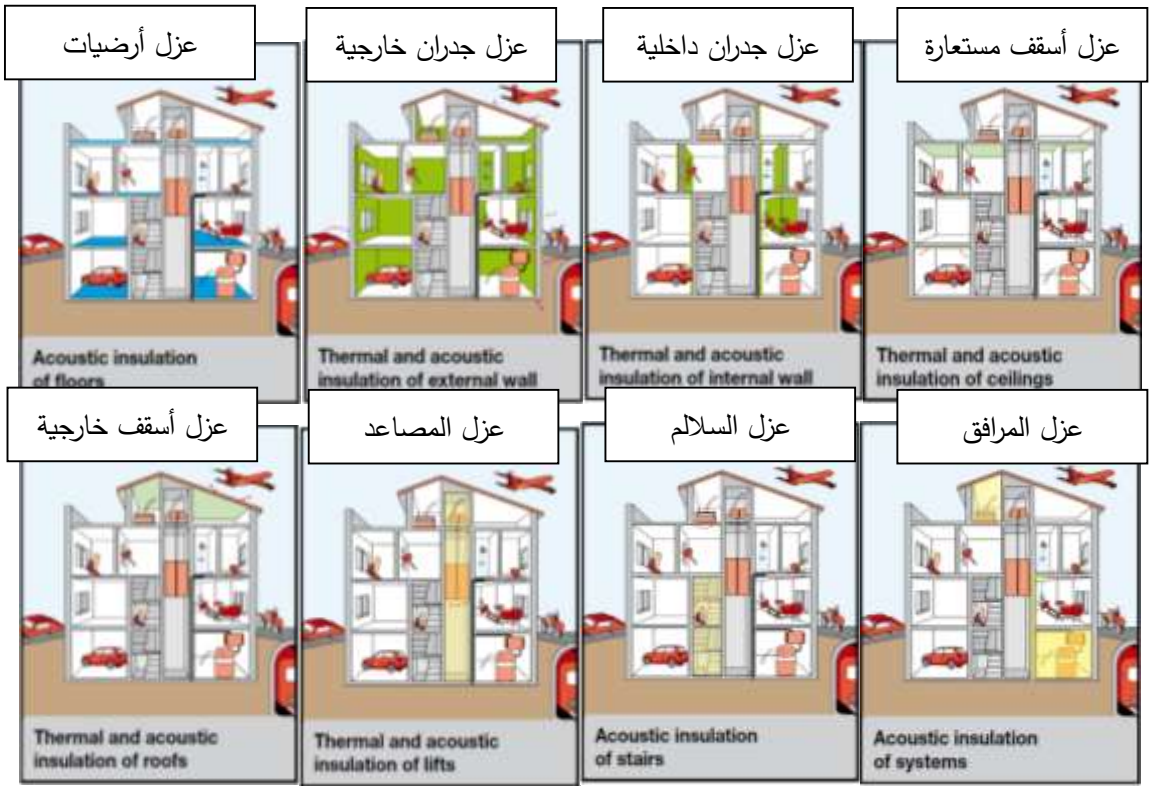
2- (Indoor airborne sound): الضجيج الصادر عن المحادثات والآلات والمعدات داخل البناء أو المنشأة.

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

4- الضجيج الصادر عن المرفقات الخدمية الخاصة بالأبنية، كالمراجل والمكيفات وغيرها...

الشكل (19): رسم توضيحي يبين مصادر الضجيج في الأبنية، (Index, 2009).

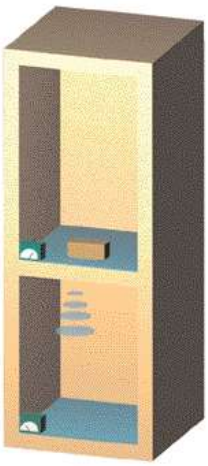
ومن ثم يتطلب تأمين بيئة العمل المريحة والهادئة، تطوير تقانات العزل الصوتي لتخفف من آثار المصادر المتنوعة لتلك الأصوات في الأبنية والمنشآت، ويصبح العزل ضرورياً في الأسقف والجدران الخارجية والداخلية والأرضيات، الشكل (20).



الشكل (20): رسم توضيحي يبين مواقع توزع العزل الصوتي (الملونة) في الأبنية، (Index, 2009).

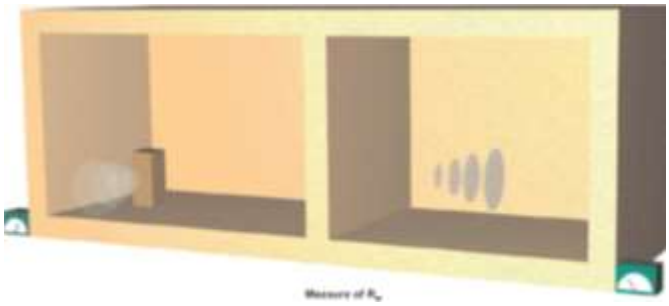
بالنسبة للضجيج الصادر عن المحيط (Airborne sound) يتم اعتماد المعيار (EN ISO 140-3)، لاختبار أداء العازل الصوتي بين غرفتين أحدهما يحوي منبعاً صوتياً والآخر مستقبلاً للصوت، الشكل (22)، ومنها يمكن قياس مؤشر عزل الصوت ($R_w\ (C; C_{tr})$) كما تبين ذلك المواصفة القياسية (EN ISO 717-1)، إذ يعبر المؤشر ($R_w + C$) عن عزل الصوت الصادر عن المنابع داخل المنشأة، والمؤشر ($R_w + C_{tr}$) يعبر عن عزل الصوت الصادر عن المنابع خارج المنشأة. كما في الجدول (6).

أما بالنسبة للضجيج الصادر عن الاصطدام بالسطوح أو حركة الأجسام أو مشي الأشخاص (Impact sound)، فيجري اعتماد المعيار الدولي (EN ISO 140-6)، لاختبار أداء العازل الصوتي لأرضية، بين غرفتين أحدهما يحوي منبعاً صوتياً (ارتطام جسم بالأرضية)، والآخر مستقبلاً للصوت، الشكل (21)، ومنها يمكن قياس مؤشر عزل الصوت (L_n) كما تبين ذلك المواصفة (EN ISO 717-2). (Arval, 2009).



(Impact sound insulation)

وفق EN ISO 140-6



(Airborne sound insulation)

وفق EN ISO 140-3

الشكل (21): رسم توضيحي لطريقة اختيار منابع الضجيج لاختبار كفاءة عزل الصوت للأبنية، (Arval, 2009).

الجدول (6): أمثلة عن معامل (R_w) عزل الصوت لبعض المواد وفق: EN ISO 717-1، (Arval, 2009).

الاسم التجاري لتقانة العزل الصوتي المستخدمة	كثافة بنية المادة العازلة (Kg/m^3)	R_w%
IN227	49	54
CIN323L	25	44
Concert 16 cm	390	56
Concert 8 cm	390	45
Solid brick	480	57
Hollow breeze block	230	48
Earthenware tile	56	16

وفقاً للمعايير (article 235.2.11-Law of 30.08.1990) المعتمدة في عزل صالات المعامل والمنشآت، 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 انطلاقة البحث عن مواد عازلة للسطوح والجدران والأرضيات قادرة على تحقيق المتطلبات البيئية المذكورة. (Arval, 2009).

أما بالنسبة للصالات والمنشآت الرياضية فيجري اعتماد المعيار (NF P 90.207)، والذي يضمن العزل الصوتي الذي يحقق حجباً للضجيج الداخلي (أكبر من 30 dB) من الخروج للمحيط الخارجي. وبالنسبة للمرافق الخدمية والبنى التحتية كالمدارس والمستشفيات والفنادق والمؤسسات، فيجري اعتماد المعيار الدولي (law of 25.04.2003)، والذي يصف متطلبات العزل الصوتي لهذه الأبنية. أيضاً هناك المعايير (law of 28.10.1994 / 01.01.2000 (NRA)) الخاصة بعزل المنازل السكنية في الأرياف. (Arval, 2009).

5.2. مفهوم فقدان نقل الصوت في عزل الأبنية (Sound Transmission Loss):

تعريف: تُقاس قدرة مادة أو نظام عازل ما، على منع انتقال الصوت من منطقة إلى أخرى أو تخفيفه بفقدان نقل الصوت (TL Transmission Loss)، وتُقاس بإجراء اختبارات ميدانية عدة، ويُعبّر عنها بالديسيبل، فكلما زادت قيمتها، دلّ ذلك على زيادة قدرة المادة على خفض شدة الصوت. يجري قياس فقد نقل الصوت لجدار بين غرفتين نموذجيتين مصغرتين بهدف الاختبار الصوتي، كما يبين الشكل (22)، وفق طريقة الاختبار الميدانية المستخدمة من قبل جميع المختبرات بالمواصفة المعيارية (ASTM E 90)، إذ كلما كان هذا المعامل أكبر دلّ هذا على كفاءة المادة العازلة للصوت في الأبنية، (يجب دائمًا استخدام أحدث مراجعة لهذا المعيار حيث تُجرى التغييرات غالبًا في مراجعة المعيار). (Owens Corning, 2004).

الشكل (22): رسم توضيحي يعبر عن طريقة قياس معامل فقدان انتقال الصوت وفق المواصفة (ASTM E 90)، بوجود مُرسل ومُستقبل، (Owens Corning, 2004).

6.2. حساب فقدان نقل الصوت (Sound Transmission Loss STL):

يُعبّر عنه بالمعادلة: (Owens Corning, 2004).

$$TL = SPLs - SPLr = 10 \log S/A \quad [\text{dB}] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

إذ إن:

$(SPLs)$: متوسط مستوى ضغط الصوت في الغرفة الأولى التي تحوي المنبع الصوتي (المصدر Source).

$(SPLr)$: متوسط مستوى ضغط الصوت في الغرفة الثانية التي تحوي المستقبل الصوتي (المستقبل Receiver).

(S): مساحة سطح القسم المختبر (الغرفتين) بواحدة القدم المربع (sq. ft).

(A): معدل امتصاص الصوت في غرفة المستقبل (Receiver)، بواحدة (Sabin). (انظر الملحق رقم (1)).

يُطلق على المصطلح الأخير $(10 \log S/A)$، في المعادلة أعلاه عامل المردود الفعلي للتجربة، إذ يقوم بضبط الفارق المبين في المعادلة السابقة $(SPLs - SPLr)$ في مستويات ضغط الصوت المقاسة عبر قسم الاختبار. كما يجب تعديل هذا الفارق، أو تطبيعه بعامل المردود ليعبر عن واقع التجربة ما أمكن، بحيث يمكن مقارنة قيم خسارة الإرسال من مختبرات مختلفة. يجري استخدامه لضبط الحجم المختلف لعينات الاختبار التي اختبرت في كل مختبر وكمية سابينات الامتصاص (Sabins) في كل غرفة استقبال. (انظر الملحق رقم (1)، الصفحة رقم (182)). (Owens Corning, 2004).

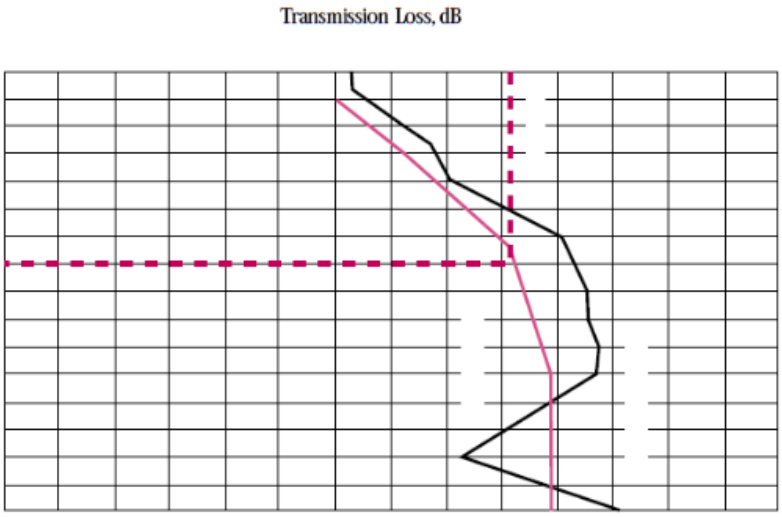
7.2. تصنيف فئات نقل الصوت في الأبنية (Sound Transmission Class STC):

هي طريقة لتصنيف أداء نقل الصوت المحمول جواً وتقييمه، لجدار أو مجموعة أرضية / سقف، بترددات مختلفة عن طريق رقم واحد. تعتمد طريقة تحديد (STC) على المواصفة المعيارية (ASTM E 413)، بعنوان "التصنيف القياسي لتحديد فئة نقل الصوت. ويُحدّد التصنيف (STC) من قيم فقدان إرسال الصوت لقسم مُقاس وفقًا للمعيار السابق (ASTM E 90). (Owens Corning, 2004).

يجب قياس فقدان إرسال الصوت على ستة عشر ترددًا، والتي تُغطي النطاق (125–4000) هرتز، إذ لتحديد (STC) لعازل معين، تتم مقارنة قيم خسارة الإرسال المقاسة مقابل التردد بمنحنى مرجعي (contour STC)، كما هو موضح في الشكل (23). يُزاح هذا المنحنى المرجعي (contour STC) عموديًا بالنسبة لمنحنى بيانات الاختبار إلى أعلى موضع ممكن، مع استيفاء الشروط الآتية: (Owens Corning, 2004).

1. ألا يتجاوز أقصى انحراف لمنحنى الاختبار أسفل (contour STC) القيمة (8) ديسيبل، عند أي تردد منفرد.

2. ألا يتجاوز مجموع الانحرافات عند جميع الترددات الـ (16) لمنحنى الاختبار أسفل (contour STC) القيمة (32) ديسيبل.



الشكل (23): رسم بياني يعبر عن المعامل (STC) كطريقة لتقييم أداء نقل الصوت الداخلي (airborne sound)، عبر الجدار الداخلي أو منظومة كاملة من سقف/أرضية، (Owens Corning, 2004).

8.2. تفسير ظاهرة فئات نقل الصوت (STC):

في كثير من الأحيان، سيكون للبناء نفسه انتشار واسع لقيم (STC)، اعتمادًا على المختبر الذي أجرى الاختبارات. ومن غير المألوف أن يكون لديك مخبران مختلفان يختبران البناء نفسه، ويحصلان على قيم (STC) التي تختلف بمقدار (3 أو 4) نقاط. (Owens Corning, 2004).

لكن يمكن أن يحدث هذا الاختلاف بسبب عوامل عدة:

(1) الاختلافات في معدات المختبرات وغرف الاختبار؛

(2) الاختلافات في تقنيات الاختبار؛

(3) الاختلافات في المواد المستخدمة لبناء عينات الاختبار.

كما يمكن أن تختلف الاختبارات المتكررة داخل مختبر معين بنقطة أو نقطتين من (STC). ومع ذلك، فإن الفروق بنقطتين أو ثلاث نقاط في تصنيفات (STC) بين الإنشاءات ليست مهمة، وكما نعلم لا تستطيع الأذن البشرية اكتشاف هذا الاختلاف، إذ يجب ألا تفترض المحددات أن القسم الذي يحتوي على قيمة (STC) أعلى هو وظيفيًا أفضل، من القسم الذي يحتوي على قيم أقل قليلاً. وكما في قياس قيمة (NRC) لامتصاص الصوت، لا ينبغي استخدام (STC) لأغراض التصميم أو الحساب. فالغرض منه هو فقط أن يكون أداة فحص سريعة لمقارنة تركيبات البناء المختلفة وكفاءتها في عزل الصوت. (Owens Corning, 2004).

يجب أن يستخدم المصمم القيم الفعلية لخسارة إرسال الصوت عند الترددات ذات الأهمية عند تحديد تقليل الصوت بين منطقتين، وذلك بطرح قيم خسارة إرسال الصوت من مستويات (dB) للضوضاء في غرفة واحدة، كما يمكن للمصمم أن يتنبأ بمستوى الضوضاء الناتج في غرفة مجاورة عند كل تردد.

9.2. فقدان الصوت الداخل (توهين الصوت) (Sound Insertion Loss):

هناك طريقة لقياس التوهين الصوتي لمادة عازلة، وهي تحديد فقد إدخال الصوت، وهو الاختلاف في مستوى الصوت مع وجود العازل في مكانه ومن دونه. في كثير من الأحيان، يهتم المهندس بالتوهين أو التخفيض الكلي الذي توفره مادة العزل الصوتي. (Owens Corning, 2004).

يُجرى في معظم الحالات اختبار فقدان إدخال الصوت بدلاً من اختبار فقد إرسال الصوت، عندما تكون العينة عبارة عن حاوية كاملة أو يكون حجم العينة صغيرًا، والاختبار عبارة عن مقارنة بسيطة لمستوى الصوت في موقع ميكروفون معين، مع وجود العينة في مكانها ومن دونه. أولاً، يتم قياس مستوى الصوت في موقع الميكروفون مع عدم وجود عينة في المكان. ثم توضع عينة بين الميكروفون ومجال الصوت ويتم تسجيل مستوى الصوت مرة أخرى. إن التصنيف المستخدم للتعبير عن فقدان إدخال الصوت هو فئة عزل الضوضاء (NIC). تُستخدم الإجراءات نفسها لتحديد (STC) لتحديد (NIC). تتم مقارنة قيم فقدان إدخال الصوت المقاسة عند (16) تردد، مع المنحني (contour STC) القياسي الموضح في المواصفة (ASTM E 413). (Owens Corning, 2004).

10.2. فقدان انتقال الصوت عبر الأسقف (Ceiling Sound Transmission Loss):

1.10.2. تحديد التوهين الصوتي للسقف:

يخضع هذا المفهوم لما يُسمى بتصنيف توهين السقف للصوت ((Ceiling Attenuation Class (CAC))، ويُقصد به قدرة الأسقف المستعارة على حجب أو توهين أو تخفيف طاقة موجة الصوت المنتقلة عبر المجرى (plenum)، الذي يقع بين السقف الإسمنتي للبناء والسقف المستعار، وكلما زادت قيمة هذا التصنيف (CAC) دلّ ذلك على جودة عزل الصوت عبر الأسقف المستعارة. فضلاً عن دور الأسقف المستعارة كعازلة للصوت ضمن الحيز نفسه (الغرفة/الصالة/المكتب)، فإنها تخفف أو تقلل من انتقال الضوضاء من مكتب إلى آخر. ومن ثم يتم تقييم منتجات الأسقف الصوتية التجارية من حيث توهين الصوت بين مكتبين بجدار بارتفاع السقف الذي يفصل بين المكاتب.

إن طريقة الاختبار المستخدمة هي المعيار (ASTM E 1414)، إذ يتم إنشاء الصوت في غرفة المصدر ويمر عبر سقف الاختبار إلى منطقة القاعة الكاملة، عبر الجزء العلوي من حيز الاختبار، ثم إلى الأسفل عبر السقف في غرفة الاستقبال، فيمر القليل جدًا من الصوت، إن وجد، عبر الحائط لأن خسارة نقل الصوت عالية جدًا مقارنة بالسقف، وبعد ذلك يُحدّد الفرق في المستويات بين غرف المصدر والاستقبال، ثم يتم تطبيع هذا الاختلاف لمقدار الاستيعاب في غرفة الاستقبال مقارنة بالمكتب النموذجي باستخدام المردود العملي المذكور في الفقرات السابقة. (Owens Corning, 2004).

2.10.2. تصنيف فئة التوهين الصوتي للسقف ((Ceiling Attenuation Class (CAC)):

تُرسم قيم التوهين المعيارية للسقف كدالة لـ 16 ترداًد، وتغطي النطاق من 125 إلى 4000 هرتز. ويتم تحديد قيم (CAC) بطريقة (STC) نفسها. (انظر الفقرة 5.5: تصنيف فئات نقل الصوت في الأبنية (Sound Transmission Class STC)، صفحة (56).. كما كان الحال بالنسبة لقيم (STC)، فإن الاختلافات بين المختبرات المختلفة التي تختبر نظام السقف نفسه، بالإضافة إلى اختلافات التكرار في المختبر نفسه شائعة. لذلك، فإن الفروق بنقطتين أو ثلاث نقاط في قيم (CAC) ليست مهمة؛ يجب فحص عوامل التوهين المقاسة الفعلية عند المقارنة بين سقفين. من المهم ملاحظة أن طريقة اختبار فقدان إرسال الصوت في السقف هي اختباران للنجاح؛ في عزل الصوت، ففي الانتقال من غرفة إلى أخرى، يجب أن يمر الصوت عبر السقف مرتين، مرة في غرفة المصدر ومرة في غرفة الاستقبال. (Owens Corning, 2004).

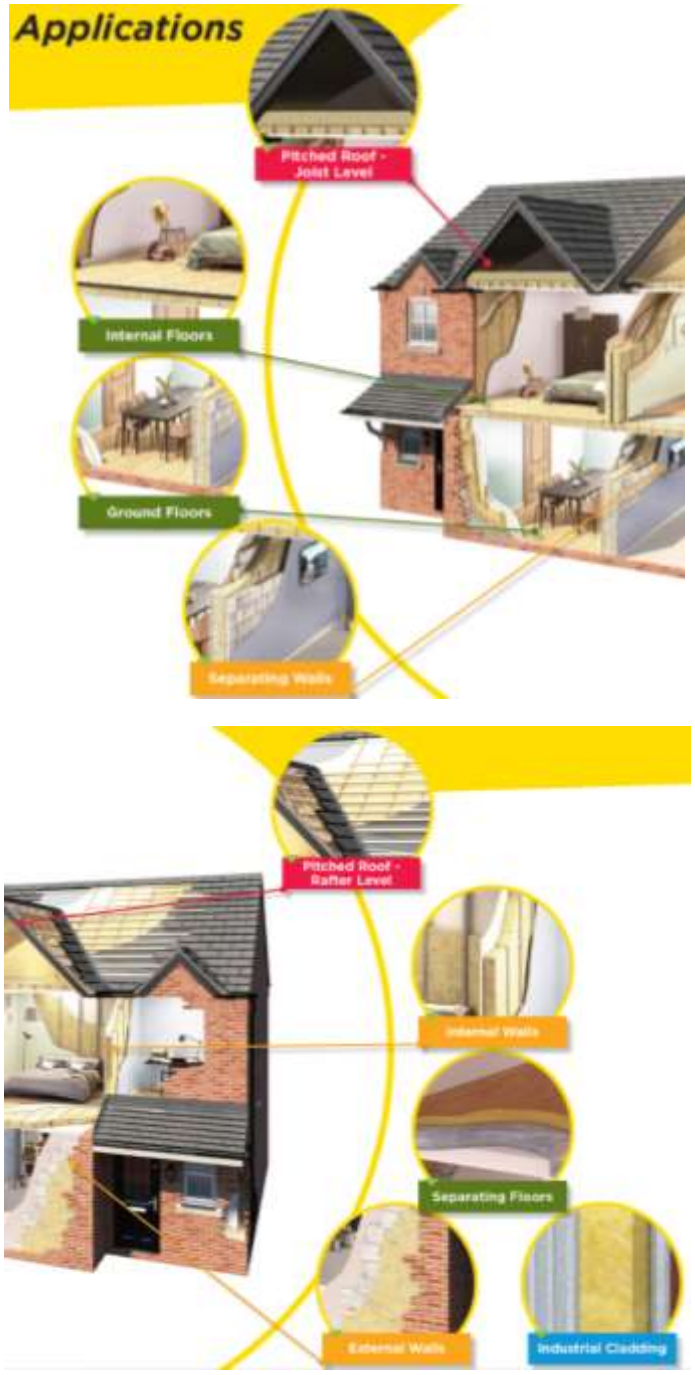
3.10.2. تحسين أداء السقف في العزل الصوتي:

يمكن تحسين توهين الصوت في السقف عن طريق وضع صفائح عازلة من الألياف الزجاجية على الجزء الخلفي من ألواح السقف. هذا له تأثير وضع العزل نفسه في تجويف الجدار؛ ومع ذلك، في هذه الحالة، سيمتص العزل الصوت في المنطقة بأكملها. يمكن تحسين (CAC) بمقدار (7 إلى 12) نقطة، اعتمادًا على نوع ألواح السقف المستخدمة، كما يمكن أيضًا تحسين توهين الصوت الفعال للسقف عن طريق إضافة مواد امتصاص

الصوت إلى كل من غرف المصدر والاستقبال. على سبيل المثال، يمكن تركيب عوازل لامتصاص الصوت للجدران في كلتا الغرفتين، ومن ثم تقليل مستوى الضوضاء الإجمالي في الغرفة. (Owens Corning, 2004).

11.2. اعتبارات ومتطلبات تصميم العزل الصوتي في الأبنية الحديثة:

إن الهدف من جميع الأنظمة "الفعالة" صوتيًا، هو خلق بيئة معيشية أو بيئة عمل مريحة وخالية من الإلهاء أو الضوضاء الخارجية غير المرغوب فيها. علماً أنه لم تُنشأ البيئة الصوتية المطلقة بالعزل "المثالية" بعد، والعديد من تصميمات البناء للمنشآت التجارية والصناعية تعمل على تعزيز بيئة صوتية محسنة (ضجيج مخفف). فعند اختيار نظام السقف ومجموعة الجدران لفصل مكتبين مثلاً، يجب على المصمم الحرص على اختيار أنظمة العزل الصوتية المتوافقة. إن تحديد عزل حائط باستخدام (STC50) وعزل سقف بمؤشر (CAC40) لا معنى له، وسوف يأخذ الصوت الطريق الأقل مقاومة؛ ومن ثم، فإن التخفيض العام في الضوضاء بين المكتبين سيعتمد على قيم نظام السقف، وسوف يمر القليل من الصوت، إن وجد، عبر الجدار. لذا يجب اختيار نظام السقف والجدار بقيم فقدان نقل الصوت نفسها تقريبًا. يجب على المصممين أن يضعوا في حسبانهم ما يحدث لقيم توهين الصوت لنظام السقف عند تركيب مكونات الإضاءة (المصابيح) وإمدادات الهواء وغيرها، إذ تحتوي العديد من أنظمة الأسقف على مصابيح مضيئة ونظام هواء عائد غير موصّل يفتح عادةً في القاعة الكاملة. هذه الاختراقات والفتحات تضر ضرراً كبيراً بأداء نظام السقف، فيجب أن يدرك المصمم أنه لن يتم الحصول على قيمة (CAC) التي حددها، وستكون دائمًا أقل. كما سيعتمد مقدار الانخفاض على قيمة (CAC) الأصلية لجميع مكونات السقف، وعدد وحدات الإنارة أو شوايات الهواء المرتجعة المثبتة ونوعها ، والذي يمكن أن يكون أقل بمقدار 10 أو 15 نقطة. إذاً يمكن أن يتأثر الأداء الصوتي الفعال للجدران بشكل كبير بعدد من تفاصيل التصميم والبناء، الشكل (24). تشمل هذه التفاصيل إغلاق محيط الجدران، وتفاصيل البناء عند تقاطعات الجدار، وحجم النوافذ ووضعها، والموقع والتركيب المناسب للأبواب، والمنافذ الكهربائية، والقنوات والمعدات الميكانيكية، والأهم استخدام نظام متكامل ومُطوّر للعزل الصوتي. ستقدم الفقرات الآتية بعض الاقتراحات المهمة لضمان الأداء الصوتي. (Owens Corning, 2004).



الشكل (24): يبين مناطق توضع تقانات العزل في الأبنية الحديثة، (Isover, 2019,2-3)

1.11.2. تأثير الصوت:

يحدث الصوت المؤثر بسبب اهتزاز الأرضية أو الجدار عن طريق التلامس الميكانيكي المباشر. ثم يشع الصوت من الأرضية أو سطح الجدران، وقد تنتقل اهتزازات الأرضية أيضًا في جميع أنحاء الهيكل إلى الجدران ويعاد إشعاعها كصوت في المساحات المجاورة. (Owens Corning, 2004).

2.11.2. تحديد التأثير الصوتي وانتقال الضوضاء:

إن طريقة الاختبار المستخدمة لتقييم عزل الأرضية أو السقف لنقل ضوضاء الارتطام، هي إجراء اختبار خاضع للعمل بالمواصفة القياسية (ASTM E 492). على عكس إجراء الاختبار لقياس فقدان نقل الصوت المحمول جواً، فلا يتطلب إجراء الاختبار هذا قياس الفرق في ضغط الصوت بين المصدر وغرفة الاستقبال، إذ تُقاس مستويات ضغط صوت غرفة الاستقبال عند (16) تردد اختبار فقط، وتُنشأ الضوضاء في غرفة الاستقبال عن طريق وضع آلة صدم قياسية على تركيبات الأرضيات أو السقف، لتصدر ضوضاء الصدمة التي ستضرب أمواجها تلك الأسطوانات المعدنية الموجودة في آلة التنصت عند سطح الأرض.

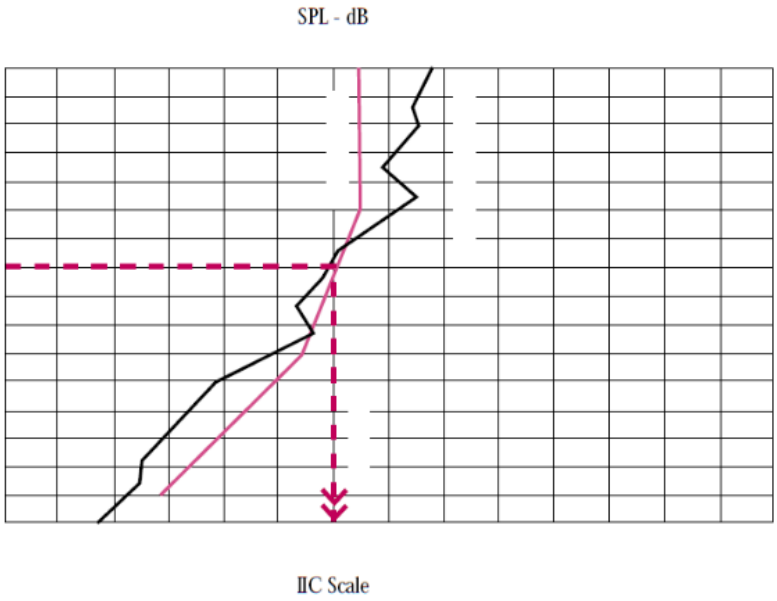
هنا يتم استخدام التصنيف ذي الرقم الفردي، للتعبير عن درجة عزل الضوضاء الناتجة عن مجموعة الأرضية أو السقف كفئة عزل التأثير الصوتي (IIC)، ويتم تحديده بطريقة مماثلة لقسم (STC). ولكنه هنا خاضع للعمل بالمواصفة القياسية (ASTM E 989). (Owens Corning, 2004).

3.11.2. تصنيف فئة العزل:

يُحدد (IIC) لعينة الاختبار بمقارنة منحنى الاختبار مع منحنى التردد المرجعي (IIC contour)، كما هو موضح في الشكل (25). وتتناقص قيم (IIC) على الجانب الأيمن من الرسم البياني لمنحنى الاختبار في الاتجاه التصاعدي، ويتطابق المقياسان الأيمن والأيسر عند (55) ديسيبل، ولكليهما القياس نفسه (عدد ديسيبل محدد)، ويتم إزاحة (IIC contour) عموديًا بالنسبة لمنحنى بيانات الاختبار إلى أدنى مستوى ممكن ، مع استيفاء الشروط الآتية: (Owens Corning, 2004).

1. ألا يتجاوز أقصى انحراف لمنحنى الاختبار فوق (IIC contour) القيمة (8) ديسيبل، عند أي تردد منفرد.

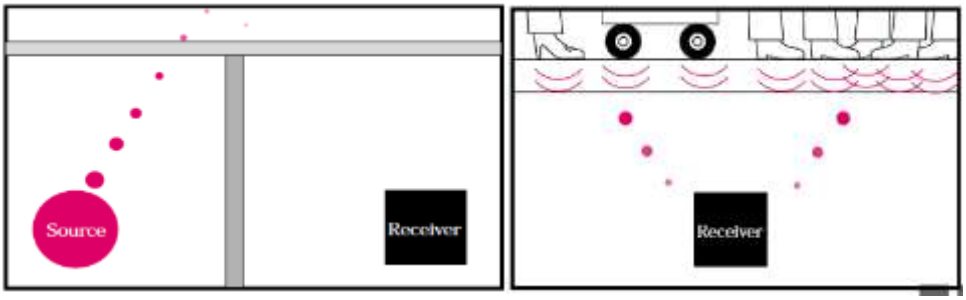
2. ألا يتجاوز مجموع الانحراف عند جميع الترددات الـ (16) لمنحنى الاختبار فوق (IIC contour) القيمة (32) ديسيبل.



الشكل (25): مخطط بياني يعبر عن تأثير آلية تصنيف العزل الصوتي، (Owens Corning, 2004).

4.11.2. زيادة تأثير عزل الضجيج الصوتي (الضوضاء):

في المباني التجارية، وحيث يُستخدم السقف المعلق، يُضاف عازل بالألياف الزجاجية إلى السقف ليزيد من عزل الضوضاء، فضلاً عن فقدان نقل الصوت المحمول جواً، فيُوصى باستخدام القنوات المرنة وعزل الألياف الزجاجية لتقليل كل من ضوضاء الارتطام بالأجسام ونقل الصوت المحمول جواً، الشكل (26). يمكن أيضًا تحسين عزل الضوضاء الفعال لمجموعة الأرضية / السقف عن طريق إضافة مواد امتصاص الصوت إلى غرفة الاستقبال نفسها، (أي عزل مضاعف). ومع ذلك، فإن أفضل طريقة علاجية لتحسين عزل الضوضاء الناتجة عن مجموعة الأرضية / السقف هي تركيب سجادة ووسادة على الأرض. عند وضع سجادة ووسادة على الأرض، تصبح المطارق الصدمية في آلة الصدم القياسية معزولة عن سطح الأرض الصلب، ومن ثم، يتم توليد ضوضاء قليلة جدًا ونقلها إلى الغرفة السفلية أو غرفة الاستقبال. على الرغم من أن تصنيف (IIC) الخاص بمجموعة الأرضية/السقف قد تحسن بشكل كبير من خلال إضافة سجادة ، فإن قيمة (STC) المحمولة جواً تتغير قليلاً، لأن السجادة والوسادة لا تخفف الصوت بشكل كبير، فهي ليست الحل الناجع لعزل الصوت، بل يجب البحث عن تصميم مناسب لعازل صوتي حقيقي في السقف/الأرضية/الجدار، كحل وقائي حقيقي ودائم للضوضاء. (Owens Corning, 2004).



الشكل (26): رسم توضيحي يبين تأثير المنابع الصوتية داخل البناء على الأرضية، إذ ينتقل الاهتزاز من حيز لآخر (غرفة لأخرى)، عبر الجدران والأسقف والأرضيات، (Owens Corning, 2004).

5.11.2. التحكم في الضوضاء البيئية (إبعاد ضوضاء البيئة الخارجية):

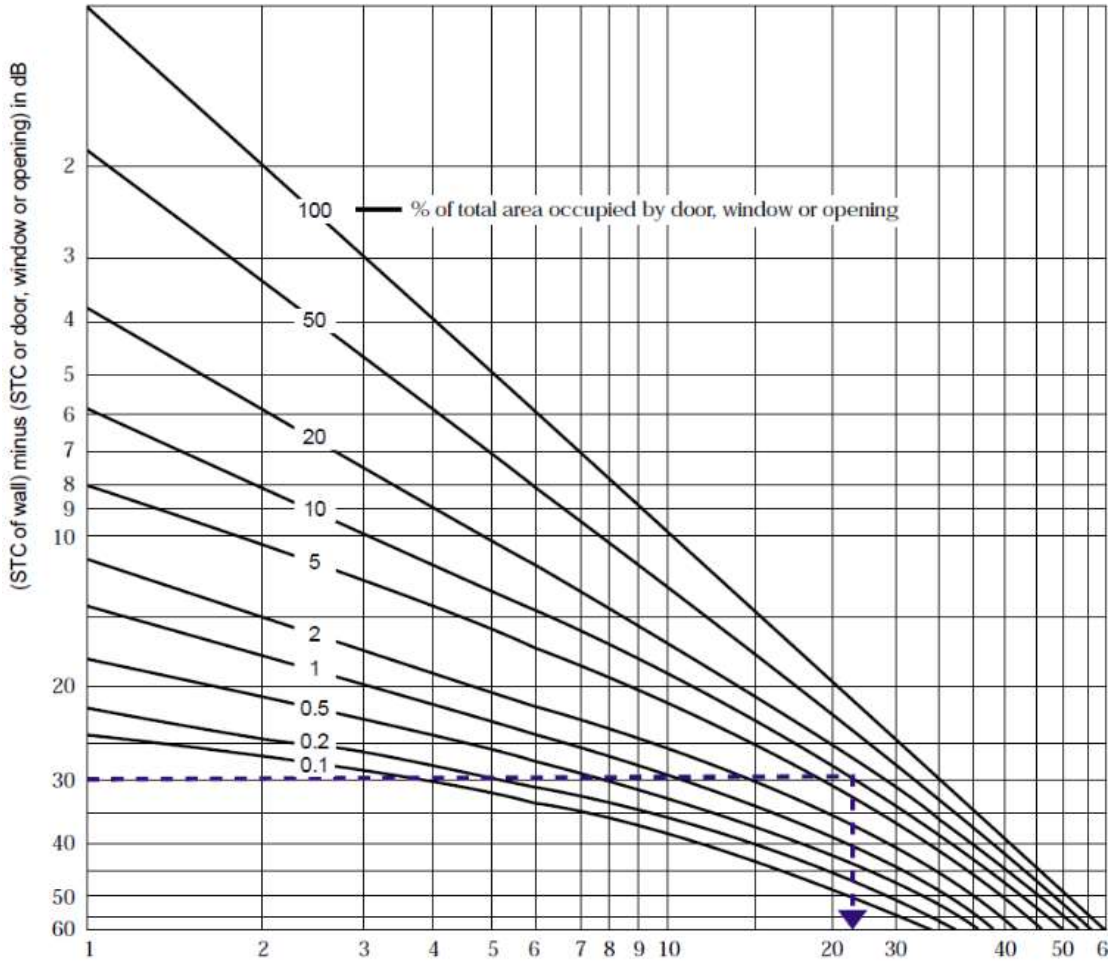
السبب في قياس فقد نقل الصوت ومعاملات امتصاص الصوت لمواد البناء أو مرافقها، هو توفير وسيلة للتنبؤ بمستوى الضوضاء المتوقع داخل الفضاء. قد تأتي الضوضاء في مكان أو غرفة معينة من مصدر يقع في ذلك الفضاء أو من مصدر ضوضاء في مكان مجاور (خارجي). أوضحت الفقرات السابقة في إطار فقد نقل الصوت وامتصاص الصوت كيف يمكن استخدام البيانات عند تصميم المساحات الداخلية. وسنتعامل في هذه الفقرة مع مصادر الضوضاء المتولدة خارج المبنى. (Owens Corning, 2004).

6.11.2. تحديد فقد نقل الصوت (Sound Transmission Loss STL) لبناء مركب:

يمكن تقدير (STC) المركب لجدار غير متجانس باستخدام الإجراء الموضح في الشكل (27)، بناءً على خسارة الإرسال، فإذا كان الجدار يتكون من عنصرين، مثل جدار به باب، فيمكن تحديد (STC) المركب للمجموعة كالآتي:

1. نحسب الفرق بين (STC) للعنصرين (يمكن استخدام الجداول 6 و 7 و 8 للحصول على بعض قيم (STC) هذه، الملحق رقم (1)).
2. نحسب النسبة المئوية لمساحة عنصر (STC) الأدنى مقابل المساحة الإجمالية.
3. باستخدام الشكل (30)، نحدد التعديل الذي سيتم طرحه من قيمة (STC) الأعلى لإعطاء (STC) المركب للعنصرين. (Owens Corning, 2004).

يمكن تكرار هذا الإجراء في حالة تضمين أكثر من عنصرين، كما سيعطي استبدال القيم المناسبة تنبؤًا بمستوى الضوضاء الداخلية الذي يمكن مقارنته بقيمة المعيار المناسبة. عندها إذا كان اقتحام الضوضاء المتوقع أقل من المعيار، فإن التصميم مقبول.



الشكل (27): مخطط رسومي بياني يمكن من خلاله تحديد قيمة (STC) لبناء مركب، (Owens Corning, 2004).

7.11.2. زيادة الكتلة:

تحجب المواد الأثقل الصوت بشكل أفضل من المواد الخفيفة. على سبيل المثال، تؤدي إضافة طبقة أخرى من ألواح الجدران الجبسية إلى زيادة فقدان نقل الصوت. كقاعدة عامة، كل مضاعفة في وزن الجدار تزيد من فقدان نقل الصوت بمقدار (5–6) ديسيبل إضافي. ومع ذلك، فمن الواضح أن الجدران الأثقل ليست الحل الأكثر اقتصاداً أو جمالية لمتطلبات التحكم في الصوت. (Owens Corning, 2004).

8.11.2. استبدال مكونات الجدار:

يمكن تحسين فقد نقل الصوت لتركيبات الجدران عن طريق زيادة الكتلة، وكسر مسار اهتزاز الصوت. بالإضافة إلى هذه الطرائق الثلاث، هناك طريقة أخرى لتقليل الضوضاء وهي إضافة مواد تمتص الصوت، إذ تشغل هذه المكونات العازلة البنية الداخلية للجدار، مثل عزل المباني المصنوعة من الألياف الزجاجية، إذ يمكن أن يؤدي عزل مبنى بالألياف الزجاجية إلى زيادة فقدان نقل الصوت بحوالي (8–10) ديسيبل، وهو تحسن يمكن ملاحظته بسهولة. إذاً هذا هو المسار المهيمن. يمكن إضافة مواد امتصاص الصوت إلى مناطق المصدر والاستقبال، وهناك طريقة أخرى لزيادة فاقد نقل الصوت الفعال بين غرفتين وهي إضافة مواد تمتص الصوت إلى كل غرفة. من خلال القيام بذلك، يتم تقليل مستوى الضوضاء الإجمالي في كل غرفة، وهذا يؤدي إلى خفض مماثل لمستوى الصوت في أي منطقة مجاورة.

9.11.2. كسر مسار الاهتزاز:

تنقل الجدران الصوت بشكل أكثر فاعلية عندما يمكنها نقل الاهتزازات من وجه إلى آخر، من خلال العناصر الهيكلية مثل الأزرار المعدنية أو الخشبية. أي شيء يمكن القيام به للتدخل في انتقال الاهتزازات بين سطح جدار وآخر سيساعد في تقليل نقل الصوت. تتمثل إحدى التقنيات الفعالة في تثبيت المسامير الخشبية، وهذا يقلل من انتقال الصوت من خلالها. كما يمكن استخدام قنوات معدنية مرنة بين لوح الحائط الجبسي والمسمار لكسر مسار الاهتزاز.

10.11.2. مواد الإحكام ومنع التسرب:

يجب استخدام مانع تسرب هواء محكم حول محيط الجدار لتوفير ختم صوتي مناسب، ويُوصى باستخدام السد غير المتصلب والمرن بشكل دائم مثل (QuietZone ™ Acoustic Sealant)، أو مركب أساسه مطاطي لكلا جانبي الحاجز في المواقع الملائمة، مثل الألواح السفلية والعلوية. وسيحقق العزل بشكل فعال إذا تم تداخل طبقاته المتعددة من ألواح الجبس بشكل صحيح. (Owens Corning, 2004).

11.11.2. الأبواب:

عند الرغبة في التحكم الأمثل في الضوضاء، يجب استخدام الأبواب الخشبية الصلبة أو الأبواب المعدنية، ويجب أن يتم تغطية الجزء العلوي والجوانب من الأبواب بحواشي ناعمة. سيساعد أيضًا إغلاق العتبة في أسفل الباب بموانع تسرب الهواء، في تحسين عزل الضوضاء الخارجية. يجب تجنب الأبواب المنزلقة عند الرغبة في التحكم في الضوضاء، ويجب ألا توضع أبواب المدخل مقابل بعضها بعضاً. (Owens Corning, 2004).

12.11.2. النوافذ:

عادةً ما يكون للنوافذ قيم خسارة إرسال أقل من الجدار المحيط، لذلك من المفيد تقليل مساحة النافذة لزيادة التحكم في الضوضاء. إن التدابير الإضافية التي يمكن اتخاذها لزيادة التحكم في الضوضاء هي تقليل النوافذ التي تواجه المناطق الصاخبة وفصل النوافذ لتقليل الحديث المتبادل، كما يجب استخدام الزجاج السميك أو المعزول وكذلك الزجاج المزدوج للمساعدة في تقليل نقل الصوت، إذ تضمن النوافذ العازلة للطقس إغلاقًا محكمًا ومن ثم تقلل من انتقال الصوت. (Owens Corning, 2004).

13.11.2. الكهرباء:

التركيب الكهربائي المناسب مهم للتحكم الصوتي الفعال، فيجب ألا تكون مفاتيح الإضاءة متقابلة، ويجب أن تكون الفتحات حول جميع الصناديق الكهربائية محكمة الغلق. يجب تركيب لوحات التوزيع الكهربائية، وكذلك الهواتف، والأجراس، والاتصال الداخلي، أو أجهزة الصوت المدمجة على الجدران الداخلية المعزولة جيدًا، وليس على جدران الحفلات أو الممرات، ويجب توصيل كل وحدة معيشة أو مكتب عمل كوحدة كاملة، ويجب توصيل المعدات الاهتزازية بأسلاك مرنة. (Owens Corning, 2004).

14.11.2. السباكة وتوصيلات المياه:

تؤدي اعتبارات التصميم الصوتي المختلفة دورًا عند تركيب السباكة، إذ يمكن تقليل ضوضاء السباكة من خلال تصميم مسارات الأنابيب بأذرع متأرجحة بحيث يمكن أن يحدث التمدد والانكماش. يجب أيضًا عزل الأنابيب عن الهياكل المحيطة باستخدام حوامل مرنة، ويمكن التخلص من ضوضاء مطرقة الماء، بسبب التوقف المفاجئ لتدفق المياه، باستخدام غرف الهواء في كل منفذ. يجب أيضًا مراعاة استخدام الأنابيب ذات الحجم الزائد وتقليل ضغط المياه. كما يجب سد الفتحات الموجودة في الجدران وسطوح الأرضيات لضمان سلامة الصوت.

15.11.2. القنوات الهوائية والتكييف:

نظرًا لأن القنوات يمكن أن تنقل الصوت بسهولة، يجب إعطاء تصميم مجرى الهواء اهتمامًا خاصًا عند التخطيط للبناء التجاري الجديد أو التحديثي. سيؤدي تركيب قنوات الألياف الزجاجية أو القنوات المعدنية المبطنة بعزل بطانة المجرى كمخفف للصوت، إلى تقليل انتقال الصوت غير المرغوب فيه من الجدار الجانبي، فضلاً عن تقليل ضوضاء المروحة في القناة. يوصى باستخدام مكيفات الهواء والأفران الهادئة عالية الجودة مع محركات ومراوح متوازنة لتقليل الضوضاء التي تحملها القناة. (Owens Corning, 2004).

16.11.2. ضوضاء المعدات:

يجب الاستفسار عن مستويات ضوضاء المعدات قبل توصيفها واستثمارها في البناء. يجب عزل الأفران ومكيفات الهواء ووحدات التدفئة والتهوية وتكييف الهواء بعيدًا عن المناطق "الهادئة"، ويجب تركيب الوحدات في غرفة معزولة جيدًا واستخدام باب صلب عندما تكون غرف المعدات متاحة للمباني الداخلية. أيضًا، عند تركيب المعدات التي يحتمل أن تهتز، استخدم عوازل الاهتزاز ومخمداته. (Owens Corning, 2004).

الفصل الثالث

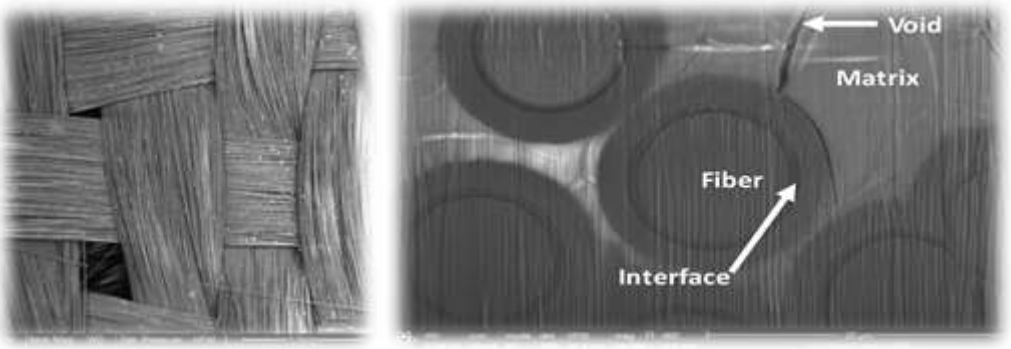
المادة النسيجية المركبة وعلم النانو

3. المادة النسيجية المركبة وعلم النانو:

1.3. المادة النسيجية المركبة:

1.1.3. تمهيد:

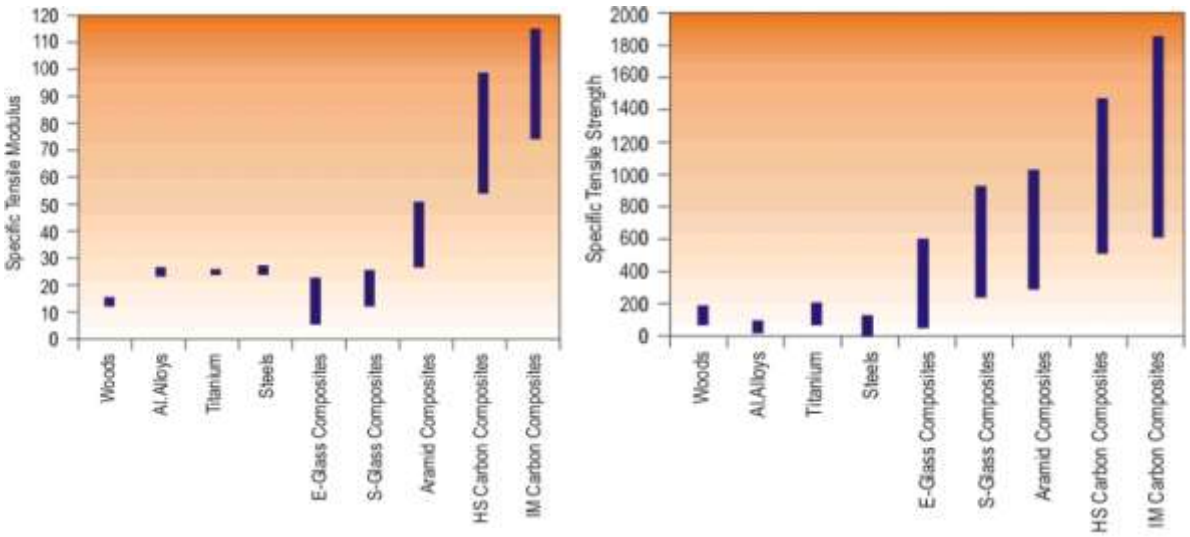
تُعرَّف المادة المركبة، الشكل (28)، بأنها مزيج أو خليط بنيوي لمادتين على الأقل معاً لإنتاج منتج جديد وبمواصفات محسنة لا يمكن توافرها في مكونات المادة المركبة في حال كانت منفردة، أي تمتاز المادة المركبة بخواص لا يمكن توافرها في الطبيعة. يمكن تقسيم مكونات المادة المركبة إلى مفهومين رئيسين، هما مصفوفة المادة الداعمة (نسيج، قماش غير منسوج، خيوط، ألياف، حبيبات، مكونات صلبة كالأخشاب والمعادن والمواد البلاستيكية)، ومصفوفة المادة الرابطة (الريزين/بوليمير). (Xiao-Su Yi *et al.*,2018).



الشكل (28): يبين صورة ماسح إلكتروني ضوئي توضح مكونات المادة المركبة والسطوح البينية بينها، وصورة نسيج زجاجي بتركيب سادا (1/1)، (Ajay, 2017).

تشكل المواد النسيجية والليفية الداعمة نسبة (50−70%) وزناً من المادة المركبة ككل، ووفقاً لتنوع الخواص الميكانيكية واختلافها للمواد النسيجية والليفية كمصفوفة داعمة للمادة المركبة، فهناك مجال واسع للاختيار وهذا يمكن استخدامه تبعاً لحاجة التطبيق كما في الشكل (29)، التي تعبر عن مقارنة بين مقاومات الشد للمواد المركبة ومعاملاته عندما تُكوِّن مواد النسيج التقني المصفوفة الداعمة. كما تعتمد قوة المادة المركبة الناتجة على قوة متانة

الخيط وقوة مادة الريزين وتوجيه الخيوط والنسبة الحجمية للقماش في المركب وهذه المتغيرات كافة تدخل في المعادلة (14). (Stephen L Ogin,2000).



الشكل (29): تحديد متانة الشد ومعاملاتها لأكثر المواد المركبة شيوعاَ. (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

$$\sigma_c = V_f.\sigma_y.\cos^2\bar{\theta} + (1 - V_f).\sigma_m \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(14)$$

σ_c: متانة المادة المركبة. σ_y: متانة المادة النسيجية. σ_m: متانة مادة الريزين.

$\bar{\theta}$: زاوية توجيه الخيط. V_f: النسبة الحجمية للنسيج. (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

من هذه المعادلة وُجد أنه للحصول على قوة متانة عظمى للمادة المركبة يجب أن تكون قوة الخيط ومعدل توجيه الخيوط والنسبة الحجمية للنسيج (V_f) عالية قدر الإمكان. وهذه المتغيرات الأساسية تعتمد بدورها على متغيرات ثانوية أخرى كتوجيه الليف ضمن الخيط ودرجة تجعد الخيط في القماش.

في حين تعتمد قوة القماش على نوع الليف والنعومة والبرم والتشعر والمتانة ونوعية التركيب النسيجي وكثافة الخيط. إذا وُجد أنه من الصعوبة بمكان الربط بين هذين المفهومين (إجهاد مادة القماش, إجهاد مادة الريزين) في مفهوم واحد (إجهاد المادة المركبة). نظرياً يجب أن تكون قوة شد القماش نتيجة لقوة شد الخيوط كافة التي تدخل في تركيبه ولكن هناك فقد في قوة الشد ناتج عن إجهادات سابقة في عملية النسيج والمعالجات كفتح النفس وتشكيل السداء وإدخال الحدف وغيرها، وأيضاً بسبب الإجهاد العرضي في نقاط التشابك بين الخيوط.

2.1.3. خواص المواد المركبة:

أولاً: مزايا المواد المركبة: (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

- مقاومة عالية للتآكل والتعب.
- صلابة ومتانة شد مقارنة بواحدة الوزن إذ يمكن توفير 25–45% من وزن المواد التقليدية.
- توزع منتظم للقوى والأحمال والإجهادات ومتجانس على كل من النسيج الداعم ومادة الريزين.
- مقاومة عالية لإجهادات الشد والانضغاط والانفجار.
- ثباتية عالية للأبعاد، تكاليف تصنيع منخفضة.

ثانياً: مساوئ المواد المركبة: (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

- كلفة مرتفعة للمواد النسيجية والأولية ولعملية النسيج.
- تُعدّ المواد المركبة قصفة للغاية وهذا يسهل من عطبها وتكسرها.
- خصائص المواد المركبة العرضية متدنية.
- إعادة التدوير والاستخدام قد تكون صعبة.
- قد تنتج عن عمليات صيانتها أخطاء منها:

- أغلب المواد الأولية تتطلب شروط تخزين خاصة عند النقل والشحن.
- تتطلب معدات خاصة عند تطبيق تقنيات المعالجة بالحرارة لتحميل المواد المركبة في موقع العمل.
- قد تستغرق عملية تحميل المنتج من المادة المركبة في موقع العمل فترة طويلة.

علماً أن الخواص تشمل المواد المركبة ذات الألياف، والمساوئ يمكن تجنبها بالاختيار الصحيح للمواد والتصميم.

ثالثاً: الخواص الإنشائية والفيزيائية:

يمكن حساب معاملات المرونة يونغ (E)، وفقاً لنظرية التصفح (Laminate Theory)، لتعبر عن المرونة والصلابة بدراسة التوزع المنتظم والمتجانس للألياف في بنية التركيب النسيجي الداعم، ومادة مصفوفة

الريزين/بوليمير. وبما أن هذه المواد المركبة تتكون من عنصرين أساسيين، هما المادة الداعمة النسيجية والتي هي القماش ثنائي أو ثلاثي الأبعاد مثلاً، مع ألياف ميكروية الأبعاد، بالإضافة إلى حبيبات صلبة داعمة، والعنصر الآخر الذي سيعمل على الربط بين جميع تلك المكونات الداعمة، ويحقق التوزع والنقل المنتظم والمتجانس لمختلف الإجهادات على جميع مكونات مصفوفة المادة الداعمة (نسيج، ألياف، جبيبات)، هو الريزين، وليتم جمع هذين المفهومين معاً مع الأخذ بالحسبان ثخانة المنتج المركّب، يُعبر عنه بالكسر الحجمي أو الوزني (أي النسبة الوزنية أو الحجمية)، لكل من النسيج الداعم و الريزين من المادة النسيجية المركبة ككل. وبما أن هذه المادة المركبة متجانسة التوزع، وبدراسة معاملات المرونة (E) بالاتجاهين الطولي (E_L) والعرضاني (E_T) ليمكن من المعادلة (15)، حساب معاملات المرونة للمادة المركبة بالاتجاه الطولاني للمحور 1 والتي يعبر عنها أيضاً بقاعدة المواد المركبة أو الخلائط (The Rule Of Mixtures)، ومنها يمكن حساب معاملات القص وبواسون والكثافة للمادة الداعمة والريزين ومنها للمادة المركبة. (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

$$E_1 = E_f.V_f + E_m.(1 - V_f) \quad \text{أو} \quad E_L = E_{Lf}.V_f + E_m.(1 - V_f)$$

$$E_2 = E_m.(1 + V_f)/(1 - V_f) \quad , \quad v_{12} = v_{12f}.V_f + v_m.(1 - V_f)$$

$$G_{12} = G_m.(1 + 2V_f)/(1 - V_f) \quad , \quad \rho_c = \rho_f.V_f + \rho_m.V_m \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(15)$$

إذ أن: V_m: النسبة الحجمية للريزين. V_f: النسبة الحجمية للنسيج.

ρ_c: كثافة المادة المركبة. ρ_f: كثافة مادة الليف. ρ_m: كثافة الريزين.

E_1 و E_L: معامل مرونة المادة المركبة بالاتجاه الطولاني بالمحور 1. G_{12} : معامل القص للمادة المركبة.

E_2: معامل مرونة المادة المركبة بالاتجاه العرضاني بالمحور 2. v_{12}: معامل بواسون للمادة المركبة.

E_{Lf}: معامل مرونة المادة النسيجية الداعمة بالاتجاه الطولاني بالمحور 1. E_m: معامل مرونة مادة الريزين.

(Krishan K. Chawla,2012).

2.3. مصفوفة المادة النسيجية الداعمة:

على مدى السنوات الماضية، كان هناك اهتمام متزايد بدراسة المواد النسيجية المركبة، نظرًا لخصائصها الفريدة (المرونة والصلابة) بدءاً من الألياف الطبيعية وألياف الزجاج (GFs) حتى ألياف الكربون (CFs)، مع طيف واسع من راتنجات البوليمر (المادة الرابطة). وتدعى المواد النسيجية المركبة مع الألياف الزجاجية بالمصطلح (GFRP Glass Fiber Reinforced Polymers) و (CFRP Carbon Fiber Reinforced Polymers) للكربونية منها، ولها طرائق تصنيع مختلفة، وتستخدم على نطاق واسع في التطبيقات الهندسية المتنوعة. تم نشر العديد من الأوراق البحثية المتعلقة بالمواد النسيجية المركبة من (GFRP و CFRP)، لكن معظمها ركز على إبراز خصائصها الأساسية. (Rajak, D.K *et al.*, 2021).

تُستخدم المواد المركبة المعززة بالنسيج والالياف استخداماً متزايداً في العديد من الصناعات مثل البناء، والسيارات، والطب، والرياضة، نظرًا لخواصها التي تمتاز بها على المواد التقليدية مثل المعادن. يمكن تصميم خصائصها لتلبية احتياجات محددة مختلفة الاستخدامات النهائية، عن طريق تغيير أنواع المواد المكونة لها، ومعايير التصنيع مثل نوع مادة الألياف، والتركيب النسيجي للأقمشة الداعمة، كاستخدام تقنيات إنتاج النسيج ثنائية (2D) وثلاثية الأبعاد (3D)، ومثل الحياكة (التريكو)، والخياطة، والأقمشة غير المنسوجة.

تتفوق خصائص المادة المركبة على خصائص المكونات الفردية فيها (نسيج داعم/ريزين/بوليمير). لكن التعزيز بالمنسوجات هو العنصر الحامل الرئيسي والمسؤول عن القوة وعن صلابة المادة المركبة وأدائها، كما تشمل أشكال التعزيز الألياف والجزيئات والرقائق والمواد النانوية. من ناحية أخرى. تحافظ المصفوفة النسيجية على التعزيز في اتجاه معين وتحميها من التلف الكيميائي والفيزيائي، كما أنها مسؤولة عن التوزيع المتجانس للحمل المطبق بين عناصر المادة المركبة. من المزايا الرئيسة للمواد النسيجية المركبة أنه يمكن تصميمها للحصول على مجموعة واسعة من الخصائص، عن طريق تغيير نوع المواد المكونة ونسبها، وتوجهاتها، وطبيعة موادها الأولية ونوعها، وما إلى ذلك. تتميز المواد النسيجية المركبة أيضًا بخصائص ميكانيكية عالية مع انخفاض الوزن، وهذا

يجعلها مواد مثالية لتطبيقات السيارات والبناء. إن العيب الرئيسي للمواد المركبة هو ارتفاع تكاليف المعالجة التي قد تحد من استخدامها على نطاق واسع. (Rajak, D.K *et al.*, 2021).

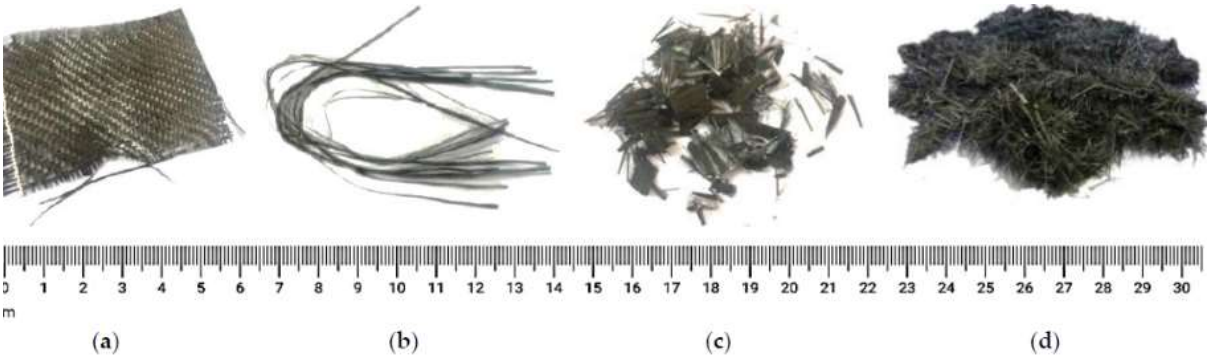
تغطي مصفوفة المادة الداعمة المصنوعة من الألياف بشكل أساسي الألياف القصيرة والمستمرة والألياف النانوية، في حين تتكون المواد المركبة المقواة بالنسيج من أقمشة منسوجة ثنائية وثلاثية الأبعاد، وأقمشة محاكة كالتريكو ثلاثي الأبعاد، والأقمشة غير المنسوجة ومتعددة المحاور كمواد نسيجية داعمة أيضاً.

1.2.3. الألياف الميكروية والخيوط المقطعة (Chopped Strand):

نظراً للتطور المستمر الذي شهده قطاع الصناعات الحديثة الإنشائية منها والعمرانية في العقود الأخيرة، والذي شمل طرائق وتكنولوجيات الصناعة بدءاً من المادة الأولية حتى المنتج النهائي، وضرورة اجتماع الخواص الميكانيكية للمنتج (القساوة، المرونة، مقاومة الإجهادات....) مع عامل الكثافة وانخفاض الوزن، تضافرت الدراسات والجهود إلى إدخال نظم الألياف والمواد المركبة في بنية هذه المنتجات، وخاصة منها الألياف الزجاجية والبازلتية والتي يمكن عدّها هبة من الطبيعة للبيئة الصناعية. فمثلاً تم ومنذ بداية العقد السابق استبدال القضبان المعدنية بتلك البازلتية واستبدال الأسبستوس بالصوف البازلتي للعزل الحراري، وأمثلة كثيرة لا حصر لتطبيقاتها.

أ. <u>ألياف الكربون:</u>

ألياف الكربون هي واحدة من أقدم فئات الألياف عالية الأداء وأشهرها، الشكل (30)، والمستخدمة في إنتاج المواد المركبة. ومن أهم أنواع ألياف الكربون عبارة عن ألياف كربونية بأساس من البولي أكريلونيتريل (PAN). تشمل الأنواع الأخرى ألياف محضرة بالبخار وأنابيب نانوية كربونية، ومؤخراً ألياف الجرافيت التي يتشابه تركيبها الذري مع الكربون؛ كلاهما يتكون من صفائح من الكربون من الذرات المرتبة في نمط سداسي منتظم (أوراق الجرافين). يبين الجدول (7) الخصائص الميكانيكية لبعض ألياف الكربون. (Rajak, D.K *et al.*, 2021).



الشكل (30): يبين بعض الأنواع المميزة للألياف الكربونية بأنواعها من اليسار لليمين (نسيج، خيوط، ألياف مقطعة)، (Rajak, D.K *et al.*, 2021)

الجدول (7): يبين بعض الخواص المميزة للألياف الكربونية، (Rajak, D.K *et al.*, 2021)

نوع الليف الكربوني	المادة الاولية	الكثافة [gr/cm³]	المتانة [GPa]	المعامل [GPa]	الانفعال عند القطع [%]
HS	PAN	1.7-1.8	2.8-4	230-250	1.0-2.0
UHS	PAN	1.7-1.8	4.1-5.7	260-290	0.8-1.0
LM	Pitch	1.3-1.7	0.6-1.0	40-60	2.0-5.0
HM	PAN/Pitch	1.8-2.0	1.7-3.5	450-750	0.5
UHM	Pitch	2.0-2.2	2.1-2.4	600-900	0.2

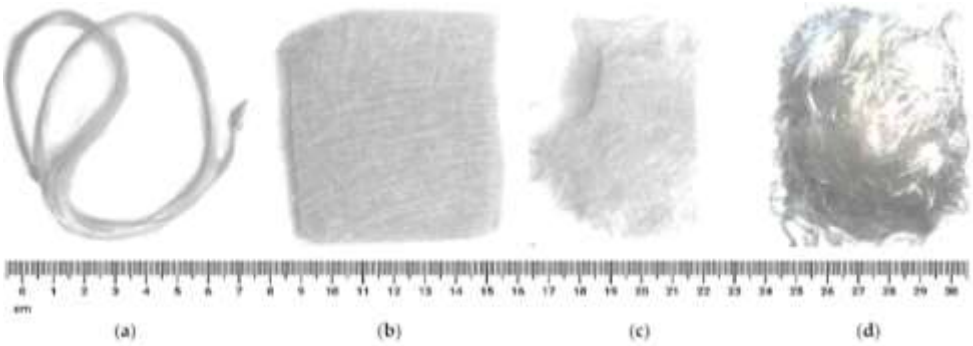
ب. ألياف الأراميد:

يعود تطور ألياف الأراميد (البولي أميد العطري) إلى الستينيات، عندما أصدرت شركة (DuPont) ألياف ميتا أراميد مع اسم المنتج (Nomex®) في عام (1967م). في وقت لاحق، في عام (1971م)، قامت الشركة نفسها بتطوير ألياف شبه أراميد وتسويقها، (Kevlar®)، مع قوة عالية ومعامل يونغ مرتفع. ثم، في أواخر الثمانينيات، ظهرت ألياف أخرى من شبه الأراميد، وهي (Twaron®) (Twaron® هو منتج مسجل لشركة Teijin). ألياف كوبوليأميد العطرية (Technora®) وهي عبارة عن ألياف أكثر مرونة وذات تماسك عال ظهرت في السوق في عام (1987م). (Nesrin *et al.*, 2017).

ت. الألياف الزجاجية:

اكتشفت الألياف الزجاجية الحديثة التي نعرفها اليوم في أوائل الثلاثينيات من القرن الماضي عندما اكتشفت (Dale Kleist) من شركة أوينز–إلينوي جلاس كومباني عن طريق الخطأ، إذ أنتج أليافاً زجاجية أثناء محاولاته ختم الكتل الزجاجية المعمارية معًا عن طريق صهر الزجاج. مهد هذا الاختراع الحاسم الطريق لإنتاج الألياف الزجاجية العازلة. في عام (1938م)، انضم أوينز إلينوي إلى شركة (Corning Glass Company) لتشكيل شركة (Owens-Corning Fiberglass) ولا تزال واحدة من الشركات الرائدة في تصنيع الألياف الزجاجية. حصلوا على براءة اختراع المنتج "Fiberglas" الذي هو أصل الإشارة العامة إلى الألياف الزجاجية. الشكل (31).

.(Rajak, D.K *et al.*, 2021)



الشكل (31): يبين بعض الأنواع المميزة للألياف الزجاجية بأنواعها من اليسار لليمين (خيوط، قماش منسوج، قماش غير منسوج، ألياف مقطعة)، (Rajak, D.K *et al.*, 2021)

المكون الرئيسي لجميع الألياف الزجاجية هو السيليكا (SiO_2). المكونات الأخرى مثل (Al_2O_3) (أكسيد الألومنيوم)، (CaO) (أكسيد الكالسيوم)، و (MgO) (أكسيد المغنيسيوم) تكون مدمجة ضمن البنية لدعم الوظائف الإضافية. على سبيل المثال، يضاف (B_2O_3) (أكسيد البورون) لتحمل درجات حرارة انصهار الزجاج وتبلوره لتجنب انسداد الفوهة البثق في أثناء تشكيل الألياف. مثال آخر هو (S-glass) الذي يحتوي على نسبة أعلى من (SiO_2) لتعزيز قوة الشد، الجدول (8). يتم إنتاج الألياف الزجاجية في خمس خطوات أساسية هي الخلط والصهر وتشكيل الألياف والتجفيف والتعبئة والتغليف. (Rajak, D.K *et al.*, 2021).

الجدول (8): يبين بعض الخواص المميزة للألياف الزجاجية بأنواعها، (Rajak, D.K *et al.*, 2021)

الخواص		نوع الليف الزجاجي							
		A	C	D	E	AR	R	S	S-2
الفيزيائية	الكثافة [gr/cm^3]	2.44	2.53	2.11	2.54	3.70	2.54	2.48	2.46
الميكانيكية	متانو الشد [MPa]	3310	3310	2415	3450	3241	4135	4585	4890
	الاستطالة حتى القطع [%]	4.8	4.8	4.6	4.8	4.4	4.8	5.4	5.7
	معامل يونغ [GPa]	68.9	68.9	51.7	72.4	73.1	85.5	85.5	46.9
	معامل بواسون	0.183	0.276	-	0.20	-	-	0.22	0.23
	معامل القص	29.1	27	-	30	-	-	35	35
الكهربائية	المقاومة الكهربائية [Ω.cm]	10^8	-	-	$4x10^{12}$	-	$2x10^{12}$	$9x10^{10}$	$9x10^{10}$
انتقال الحرارة بالتوصيل [W/m.K]		1.1	-	1.3	-	-	-	-	1.45
درجة الانصهار [C°]		-	-	1725	-	-	-	1725	-

ث. <u>ألياف البازلت:</u>

تُستخرج الألياف البازلتية من الصخر البازلتي بركاني المنشأ الذي يوجد مثيله في محافظة السويداء، وتعود جودة المواد الخام لطبيعة التركيب الفلزي والكيميائي لتلك الصخور (المادة الخام في صناعة الليف البازلتي)، ومدى قدرتها على تحقيق التركيب الكيميائي لليف البازلتي، والذي يتكون حقيقة من جملة من الأكاسيد المعدنية اللاعضوية، والتي يعني تغير نسبها المئوية تغيراً في الخواص النهائية لليف، والتي يجب أن تُعنى بحاجة السوق والمستهلك، وهذا الأمر لا يحدده إلا المختصون بعلم الألياف والجيولوجيا والكيمياء، الشكل (32).

الشكل (32): يبين بعض الأنواع المميزة للألياف البازلتية بأنواعها، (www.basaltfm.com).

تمتاز الألياف الزجاجية والبازلتية بخواص ميكانيكية عالية، وحرارية جيدة، إذ يمكنها العمل ضمن مجالات حرارية تتراوح بين (−50) وحتى (+600) درجة مئوية، مع تباين في الأسعار وكلف التصنيع والكثافات، إلا أنها تبقى بكثافتها ($2900\ kg/m^3$) أخف وزناً من الحديد وباقي المعادن (خاصة في الصناعات الإنشائية). بالمقارنة بين هذين النوعين من الألياف يمكن القول إن الألياف الزجاجية جيدة ومناسبة، لكن كلف تصنيعها مرتفعة بالمقارنة مع الألياف البازلتية، علماً أن الألياف الزجاجية مصطلح عام يشمل زمرة من الأنواع التي تختلف فيما بينها ميكانيكياً وحرارياً وكيميائياً وحتى بنيوياً. تصل نسبة أوكسيد السليسيوم (SiO_2) في تركيب الألياف الزجاجية حتى (54%)، وتتعداها في الألياف البازلتية لتصل حتى (65%). انظر الملحق رقم (4). (Rajak, D.K *et al.*, 2021).

تقدر كلفة الكيلوغرام الواحد من الألياف الزجاجية نوع (E) بما يقارب (1.6) دولار أمريكي، وكلفة الكيلو الواحد من الألياف الزجاجية نوع (S) بما يقارب (6) دولار أمريكي كون الخواص الميكانيكية للألياف الزجاجية ذات النوع (S) أفضل من تلك ذات النوع (E). في حين تتراوح كلفة الكيلو من الألياف البازلتية ضمن المجال (1.1–2.1) دولار أمريكي، لكن الألياف البازلتية تضاهي تلك الزجاجية (S) ميكانيكياً وحرارياً، وازداد الطلب عليها بالمقارنة مع الألياف الكربونية التي تعد أغلى منها بعشرين مرة، إذ تقع الألياف البازلتية بين الكربونية والزجاجية نوع (S) من حيث الخواص لكنها تقارب الألياف الزجاجية (E) من حيث الكلفة. (Basfiber®).

إن اختيار النوع المناسب للتطبيقات الصناعية والمحلية يحتاج إلى خبراء متخصصين في مجال الألياف والمواد المركبة، تمكنهم خبرتهم النظرية والميدانية من حصر جملة من المواد الأولية والأدوات تتلاءم وطبيعة السوق وحاجاته. (Rajak, D.K *et al.*, 2021).

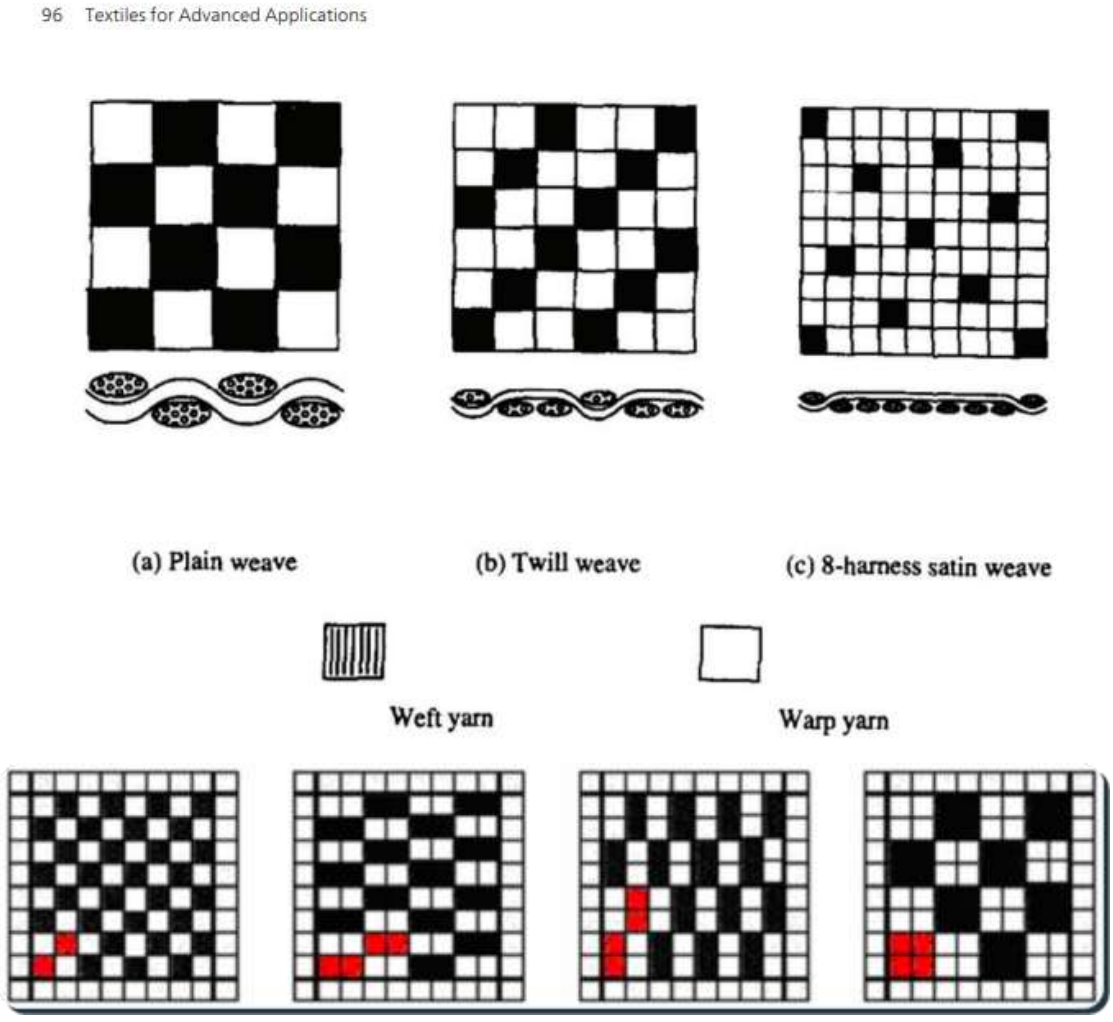
2.2.3. الأقمشة غير المنسوجة (Nonwoven Fabrics):

القماش غير المنسوج هو أساسًا هيكل شبكي مصنوع من ألياف يتم توحيدها باستخدام تقنيات مختلفة. يتضمن إنتاج الأقمشة غير المنسوجة خطوتين أساسيتين هما تشكيل الشبكة من الألياف المقطعة، ثم توحيدها وربطها معاً بطرائق إما حرارية أو كيميائية. ولتحقيق ذلك، يمكن استخدام تقنيات مختلفة:

- الربط بالمواد اللاصقة.
- الربط الميكانيكي والحراري (كاللباد)، أو قوة نفث الهواء (كحشوات الأقمشة وفوط الأطفال).
- الربط بغرزات الخياطة وباستخدام الأبر.
- نظام جاف (تسخين هوائي).
- النظام المعتمد على البوليمر (spun bonding، stitch bonding، melt blowing، flash spun).
- النظام الرطب. (Nesrin *et al.*, 2017).

3.2.3. الأقمشة المنسوجة ثنائية الأبعاد (2D-Woven Fabrics):

يتكون القماش المنسوج من مجموعتين أو أكثر من الخيوط المتشابكة معاً لتشكيل سطح ثنائي الأبعاد ومستمر. يعد النسيج المنسوج ثنائي الأبعاد الأكثر شيوعًا، وهو نسيج ثنائي المحور (المتعامد)، ويتكون من خيوط طولية (سداة) وخيوط عرضية (لحمة أو حدف) متشابكة معاً ضمن تركيب نسيجي محدد. يوضح الشكل (33)، بعض التصاميم النسيجية من السادة 1/1 والمبرد 2/1 والساتين 8/3، ومشتقاتها. (Nesrin *et al.*, 2017).

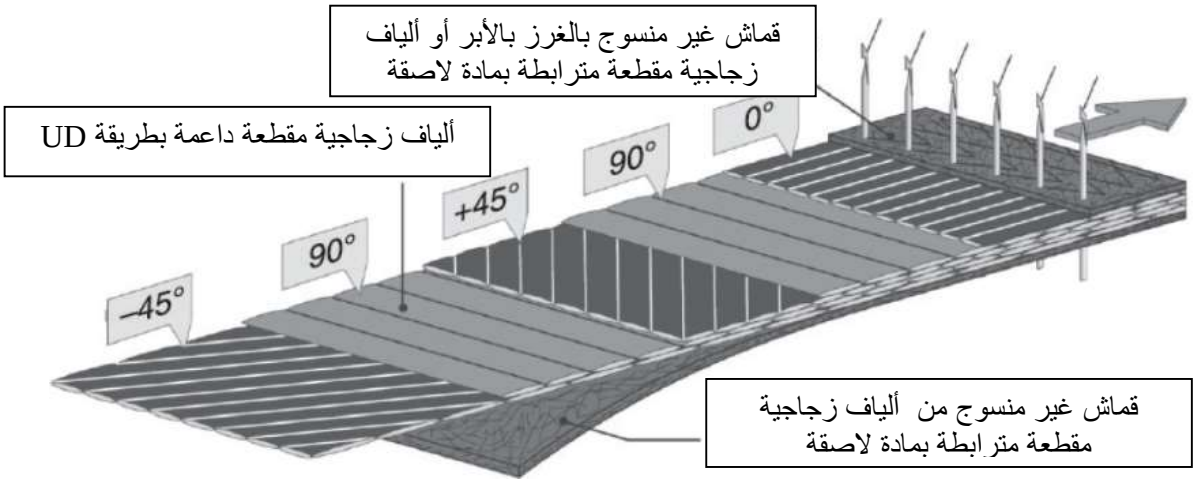


الشكل (33): تصاميم نسيجية أساسية ومشتقاتها، (Nesrin *et al.*, 2017)

هذا وتعد التراكيب النسيجية المذكورة أعلاه وبالأخص السادة ومشتقاته والمبرد الأكثر استخداماً في تصنيع الأقمشة التقنية الزجاجية والكربونية، والتي يتم تطبيقها في صناعة المواد المركبة.

البنى النسيجية ثنائية الأبعاد ومتعددة الطبقات:

تعاني من ضعف بخصائص الارتباط بين الطبقات (Interlaminar)، (أي قوة القص بين طبقات النسيج الداعم ضمن المادة المركبة)، بسبب نقص الألياف عبر السماكة والمحور (z-fibers)، تتوضع تلك الطبقات بزوايا توجيه عدة (±45 ,±90 ,0) وفقاً للخواص الميكانيكية المطلوبة، ويتم التنضيد والربط بالحياكة في آن واحد، لينتج التركيب المبين في الشكل (34). (Nesrin *et al.*, 2017).



الشكل (34): يبين توضع طبقات النسيج وفق زوايا توجيه محددة، (Nesrin *et al.*, 2017,103)

هنا وبالمقارنة مع الأقمشة النسيجية ثلاثية الأبعاد وذات الألياف على المحور (z-fibers)، فإنها تمتاز عن تلك ثنائية الأبعاد بمختلف أنواعها من خلال قدرتها على تحسين قوة الترابط بين السطوح البينية (Interlaminar)، وتحمل الضرر الناجم عن أي تأثير خارجي. لذلك، تلقت مركبات النسيج ثلاثية الأبعاد اهتمامًا كبيرًا في صناعة السيارات ومواد البناء منذ الستينيات.

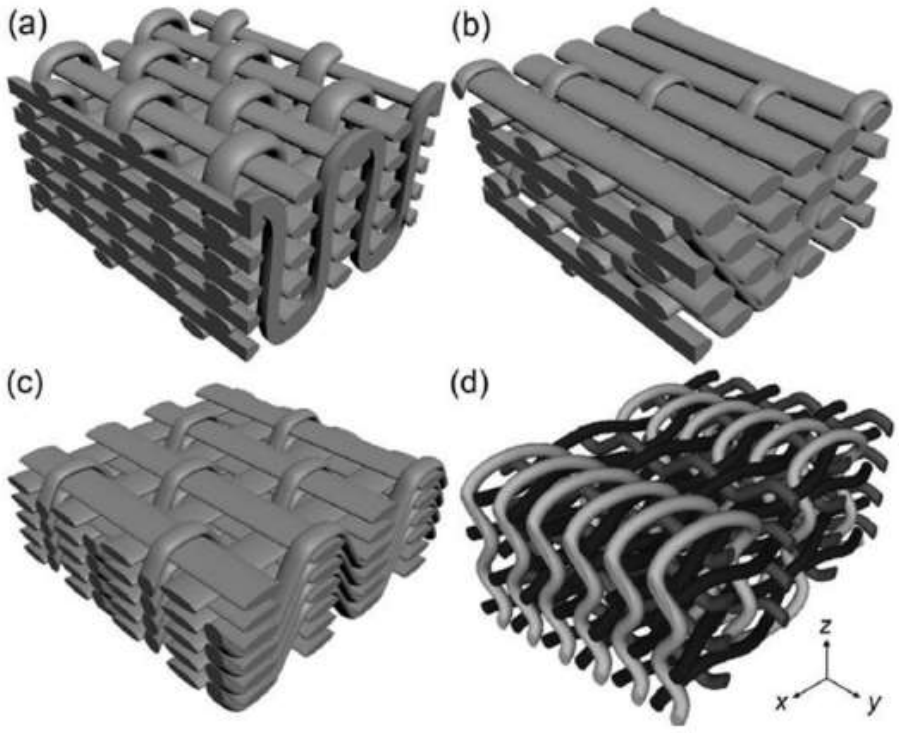
4.2.3. الأقمشة المنسوجة ثلاثية الأبعاد (3D-Woven Fabrics):

من أجل إنتاج الأجزاء الهيكلية التي يمكن أن تصمد أمام حمل ميكانيكي متعدد الاتجاهات وتحمل التبدلات الحرارية، تمتاز المواد المركبة من المنسوجات ثلاثية الأبعاد بقوتها العالية، وإمكانية التعامل مع مادة التسليح بمرونة أكبر، وبمدى ملاءمتها للتصنيع بالشكل المطلوب للتطبيق. لذا أصبحت المواد المركبة المقواة بالأقمشة ثلاثية الأبعاد أولاً ثم الأقمشة ثنائية الأبعاد تالياً، شائعة الاستخدام في مختلف الصناعات بما في ذلك صناعة البناء والسيارات والرياضة والطب. (Nesrin *et al.*, 2017).

هناك نوعين من تلك الأقمشة هما:

1- الأقمشة ثلاثية الأبعاد المحاكة بالتريكو (3-Dimensional Knitted Spacer Fabrics 3DWSF)، الشكل (35).

2- الأقمشة ثلاثية الأبعاد المنسوجة (3-Dimensional Woven Spacer Fabrics 3DWSF)، الأشكال (36) و(37).

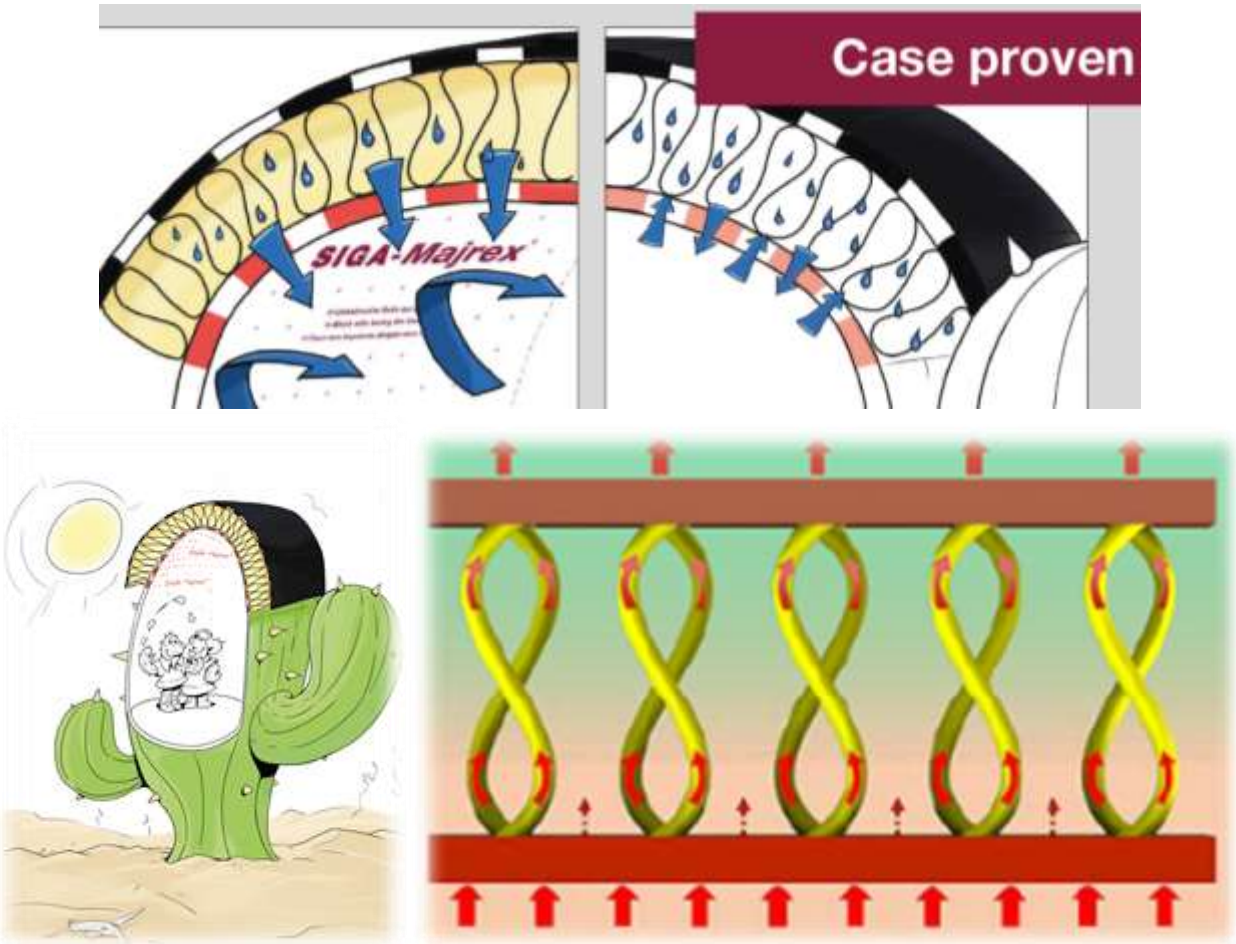


الشكل (35): أقمشة نسيجية ثلاثية الأبعاد من التريكو ومتعددة الطبقات، (Nesrin *et al.*, 2017)

توفر الأقمشة ثلاثية الأبعاد تقوية من خلال السماكة، ومن ثم تحسين خصائص السطوح البينية (Interlaminar)، ويتم إنتاج الأقمشة المنسوجة ثلاثية الأبعاد باستخدام طبقات متعددة. يتم التحكم في خيوط السداة والحدف بحيث يتشكل بعضها في طبقات، في حين ينسج بعضها الآخر هذه الطبقات معًا.

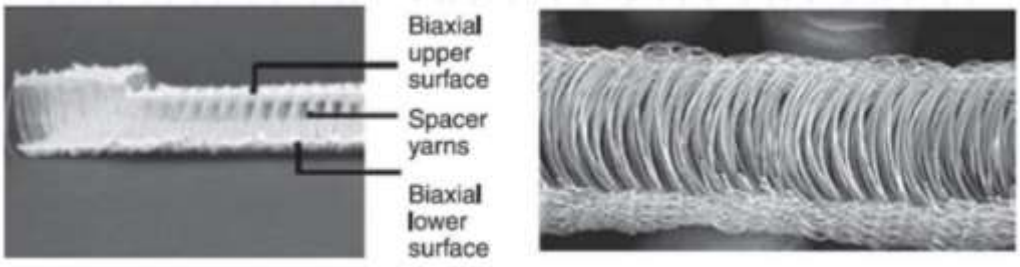
كما تتيح الأقمشة المنسوجة بشكل متكامل إنتاج أشكال ثلاثية الأبعاد ومعقدة، وهذا يلغي التراكيب النسيجية التي تتطلب جهدًا كبيرًا، ويمكن إنتاج الهياكل ذات الشكل القريب من الشبكة باستخدام هذه النماذج المسبقة للنسيج. كان أول استخدام لهذا النوع من التركيبات النسيجية هو (3D Woven Spacer Fabrics WSF) المصنوع في الثمانينيات. يمكن ملء بنية النسيج الداخلية بمادة صلبة كالايبوكسي أو سائلة أو غازية كالهواء المحجوز ضمن بنية الفوم. الميزة الرئيسة لهذا النسيج هي خفة الوزن، والمرونة، وصلابة الانحناء العالية، وخصائص عزل صوتي وحراري جيدة، كون العازل الحراري الأفضل على الاطلاق هو الهواء، وبفضل حركة خيوط الربط التي تحقق السماكة بالمحور الثالث. (Nesrin *et al.*, 2017).

يصبح هذا النسيج ثلاثي الأبعاد مفرغاً وغنياً بالجيوب الهوائية، الشكل (37)، كما في بنية جدار نبات الصبار، وهذا ما اعتمدته بعض الشركات الصناعية مثل (SIGA) لتطوير منتجاتها الخاصة بالعزل الحراري، الشكل (36)، فيقل معدل تدفق الحرارة من أحد وجهي القماش نحو الوجه الأخر، إذاً هي مواد خفيفة الوزن وذات كفاءة إنتاج عالية وأداء ممتاز وخصائص الحفاظ على الطاقة. ومن ثم، فقد تم استخدامه على نطاق واسع في العديد من المجالات، بما في ذلك الهندسة المدنية والميكانيكية والبيولوجية، وكذلك في ألواح الجدران والسفن والسيارات. إن المواد الأولية المستخدمة في القماش ثلاثي الأبعاد (3D Woven Spacer Fabrics 3DWSF) هي بشكل عام ألياف عالية الأداء (مثل ألياف البوليستر والأراميد والبولي بروبيلين) والألياف غير العضوية (مثل الألياف الزجاجية والبازلتية). (Liangang *et al.*, 2021).



الشكل (36): يبين كيفية انتقال الحرارة عبر بنية القماش ثلاثي الأبعاد، (Liangang *et al.*, 2021)، (SIGA®)

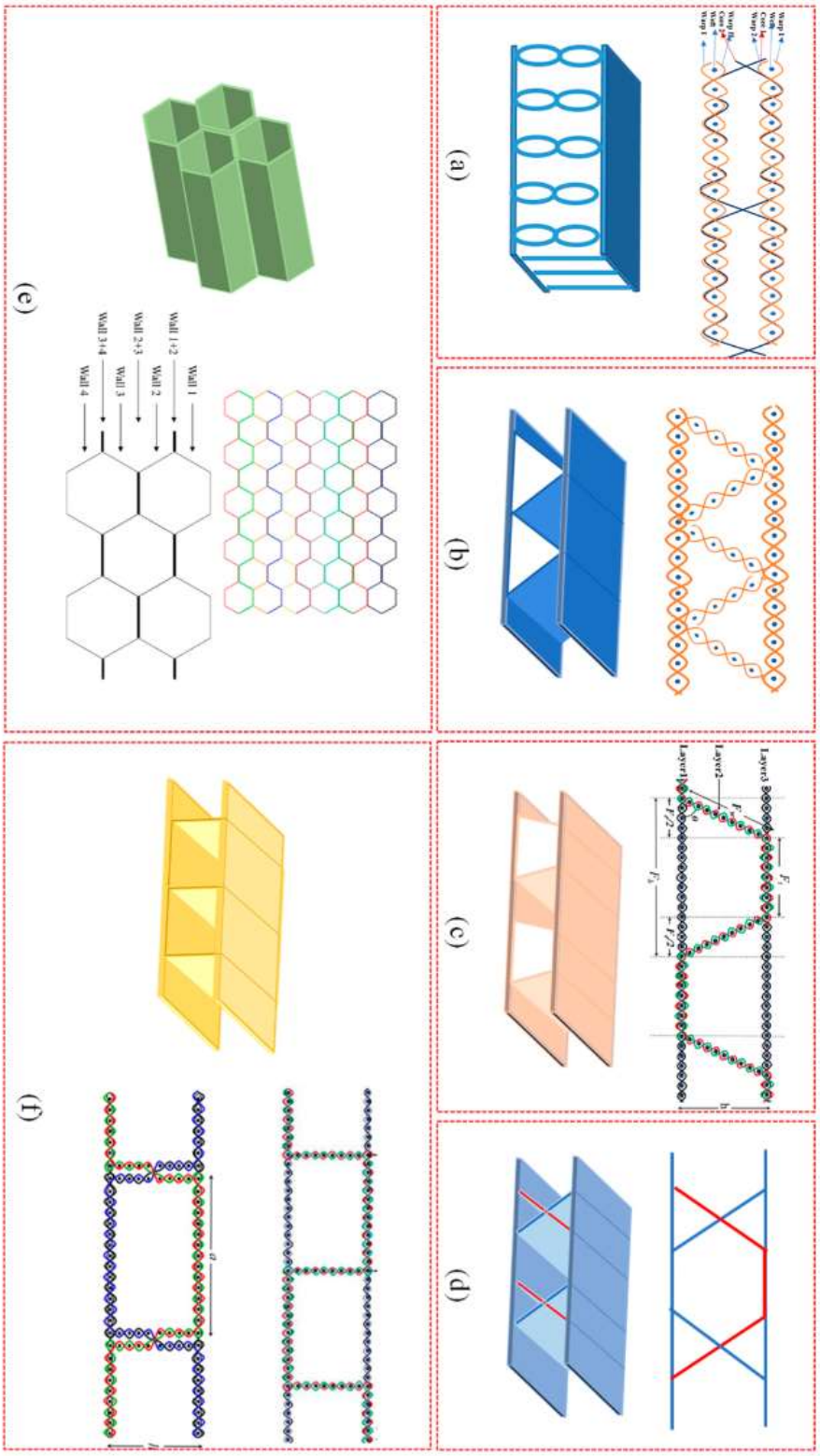
تتميز الألياف الزجاجية وألياف البازلت بخصائص ميكانيكية جيدة، لكن بالمقارنة مع ألياف الكربون، فإن ألياف الكربون أكثر عرضة للهشاشة من الألياف الزجاجية، ولكن الألياف البازلتية أقل عرضة للكسور، وأقل كلفة، لكنها أعلى كثافة. لتحسين أداء الألياف التقنية، حاول العديد من الباحثين مزج ألياف عالية الأداء مع ألياف غير عضوية لتشكيل خليط الغزل، وهذا ينتج ترتيبًا جديدًا في هندسة النسيج وسيؤثر في الخصائص البيئية والميكانيكية للمادة النسيجية المركبة. على سبيل المثال، (Zhong et al.) الذي درس خيوط الغزل الأساسية التي تنتجها ألياف البولي بروبلين وخيوط البازلت. (Nesrin *et al.*, 2017).



الشكل (37): يبين الأقمشة (3D Woven Spacer Fabrics WSF)، (Nesrin *et al.*, 2017)

كون الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمُفرَّغة (3D woven Spacer Fabrics)، تختلف عن الأقمشة ثنائية الأبعاد بأنه يؤخذ فيها بالحسبان البعد الثالث ألا وهو سماكة القماش، إذ تتكون هذه الأقمشة ثلاثية الأبعاد من طبقة نسيج الأرضية العلوي والسفلي وبينهما تمتد خيوط الربط باتجاه المحور (Z)، طول هذا الامتداد يقابله سماكة النسيج، والتي تبدأ من (1) مم حتى (50) مم، وفقاً للتطبيق، هنا تدخل خيوط الربط في المحور (Z) في حساب الخواص الميكانيكية من مقاومة الشد والانحناء والانضغاط والقص والتمزق وغيرها من قوى ومؤثرات خارجية تسببها بيئة التطبيق، كما أن نوع خيوط الربط وطريقة حياكتها (حركتها في بنية النسيج ثلاثي الأبعاد) يؤدي دوراً في التأثير في تلك الخواص، فهناك الحياكة بالشكل المستطيل (Rectangular)، والزيكزاك والمثلثي. الشكل (38). (YeranWang et al., 2022).

في هذا البحث، سيتم استخدام أقمشة ثلاثية الأبعاد ومُفرَّغة، مصنعة من ألياف وخيوط زجاجية من النوع (E; Electrical and Thermal Resistance) ذات خواص ميكانيكية عالية، وبسماكة (10 مم و 20 مم)، وبتركيب نسيجي سادة (1/1)، وبنظام حياكة لحركة خيوط الربط بين قماشي الأرضية العلوي والسفلي من النوع (Rectangular)، الشكل (38)، وهذا يُعطي معامل تغطية أعلى لقماشي الأرضية العلوية والسفلية، ويؤثر إيجاباً في الخواص الميكانيكية، ويُقلل من نسبة تغلغل مادة الإيبوكسي في بنية القماش، أي ستتحسن الخواص الميكانيكية بنسبة جيدة، وسيُقابل هذا التحسن كثافة منخفضة ووزن أقل ما أمكن، ومرونة أعلى، كون نسبة مصفوفة النسيج الداعم إلى مصفوفة الريزين الرابط ستكون أعلى.



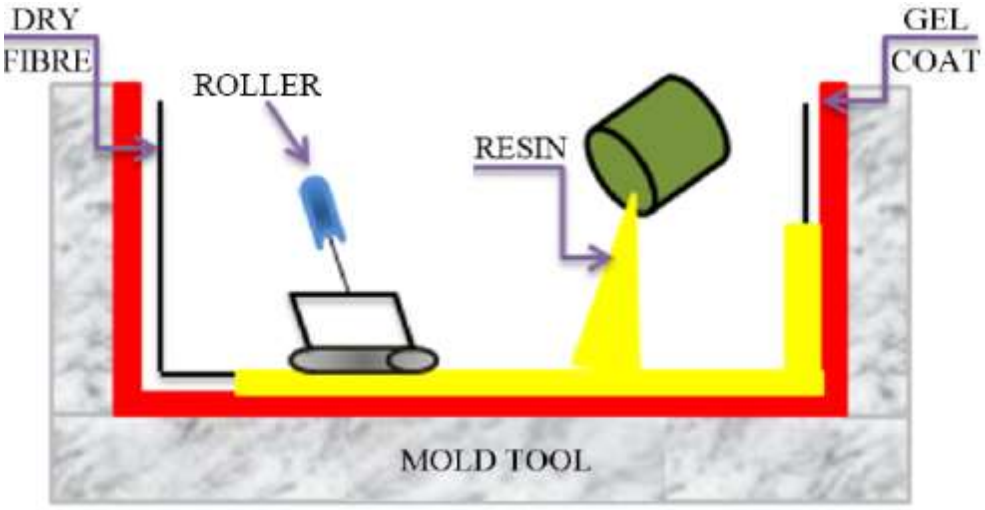
الشكل (38): يبين تصاميم الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمفرغة، حيث:

(a) "8" core yarn spacer structure, (b) triangular (sawtooth) spacer structure, (c) trapezoidal spacer structure, (d) x-spacer structure, (e) hexagonal structure, and (f) rectangular spacer structure. (YeranWang et al., 2022).

3.3. مصفوفة مادة الريزين بوليمير (PMC):

مادة الريزين أو المادة الرابطة، أو الراتنج، أو البوليمير، هي مادة كيميائية تنتج من خلط مكونين معاً، هما الرزين (A) والمقسي (B) وأحياناً تضاف مادة ثالثة لتسريع التفاعل تسمى بالمسرع (C)، الخليط المتجانس الناتج، يكون سائلاً، ويمتلك لزوجة معينة، ويجب أن تكون هذه اللزوجة ضمن حدود معينة تحقق قابلية تغلغل مادة الريزين ضمن بنية التركيب النسيجي، ولإشباع مصفوفة النسيج بالبوليمير.

يقوم الريزين بجمع مكونات المادة النسيجية وطبقاتها معاً ضمن قالب محدد الأبعاد، ويتم الإشباع بتقنيات عديدة لتشكيل المادة المركبة، منها الرول والفرشاة، الشكل (39). (Liangang *et al.*, 2021).



الشكل (39): يبين كيفية تطبيق مادة الريزين بالرول والفرشاة على النسيج ضمن قالب لتصنيع مادة نسيجية مركبة، (Liangang *et al.*, 2021)

يمكن تصنيف بوليميرات مواد ريزين المواد المركبة لمجموعتين رئيسيتين هما:

وفقاً للمرجعين (P.C.Pandey, 2004)، (Krishan K. Chawla,2012):

أولاً: المواد المتصلبة حرارياً (Thermosetting):

من أكثر المواد شيوعاً مركبات الإيبوكسي والبوليستر والفينيل إستر، والتي بدورها تغطي مجالاً واسعاً من الخواص والمواصفات الميكانيكية والحرارية. هذا ويتم تطبيق هذه المواد كمواد ريزين متصلبة بالحرارة على مادة النسيج الداعم عندما تكون بالحالة السائلة وباستخدام تقنيات تطبيق الحرارة والضغط تحمّل هذه المواد على النسيج لتتغلغل في بنيته الفراغية وتسهم في ربط عناصر النسيج معاً وتوزع الأحمال والإجهادات على كامل المركب الناتج. تتميز هذه الريزينات المتصلبة بالحرارة، بكونها قصفة للغاية نظراً لقساوتها وصلابتها وخاصة بعد تحميلها على النسيج، فمثلاً ريزينات الإيبوكسي تتميز بقساوة أكبر من ريزينات البوليستر، لكنها ذات خواص عالية فتستخدم لتطبيقات عالية الأداء، كما في هذا البحث، علماً أن ريزينات البوليستر تتأثر بالمواد النفطية، إلا إذا عولجت ببعض المركبات المساعدة. (Nesrin *et al.*, 2017).

ثانياً: المواد المتلدنة حرارياً (Thermoplastic):

هنا تختلف هذه الريزينات المتلدنة بالحرارة عن تلك المتصلبة سابقتها كونها غير قصفة وتتكون بنيتها الجزيئية من سلاسل طويلة ولديها مقاومة جيدة للكسر وللمواد الكيميائية، مثال (PEEK) وهو بولي إيتر إيتر كيتون، الذي يستخدم في المواد المركبة الخاصة وعالية الجودة وتتميز بزيادة خاصية الكرمشة في بنيتها عندما تتعرض لحمل ثابت، بالنتيجة هذه الريزينات لزوجتها عالية ومن ثم مقاومتها عالية للسيلان وهذا يزيد من صعوبة تغلغلها في بنية النسيج الداعم. (Nesrin *et al.*, 2017).

1.3.3. وظيفة مادة الريزين:

في بنية المواد المركبة، تقدم مادة الريزين الفوائد الآتية: (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

- تربط الخيوط والألياف معاً وتضمها، وتحميها من الظروف البيئية.
- توزيع الأحمال والإجهادات على الألياف كافة في بنية النسيج الداعم من جهة وعلى الريزين نفسه وهذا ينظم المقاومات والانفعالات ويجانسها.

- تحسين خاصية مقاومة الكسر والانهيار تحت تأثير القوى للمنتج المركب.
- تساعد في التوزع المنتظم للإجهادات على السطوح الداخلية بين مادة الريزين والألياف.
- تقليل امتصاص الرطوبة، مع تجعد منخفض، وانخفاض معامل التمدد الحراري.
- خلال عمليات المعالجة بالحرارة والضغط تؤمن خواص الريزينات تدفقاً منتظماً وفقاً للزوجتها بين فراغات النسيج الداعم لتجمع بين مكوناته.
- تحمّل إجهادات القص وتأمين معاملات استطالة وشد عالية للمادة المركبة.
- يجب أن تتميز مادة الريزين بالمرونة لنقل الحمل عبر الألياف.
- مقاومة جيدة للمواد الكيميائية وثباتية عالية للأبعاد مع سهولة التطبيق للحصول على المنتج المركب.

2.3.3. اختيار مادة الريزين المناسبة:

عند اختيار مادة الريزين المناسبة لإنتاج مادة مركبة ما وفقاً للغاية من الاستخدام، كما في هذا البحث، لعزل الأبنية الحديثة حرارياً وصوتياً، يجب الأخذ بالحسبان نقاط عدة هي:

- لابد من وجود توافق وانسجام في الخواص الميكانيكية بين مصفوفة مادة الريزين والنسيج الداعم، إذ أنه عند استخدام مواد نسيجية داعمة ذات متانة شد عالية لا فائدة من استخدام ريزينات ذات متانة منخفضة لأنها ستسيئ لتوزع الإجهادات ونقلها عبر مصفوفة مادة الألياف، وتعد مادة ريزين الإيبوكسي الأفضل في هذا المجال، والأكثر انتشاراً واستخداماً. (M. S. Bhatnagar, 1996).
- على مادة الريزين أن تلائم خواص البيئة التي سيتم تطبيق المادة المركبة بها كالرطوبة والضغط والحرارة والأشعة فوق البنفسجية.
- سهولة الاستخدام في عمليات الحياكة النسيجية ومراحلها عند الحاجة إلى ذلك.
- تأمين عمر استخدام مديد للمنتج المركب النهائي وكلفة منخفضة.
- على الألياف أن تكون مشبعة بمادة الريزين قبل تصلبها. (Ghosh, A.K *et al*., 2020).

4.3. دور علم النانو وتقاناته في صناعة النسيج:

1.4.3. تعريف تكنولوجيا النانو:

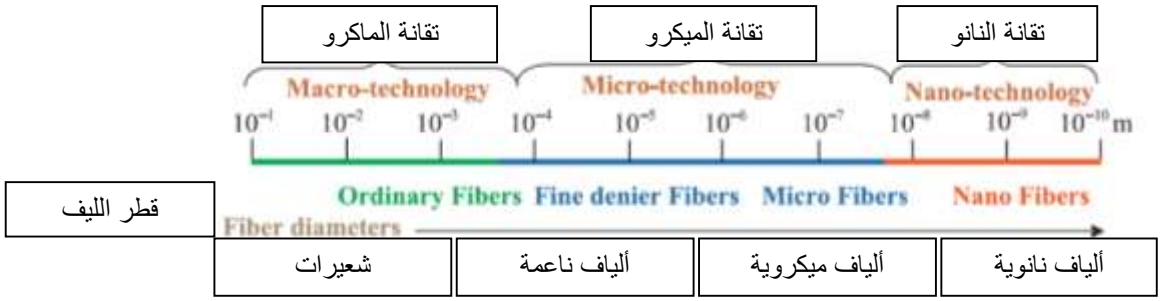
يعبر علم النانو عن دراسة المنمنمات، أي دراسة الخواص الهندسية والفيزيائية والكيميائية والمورفولوجية لتلك المواد ضمن أبعاد صغيرة برتبة (1 - 100 nm) إذ كل (1 billion nm = 1 m). ويتم تصنيف البنى المسامية النانوية على ثلاثة أنواع، أولها بنية مسامية بأبعاد نانوية أكبر من (100 nm)، وتعرف بالمصطلح (microporous)، وبنية مسامية بأبعاد نانوية بالمجال (2-100 nm)، وتعرف بالمصطلح (mesoporous)، وآخرها بنية مسامية بأبعاد نانوية أقل من (2 nm)، وتعرف بالمصطلح (Nanoporous). (A.P.S. Sawhney *et al.*, 2009). يقصد بتقانة النانو الطرائق والآليات والتقانات التي يمكن من خلالها تطبيق علم النانو في مجالات العلوم الأخرى أي هو علم تطبيقي بامتياز، ويمكن القول إنه العلم الشامل للعلوم الحديثة، ومن هذه العلوم علم النسيج والمواد المركبة المصنعة منه والتي أمكن تحسين خواصها كمنتجات، وخواص مساعدات انتاجها، وطرائق تصنيعها وتقاناتها بشكل أفضل باستخدام تكنولوجيا النانو. (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

تبين في السنوات الأخيرة أن لتقانة النانو وطرائق تطبيقها في صناعة النسيج ومواده المركبة دوراً فعالاً في تحسين خواصها المتعلقة بالملمس والمظهر والأداء والكلفة الاقتصادية وعمر الاستخدام ومقاومة الظروف المحيطة، بالإضافة إلى دخول صناعة النسيج ومواده المركبة في تطبيقات عالية الأداء كمقاومة الحرائق والشروط البيئية، وفي مجال عزل الأبنية، والتي يمكن توضيحها في النقاط الآتية: (Sherif Attallah *et al.*, 2015).

1- تمتاز المواد النسيجية وموادها المركبة والمحضرة باستخدام تكنولوجيا النانو بخواص هندسية وميكانيكية عالية الأداء من حيث المتانة ومقاومة الضغط والشد والانحناء.

2- زيادة عمر الاستخدام للمواد المصنعة باستخدام تكنولوجيا النانو نظراً لمقاومتها العالية لظروف الوسط (حرارة، رطوبة، UV)، والتي تعود لزيادة مساحة السطح الداخلي للبنية بالنسبة لواحدة الكتلة.

3- إمكانية استخدام المواد النسيجية وموادها المركبة (والتي صُنّعت باستخدام تكنولوجيا النانو) في تطبيقات عالية الأداء وخاصة أنه لا يمكن للمنتجات النسيجية التقليدية خوض غمارها (كمقاومة الحرائق والظروف البيئية القاسية الخارجة عن العادة). بالنسبة لمجال تصنيع الألياف والخيوط فيمكن تقسيمها وفقاً لقطر مقطعها لنعبر بشكل أوضح عما يُقصد بالنانو في صناعة النسيج، الشكل (40)، إذ يعني تقليل قطر الليف هو زيادة في مساحة السطوح البينية في النسيج عند صناعته أو بين المادة النسيجية الداعمة ومصفوفة الريزين في المادة المركبة من جهة أخرى. (A.P.S. Sawhney *et al.*, 2009).



الشكل (40): تغير قطر الليف وفقاً للتكنولوجيا المستخدمة. (A.P.S. Sawhney *et al.*, 2009).

2.4.3. تطور صناعة الألياف والنُّسُج ومعالجاتها باستخدام تكنولوجيا النانو:

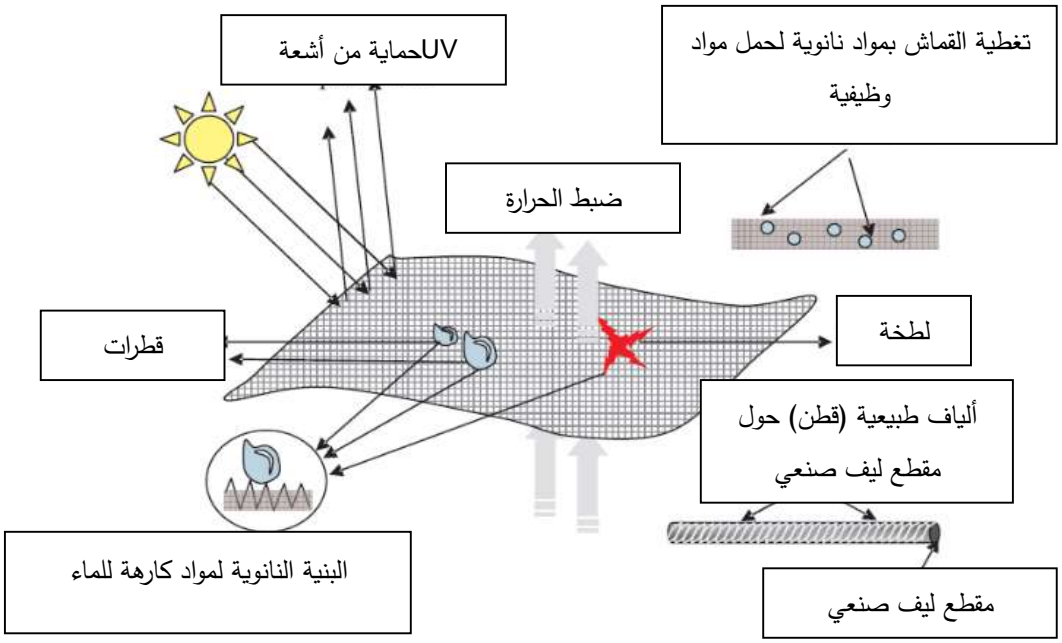
تعود جودة الخواص النهائية للمنتجات النسيجية والخيوط والألياف المصنعة منها هذه المنتجات، إلى جودة آليات وطرائق تصنيعها خلال مراحل الإنتاج بدءاً من المادة الخام، ونوعية المواد الأولية ومساعدات الإنتاج الداخلة في التركيب. لذا وكما تمتاز المواد النسيجية المصنعة من الخيوط والألياف القطنية بمتانة جيدة مقارنة بخواصها الحيوية والمورفولوجية (البنيوية) والبيئية (رطوبة، حرارة، تنفس)، فإنه يمكن عندها رفع سوية أداء هذه المنتجات التقليدية بإدخال تكنولوجيا النانو وعلم النانو في خواص موادها الأولية وطرائق ومراحل تصنيعها (غزل، نسيج، صباغة، طباعة، معالجات) ومن ثم ستتحسن خواصها الميكانيكية والمورفولوجية، (Filippov, 2019)، لتصبح تلك المنتجات الصحية (طبيعية المنشأ) قادرة بخواصها المحدثة على الدخول في مجال التطبيقات عالية الأداء وضمن ظروف بيئة التطبيق لا يمكن للمنتجات والتقانات النسيجية التقليدية خوض غمارها. من جهة أخرى يمكن للمنتجات النسيجية الصنعية والمحضرة من ألياف وغزول صناعية وكيميائية المنشأ أن تؤدي الدور نفسه عند

استخدام تقانة كالغزل الكهربائي، وطرائق المحلول لتحضير الألياف النانوية، ومن ثم تصنيع منتجات نسيجية نانوية البنى الليفية منها، ومن ثم ستتحسن خواص مصفوفة المادة النسيجية الداعمة في المادة المركبة، يمكن عندها التوصل لمادة نسيجية مركبة وفق متطلبات التطبيق الهدف. (A.P.S. Sawhney *et al.*, 2009).

على سبيل المثال لا الحصر، تمتاز ألياف الكربون النانوية بناقلية عالية للحرارة والكهرباء مقارنة بألياف الكربون التقليدية، كما أن معاملات المتانة والشد (حتى 200 GPa) والانحناء والانضغاط والمرونة (حتى 5%) الخاصة بالمنتجات النسيجية المصنعة باستحضار تقانات النانو ومن ألياف نانوية ستكون أعلى من معاملات الألياف الأخرى سواء كانت (زجاجية، بازلتية). (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

يمكن إدخال طرائق معالجة مختلفة تماماً عن المعالجات التقليدية للنسج والألياف ومنها المعالجة بمواد ومحاليل كيميائية معززة بحبيبات فعالة (ذات أداء حراري، كيميائي، كهربائي) محضرة باستخدام تكنولوجيا النانو، كما يبين ذلك الشكل (41)، كتغطية القماش بمواد نانوية لحمل مواد وظيفية، أو للحماية من الأشعة فوق البنفسجية (UV)، أو تحميل القماش بمواد كارهة للماء والرطوبة، أو بمواد معقمة ومضادة للبكتيريا واللطخات الملوثة. وبالتالي لتدخل تلك المنتجات تطبيقات مختلفة تماماً عما اعتيد عليه ومنها تطوير العزل الحراري والناقلية الحرارية والكهربائية، علماً أن إدخال هذه المواد الفعالة لن يؤثر تأثراً كبيراً في الكلفة مقارنة بجودة الأداء الوظيفي، إذ بالعودة إلى أغلب الدراسات الحديثة ذات الصلة بالموضوع فإن نسبة تلك المواد الفعالة لن يتعدى (5–7%) من كتلة المادة المركبة، (Shanaz *et al.*, 2020)، من جهة أخرى تعدّ مقاومة الضغط منخفضة للمنتجات النسيجية المركبة التي تكون فيها مصفوفة النسيج الداعمة تقليدية المنشأ (أي من دون استخدام تكنولوجيا النانو)، ولكن سيختلف الوضع تماماً عندما يتم إدخال علم النانو وتقاناته الخاصة بصناعة النسيج ومواده المركبة (Textile Composites). (Sherif Attallah *et al.*, 2015).

يمكن أن يُستنتج مما سبق، أن إدخال تكنولوجيا النانو في صناعة النسيج ومواده المركبة سينقل هذه الصناعة إلى مرحلة متطورة وعصر جديد لم يكن من المتوقع وجوده لولا علم النانو.



الشكل (41): إدخال تكنولوجيا النانو في صناعة النسيج ومواده المركبة. (A.P.S. Sawhney *et al.*, 2009).

3.4.3. تعريف ببعض المنتجات النسيجية باستخدام تكنولوجيا النانو:

دخلت تقانة النانو في العقد الأخير وبقوة مجال صناعة النسيج والألياف والخيوط والمعالجات النهائية للمنسوجات والألياف، لتمنح تلك المنتجات النسيجية والمواد المركبة منها قدرة على الدخول ضمن تطبيقات خاصة، نذكر منها:

1- المنسوجات الالكترونية الذكية (Electronic Textiles): محسنة خواصها باستخدام تكنولوجيا النانو (مكثفات سعوية، مقاومات كهربائية، ...).

2- أقمشة التحكم بالمناخ (Climate Control Textiles): هي منسوجات ذكية معالجة بمواد كيميائية معززة بحبيبات نانوية فعالة، تدعى بالكبسولات متغيرة الحالة (Phase Change Materials PCM / Microencapsulation Particles) والتي يمكنها تغيير حالتها الفيزيائية (صلب/سائل) وفقاً لدرجة حرارة الوسط وهي ضمن حافظة ميكروية محملة على طبقات النسيج وموزعة بانتظام متجانس على كامل البحر المنسوج، ومن ثم سيمنح المنتج النهائي حامله بالحرارة في الأجواء الباردة وبالبرودة في الحرّ.

3- المنتجات النسيجية ذات الطابع الحيوي (Medical Fabrics, Tissue Engineering): تستخدم للتطبيقات الطبية، وتشبع سطوحها بمواد نانوية البنى والأبعاد وذات فاعلية طبية (إيقاف النزيف الآني، شفاء الجروح و الحروق، الكمامات)، حيث استخدام تقانة النانو من مراحل تصنيع الألياف النانوية حتى النسيج حتى تدعيم النسيج ومعالجته بمواد وحبيبات نانوية فعالة سيزيد من مساحة السطح الفعال للمنتج وتماسه مع بيئة التطبيق.

4- منتجات الحماية الخاصة ((Protective Clothing (UV, Static, Chemical): للحماية من الأشعة فوق البنفسجية والكهرباء الساكنة والإشعاعات المضرة والحرارات العالية، التي يمكن معالجتها بمواد نانوية أو تصنيعها بطرائق تتداخل فيها تكنولوجيا النانو.

5- المواد النسيجية والليفية المركبة (Composite Fabrics and Materials): التي تكون فيها الألياف والمنسوجات مادة داعمة، في حين تكون الريزينات والبوليميرات مادة رابطة لمكونات تلك المادة الداعمة، وعندها تدخل تكنولوجيا النانو على خواص المواد الأولية أو على تقانات التصنيع أو المعالجات النهائية بمواد وحبيبات نانوية وظيفية فعالة (وفق حاجة التطبيق المطلوب)، ومحملة على طبقات النسيج وموزعة بانتظام متجانس على كامل البحر المنسوج ضمن مصفوفة المادة الداعمة.

5.3. دور تكنولوجيا النانو في عزل الأبنية الحديثة:

برزت العلوم الحديثة كعلم النانو وتقانة النانو، (Bharat, 2004)، وتداخلت مع علم النسيج وصناعة الألياف النانوية، (Sawhney *et al.*, 2009)، بطريقة الغزل الكهربائي والطرد المركزي، وتشكيل بنية شبكية نانوية الأبعاد ذات مساحة سطح نوعي كبيرة (m^2/gr)، ومحضرة من مواد أولية قد تعد صديقة للبيئة والإنسان، أو يمكن إتلافها أو إعادة تدويرها بآليات أسهل وأقل كلفة، كمواد مثل (PLA, PVA, PA, PP, PE) [1]، 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). وكما نعلم أن كلمة نانو تعني أبعاد أصغر من (100 nm)، (Kartik *et al.*, 2021)، إذاً ستشكل هذه الألياف والبنى النانوية مع الألياف الميكروية كالزجاجية (E-glass) والبازلتية (Basalt Chopped Strands BCF)، سطوحاً لانهائية من المادة بأبعاد صغيرة، وهنا يأتي دور المواد النسيجية المركبة التي تنتج عن اجتماع مادتين على الأقل للوصول إلى مادة بخواص جديدة لم تكن موجودة في مكوناتها منفردة، وأهم مكوناتها مصفوفة المادة الداعمة (ألياف، منسوجات، حبيبات) المسؤولة عن الأداء الوظيفي للمادة المركبة، ومصفوفة مادة الريزين (إيبوكسي، بوليستر، فوم) المسؤولة عن ربط باقي المكونات ونقل الاجهادات بتجانس في البنية، (Nesrin *et al.*,, 2017)، ومع استحضار تكنولوجيا النانو لخواص الألياف والحبيبات، ستضيع طاقة موجة الصوت بين تلك السطوح البينية نانوية الأبعاد، وسيسهل بالتالي امتصاصها. ستساعد دقة ونعومة أبعاد البنية المسامية للمادة على زيادة مساحة السطح النوعي للبنية (m^2/gr)، وزيادة النسبة الحجمية للهواء فيها، والهواء هو العازل الحراري الأفضل على الاطلاق، هنا سينخفض معامل انتقال الحرارة (K) للمادة العازلة وستزداد كفاءة العزل الحراري لمنظومة العزل في البناء.

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

1.5.3. مجالات تطبيق تكنولوجيا النانو في الهندسة المدنية:

يمكن إدخال تكنولوجيا وعلم النانو في عمليات تصميم المنشآت الهندسية وبناءها وتدعيمها وحتى صيانتها، أو حتى في عمليات تصنيع المواد الأولية الداخلة في مراحل البناء نفسها، ومنها يقوم الباحثون المتخصصون في هذا المجال بدراسة خواص هذه الأبنية وموادها الداخلة في إنشائها، ومن ثم استقراء المشكلات وحلولها لتفاديها مستقبلاً. (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

سنذكر هنا بعضاً من أهم تطبيقات تكنولوجيا وعلم النانو في الهندسة المدنية ومنها ما هو بغرض العزل، وهي:

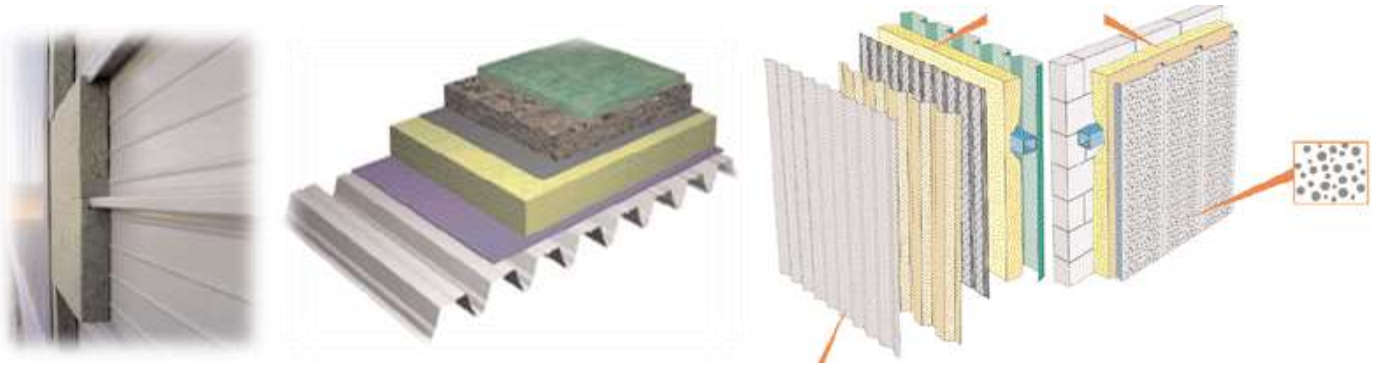
1. **مواد التغطية Coatings:** تدخل هذه المواد في مختلف مراحل إنشاء الأبنية ومرافقها، فتؤدي دور العزل الأولي أو النهائي للسطوح (قضبان وشبكات التسليح، جدران، أسقف،...)، وبالرغم من فاعلية المواد التقليدية فقد خضعت أيضاً هذه المواد للبحث والتطوير منذ العقد الأخير من القرن الماضي فأصبحت وبعد إدخال تكنولوجيا النانو (استخدام حبيبات وألياف نانوية) أكثر قدرة على مقاومة التآكل والأوساط المحيطة سواء كانت كيميائية أو حرارية، كما أمكن إضفاء بعض الخواص المحدثة كالقدرة على التحكم الحراري في تقنيات العزل المستخدمة في الأبنية والمرفقات (أنابيب مبادلات، تسخين، تبريد). (V Kartik Ganesh et al., 2021).
2. **الزجاج العازل Insulation Glass:** يُعدّ مسمى الزجاج العازل شاملاً لأنواع عدة من الزجاج فمنه العازل للصوت والعازل للحرارة والعازل للحريق والعازل للضوء أو بعض الأشعة الضوئية، إذ يمكن استخدام حبيبات السيليكا النانوية (silica (SiO_2) nanoparticles) لتدخل ضمن خلطة تحضير الزجاج أو كطبقة متوسطة بين طبقتين زجاجيتين فيصبح ذلك الزجاج عازلاً للحرارة. (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

3. **مواد العزل Bulk Insulating Materials :** كون الهواء العازل الحراري الأفضل يتم خلق فجوات وفراغات بين الجدران والسطوح الخاصة بالأبنية والمنشآت التي تتطلب مراعاة ظروف البيئة ووسط التطبيق، وتحسيناً لخواص العزل الحراري دخلت تقانة علم النانو باستحضار حبيبات نانوية مسامية البنى من السيليكا تُضاف سواءً للخلطات الأسمنتية أو مواد الطلاء أو ألواح العزل الخاصة بعزل الأسقف والجدران، الشكل (42)، كما يمكن التحكم بخواصها المائية (كارهة أو محبة للماء)، فتصبح ألواح العزل تلك ذات فاعلية أكبر في العزل الحراري وبكثافة وسماكة أقل وبمتانة أفضل يمكن تحسينها بإضافة خلطات تحتوي على ألياف نانوية أو حتى ميكروية، كما يمكن استبدال ألواح العزل التقليدية تلك بمنتج عازل أكثر مرونة مصنع من مواد نسيجية مركبة (Flexible Textile composite Insulation Blanket). (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).
4. **الخرسانة الأسمنتية Concrete:** تُعدّ الخرسانة المكونة من مادة الأسمنت أكثر العناصر شائعة الاستخدام في الهندسة المدنية، ومن ثم تدخل تقانة النانو هذا المجال بهدف تحسين خواص الخرسانة الاسمنتية من حيث مقاومتها للإجهادات الميكانيكية الخارجية وللأوساط القلوية والحمضية، وللرطوبة والحرارة. إذ تُعدّ إضافة حبيبات وألياف السيليكا النانوية (Nano Silica Powder) من أكثر الطرائق الشائعة لتحسين الخواص الميكانيكية والحرارية للإسمنت، ومن ثم قد يؤدي ذلك إلى ظهور أنواع مختلفة من الاسمنت كالرغوي. إن إضافة كمية قليلة (1%) من حبيبات وألياف الكربون النانوية سيزيد من معاملات متانة الضغط والانحناء بمقدار (25%) للخرسانة الاسمنتية حتى بدون تدعيمها بقضبان التسليح (المعدنية أو النسيجية/اللامعدنية).
5. **المواد المركبة الإنشائية Structural Composites:** ويقصد بها قضبان وشبكات التسليح والتدعيم للخرسانة الاسمنتية، حيث يعتبر المعدن من المواد التقليدية المستخدمة منذ القدم في تدعيم الخرسانة إلا أنها ورغم التطور الذي طرأ على بنية ونوع هذه القضبان المعدنية، فمازالت ضعيفة بالمقارنة مع البدائل الحديثة من المواد النسيجية المركبة سواء استخدمت فيها ألياف زجاجية أو كربونية أو بازلتية مع الراتنج أو الريزين، والتي بدورها عززت من جودة الخواص الميكانيكية والإنشائية، فزادت مرونتها ومعاملاتها في الشد والاستطالة والضغط والانحناء وزيادة عمر الاستخدام ومقاومة الزلازل وخاصة للعمل في أوساط خاصة بيئياً وحرارياً وكيميائياً وغيرها، بالمقارنة مع استخدام قضبان التسليح المعدنية. (V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

6. تقانة النانو في الحماية من الحرائق Nanotechnology In Fire Protection :

تقليدياً يتم تحسين خواص الحماية لقضبان وشبكات التسليح في الأبنية من الحرائق باستخدام مواد طلاء اسمنتية معززة بالبوليميرات الخاصة تمنح المطلوب، لكن لم يقف الأمر عند هذا الحد لتدخل تقانة النانو هذا المجال باستخدام مواد اسمنتية نانوية البنية ((nano-cement (made of nano-sized particles) والتي أفصح عنها باستخدام ألياف كربونية نانوية مع ألياف من البولي بروبيلين بهدف زيادة اللصق والمتانة.

(V Kartik Ganesh *et al.*, 2021).

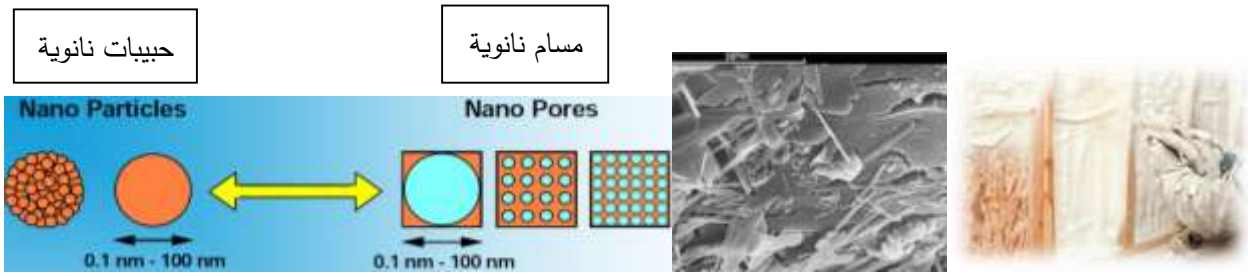


الشكل (42): صور توضح بعض تقنيات العزل المحضرة بتقنية النانو للأبنية الحديثة

(NAIMA, 2009) ، (Arval, 2009)

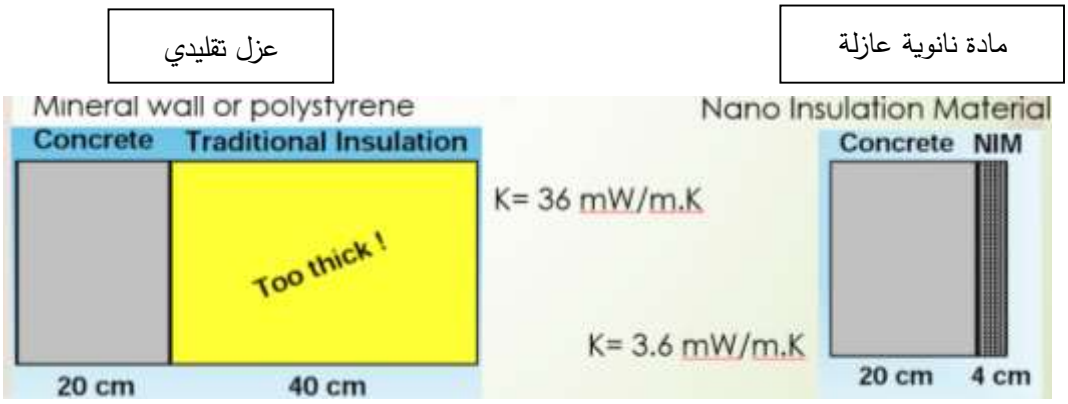
2.5.3. دور علم النانو في المواد النسيجية المركبة بغرض العزل الحراري والصوتي للأبنية:

تعدّ المواد النسيجية المركبة نانوية البنى بدعة خلاقة في مجال صناعة العزل للأبنية الحديثة والمعاصرة، وذلك بالمقارنة مع تقانات العزل التقليدية، إذ تعمل المواد والحبيبات النانوية دور المادة الفعالة التي سترفع من سوية الأداء الوظيفي في العزل، في حين مصفوفة المواد الداعمة فتكون عبارة عن ألياف ميكروية أو نانوية موزعة عشوائياً في بنية المادة المركبة أو نسيج (woven/non-woven) تُحمل عليه هذه الحبيبات النانوية، ومن ثم تأتي المادة البوليميرية الرابطة كالإيبوكسي والبولي إستر و الفينيل إستر لتجمع بين المكونات السابقة بتقنية التشريب والتنضيد (Lay-up/Spray-up/Pre-preg) أو التغطية والتصفيح (Laminating). (Marco, 2016). إن الانتقال بأبعاد البنية من عتبة الميكرو إلى عتبة النانو يعني ألف درجة كأبعاد مجهرية، لكن نقل جودة الأداء والخواص حينها سيكون بأشواط أكبر بكثير، وخاصة بما يتعلق بالعزل الحراري الذي يتطلب بنية مسامية بشكل شبه كامل، بل إن زيادة الجدران والسطوح البينية بين الحبيبات والمسامات داخل البنية المجهرية للمادة العازلة بجميع مكوناتها (حبيبات/نسيج/بوليمير)، الشكل (43)،(Bharat, 2004)، (YURY, 2006)، يعني زيادة قدرتها على تشتيت أمواج الطاقة الصوتية داخلها وامتصاصها، وأيضاً فإن الحبيبات النانوية لا يمكن تطبيقها منفردة دون وجودها ضمن حافظة تحميها من عوامل الوسط الخارجي وتحمي البيئة من التلوث الذي قد تسببه هذه المواد المجهرية حال كانت منفردة وغير مضبوطة ضمن قالب وأبعاد محددة.



الشكل (43): تبين الصورة الأولى رسماً توضيحياً لأبعاد الحبيبات والمسامات النانوية، وتبين الصورة الثانية من اليسار مسحاً الكترونياً ضوئياً (SEM) لبنية المادة العازلة المكونة من الألياف والإيبوكسي والحبيبات النانوية، في حين الصورة الثالثة من اليمين فتبين كيفية تطبيق ذلك العازل المعزز بالحبيبات النانوية في العزل الحراري للأبنية.
(Bjørn *et al.*, 2012) ، (NAIMA, 2009) ، (Satoshi *et al.*, 2021)

لوحظ ضمن فقرات سابقة، أنه يمكن من خلال العلاقات الرياضية والمفاهيم الفيزيائية دراسة كفاءة العزل الحراري لمادة ما، من خلال تحديد معامل انتقال الحرارة لتلك المادة، باستخدام أدوات وتجهيزات مخبرية، ولكن كان هذا فقط بالنسبة لطرائق العزل التقليدية، حيث تكون جميع طرائق انتقال الحرارة موجودة لكن مراقبة من قبل المادة العازلة نفسها (حسب مساحة سطحها النوعية وحسب موصليتها الحرارية)، في حين يمكن باستخدام تكنولوجيا النانو حجب أكثر من طريقة لانتقال الحرارة، فتصبح عندها جودة العزل الحراري أكبر، ومن ثم عند تطبيق هذه التقنية في العزل سيكون معامل انتقال الحرارة أقل ما يمكن وأفضل من استخدام الطرق التقليدية، الشكل (44). إذاً، تمتلك مواد العزل الحراري المحضرة باستخدام تكنولوجيا النانو موصلية حرارية أقل مما لدى وسائل العزل التقليدية، إذ كلما كانت الموصلية الحرارية أقل كان العزل أفضل. (Arval, 2009).



الشكل (44): مقارنة بالسماكة والموصلية الحرارية بين تقنية عزل تقليدية وأخرى مطورة باستخدام تقانة النانو.

(Bjørn *et al.*, 2012)

يمكن التعبير عن معامل انتقال الحرارة الكلي (U) بطريقتين مختلفتين بوجود المواد العازلة المصنعة وفق تكنولوجيا النانو، إذ تمتلك بعض هذه المنتجات العازلة معامل انتقال حرارة أقل مما لدى المنتجات التقليدية، في حين القسم الآخر من تلك المواد العازلة المصنعة وفق تكنولوجيا النانو يكون قادراً إلى درجة تقارب حجب نقل الحرارة بشكل شبه تام.

تركزت الأبحاث المعاصرة حول تطبيق حبيبات السيليكا النانوية المحضرة بتقنية (sol-gel) وهي إحدى تقانات علم النانو كما أشرنا سابقاً، لتمزج هذه الحبيبات (المعالجة حرارياً بالشروط الجوية العادية) بنسبة وزنية (0.5 , 1.0 , 1.5, 3, 5, 7 wt%)، (Shanaz *et al.*, 2020)، مع بوليميرات من الإيبوكسي أو البولي إستر أو الفينيل إستر أو مادة أكريلو نتريل بوتاديين ستايرين (ABS)، ومن ثم يمكن قولبتها ضمن أبعاد محددة وحفظها من التناثر في البيئة، لكنها تبقى قصفة وخواصها الميكانيكية غير مجدية بالمقارنة مع خلطها في مراحل التصنيع الأولية أو النهائية بالألياف المعززة (زجاجية، بازلتية،...) أو مع ألياف كربون نانوية (Carbon Nano Tube (CNT))، أو تحميلها على طبقات النسيج سواء كان قماشاً منسوجاً أو غير منسوج، (Sherif *et al.*, 2015).

كما ظهرت دراسات أخرى في مجال المواد متغيرة الطور (Phase Change Materials PCMs)، (Lamrani *et al.*, 2021)، باستخدام مادة البولي ايتيلن غليكول ذات الوزن الجزيئي العالي (حتى 600)، والتي تغلف ضمن غلاف كروي حافظ من السيليكا، وتحمل المادة المركبة الناتجة على طبقة أو شبكة غير منسوجة من الألياف النانوية المحضرة بالغزل الكهربائي أو الطرد المركزي من البولي استر أو البولي لاكتيك أسيد أو البولي أميد، ثم تقوى الشبكة بطبقة من الألياف المنسوجة، وبما أن درجة انصهار البولي ايتيلن غليكول ذي الوزن الجزيئي (600) تصل حتى الدرجة (20 °C) عندها سوف تنصهر هذه المادة عند ارتفاع الحرارة في الوسط المحيط فوق الدرجة (20 °C) لسوف تحتاج إلى الطاقة لاتمام الانصهار أي سوف تتحول إلى الطور السائل و تمتص الحرارة ويصبح السطح المجاور لها بارداً، والعكس عندما تصبح درجة الحرارة في الوسط المحيط تحت الدرجة (20 °C)، وسوف تحتاج إلى البرودة لاتمام تجمدها أو تحولها للطور الصلب إن صح التعبير، أي سوف تنشر حرارة ويصبح السطح المجاور لها دافئاً، من هنا توفر بُعد الذكاء في قدرة هذه المواد على العزل، نظراً لقدرتها على التكيف مع شروط بيئة التطبيق. (Chunpeng *et al.*, 2022).

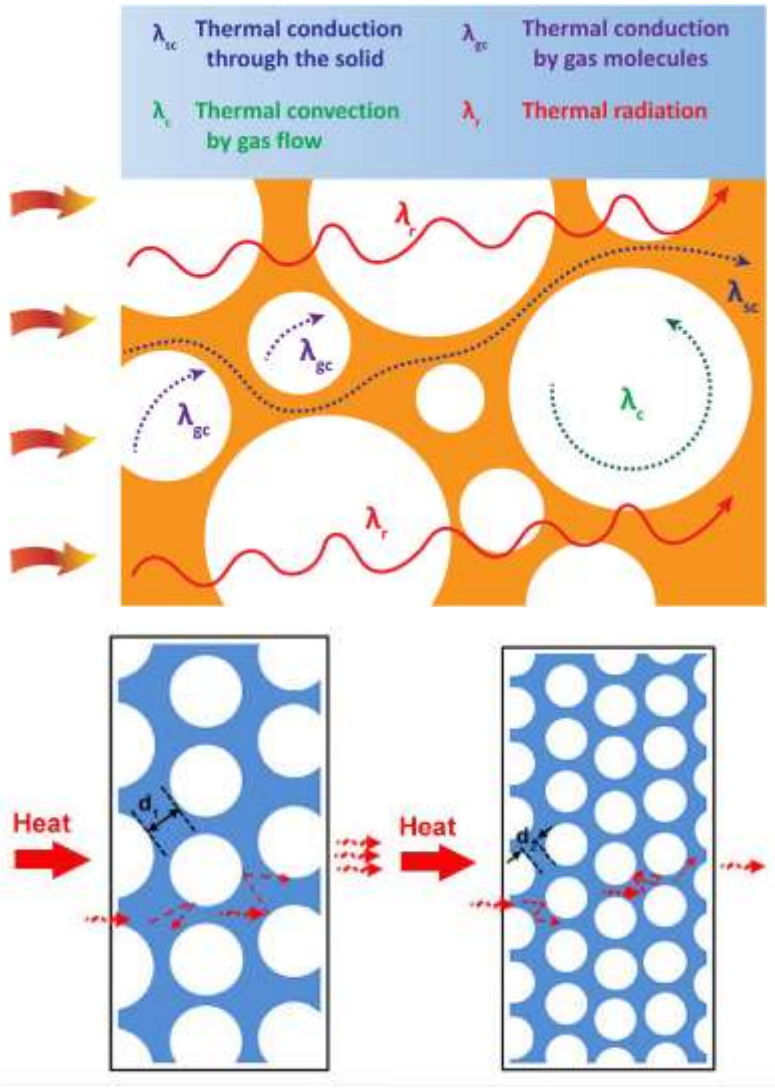
6.3. فرضيات تصميم وتصنيع المواد النسيجية المركبة نانوية البنى للعزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة:

1.6.3. سلوك التوصيل الحراري ضمن بنية مسامية نانوية الأبعاد (Mesoporous-Ns):

تعدّ المواد النانوية مسامية البنية، ذات معامل انتقال الحرارة شديدة الانخفاض (<0.1W/m·K) كعوازل حرارية واعدة، فالموصلية الحرارية هي خاصية مادية فيزيائية تصف قدرة المادة على توصيل الحرارة. وفقًا لقانون فوريه، يمكن وصف الانتقال الكلي للحرارة للمواد المسامية (كفوم البولي يوريثان الرغوي) على أنه مجموع مساهمات كل من التوصيل عبر الجسم الصلب (λsc)، والتوصيل عبر الغاز (λgc)، وثم الإشعاع الحراري (r)، والحمل الحراري (λc) عن طريق تدفق الغاز. يبين الرسم التخطيطي، الشكل (45)، آلية التوصيل الحراري للهواء ضمن تكهفات البنية المسامية نانوية الأبعاد. وفيما يتعلق بالتوصيل الصلب (λsc)، فقد نُقلت الحرارة في المواد الصلبة بشكل أساسي بوساطة الإلكترونات والفوتونات. بالنسبة لألياف البوليمر أو المواد النانوية غير العضوية، يأتي (λsc) بشكل أساسي من تشتت الفوتونات، والفوتونات هي كمية الطاقة المرتبطة بأنماط الاهتزاز الصوتي للبنية البلورية. تعد عيوب وحدود الحبيبات من أكثر العيوب البلورية شيوعًا في المواد العشوائية البنية المسامية. من المعتقد بصورة عامة أن تفاعل الفوتونات يؤدي دورًا حاسمًا في التوصيل الحراري، خاصةً عندما يتم تقليل أبعاد المادة إلى المقياس النانوي، حيث تكون المادة النانوية ذات البنية المسامية (Mesoporous) عبارة عن مواد صلبة ذات هيكل نانوي ثلاثي الأبعاد، وتحتجز الفراغات الهوائية (المسامات النانوية) بين فروع تلك الشبكة الهيكلية الصلبة من الأوكسيد اللامعدني اللاعضوي، لذلك فإن تشتت الفوتونات بوساطة سطوح (صلبة – صلبة) أو (صلبة – غازية) في هيكل هوائي سوف يقلل من مساهمة (λsc) في التوصيل الحراري. نظرًا للعدد الكبير من الواجهات والجسور (السطوح) الصلبة متعددة المستويات (الهيكل العظمي المكون من وحدات المقياس النانوي) وواجهات الغاز الصلب (المسام)، لذا فإن تلك البنية المسامية نانوية الأبعاد تمتلك دائمًا خصائص قوية لتشتيت الفوتونات، مما يؤدي إلى انخفاض الموصلية عبر الأوساط الصلبة. أما بالنسبة للحمل الحراري (λc)، فإن مساهمته في

التوصيل الحراري للحبيبات النانوية مسامية البنية (الهوائية) تكاد لا تذكر، هذا لأن حجم المسام عادة ما يكون بمقياس نانومتر، ومن ثم فإن مساحة نقل الحرارة على السطح صغيرة جدًا. يمكن تقريبًا تجاهل مساهمة التوصيل بالإشعاع (λr) في التوصيل الحراري تحت درجة الحرارة والضغط المحيطين. لكن في ظل ظروف الفراغ، يجب أن تؤخذ مساهمة الإشعاع على محمل الجد. يخضع توصيل الغاز لمتوسط حجم المسام في البنية النانوية، فتفضل المسام المتوسطة المسامية (2–50 نانومتر) تأثير (Knudsen)، مما يعني أن دوران جزيئات الهواء محصور داخل المسام (أي حجم المسام أصغر من متوسط المسار الحر لجزيئات الهواء)، الشكل (45)، هذا يؤدي إلى انخفاض شديد في توصيل الحرارة عبر الغاز. إذا أُخذت حبيبات السيليكا النانوية (محور عمل هذا البحث) كمثال، يمكن أن تُعزى الموصلية الحرارية المنخفضة والقدرة العالية على العزل إلى وجود مسام بحجم النانو مليئة بالهواء، بالإضافة إلى مجموعات صغيرة متناثرة من مادة السيليكا الصلبة. (Liu Q. et al., 2021).

عموماً، هناك طريقتان تستخدمان استخداماً شائعاً لاختبار الموصلية الحرارية ضمن المادة النانوية ذات البنية المسامية (Mesoporous)، وهما طريقة تدفق الحرارة (HFM) وطريقة المصدر المستوي العابر (TPS)، أما طريقة (HFM) فهي طريقة الحالة الثابتة المستخدمة لتحديد خصائص نقل الحرارة عبر المادة العازلة من خلال جهاز مقياس تدفق الحرارة. يمكن أن تكون هذه الطريقة قابلة للتطبيق على مواد عزل الألواح المسطحة الأخرى، مثل المواد الصلبة والرغوية (PU) والمنسوجات ذات معامل انتقال الحرارة من (0.005 W/m·K إلى 0.5) على مدى درجة حرارة من (−20 إلى 70) درجة مئوية. تعدّ طريقة التدفق الحراري تقنية توصيف حراري دقيق.



الشكل (45): يبين كيفية التوصيل الحراري ضمن المادة النانوية ذات البنية المسامية، (Liu Q. *et al.*, 2021).

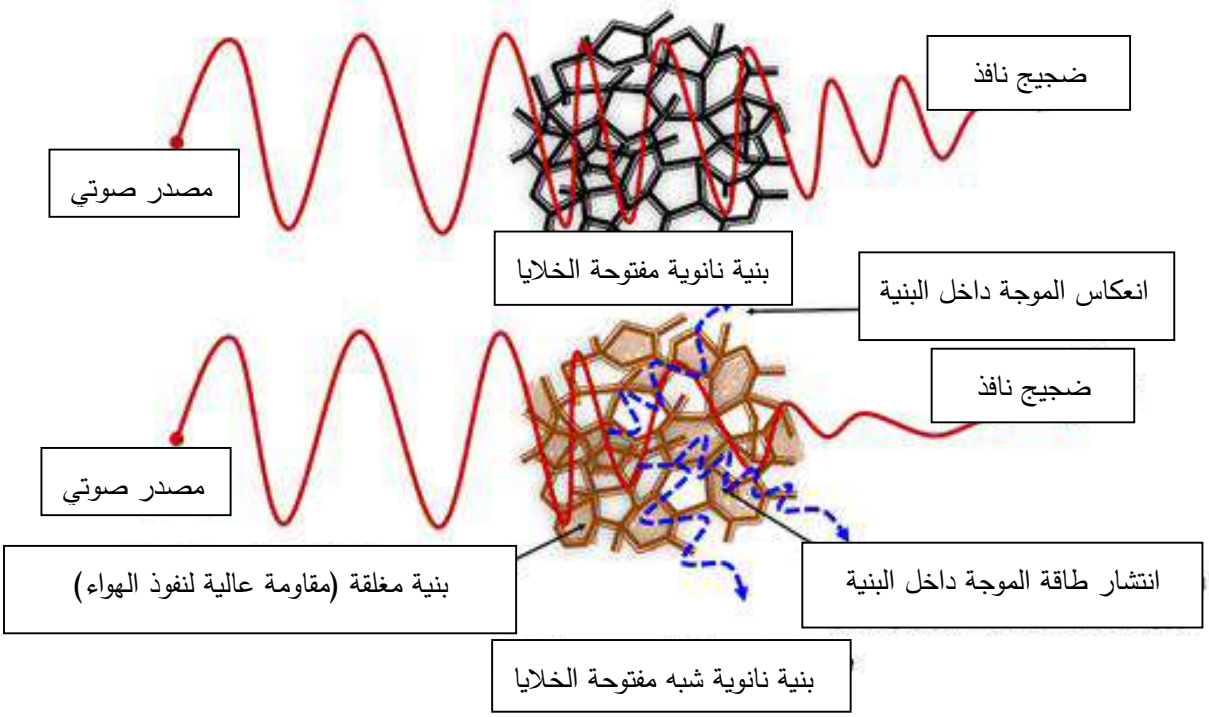
مع ذلك، فإن العيب هو أنها تستغرق وقتًا طويلاً في الأداء وتتطلب عينات أكبر، وهي مناسبة لاختبار المواد صغيرة الحجم نانوية البنية .يمكن لطرائق المصدر المستوي العابر (TPS) تقييم الأداء الحراري بمعدل أسرع، ويمكن استخدامها لعينات حتى بضعة ملليمترات. غالبًا ما يشار إلى هذه الطريقة أيضًا باسم طريقة القرص الساخن. ولكن بالنسبة لمواد العزل الحراري العالي، تجدر الإشارة إلى أن هذه الطريقة قد تؤدي أحيانًا إلى المبالغة في تقدير الموصلية الحرارية. (Liu Q. *et al.*, 2021).

2.6.3. سلوك الطاقة الصوتية ضمن بنية مسامية نانوية الأبعاد (Mesoporous-Ns):

إن الفهم الأساسي للآليات الفيزيائية المرتبطة باستخدام المواد النانوية التي تعمل كممتصات صوتية وفوائدها المحتملة لم يتم تطويره بعد. لذا يهدف البحث الحالي إلى التحقيق في آليات امتصاص الصوت للمواد الصوتية المسامية التقليدية بأقطار ألياف أو مسام على المقياس الصغير (حتى 1 ميكرومتر) لتصبح مفهومة جيدًا. ثم نقل النظرية للمستوى النانوي، مع الأخذ بالحسبان تغير التأثير النسبي للآليات المختلفة للمواد ذات المسام أو الألياف على مقياس نانوي أصغر (حتى 1 نانومتر)، وقد تصبح الآليات الأخرى والتأثيرات غير الخطية مهمة أيضًا. لذلك، مما يتطلب نمذجة الآليات الصوتية على المقياس النانوي بمحاكاة جزيئية يمكنها نمذجة سلوك تدفق وانتشار موجة الصوت في البنية النانوية، ومن ثم فإن الافتراضات الصوتية شائعة الاستخدام، مثل الاستمرارية الخطية المنتظمة لمسار موجة الصوت، تصبح غير صالحة، بالإضافة إلى ذلك، من المهم جدًا اختيار نهج محاكاة جزيئية قابل للتطبيق، ويمكن استخدامه لنمذجة جميع الظواهر الفيزيائية ذات الصلة بالعزل الصوتي، أي التبادل بين الأوساط الغاز (المسام) / الصلب (الهيكل SiO_2)، وتشتت الموجات الصوتية، المرتبط بالتفاعلات بين الموجة والمواد النانوية على المقياس النانوي. (Anthony et al., 2018).

إن تطوير العوازل الصوتية باستخدام مواد النانو في هذا البحث، يتضمن دراسة سلوك الامتصاص لحبيبات السيليكا النانوية والممتصات الصوتية القائمة على البنى المسامية نانوية الأبعاد، وتشير الدراسات المرجعية ذات الصلة، إلى أن هذه المواد النانوية يمكن استخدامها كمواد لامتصاص الصوت، لأنها تُظهر أداء امتصاص صوتي محسناً عن المواد التقليدية، وتوفر في الوقت نفسه خصائص مفيدة كمواد كارهة للرطوبة، ومقاومة للحريق، كونها أكاسيد لامعدنية ولاعضوية، ولا تحوي زمر هيدروكسيل (OH-) قادرة على تشكيل روابط هيدروجينية.

يُعزى أداء امتصاص الصوت المتميز لهذه الهياكل السيليكونية الجديدة بشكل أساسي إلى مقاومة تدفق الهواء التي تسببها الخصائص الهيكلية لبنية المادة، والتي تشمل البنية شبه المسامية وحجم المسام والتعرج والسماكة، ومن ثم يزيد بشكل كبير من تعرج اتجاه مسار موجة الصوت، ويقلل بشكل طفيف من مسامية المادة، وهذا يغير مسار انتشار الموجة. وفي المحصلة ستبدي العينات امتصاصًا صوتيًا محسنًا أعلى بكثير من هياكل الخلايا المفتوحة. يظهر توضيح لظاهرة الامتصاص والتشتت هذه في الشكل (46). (Anthony et al., 2018).



الشكل (46): يبين الفرق بين سلوك الظاهرة الفيزيائية (انتقال موجة الصوت) في مادة مسامية (100% مفتوحة الخلايا كمادة البولي يوريثان PU) (الصورة العلوية)، ومادة شبه مسامية (Mesoporous)، (Anthony *et al., 2018*).

الفصل الرابع

توصيف المواد وتصميم العينات وتحضيرها

4. توصيف المواد وتصميم العينات وتحضيرها:

1.4. تمهيد:

تم في القسم العملي (الشكل (47))، تحضير واختبار عينات مواد نسيجية مركبة مصنعة من مختلف الأقمشة والألياف المبينة في الشكل (47)، وباستخدام تقانة النانو عن طريق إدخال حبيبات نانوية بأساس من السيليكا، لتطبيقها في العزل الحراري والصوتي، وللوصول إلى الأسس الصحيحة ليتم اعتمادها لاحقاً في تصميم وتصنيع مواد عزل الأبنية الحديثة. وبالتجربة التي كانت خير برهان، ثم بالمقارنة مع نتائج دراسات مرجعية ذات الصلة بموضوع البحث كالدراسة (Olga et al., 2022)، أمكن للمادة العازلة ببنيتها النانوية والميكروية، حجب طرائق انتقال الحرارة الثلاث معاً (توصيل، اشعاع، حمل)، من خلال بنية نانوية شبه مسامية من رتبة (Mesoporous) بأبعاد حتى (83 نانومتر)، ويمكنها امتصاص طاقة موجة الصوت حتى (99.79%)، مع الحفاظ على خواص العزل الحراري، وتخفيض معامل انتقال الحرارة بالتوصيل حتى (0.024 W/m.K).

الشكل (47): مخطط توضيحي لمكونات المواد النسيجية المركبة المحضرة باستخدام تقانة النانو لتحضير حبيبات نانوية والتي تشكل نسبة (1–10%) في حين الأنسجة التقنية تشكل (50–60%) والمادة الرابطة تشكل نسبة (30–40%)

2.4. تحضير المواد الأولية وتوصيفها:

1.2.4. المواد النسيجية والليفية والحبيبات الداعمة المستخدمة لبنية المادة النسيجية المركبة:

- ألياف زجاجية مقطعة (Chopped Strands): قطرها (9 ميكرون) طولها (8–12 مم)، صينية المنشأ.
- ألياف بازلتية مقطعة (Basalt Chopped Fibers): قطرها (9 ميكرون) طولها (8–5 مم)، صناعة محلية، من إنتاج المؤسسة العامة للإسكان–فرع1.
- قماش زجاجي (Mat) غير منسوج: مصنع بطريقة الربط بالغرز بالأبر (Stich Bonded)، من الألياف الزجاجية نوع (E-glass)، وزن المتر المربع ($300\ gr/m^2$)، تم تأمينها من السوق المحلية، والمنشأ صيني.
- نسيج زجاجي ثنائي الأبعاد نوع (2D Woven fabric type E-glass) سماكته (0.32 مم)، وزن المتر المربع ($300\ gr/m^2$)، التركيب النسيجي هو السادة (plain 1/1)، المنشأ صيني.
- نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E–glass) سماكته (10 مم)، وزن المتر المربع ($1480\ gr/m^2$)، التركيب النسيجي لقماشي الأرضية هو السادة (plain 1/1)، المنشأ صيني.
- نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (20 مم)، وزن المتر المربع ($2000\ gr/m^2$)، التركيب النسيجي لقماشي الأرضية هو السادة (plain 1/1)، المنشأ صيني.
- مادة حبيبات السيليكا النانوية (nano-silica particles): الاسم التجاري للمادة هو أيروسيل200.

2.2.4. المواد الرابطة (ريزينات، راتنجات):

- مادة الإيبوكسي الطلائية (Coating Epoxy): كثافتها (1170 كغ/م^3)، لونها شفاف مائي، تتكون من خليطين (الريزين والمقسي)، نسبة الخلط الوزنية (1:1)، زمن العمل قبل التصلب (4 ساعة)، زمن التصلب (24 ساعة)، يحتاج معالجة حرارية لمدة نصف ساعة بالدرجة (70 ºC)، لزوجتها بالدرجة (23 ºC) تصل حتى (780 mPa.s) للريزين و(90 mPa.s) للمقسي، درجة الانتقال الزجاجية (Tg 110 ºC)، الاسم التجاري لكل مادة هو (Epikore) للريزين و(Epikote) للمقسي، تم تأمينها من السوق المحلية.

- مادة فوم البولي يوريثان الصلب: يتكون من خليطين (البوليول poly-yol والإيزوسيانات isocyanate)، الاسم التجاري للبوليول (VA250) وفق الكثافة (250 كغ/م³)، و(VA50) وفق الكثافة المطلوبة (50 كغ/م³)، وللإيزوسيانات (R310/10). نسبة الخلط الوزنية (1:1) و(1:1.1) بين البوليول والايزوسيانات، إذ تصب المادة بعد الخلط المتجانس في قالب لتتصلب في درجة حرارة الجو، زمن العمل قبل تفاعل التفويم والتصلب (40–80 ثانية)، يتحمل العمل بظروف حرارية حتى (200 °C). وقد استجرت المادة من السوق المحلية.

3.2.4. المواد الأولية المستخدمة في تحضير الحبيبات النانوية ذات البنية المسامية لعزل الأبنية:

- مادة سيليكات الصوديوم (Meta Sodium Silicate Na_2SiO_3): مادة تجارية سائلة، شفافة، تتبلور عند انخفاض درجة الحرارة دون (15 °C)، لذا توضع ضمن حمام مائي حار للتخلص من التبلور، كثافتها تتراوح بين (1100 كغ/م³) و(1300 كغ/م³)، لزوجتها بالدرجة (15 °C) تصل حتى (890 mPa.s)، تستخدم بكثرة في صناعة الصابون ومواد التجميل، تم تأمينها من السوق المحلية.
- بودرة سوبر سيليكات الصوديوم التجارية: عبارة عن بودرة بيضاء من السيليكات الشرهة للرطوبة، يتم حلها بالماء المقطر للحصول على محلول سيليكات الصوديوم الآنف الذكر.
- مادة الإيثانول (الكحول الطبي) (C_2H_5OH): نسبة النقاوة تتجاوز (97%): مستخدم لأغراض تجارية، للتعقيم والتنظيف، تم استجرار المادة من السوق المحلية.
- ماء مقطر (H_2O).
- ن–الهيكسان: نسبة النقاوة تتجاوز (97%): مستخدم لأغراض تجارية، تم استجرار المادة من السوق المحلية.
- ماءات الأمونيوم الممددة (NH_4OH)، متوفرة في السوق المحلية.
- حمض كلور الماء الممدد (HCl)، متوفر في السوق المحلية.
- مبادل شاردي (كاتيوني) (H^+ Amberlyst 15)، متوفر في السوق المحلية.

3.4. توصيف الأدوات والمعدات المستخدمة:

الأدوات المستخدمة في تحضير العينات:

1. عبوات بلاستيكية لخلط مواد الإيبوكسي والفوم.
2. سباتولات خشبية أو معدنية لخلط مكونات الإيبوكسي والفوم.
3. ميزان دقيق، بمجال خطأ رتبة (0.1 gr).
4. فرشاة لإشباع النسيج بالخلائط المحضرة.
5. لاصق شفاف لعزل المواد عن سطح القالب (تمنع التصاق المواد بسطح القالب فيسهل نزعها لاحقاً).
6. قالب معدني أسطواني بالأبعاد (Ø8.5 cm، 4 cm).
7. قالب معدني أسطواني بالأبعاد (Ø12 cm، 4 cm).
8. قالب معدني أو خشبي مستطيل بالأبعاد (10 x 10 x (4) cm).
9. طاولة عمل مخبرية مزودة بساحبة جيدة لسحب الغبار والأبخرة الناجمة عن التجارب.
10. محراك مغناطيسي مزود بسخان حراري.
11. بيشران زجاجيان سعة (250 مل)، وأنبوب زجاجي سعة (50 مل).
12. سيرنكات بلاستيكية سعة (5 سم).
13. عمود تثبيت معدني مع أنبوب معايرة (للمبادل الشاردي H^+).
14. خلاط ميكانيكي بسرعة (2000 RPM).
15. مثقب قص العينات بعد تشكيلها، مزود بشفرة دائرية خاصة وأداة تنعيم حواف.
16. لاصق ورقي (4 سم).
17. وسائل وقاية شخصية: عبارة عن كمامة ورقية، ونظارة واقية، وقفازات طبية، للحماية من مخاطر التعامل مع المواد النانوية والكيميائية وآثاره.

الشكل (48): صورة تجمع بعض الأدوات والمعدات المستخدمة

4.4. توصيف التجهيزات وأدوات الاختبار:

1.4.4. جهاز اختبار امتصاص الصوت (كفاءة العزل الصوتي):

اختُبرت العينات في جامعة حلب–كلية الهندسة الميكانيكية–قسم هندسة الغزل والنسيج، على جهاز قياس امتصاص الصوت (Sound card oscilloscope) المصمم والمنفذ وفق المرجع (مصطفى، 2009)، الشكل (49)، وفق المواصفة القياسية رقم (ASTM C384-04).

يتألف جهاز قياس امتصاص الصوت الذي تم توضيح مبدأ عمله العام وفق الشكل (12) في القسم النظري، من الأجزاء الآتية:

1–طاولة خشبية ثابتة مستوية يتوضع عليها الجهاز دون أي اهتزازات (مزودة بمخمدات).

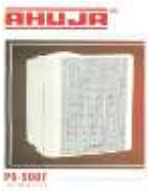
2–علبة مغلقة (30x30 cm) عازلة للصوت. 3–أنبوب مبطن عازل للصوت.

4–سماعات ذات حساسية عالية. 5–جهاز مضخم للصوت. 6–سدادة خشبية.

طاولة خشبية، ثابتة مزودة بمخمدات اهتزاز

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

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



سماعات لإصدار الصوت بتردد معين وبشدة مطال محددة

مضخم الصوت يقوم باستقبال الإشارة الصوتية وتضخيمها وإعادتها عبر السماعات

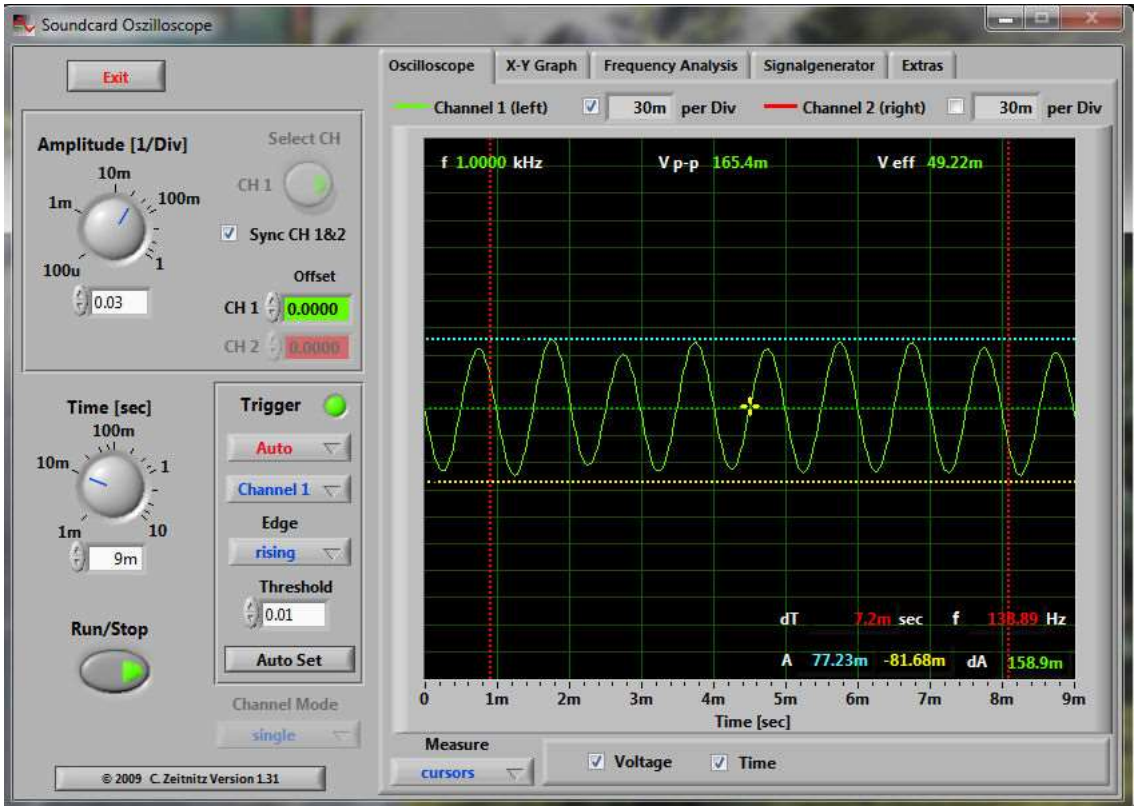
السدادة الخشبية

الميكروفون لاستقبال الإشارة الصوتية المنعكسة من العينة

الشكل (49): أجزاء جهاز اختبار امتصاص الصوت وكفاءة العزل الصوتي، (مصطفى، 2009)

برنامج قراءة امتصاص الصوت:

وهو عبارة عن برنامج حاسبي لقراءة امتصاص الصوت وتحليله، اسمه (Sound card oscilloscope) من شركة (Christian Zeitnitz) الألمانية، يوضح الشكل (50) واجهة البرنامج، إذ 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 نظرياً، حساب مؤشر العزل الصوتي (R_w) للعينات المختبرة. (مصطفى، 2009).



الشكل (50): واجهة البرنامج (Sound card oscilloscope) لجهاز اختبار عزل الصوت (مصطفى، 2009، 69)

يتم عملياً حساب مؤشر العزل الصوتي (R_w%)، من خلال قراءة طول موجة الصوت التي اخترقت العينة والتقطها المستقبل خلف العينة، ضمن أنبوبة الجهاز، ومن خلال معرفة طول موجة الصوت الصفرية:

$$R_w\% = \frac{\text{(طول موجة الصوت الصفرية – طول موجة الصوت التي اخترقت العينة)}}{\text{طول موجة الصوت الصفرية}}$$

2.4.4. جهاز قياس معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (كفاءة العزل الحراري):

اختُبرت الناقلية الحرارية باستخدام الجهاز (Mathis TCI 25 C-therm) في المعهد العالي للعلوم والتكنولوجيا، الشكل (51)، وانظر الملحق رقم (4)، الذي يعمل وفق المواصفة (ASTM D7984)، ومبدأ عمل الجهاز يعتمد على الطريقة الثانية (Calibrated Hot Plate Technique) المذكورة في القسم النظري)، والتي تعتمد على المواصفات القياسية (ASTM C518 / ISO 8302)، ليتم قياس معدل التدفق الحراري (HFM) بالواحدة (Q [W/m²]) الذي يعبر العينة عبر كامل مساحة عينة الاختبار التي تحددها المواصفة، ولا يتم انجاز الاختبار وإظهار النتائج إلا بعد الوصول للاستقرار الحراري، انظر الملحق رقم (4) للاستفاضة بمبدأ عمل الجهاز، ويتكون

هذا الجهاز المستخدم في هذا البحث من حساس، الشكل (51)، يقيس الخواص الحرارية، موصول بجهاز مزود بحاسب يقوم بإظهار النتائج (ناقلية حرارية، وخواص حرارية كالكفاءة الحرارية (Thermal Effusivity) وهي مقياس لقدرة المواد على تبادل الطاقة الحرارية مع محيطها. والانتشار الحراري (Thermal Diffusivity) للمادة وهو مقياس لمدى سرعة تكيف حرارة المادة مع درجة الحرارة المحيطة)، الشكل (18) في القسم النظري من هذا البحث، كما أن الجهاز مزود بغرفة مناخية لقياس الخواص الحرارية، ضمن جو من درجات الحرارة المضبوطة بالمجال (23–180ºC)، ويمكن الاختبار خارج الغرفة المناخية بجو المختبر بالدرجة (25ºC) كما تم لعينات هذا البحث، ويمكن قياس الخواص الحرارية لمواد سائلة ومواد مركبة وأقمشة وسيراميك، ومواد فوم، وبودرة ناعمة (بشرط ألا تقل كمية البودرة عن 40 سنتيمتر مكعب وتوضع ضمن بيشر مخصص للعمل على الجهاز ويوضع الحساس فوق البودرة مقلوباً رأساً على عقب، بهذه الطريقة قيست الناقلية الحرارية لعينتي الحبيبات النانوية)، أما بالنسبة للمواد المركبة (عينات العزل لهذا البحث) فقد وُضعت العينة فوق الحساس، كما في الشكل (15)، ثم وضع فوق العينة وزن تثبيت، وأجري الاختبار، وكانت النتائج مبينة وفق الجدول (12).

الشكل (51): جهاز اختبار الناقلية الحرارية (TCI 25 C-therm)

3.4.4. جهاز اختبار الكثافة والمسامية:

تم قياس الكثافة والمسامية للحبيبات النانوية، باستخدام الجهاز (Lab World Porosity Density Tester) الموجود في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الشكل (52)، وفق المواصفة القياسية (ASTM C373)، حيث أبعاد الجهاز (18 x 40 x 35 cm). يُستخدم الجهاز لقياس كثافة المواد الرغوية ومساميتها كالفوم، والمواد الصلبة كمواد البلاستيك والبوليميرات والمواد الناعمة كبودرة السيراميك. حيث يعتمد مبدأ عمل الجهاز على طريقة

الغمر والطفو (دافعة أرخميدس)، ومدة الاختبار (1–5 دقيقة)، من خلال قياس وزن العينة قبل وبعد غمرها بالمائع (بدقة قياس 0.005 gr)، إذ أولاً يُقاس وزن المادة قبل غمرها في سائل الجهاز (وهو الماء وكثافته معروفة 1000 kg/m^3)، وهو الوزن الجاف، ثم توضع العينة في منطقة السائل، لتمتص الماء وتُغمر بشكل كامل، وقياس وزن العينة المغمورة، ويُعطي الجهاز النتائج النهائية لكثافة عينة المادة (Bulk Density [kg/m^3]) (بخطأ قياس 0.001 gr/cm^3) ودرجة مساميتها (Porosity [%]) (النسبة الحجمية للمسام المفتوحة التي امتصت الماء).

الشكل (52): جهاز تحليل الكثافة والمسامية

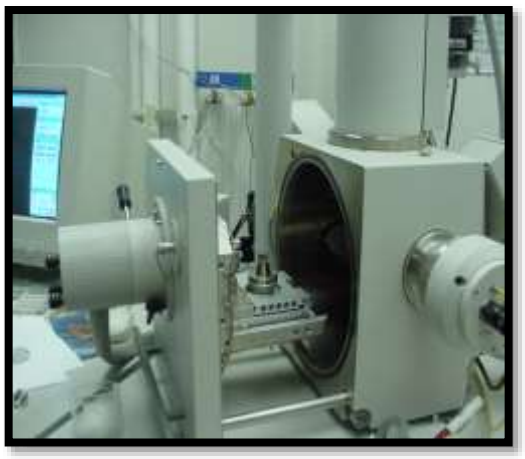
4.4.4. جهاز التحليل الطيفي للبنية بحيود أشعة إكس بطريقة المساحيق:

هو جهاز (X-Ray Diffraction Tester)، المتواجد في قسم الفيزياء في المعهد العالي للعلوم التطبيقية، ويتم العمل فيه وفق المواصفة القياسية (EN13925-1:2003)، ويتكون الجهاز من حجرة مغلقة، الشكل (53)، لتوضع ضمنها العينة على شكل مسحوق ناعم، وبوزن لايقل عن (1 غرام)، ومن حاسب ومعالج مركزي لمعالجة البيانات وقراءة النتائج وطباعتها، عند البدء بتشغيل الجهاز للاختبار يتم تلسيط حزمة من أشعة إكس على مسحوق الحبيبات، لتقوم الروابط الكيميائية للمادة بامتصاص جزء من تلك الأشعة وعكس الجزء الآخر، يتم قياس طاقة الإشعاع المنعكس بواسطة المستقبل الذي من خلاله يتم معرفة كمية الأشعة الممتصة، حيث لكل رابطة كيميائية طاقة امتصاص وانعكاس محددة وبزاوية محددة (θ).

الشكل (53): جهاز التحليل الطيفي XRD

5.4.4. جهاز تحليل البنية بالماسح الالكتروني الضوئي:

تم تحليل بنية مسحوق الحبيبات الناعمة بتقنية (Scanning Electron Microscopy SEM)، وباستخدام جهاز الماسح الإلكتروني الضوئي (VEGA\\TESCAN Arab European University)، في هيئة الطاقة الذرية، وفق المواصفة (ISO/21383:2021)، الشكل (54)، وانظر الملحق رقم (3)، حيث يتكون الجهاز من حاسب مركزي مزود بمعالج لقراءة وتحليل الصور الملتطة لبنية العينة، ومن حجرة الجهاز التي توضع فيها العينة، حيث يتم تسليط حزمة من الأشعة بطاقة معينة على سطح البنية لتنعكس تلك الأشعة نحو المستقبل الذي يقوم بالتقاطها، ثم يحولها المعالج إلى صورة تعبر عن بنية المادة.



الشكل (54): جهاز التحليل الطيفي SEM

6.4.4. جهاز الاختبارات العامة (متانة الشد، ومقاومة الانحناء):

جهاز الاختبارات العامة (Testometric)، هو جهاز موجود في مخبر البيئة في كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث، يقدم الجهاز مجموعة من الاختبارات من أهمها اختبار الشد وفق المواصفة (ASTM D3039)، واختبار مقاومة الانحناء وفق المواصفة (ASTM D790).

بالنسبة لاختبار الشد يقدم الجهاز قيمة لقوة الشد (F_{max}) التي انهارت عندها العينة، والانفعال $(\varepsilon\%)$ الذي يعبر عن تشوه العينة، عندها يحسب الاجهاد $(\sigma = \frac{F_{max}}{A})$ إذ أن (A) هي مساحة سطح مقطع العينة، ثم يمكن عندها حساب الاجهاد والانفعال عند حد المرونة (الخضوع) من المخطط، ومنه يُحسب معامل يونغ بالعلاقة $(E = \sigma/\varepsilon)$.

أما بالنسبة لاختبار مقاومة الانحناء فيتم استبدال مقامط تثبيت العينة الخاصة باختبار الشد لتصبح عبارة عن مضجعين تتوضع عليهما العينة أفقيا، ثم ينخفض الرأس العلوي عند بداية الاختبار مطبقاً ضغطاً أولياً، ويستمر الضغط حتى انهيار العينة، وتوقف الجهاز تلقائياً، ثم إظهار النتائج على الشاشة، ومطبوعة أيضاً، الشكل (55).

الجهاز في حالة مقامط اختبار الشد

الجهاز في حالة اختبار مقاومة الانحناء

الشكل (55): صورة جهاز الاختبارات العامة

7.4.4. جهاز اختبار مقاومة الانضغاط والانحناء:

اختُبرت العينات من حيث مقاومة الانضغاط ومعاملاتها وفق المواصفة (ASTM D3410)، ووفق المواصفة (ASTM D790) من حيث مقاومة الانحناء ومعاملاتها، في كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث، باستخدام الجهاز (Controls)، الشكل (56):

مكبس اختبار مقاومة الانضغاط

مكبس اختبار مقاومة الانحناء

الشكل (56): جهاز اختبار مقاومة الانضغاط والانحناء

يتكون الجهاز من شاشة قراءة، ومكبسين الأول لاختبار مقاومة الانضغاط والثاني لاختبار مقاومة الانحناء، حيث يتم تطبيق ضغط أولي عند كل اختبار، بعد وضع العينة أفقياً في منطقة الاختبار، ثم يتم كبس زر (On) ليبدأ المكبس بالهبوط للأسفل وتطبيق قوة على سطح العينة، حتى تنهار العينة، ليتوقف الاختبار تلقائياً، ثم تظهر النتائج على شاشة القراءة.

8.4.4. جهاز تحمل العوامل الجوية المُسرَّعة:

هو الجهاز (QUV Accelerated Weathering Tester)، المبين في الشكل (57)، الذي يتم فيه اختبار التقادم المسرع لتحمل العوامل الجوية وفق المواصفة (م.ق.س 114/2014)، في مخبر النسيج في مركز الأبحاث الصناعية في وزارة الصناعة، ويتكون الجهاز من عشر حجرات، أي قادر على استيعاب عشر عينات في آن واحد، يتم تعريض جميع العينات لنفس الظروف الجوية المسرَّعة من أشعة فوق بنفسجية (UV) ورطوبة (100%) وحرارة بالدرجة (50 ºC). أي يتم اختبار التقادم المسرّع بناءً على المواصفة القياسية السورية آنفة الذكر والتي اعتمدت على المواصفة العالمية (ASTM G151/G154)، حيث كل يوم اختبار (24 ساعة متواصلة) يعبر عن تعرض لمدة عام كامل.

الشكل (57): يبين صور جهاز التقادم المسرع

5.4. تحضير البنية النانوية:

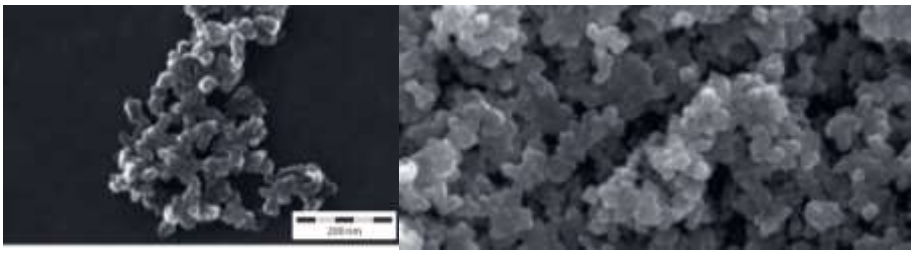
1.5.4. البنية النانوية غير مسامية (Aerosil®200):

استُخدمت مادة نانوية من حبيبات السيليكا المُفوَّمة، الشكل (58)، والمتوافرة في السوق المحلية تحت المسمى التجاري (Aerosil® 200)، وتستخدم في صناعة الدهانات كمحسن لزوجة ومثخن للطلاءات، وتمتلك خواص حرارية عالية، إلا أنها تتأثر بالرطوبة (محبة للماء)، تتناثر بسهولة في الوسط إذا ما حفظت ضمن حيز أو كيان أو بنية مغلقة، بنيوياً لا تعدى هذه الحبيبات النانوية مسامية، لكن وبسبب كثافتها المنخفضة، وصغر حجم حبيباتها، يشكل الهواء نسبة (97%) من حجمها، فتعدّ أن لها خواص عازلية حرارية جيدة، كون الهواء هو العازل الحراري الأفضل على الإطلاق.

الخواص الفيزيائية والبنيوية الخاصة بهذه المادة هي:

كثافتها (50 g/l)، مساحة السطح النوعي للبنية (220 m^2/g)، أبعاد الحبيبات (20–12 نانومتر)، محبة للماء، المنشأ الصين، يبين الشكل (58) صورة ماسح الكتروني (SEM) خاص بمادة السيليكا التجارية الأيروسيل 200 (Aerosil®200).

b a



الشكل (58): (a) صورة (SEM)، و (b) صورة (TEM) لحبيبات (أيروسيل200)، (Evonik, 2015).

2.5.4. تحضير البنية النانوية المسامية (Ns-Nanoporous):

وهي عبارة عن حبيبات نانوية بأساس من السيليكا (SiO_2)، وبوجود سيليكات الصوديوم (silica nano-particles based sodium silicate)، تُحضّر بتفاعلات الحلمهة والتكاثف البسيطة، ضمن وسط من المذيبات العضوية (الماء، فالايتانول، فالهيكسان)، ثم يجري تعريضها لمعالجات حرارية وفق ترتيب معين آخرها تدعى بالتلبيد (Sintering) أي (تسخين بطيء يليه تبريد بطيء)، الشكل (59) والشكل (60) والشكل (61)، فيصبح الناتج حبيبات نانو بولي سيلوكسان بأساس من السيليكا، تحوي في بنيتها فراغات مسامية بتوزع عشوائي.

كيمياء المحاليل المائية لتحضير المواد النانوية:

1- الخطوة الأولى (حلمهة جزئية/partial hydrolysis): وفق المعادلة (1):

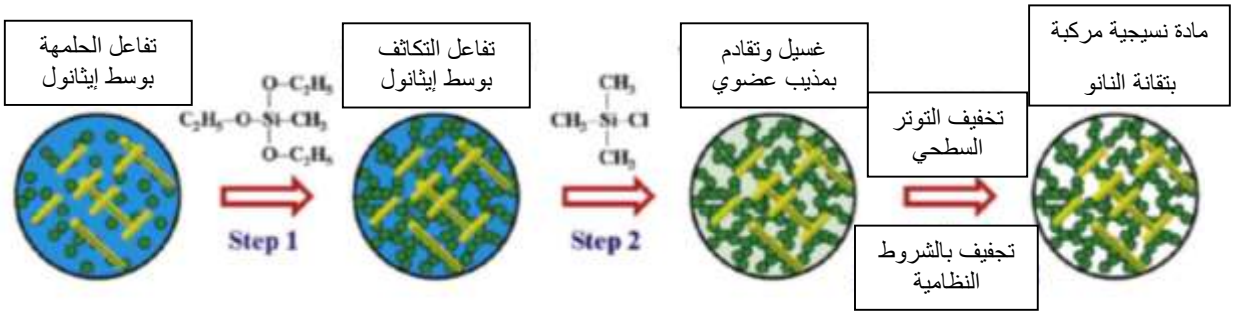
$$n\,Si(OC_2H_5)_4\ (\text{liq.}) + 2H_2O\ (liq.) \xrightarrow{Base,\ Or\ Acid} SiO_2\ (solid) + n\,C_2H_5OH\ (\text{liq.})$$

2- الخطوة الثانية (تكاثف/condensation): وفق المعادلة (2):

$$\equiv Si(OH) + \equiv Si(OC_2H_5) \xrightarrow{Ethanol,\ and\ Water} \equiv Si - O - Si \equiv + C_2H_5OH$$

3- الخطوة الثالثة (الربط ثلاثي الأبعاد): بين السلاسل الخطية من $(OR)_{n-m}\ M - O - (OR)_{n-m}$.

هذا بشكل تتوافر فيه مواد معينة، مثل رباعي إيتوكسي أو ميتوكسي السيلان.



الشكل (59): مخطط يوضح خطوات تفاعل الحلمهة والتكاثف لتحضير الحبيبات النانوية، مع غمر الألياف الميكروية منذ مراحل التصنيع الأولى

تُعدُّ أغلب التقانات المستخدمة لتحضير الحبيبات والمواد النانوية مكلفة، وموادها أيضاً ذات كلفة عالية، وتتطلب شروطاً خاصة، ولا يمكن تنفيذها على المستوى الصناعي، لذا كان لا بد من البحث عن تقانة بسيطة منخفضة الكلفة من حيث المواد الأولية، وطرائق التحضير وتقانات المعالجات النهائية ومتطلباتها، وأيضاً أن تكون صديقة للبيئة، كون التطبيق الهدف هو عزل الأبنية، أي أن الاحتكاك مباشر مع الانسان والبيئة والآلة، فكانت تقنية تحضير المحلول (Sol-gel) بتفاعلات الحلمهة والتكاثف البسيطة، باستخدام مادة رخيصة هي سيليكات الصوديوم.

مراحل التحضير:

1- سيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3) بنسبة (6.2 % wt)، (PH=11−13).

2- تركيز أوكسيد الصوديوم مع أوكسيد السيليكون بالنسبة ($^{SiO_2}/_{Na_2O} = {}^{3}/_{13}$).

3- مبادل كاتيوني ($Amberlyst15\ H^+$) لتخفيف القلوية العالية لمحلول السيليكات حتى القيمة (5−6)، بالغسيل المتكرر ضمن عمود المعايرة، فيتم استبدال شوارد الصوديوم (Na^+) بالهيدروجين (H^+)، والحصول على حمض السيليسيك (H_2SiO_3).

4- إيثانول (99.7%)، يضاف مع المحلول السابق (سيليكات الصوديوم) بنسبة (1.2/1)، ثم يستخدم لاحقاً لغسيل كتل المحلول المتكاثف بعد المرحلة رقم (6)، بهدف التخلص من أي محتوى مائي ضمن بنية المحلول المتكاثف، والوسط الناتج يدعى ألكوجيل (Alchogel). الشكل (61).

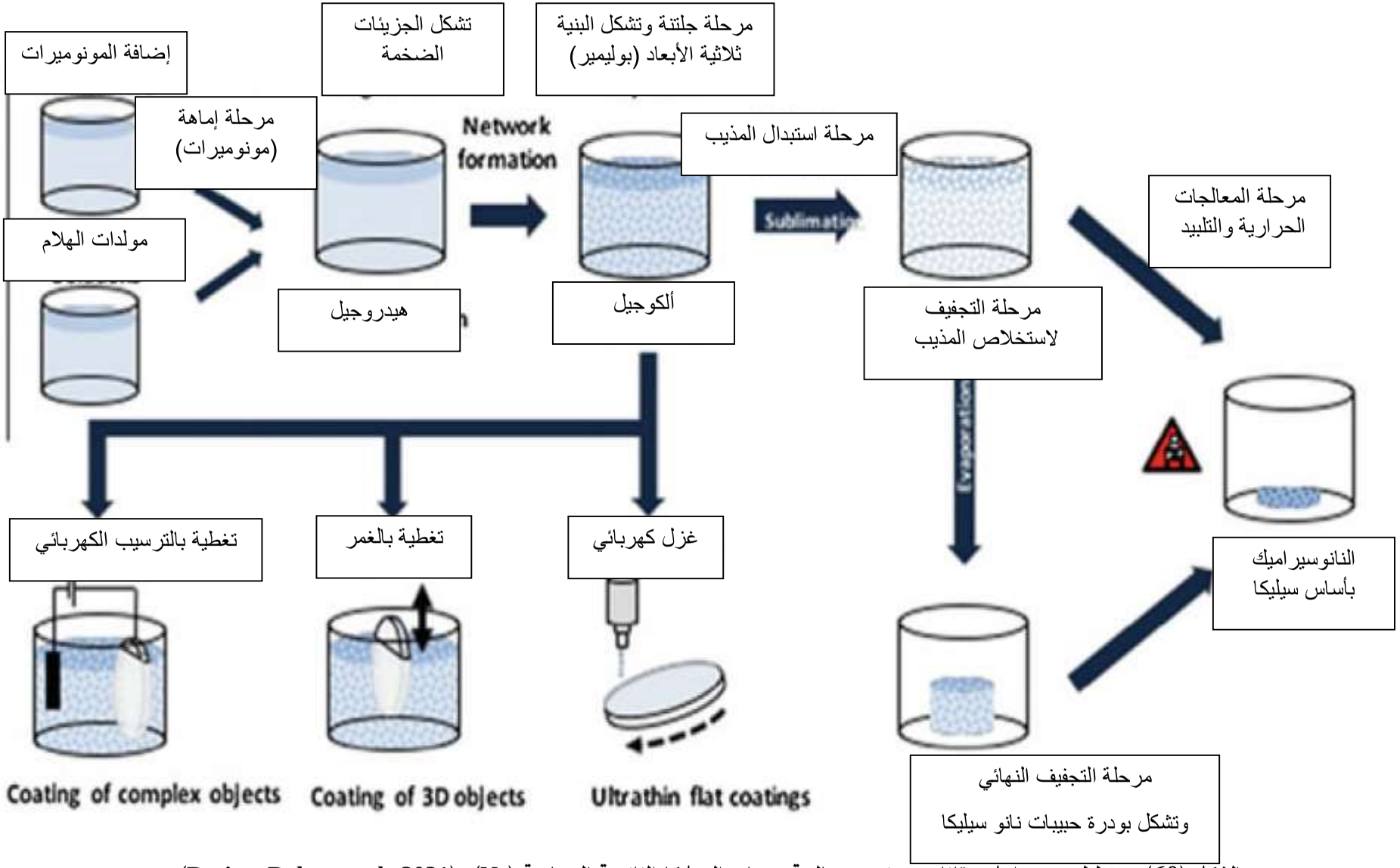
5- حمض كلور الماء الممدد، عند الحاجة فقط للحفاظ على حموضة (PH) الوسط ضمن المجال (3-4.5)، وإتمام تفاعل الحلمهة بتجانس المزيج.

6- أمونيا (25-28%)، حيث تضاف قطرة قطرة بعد انتهاء تفاعل الحلمهة وحموضة الوسط مستقرة مع التحريك المستمر بالخلاط المغناطيسي دون تسخين، ونراقب حموضة الوسط حتى تصبح بالقيمة بين (7-8)، نوقف عندها إضافة الأمونيا ونتابع التحريك لدقيقتين، ثم نصب المزيج ضمن المحاقن (السيرنكات) الاسطوانية، ونتركه ليتكاثف، والوسط الناتج يدعى هيدروجيل (Hydrogel). الشكل (61).

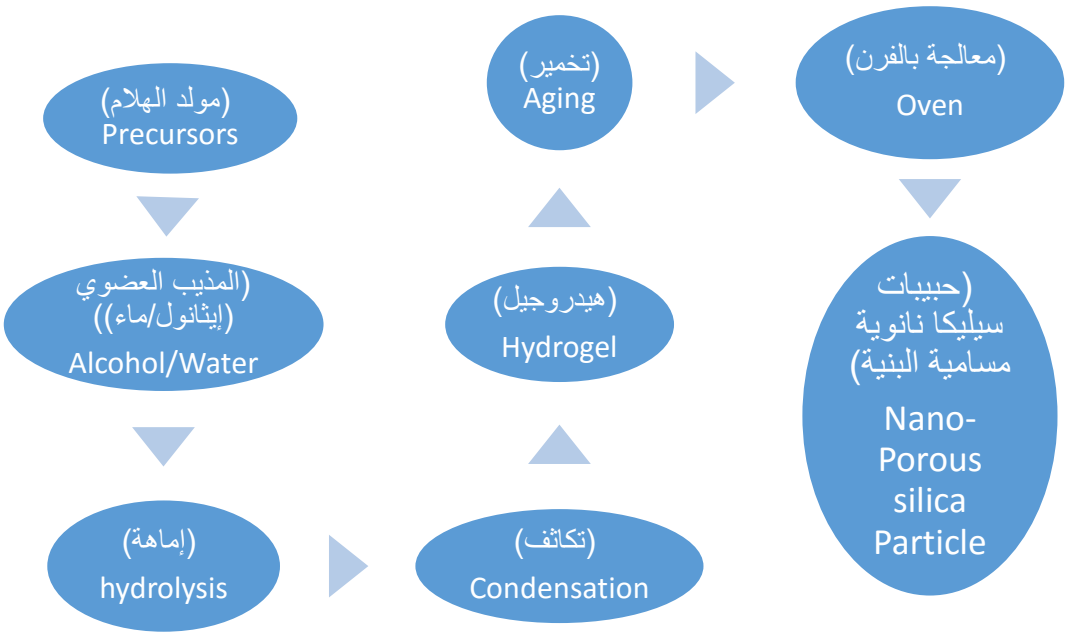
7- الغسيل المتكرر بالايتانول وفق البند رقم 4.

8- يترك الوسط ليتقادم جيداً بالدرجة (30-35) مئوية، ولمدة (24 ساعة).

9- نظامي الهيكسان المخبري: يستخدم لغسيل كتل المحلول المتكاثفة، والتخلص من مادة الإيثانول، ومن ثم يصبح المحلول المتكاثف ضمن وسط مذيب عضوي (الهيكسان) ذي درجة الغليان والتبخر المنخفضة ومن ثم تنخفض الخاصية الشعرية في البنية، وتحافظ البنية الهيكلية للبولي سيلوكسان على مساميتها العشوائية، حيث نسبة إضافة الهيكسان إلى حجم المادة المتكثفة (1:8).



الشكل (60): مخطط يبين مراحل وتقانات تحضير ومعالجة حبيبات السيليكا النانوية المسامية (Ns)، (Dmitry Bokov *et al.*, 2021).



الشكل (61): مخطط توضيحي لتقنية المحلول في تحضير حبيبات النانو كإحدى تقانات علم النانوتكنولوجي في تطوير العزل الذكي للأبنية الحديثة

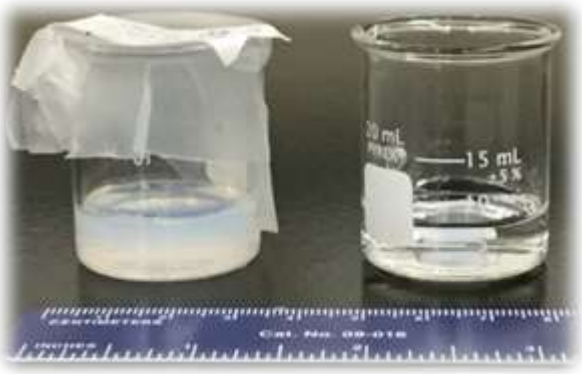
10- يتم تكرار عملية الغسيل بالهيكسان ثلاث مرات وكل مرة يترك الوسط ليتقادم ضمن الشروط المذكورة في الخطوة رقم 8.

11- ثم يتم التجفيف بالجو العادي ولمدة يومين بنزع كتل المحلول المتكاثفة من وسط الهيكسان وتركها ضمن بيشر في جو المختبر.

12- ثم يتم التجفيف بفرن يعمل بالتسخين الهوائي بالدرجة (70°C) مدة ساعتين، ثم تليها معالجة بجو المختبر لمدة يوم كامل (24 ساعة)، ثم تليها معالجة بالفرن بالدرجة (120°C) مدة ساعة، ثم تليها مرحلة التلبيد و المعالجة بالفرن بالدرجة (400°C) مدة (20) دقيقة، وبتسارع حراري (5 °C/min)، ثم تبريد بطيء داخل الفرن.

(تم اعتماد هذا البرنامج في المعالجات الحرارية من خلال مراجعة الدراسات المرجعية ذات الصلة بموضوع البحث، والمبينة في الفصل الأول من هذا البحث، بالإضافية للدراسة المرجعية (Ajay, 2017)).

عندها نحصل على حبيبات السيليكا، وبتقانات بسيطة، وهي جاهزة للتوصيف والاختبار، ومن ثم الدخول ضمن مكونات مصفوفة المادة النسيجية المركبة. الشكل (62) والشكل (63).



الشكل (62): يبين البيشر الأيمن محلول تفاعل الحلمهة، ويبين البيشر الأيسر محلول تفاعل التكاثف ضمن الايثانول

الشكل (63): يبين حبيبات السيليكا، بعد التجفيف والمعالجة بالفرن

3.5.4. تحضير البنية النانوية شبه المسامية (Mesoporous):

يمكن مزج الألياف والنسج خلال مراحل التحضير الأولية للمحلول، كما بين ذلك الشكل (59)، لكن في العمل الحالي تم خلط هذه المادة الداعمة من الألياف والنسج مع حبيبات النانو الجاهزة لاحقاً ضمن حافظة مقولبة من مصفوفة المادة الرابطة (الريزين) التي تُحمَّل على المادة النسيجية بالرول أو بالفرشاة أو بالرذاذ، الشكل (65)، ومع وجود إضافة مدروسة بنسب وزنية محددة للألياف الميكروية (زجاجية أو بازلتية)، بالعودة للدراسات المرجعية ذات الصلة، وُجد أن نسب إضافة الحبيبات النانوية يتراوح بين (0,5%، 1%، 3%، 5%، 7,5%، 10%)، وأي إضافة فوق (10%) لن تؤدي إلا إلى زيادة غير مرغوبة بالكلفة، لذا وبسبب ارتفاع كلفة تصنيع حبيبات السيليكا النانوية (Ns) سواءً بسبب صعوبة توافر المواد الأولية أو غلاء ثمنها أو كلف تقانات التحضير، ولأن حبيبات السيليكا التجارية (Aerosil®200) منخفضة الكلفة ومتوافرة في السوق المحلية، وبهدف الحصول على البنية شبه المسامية (Semi-Porous)، التي تحقق العزل الحراري والصوتي معاً برتبة النانومتر، لذا تم خلط كلا المادتين

النانويتين (Aerosil®200) و (Ns2) بنسبة خلط وزنية (1/1) ليصبح الرمز (Ns)، الشكل (64)، (قد يتطلب الأمر دراسات لاحقة لتحديد الخلط الأنسب من حيث البنية والأداء والكلفة، كأن تُخلط حبيبات الأيروسيل بنسبة 30% وزناً وحبيبات (Ns2) بنسبة 70% مثلاً أو العكس). ومن خلال نتائج توصيف البنية النانوية، الجدول (11) والفقرة (2.2.5)، وبوجود مادة فوم البولي يوريثان (ذات المسامات الميكروية)، سوف تصبح البنية المورفولوجية للمادة النسيجية المركبة نصف مسامية من رتبة (Mesoporous)، بسبب تداخل حبيبات السيليكا النانوية بين فراغات وجدران الفوم المسامي ذات الأبعاد الميكروية والألياف العشوائية ميكروية الأبعاد أيضاً من جهة أخرى، فيصبح عندها الناتج النهائي، ألواح عازلة من مادة نسيجية مركبة معززة بحبيبات السيليكا النانوية المحضرة بتقنية (Sol-gel)، الشكل (65)، كمنتج عازل للأسقف والجدران والأرضيات وبالسماكات المطلوبة، وبما يتناسب مع الدليل الشامل في العزل الحراري والصوتي للأبنية الحديثة، والأطلس السوري للعزل الحراري.

الشكل (64): يبين صور عينات المسحوق بأساس السيليكا والتي تم تحضيرها وفق تقنية النانو الـ(Sol-gel)

الشكل (65): يبين ألواح العزل من مادة نسيجية مركبة معززة بحبيبات السيليكا النانوية المحضرة بتقنية (Sol-gel) وآليات تحميل المادة الرابطة (الريزين) على المادة النسيجية

6.4. تصميم العينات وتحضيرها:

لم يُعتمد فقط على الدراسات المرجعية ونتائجها في تحديد النسب الوزنية لمكونات كل عينة من عينات المادة النسيجية المركبة التي تم تحضيرها كعازل صوتي وحراري للأبنية، وإنما أخذت أفضل نتائج تلك الدراسات والمراجع ذات الصلة بموضوع هذا البحث، وأدخلت كمعطيات أولية ضمن برنامج معالجات إحصائية احتمالية (DOE Design Of Experiments)، لتصميم العينات المحضرة، وعددها (130)–عدا عينات الحبيبات النانوية (4 عينات ناجحة، الجدول (4))–وفقاً لاحتمال وضعها البرنامج الإحصائي المذكور، ثم جرى تقسيمها إلى مجموعات، الملحق (2)، وبناءً على النتائج التي توصلت لها الدراسات المرجعية للنسب الأفضل لإضافة الحبيبات النانوية وهي (5%، و 7%، و10% وزناً) لذا اعتمد منها (84 عينة منها فقط، الشكل (66))، ثم حُضّرت تلك العينات واعتبارها جميعاً كمجتمع احصائي، تم اختبار (28 عينة منها كممثلة عن تلك المجموعات) لتحديد كفاءة عزلها للصوت والحرارة، على أجهزة متخصصة وفق مواصفات معيارية عالمية، وبإدخال نتائج تلك الاختبارات ضمن المعالج الاحصائي المذكور نفسه، ليعطي الموديل الأنسب لعزل الأبنية الحديثة، ويبين أثر كل مكون من مكونات المادة النسيجية المركبة على أداء العزل، ومنه تم استقراء معامل (R-squared %)، الذي تجاوز النسبة (88%)، مما يعني مقاربة القيم العملية للنظرية المتوقعة، ومن ثم الاستجابة مرتفعة، والتصميم أقرب ما يمكن للصحة.

1.6.4. الدراسة الإحصائية لتصميم العينات، وفق برنامج (Design Of Experiments DOI):

مراحل وخطوات إجراء الدراسة الإحصائية لتصميم العينات وفق برنامج (DOE Design Of Experiments):

أولاً: إدخال العناصر المتغيرة (المواد الأولية) ومجال قيمها، وفق الجدول (9) والشكل (66).

ثانياً: إدخال نتائج اختبارات الأداء الوظيفي، الشكل (67).

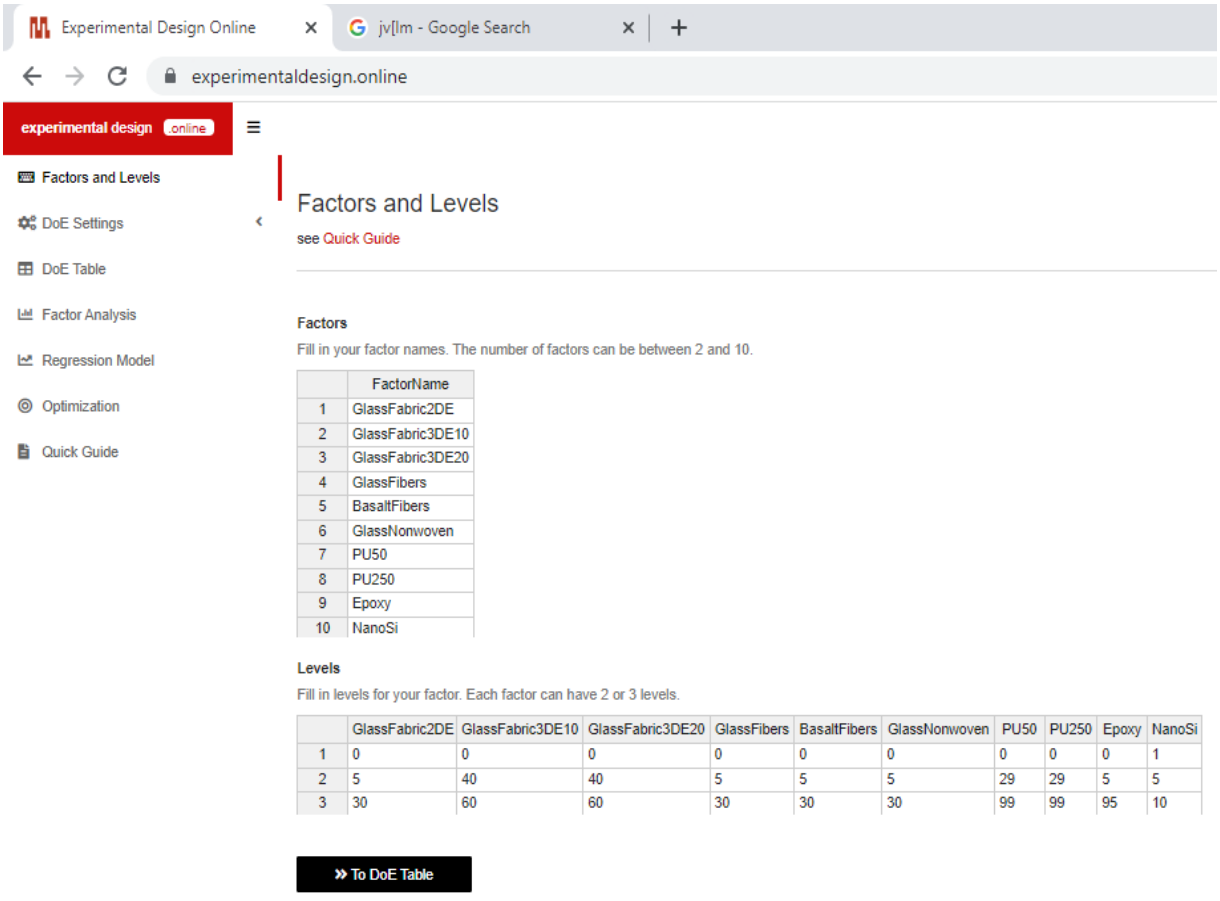
ثالثاً: تحليل بيانات العناصر ومعاملات تأثيرها، الشكل (68).

رابعاً: إنشاء الموديل، الأشكال (69) و(70) و(71).

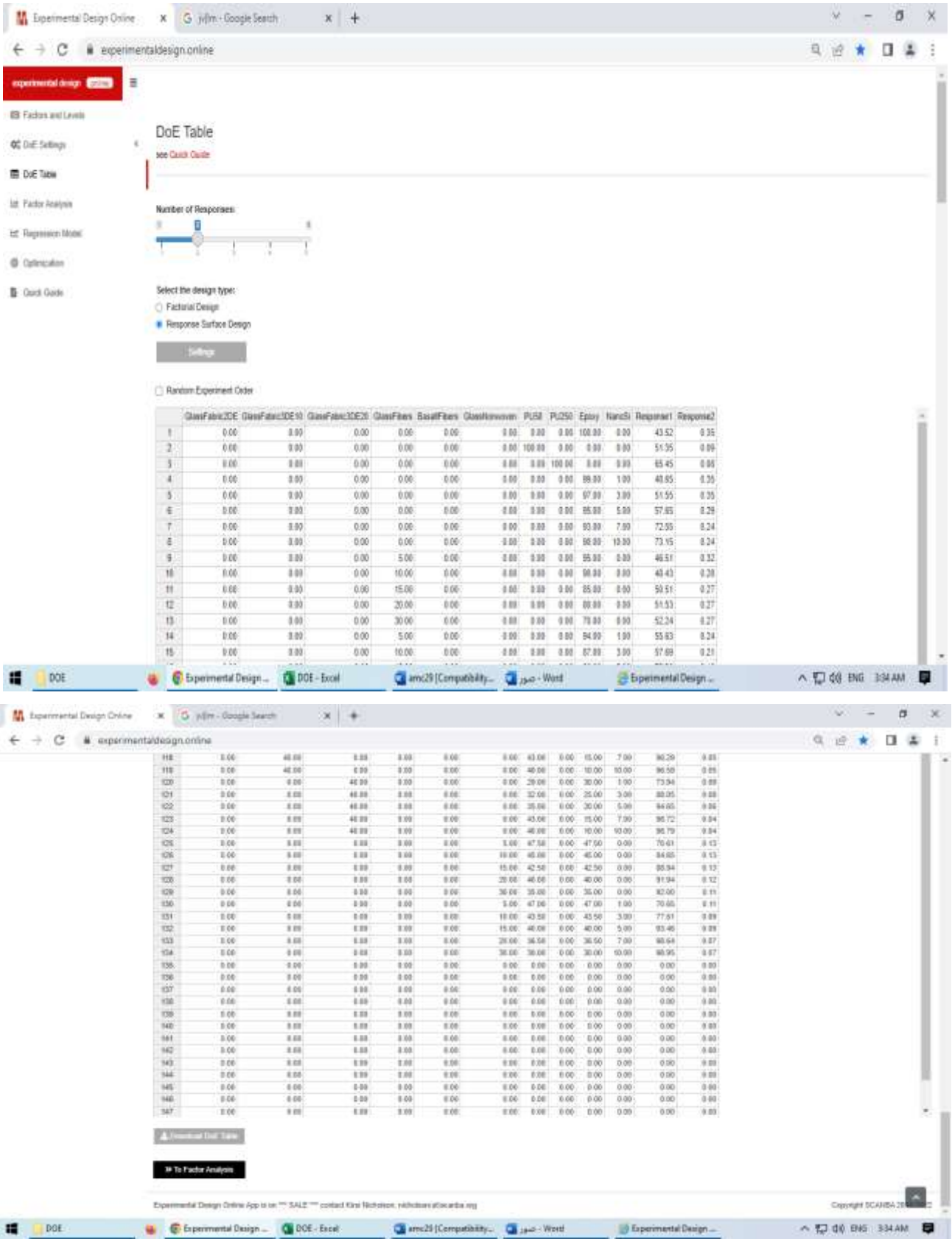
خامساً: تحليل الموديل مقاربة القيم العملية للنظرية المتوقعة، ومن ثم الاستجابة مرتفعة، الأشكال (72) و(73).

الجدول (9): يبين أسماء المتغيرات التي تعبر عن المواد الأولية الداخلة في كل عينة

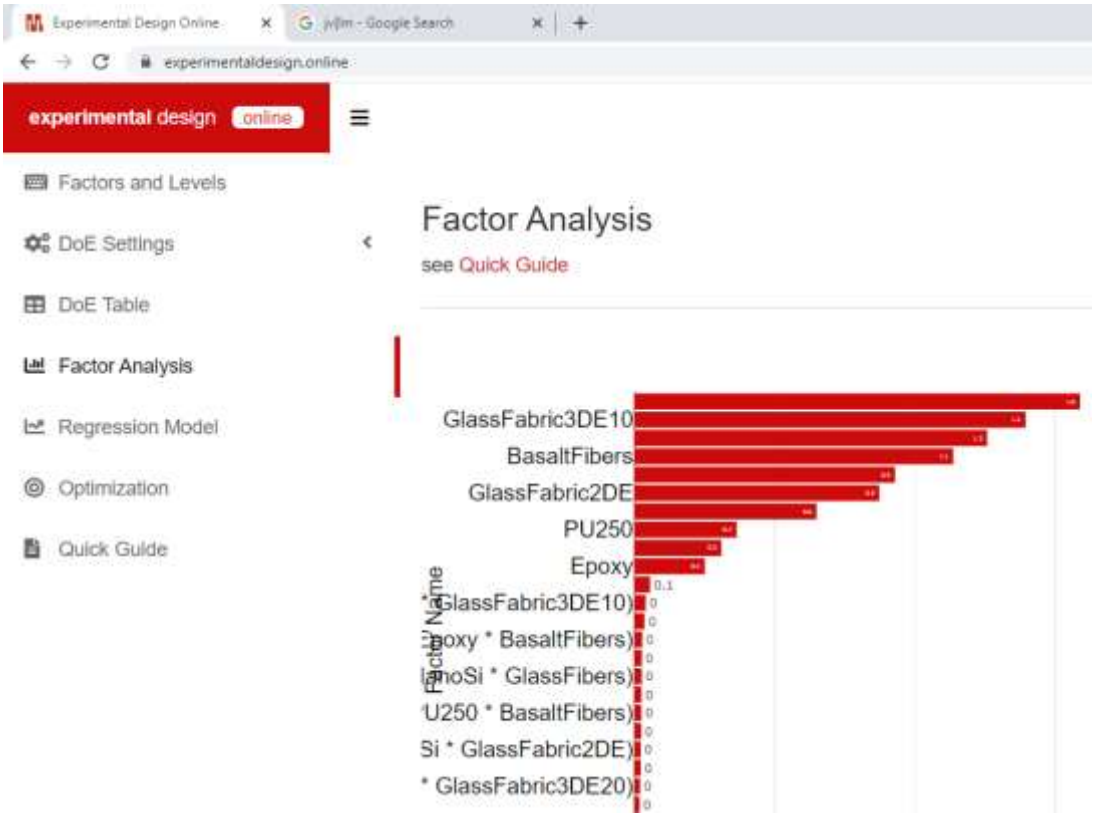
قيم المتغيرات	المتغيرات (المواد الأولية الداخلة في كل عينة)									
	نسيج زجاجي ثنائي البعد	نسيج زجاجي ثلاثي البعد سماكة (10 مم)	نسيج زجاجي ثلاثي البعد سماكة (20 مم)	ألياف زجاجية مقطعة	ألياف بازلتية مقطعة	قماش زجاجي غير منسوج	بولي يوريثان كثافة (250 كغ/م³)	بولي يوريثان كثافة (50 كغ/م³)	إيبوكسي	حبيبات السيليكا النانوية
القيمة 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
القيمة 2	5	40	40	5	5	5	29	29	5	5
القيمة 3	30	60	60	30	30	30	99	99	95	10



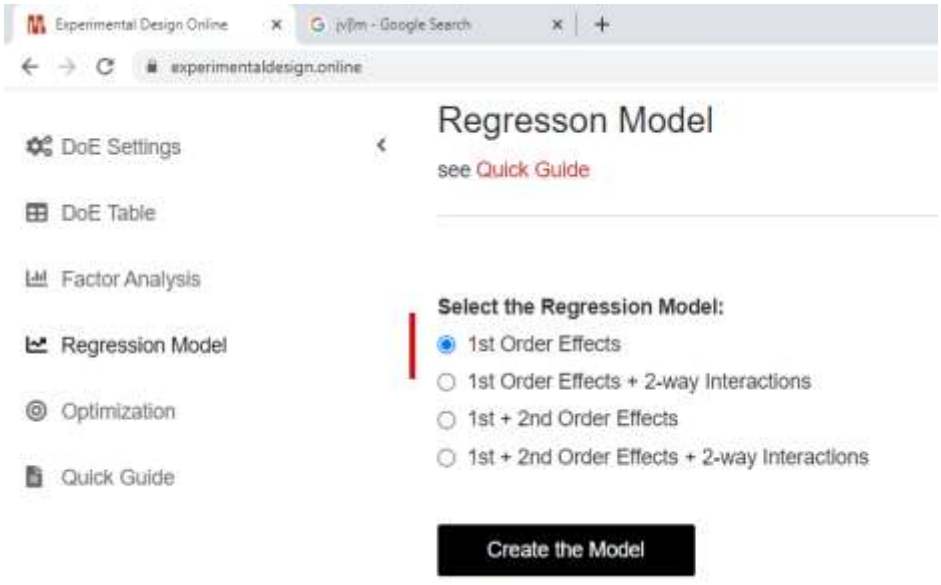
الشكل (66): إدخال العناصر (المواد الأولية) ومجال قيمها



الشكل (67): إدخال محددات اختبار الأداء الوظيفي لـ 130 عينة

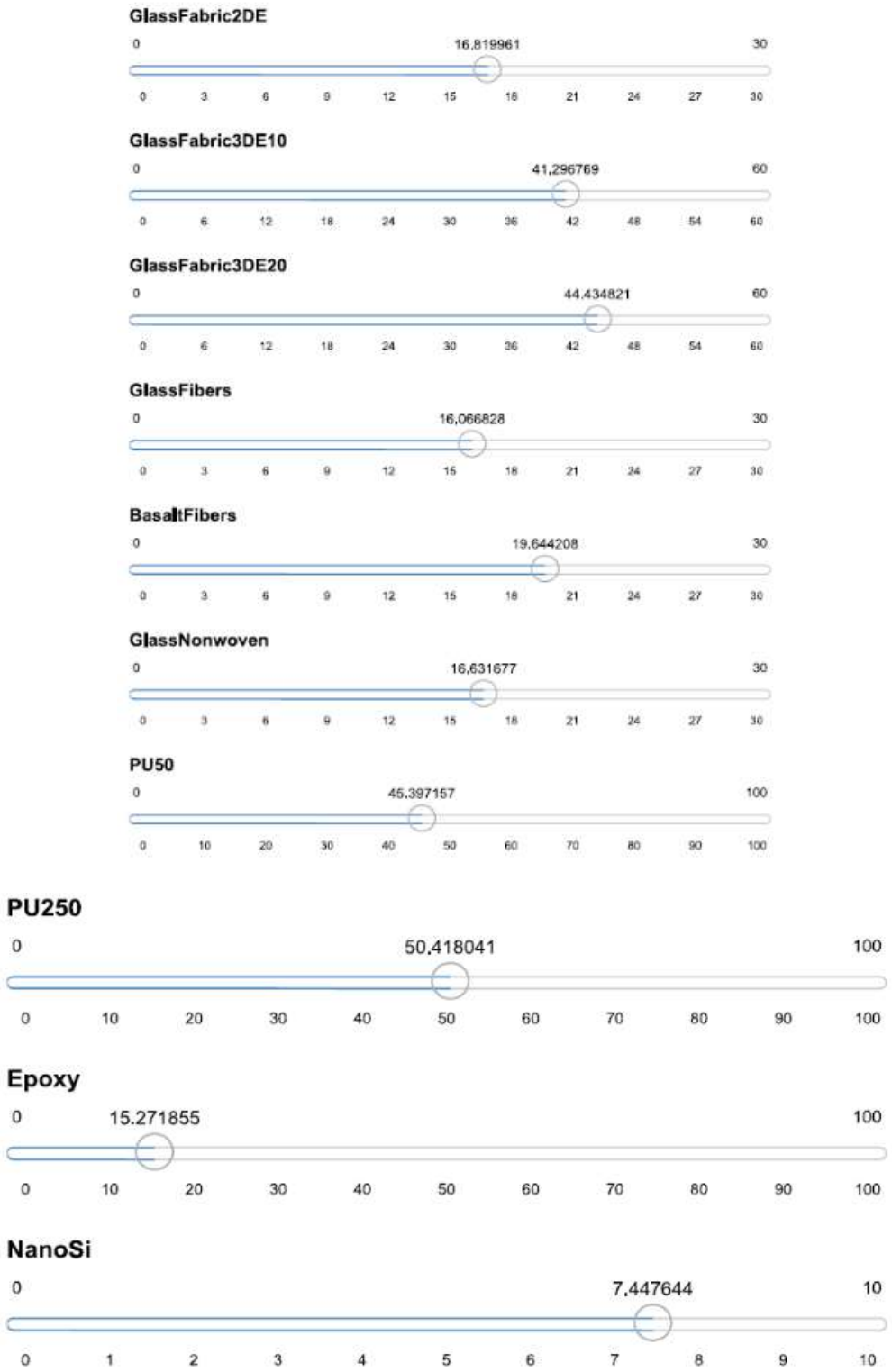


الشكل (68): تحليل بيانات العناصر ومعاملات تأثيرها



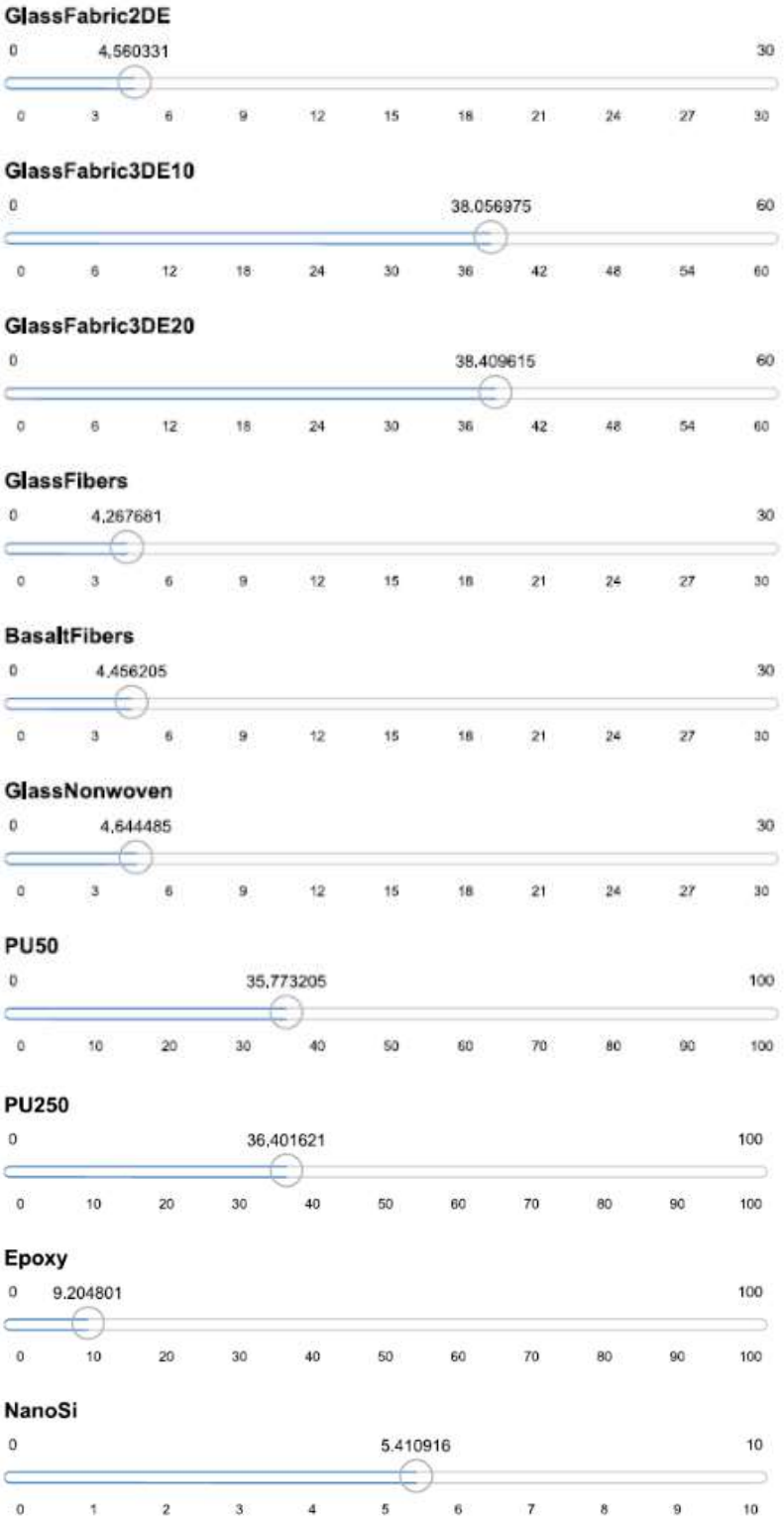
الشكل (69): إنشاء الموديل

ويبين الشكل (69)، بوابة إنشاء الموديل الإحصائي لتصميم كل عينة من عينات المجتمع الإحصائي المقترح من (130) عينة مصممة وفق هذا البرنامج (DOE)، حيث تم اختيار التصميم على المستوى المخبري، علماً أنه يمكن في نفس التبويب في هذا البرنامج اختيار تصميم للموديل على المستوى الصناعي (Factorial) والنصف صناعي (Pilot-Semi Factorial).



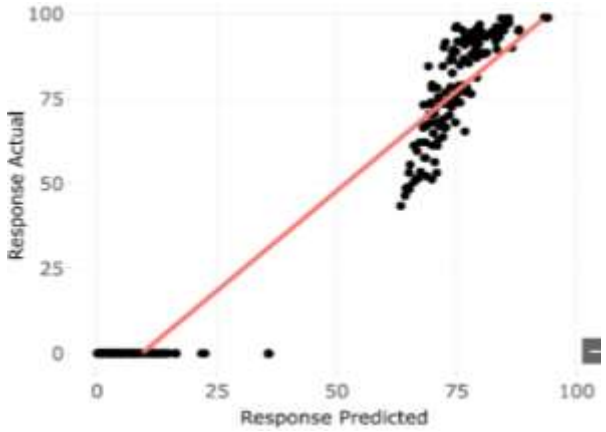
الشكل (70): إظهار أعلى قيمة للعناصر (المواد الأولية)

ويبين الشكل (70)، القيمة العظمى لكل متغير (النسب الوزنية لكل مادة أولية)، سيدخل في تركيب كل عينة من عينات المجتمع الإحصائي المقترح من (130) عينة مصممة وفق هذا البرنامج (DOE).



الشكل (71): إظهار أدنى قيمة للعناصر (المواد الأولية)

ويبين الشكل (71)، القيمة الدنيا لكل متغير (النسب الوزنية لكل مادة أولية)، سيدخل في تركيب كل عينة من عينات المجتمع الإحصائي المقترح من (130) عينة مصممة وفق هذا البرنامج (DOE).



الشكل (72): يُلاحظ من تحليل الموديل مقاربة القيم العملية للنظرية المتوقعة، ومن ثم الاستجابة مرتفعة

Statistics:

R-squared = 0.88

Term	Coefficient	p-value
(Intercept)	0.03501	NA
BasaltFibers	0.61396	> 0
Epoxy	0.27546	> 0
GlassFabric2DE	0.88440	> 0
GlassFabric3DE10	0.48748	> 0
GlassFabric3DE20	0.51222	> 0
GlassFibers	0.45493	9e-05
GlassNonwoven	0.85985	> 0
NanoSi	1.32134	> 0
PU250	0.40931	> 0

الشكل (73): يبين الحصول على R-squared=0.88

من الشكل السابق (73)، يُلاحظ أن القيمة الأقل لـ (p-value) هي للألياف الزجاجية، كونها أقل من (0.05)، مما يعني أن لها تأثير مباشر على أداء العينة، لكن بملاحظة المعامل (coefficient) يتبين أن التأثر الأكبر في أداء العزل يعود لحبيبات السيليكا النانوية، يليها استخدام الأقمشة المنسوجة، بنوعيها الثنائي وثلاثي الأبعاد، ويعود تأثير مادتي الإيبوكسي والبولي يوريثان (المستخدم كعازل تقليدي منفرداً دون أية إضافات) أقل من تأثير أي عامل آخر، كما يبدو أن لاستخدام الألياف الميكروية البازلتية المقطعة تأثيراً إيجابياً أكبر من تأثير الألياف الميكروية الزجاجية المقطعة، قد يعود ذلك لكون نسبة السيليكا (SiO_2) في تركيبها تصل حتى (65%)، وهي أعلى مما هي في تركيب الألياف الزجاجية (54%).

2.6.4. تحضير العينات وتوصيفها:

بعد تصميم العينات وفق الدراسة الإحصائية السابقة، سيتم تقسيمها لخمس مجموعات رئيسية، ثم سيتم تحضيرها من مواد أولية متوفرة في السوق المحلية، الشكل (74)، وبالتوافق مع الدليل الشامل للعزل الصوتي والحراري في الأبنية وللأطلس السوري للعزل الحراري من حيث السماكة، وثم ستجري مقارنتها كعينات محسنة باستخدام تقانة النانو مع مواد ومنتجات عزل تقليدية شائعة في السوق المحلية.

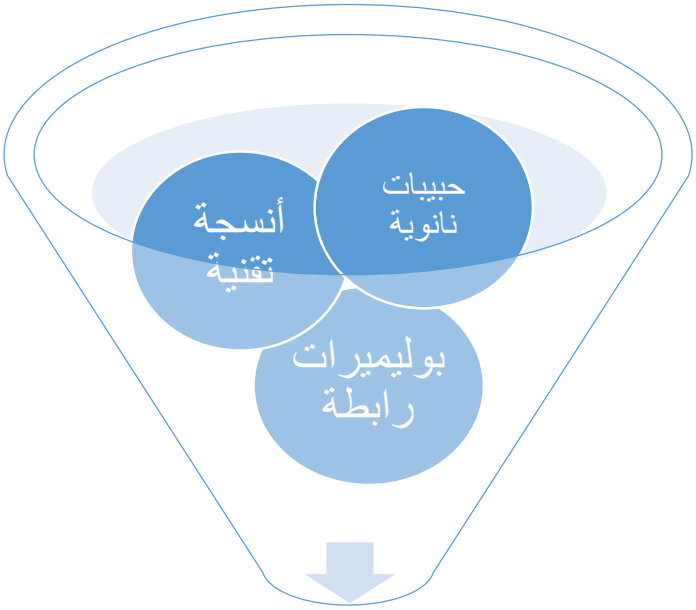
1- عينات مواد مركبة من فوم البولي يوريثان الصلب/الألياف الزجاجية (تقليدي).

2- عينات مواد مركبة من الفوم/الألياف(Ba/E)/الإيبوكسي/النسيج/حبيبات نانوية.

3- عينات مواد مركبة من الإيبوكسي/الألياف الزجاجية والبازلتية/حبيبات نانوية.

4- عينات مواد مركبة من الأقمشة ثنائية وثلاثية الأبعاد والمفرغة/الإيبوكسي/حبيبات نانوية.

5- عينات من ألواح الساندويش العازل (VIPs). **انظر الملحق رقم (2)**



الشكل (74): يبين مكونات كل عينة محضرة كمادة نسيجية مركبة

أولاً»» مصفوفة المادة الداعمة (الألياف والمنسوجات):

الجدول (10): يبين باختصار أسماء وخواص المواد الأولية النسيجية والليفية الداعمة لبنية المادة النسيجية المركبة

م	المادة	التوصيف	$/كغ
1	ألياف زجاجية مقطعة	E-glass chopped strands 6-12 mm	1–1.5
2	ألياف بازلتية مقطعة	Basalt chopped fibers (BCF) 6 mm	0.5–1
3	قماش زجاجي غير منسوج	E-glass Nonwoven mat 300 g/m² Type: Stitch Bonded Mat	1.5–2
4	قماش زجاجي منسوج 2D	E-glass woven 300 g/m², 1/1, 0.23 mm	2–3
5	قماش زجاجي منسوج 3D	E-glass woven 1100 g/m², 1/1, 10 mm	5
6	قماش زجاجي منسوج 3D	E-glass woven 1480 g/m², 1/1, 20 mm	6

ثانياً»» مصفوفة المادة النانوية ومواد الأداء الوظيفي:

الجدول (11): يبين باختصار أسماء وخواص المواد الأولية من بوليميرات وريزينات رابطة وحبيبات نانوية

م	المادة	التوصيف	$/كغ
1	إيبوكسي	Epoxy Resin (A+B)(1:1) 1170 kg/m³	5
2	فوم بولي يوريثان صلب	Rigid polyurethane foam 50-250 kg/m³	4
1	حبيبات نانوية	Mesoporous/silica Nano particles (Ns) + Aerosil® 200	6

وتبين الجداول في الملحق رقم (2). تركيب وتطبيق كل عينة من العينات المحضرة في هذا البحث، كمادة نسيجية مركبة، والنسب الوزنية لمكونات كل عينة منها. كما يبين الشكل (75)، صوراً للعينات المحضرة في هذا البحث.

الشكل (75): صور العينات المحضرة، في هذا البحث بغرض العزل الصوتي والحراري في الأبنية

3.6.4. توافق العينات مع الدليل الشامل للعزل الحراري والصوتي في الأبنية:

بمراجعة الدليل الشامل لمنتجات العزل الصوتي والحراري للأبنية (Arval, 2009)، ومن الأطلس السوري في العزل الحراري للأبنية، وُجد أن أغلب المنتجات العازلة ذات كثافة منخفضة، ويشكل الهواء النسبة الأعظم من بنيتها، وتمتلك سماكات كبيرة، لذا تم عند تحضير عينات هذا البحث، ومقارنةً بمنتجات ذلك الدليل، مراعاة أن تتراوح السماكة بين (100–35 مم) وفقاً للدليل (Arval, 2009)، وبالسماكة (65–35 مم) وفق الأطلس السوري في العزل الحراري للأبنية، (ناعمة، 2010). ومأخوذاً بالحسبان عامل الكلفة، تم تخفيض سماكة العينات المحضرة في هذا البحث لتصبح (45–40 مم).

4.6.4. خطوات تحضير وتصنيع العينات:

أولاً: إضافة المواد النانوية والليفية الداعمة والوظيفية إلى البنية:

1- يتم مزج حبيبات السيليكا النانوية مع مادة البوليول يدويا ضمن وعاء بلاستيكي باستخدام سباتولة خشبية، حتى تمام التجانس الذي يتم التأكد منه بتجانس لون المزيج ليصبح أبيضاً حليبيّ، مما يدلّ على توزع منتظم لمسحوق الحبيبات الأبيض ضمن خليط مادة الريزين، ووفق النسب الوزنية لتركيب كل عينة، انظر الملحق رقم (2).

2- تُضاف الألياف الميكروية المقطعة زجاجية نوع (E)، أو بازلتية بحسب نوع العينة، إلى مادة الايزوسيانات، وتخلط جيداً بنفس الطريقة السابقة حتى تمام التجانس.

من هنا أتى تأثير علم النانو في تفعيل المسامية النانوية، وزيادة مساحة السطح النوعي للبنية بالنسبة لواحدة الوزن.

ملاحظة: تختلف مواد البوليول والإيزوسيانات بنسب خلطها وفقاً للكثافة المطلوبة من فوم البولي يوريثان الصلب الناتج، إذ لكثافة (50 كغ/م3) تكون النسبة (1.2:1) بالترتيب، ولكثافة (250 كغ/ م3) تصبح النسبة الوزنية (1:1). كما يتم الوزن بميزان دقيق.

ثانياً: تشكيل نواة العينة العازلة (Core material):

3- صب مادة فوم البولي يوريثان الصلب: يُخلط المزيج المتجانس بالخطوة 1 مع الخليط المتجانس الثاني بالبند 2، آنفي الذكر، وبسرعة ولمدة (60-40 ثانية)، يُصب ضمن قالب، لتقويم المزيج بالأبعاد والسماكة المطلوبة.

ثالثاً: إضافة المادة النسيجية الداعمة:

4- بعد نزع المادة الصلبة المفومة من القالب المذكور، تنضد طبقات من النسيج الزجاجي غير المنسوج 2DEmat، أو المنسوج 2DE، أو ثلاثي الأبعاد بنوعيه 3DE10 و 3DE20، على شكل (طبقتين فقط واحدة علوية والأخرى سفلية لتحيطان بسماكة مادة الفوم وفق البند 3 آنف الذكر)، وكل عينة وفق تركيبها ونسب مكوناتها، انظر في الملحق رقم (2).

رابعاً: الطلاء العاكس والمادة الرابطة (ريزين الإيبوكسي):

5- يتم يدوياً، وباستخدام سباتولة خشبية ضمن وعاء بلاستيكي، خلط مكوني مادة الإيبوكسي (A+B) بنسبة وزنية (1:1)، بعد وزن كل منهما على حدا بميزان دقيق.

6- يتم يدوياً وباستخدام الفرشاة، طلاء خليط الإيبوكسي المحضر في المرحلة السابقة، وذلك حتى تمام إشباع طبقتي النسيج العلوية والسفلية به، ويتم التأكد من حالة الاشباع عندما يتم تشريب كامل مناطق النسيج بالريزين.

7- أما في حال احتواء العينة على حبيبات سيليكا نانوية كخليط مع الإيبوكسي فيتم خلط مكوني الإيبوكسي مع الحبيبات حتى تمام التجانس، ثم يتم تشريب طبقتي النسيج به، يدوياً بالفرشاة. على ألا تتعدى النسبة الوزنية الإجمالية للحبيبات عما هو مصمم، انظر جداول الملحق رقم (2).

8- تُترك العينة المحضرة لتجف حتى صباح اليوم الآتي، لتصبح جاهزة للاختبارات.

خامساً: متطلبات السلامة المهنية:

عند التعامل مع المواد الأولية سواءً كانت أقمشة ومنسوجات وألياف زجاجية أو بازلتية، أو كانت مواد فوم بولي يوريثان، أو مسحوق من الحبيبات النانوية، ونظراً للمخاطر التنفسية والجلدية التي يسببها التعامل المباشر مع تلك المواد، يجب ارتداء قفازات طبية، ونظارات واقية للعينين، وكمامات ورقية، وإبعاد الوجه قدر الإمكان عن المواد.

الفصل الخامس

توصيف العينات وتحليلها واختبارها

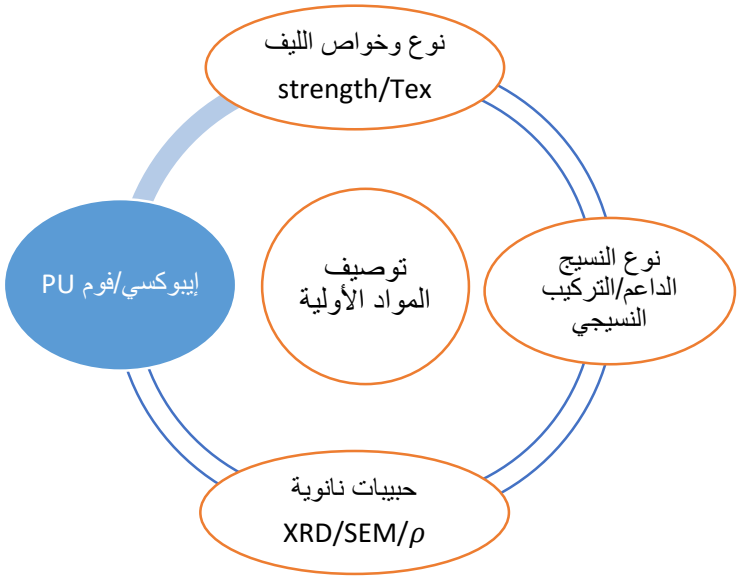
5. توصيف وتحليل واختبار العينات:

1.5. تمهيد:

اعتمدت الدراسات المرجعية ذات الصلة بموضوع هذا البحث، في تقييمها وتوصيفها للمواد النانومترية والبنى المسامية نانوية الأبعاد، على طرائق وتجهيزات تعتمد على تقانات متطورة ومكلفة، مثال الماسح الالكتروني الضوئي (SEM) والتحليل الطيفي لحيود أشعة إكس بطريقة المساحيق (X-Ray Diffraction XRD)، وبالتالي فقد تم اتباعها لتحليل حبيبات السيليكا المحضرة في هذا البحث وتوصيفها.

2.5. تحليل خواص البنية النانوية:

بالعودة لنشرة مواصفات مادة السيليكا النانوية التجارية (Aerosil®200)، (Evonik, 2015)، فهي عبارة عن حبيبات سيليكا (SiO_2) محبة للماء، وغير مسامية البنية، لكن تعدّ ذات خواص مسامية نظراً لأن الهواء يُشكل حتى (98%) من حجمها، وبسبب كثافتها المنخفضة، وأبعاد حبيباتها النانوية حتى القيمة (20 nm).



الشكل (76): مخطط توضيحي لمكونات المادة النسيجية المركبة المحسنة باستخدام تقانة النانو للعزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة

1.2.5. تحليل الكثافة ودرجة المسامية والخواص الحرارية:

أولاً: اختبار الكثافة والمسامية والناقلية الحرارية:

تم قياس الكثافة والمسامية للحبيبات النانوية، باستخدام الجهاز (Lab World Porosity Density Tester)، وفق المواصفة القياسية (ASTM C373)، ويبين الجدول (12)، النتائج الخاصة بعينات هذا البحث.

كما اختُبرت الناقلية الحرارية باستخدام الجهاز (Mathis TCI 25 C-therm)، الذي يتم العمل فيه وفق المواصفة (ASTM D7984)، لمسحوق الحبيبات الناعمة (بشرط ألا تقل كمية البودرة عن 40 سنتيمتر مكعب ووضعت ضمن بيشر مخصص للعمل على الجهاز ووضع الحساس فوق البودرة مقلوباً رأساً على عقب)، أما بالنسبة للمواد المركبة (عينات العزل لهذا البحث) فقد وُضعت العينة فوق الحساس، ثم وضع فوق العينة وزن تثبيت. أُجري الاختبار خارج الغرفة المناخية في جو المخبر، وكانت النتائج مبينة وفق الجدول (12).

الجدول (12): نتائج قياس الكثافة والمسامية ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل (λ) لعينات حبيبات نانو سيليكا منفردة ثم مع مادة الإيبوكسي كوسط حامل للحبيبات

م	رمز العينة	نسبة حبيبات السيليكا النانوية (W%)	نسبة مادة الإيبوكسي W%	معامل انتقال الحرارة ($\boldsymbol{\lambda}$ W/m.K)	الكثافة (kg/m^3)	المسامية %
1	NS1	100	0	0.04	80	83
2	NS2	100	0	0.03	20	92
3	*NS1EP	20	80	0.08	900	68
4	NS2EP	40	60	0.07	800	74

* NS: Nano Silica مسحوق سيليكا ، 1,2: رقم عينة اختبار مسحوق الحبيبات ، EP: Epoxy راتنج الايبوكسي

ويمكن بملاحظة النتائج من الجدول (11)، التوصل لما يأتي:

1- في العينتين (1 و 2) يكون معامل انتقال الحرارة بالتوصيل منخفضاً جداً، لكنه ارتفع **فقط** للضعف في العينتين (3 و 4)، مع وجود مادة الإيبوكسي (الكثافة مرتفعة ($1170\ kg/m^3$) والبنية كتيمة غير مسامية)، ذات معامل انتقال الحرارة من رتبة ($0.35\ W/m.K$)، بالمقابل أصبحت العينات جاسئة ومتينة، في ملمس اليد.

2- بالمقارنة بين العينتين (3 و 4) وُجد أن مضاعفة كمية الحبيبات النانوية خفض من معامل انتقال الحرارة بالتوصيل، وكذلك من الكثافة، لكن انخفضت الخواص الميكانيكية للمادة المركبة.

ثانياً: اختبار التحمل الحراري وحساب الفاقد الوزني:

بعد أن حُضّرت عينات حبيبات السيليكا (NS)، وجُففت بالشروط العادية لتصبح على شكل مسحوق ناعم، تمت معالجتها حرارياً بوضعها ضمن مرمدة بدءاً من الدرجة (25 °C) حتى الدرجة (1150 °C) ولمدة (2-3) ساعة متواصلة، ثم أطفئت المرمدة وتركت العينة لتبرد، ثم أخرجت ووزنت لحساب نسبة الفاقد بعدها، وفق الجدول (13).

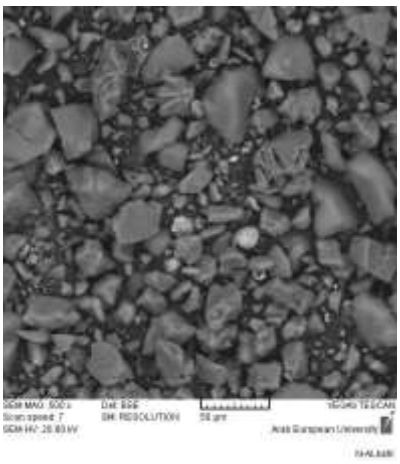
الجدول (13): يبين نسبة الفاقد الوزني بعد المعالجة الحرارية حتى الدرجة (1150 °C) ولمدة (2-3) ساعة

م	رمز العينة	درجة حرارة المعالجة (C°)	زمن المعالجة (hours)	نسبة الفاقد (%)	ملاحظات
1	NS1	1150	3	28.7	مسحوق ناعم
2	NS2	1150	3	27.5	مسحوق ناعم

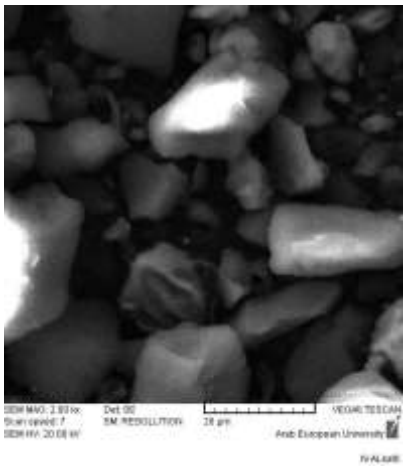
بالمقارنة بين العينة (1) والعينة (2) وُجد أن نسبة فاقد العينات، بعد المعالجة الحرارية القاسية، مقاربة للدراسات المرجعية وهي تقريباً (26%)، وهذا يعني أن المادة المتبقية هي أكاسيد لاعضوية لامعدنية (SiO_2) سيليكا، كون المواد العضوية تتحلل حرارياً عند الدرجة (800°C)، وأن الفاقد الضائع خلال الاختبار هو رطوبة محتواة بالعينة.

2.2.5. التحليل باستخدام الماسح الإلكتروني الضوئي (SEM):

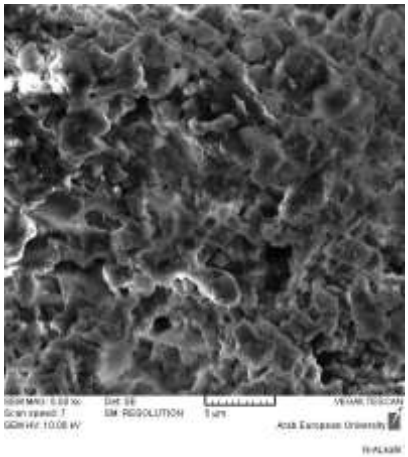
أُجري التحليل (Scanning Electron Microscopy SEM) وفق المواصفة (ISO/21383:2021) باستخدام جهاز الماسح الإلكتروني الضوئي (VEGA\\TESCAN Arab European University)، في هيئة الطاقة الذرية، ويبين الشكل (77)، الآتي، نتائج التحليل لعينات حبيبات نانو سيليكا (بولي سيلوكسان) وملاحظة أبعاد الحبيبات، ويمكن بوضوح ملاحظة مسامات البنية (باللون الأسود العاتم) بين كتل وأعناق تلك الحبيبات وبتوزع عشوائي، ومن رتبة (100) نانومتر. وللاستفاضة بالصور والنتائج، انظر الملحق رقم (3).



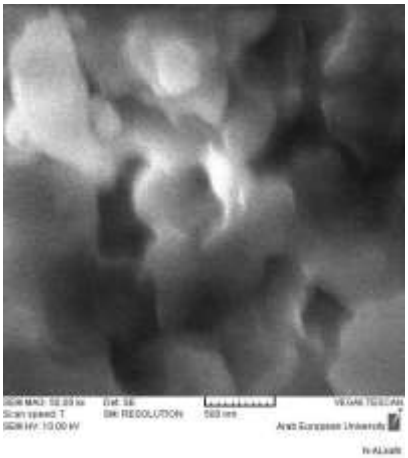
حبيبات نانو سيليكا
أبعادها 5–50 ميكرون تكبير (500x)



حبيبات نانو سيليكا
أبعادها 2–20 ميكرون تكبير (2kx)



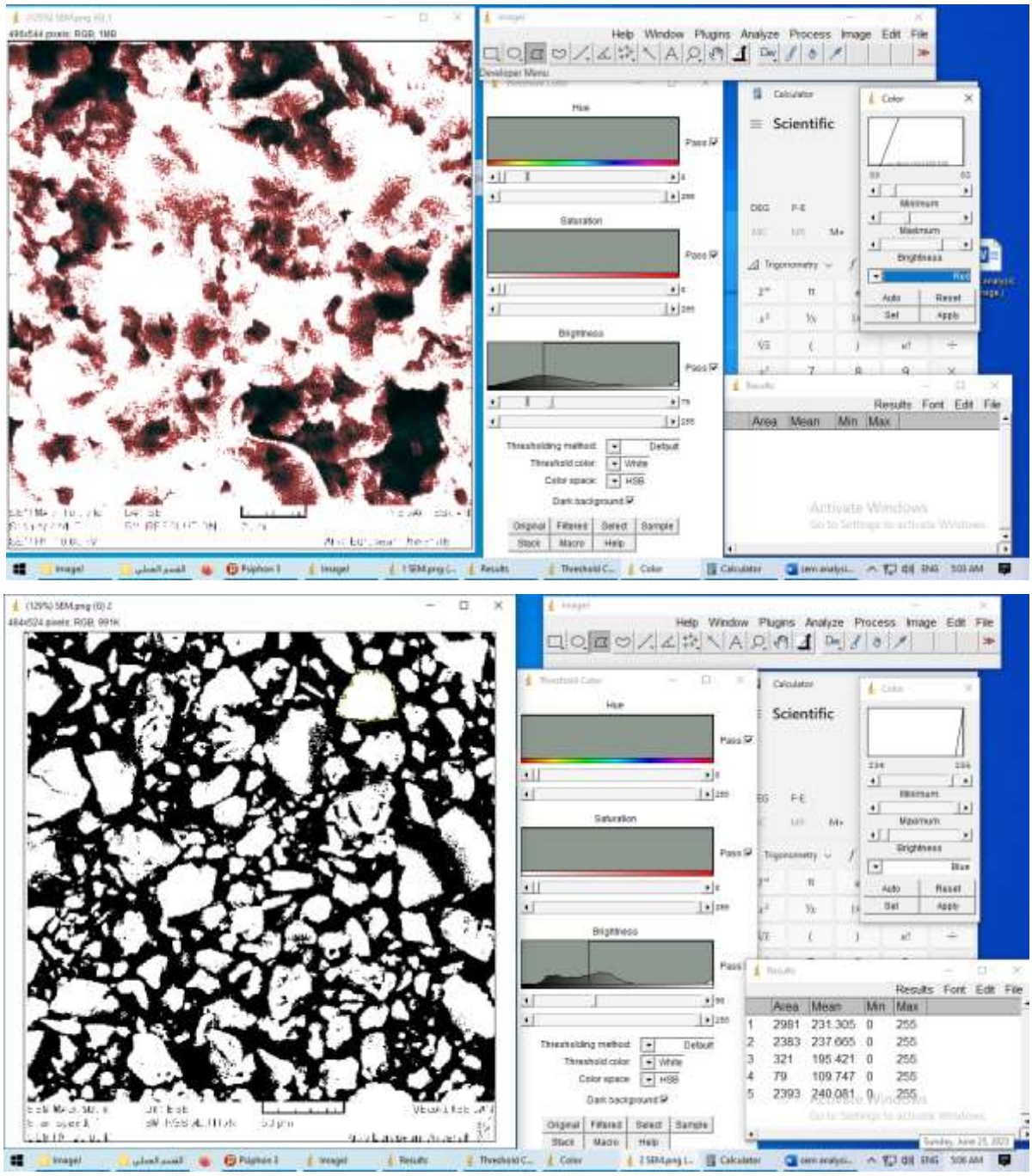
حبيبات نانو سيليكا بتكبير (5kx)
أبعادها 500 نانومتر – 2 ميكرون
أبعاد المسام 100 نانومتر – 1 ميكرون



حبيبات نانو سيليكا بتكبير (50kx)
أبعادها 500 نانومتر – 2 ميكرون
أبعاد المسام 100– 500 نانومتر

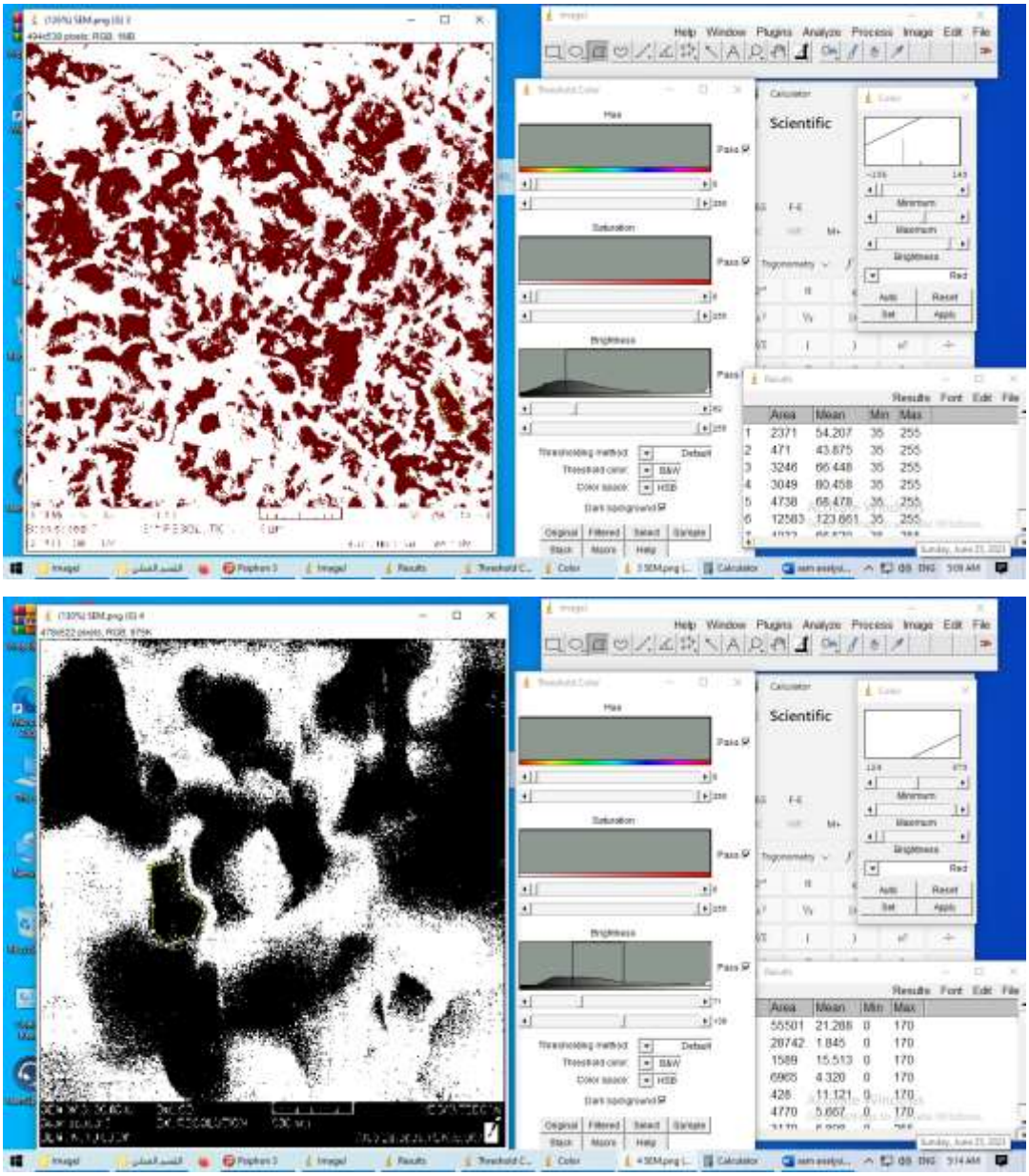
الشكل (77): صور الماسح (SEM) لعينات حبيبات النانو سيليكا المسامية

تحليل صور الـ (SEM) باستخدام البرنامج (SEM Analysis Image J):



الشكل (78): يبين نتائج تحليل صور الـ (SEM) باستخدام البرنامج (SEM analysis image j)

ويظهر في الزاوية اليمنى السفلية أبعاد المسامات في البنية النانوية



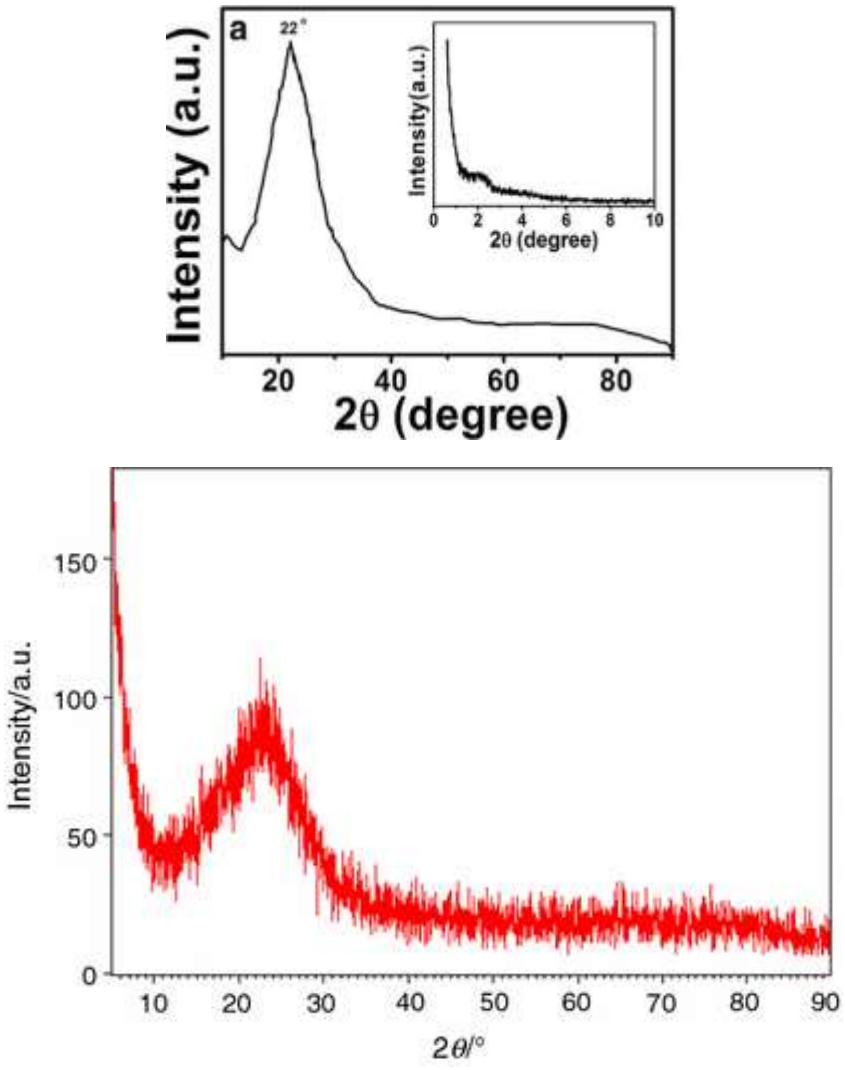
الشكل (79): يبين نتائج تحليل صور الـ (SEM) باستخدام البرنامج (SEM Analysis Image J)

ويظهر في الزاوية اليمنى السفلية أبعاد المسامات في البنية النانوية

من صور ونتائج تحليل (SEM)، وُجد أن أبعاد المسام بين تكتلات الحبيبات النانوية وأعناق الربط فيما بينها، يتراوح بين (4.32) و (240) نانومتر، ووسطي قراءات حجوم المسامات وأبعادها هو (83.39) نانومتر، وبنية المادة نانوية، ومن رتبة (Mesoporous). ستسهم هذه الحبيبات مع الفراغات المسامية لمادة فوم البولي يوريثان مغلق الخلايا، في جعل البنية الإجمالية لمادة (Core Material)، بنية نانوية مسامية نصف مغلقة/نصف مفتوحة، وهذا سيزيد من مساحة السطح النوعي، ورفع قدرة البنية على تشتيت طاقة الموجة الصوتية والحرارية.

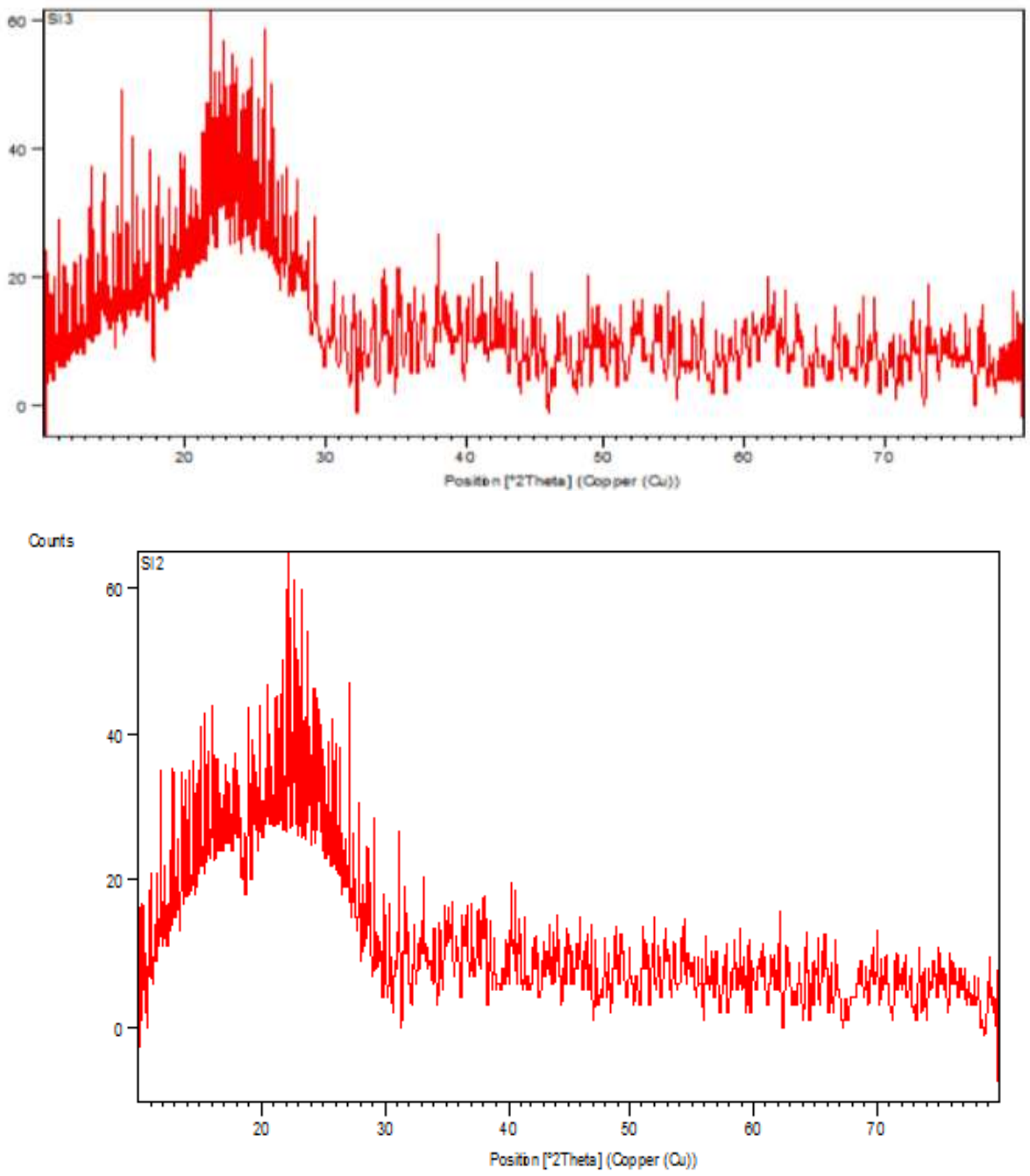
3.2.5. التحليل الطيفي لحيود أشعة إكس بطريقة المساحيق (X-Ray Diffraction XRD):

تُبين الأشكال الآتية (81 و82)، نتائج التحليل الطيفي بتقنية (XRD) لحبيبات السيليكا النانوية المحضرة في هذا البحث، وفق المواصفة (EN13925-1:2003)، والذي أُجري على الجهاز (TESTER X-Ray Diffraction) في قسم الفيزياء في المعهد العالي للعلوم والتكنولوجيا، وبمقارنتها مع مخططات مرجعية، الشكل (80)، وُجد أن البنية عشوائية (Amorphous)، وهي تعود للسيليكا (SiO_2)، حيث أن القمة عند الزاوية (25°) تقريباً تدل على الرابطة (Si-O-Si) التي تعود إلى أوكسيد السيليكا اللاعضوية اللامعدنية (SiO_2).



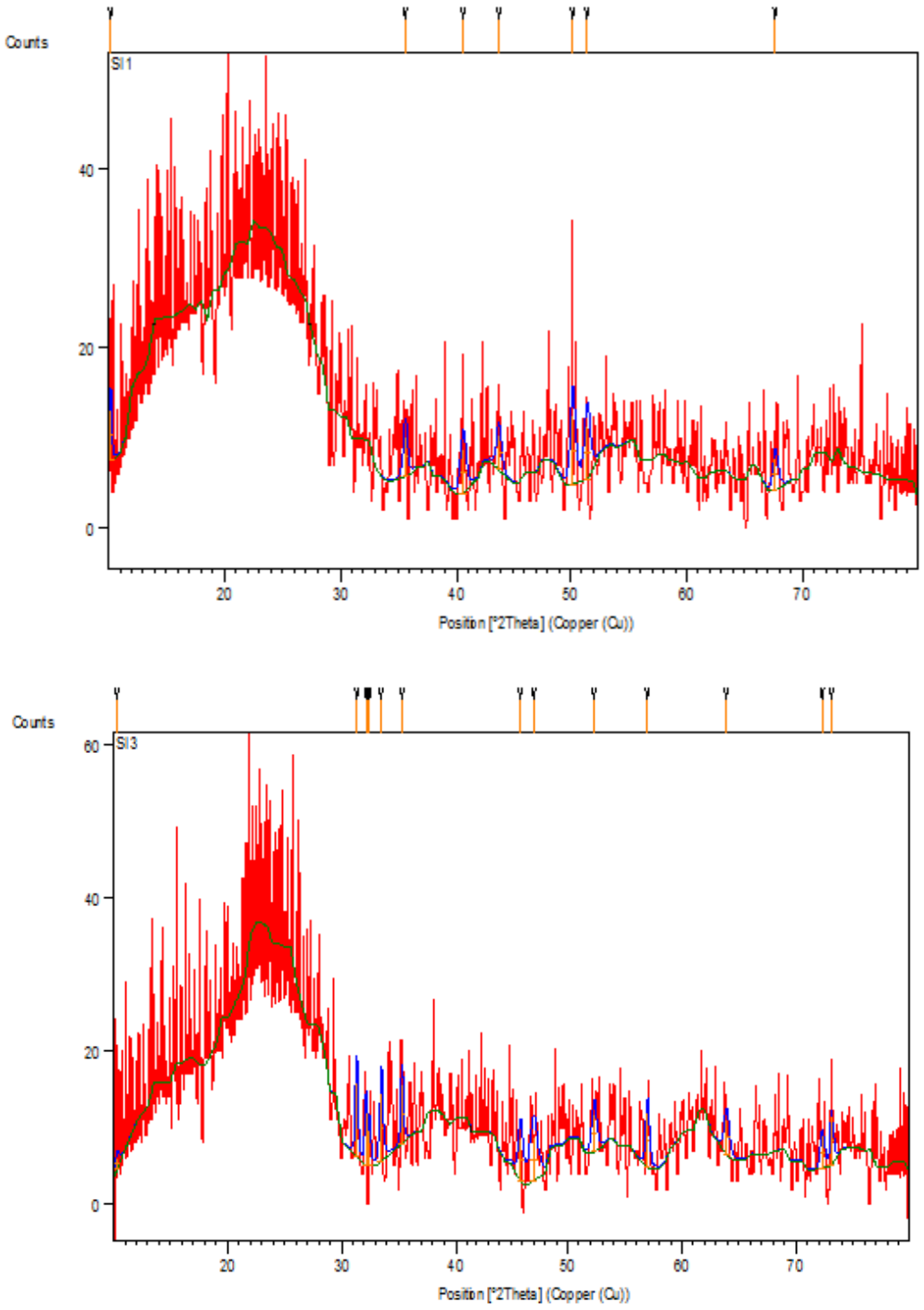
الشكل (80): مخطط تحليل طيفي XRD لعينة مرجعية لحبيبات نانو سيليكا، (Ajay, 2017)

يُلاحظ من مخطط التحليل الطيفي (XRD) وفق الشكل (80)، للعينة المرجعية، أنه ذي قمم غير حادة، وأن رابطة البولي سيلوكسان تقابل الزاوية (25) تقريباً، وعند الشدة (40–60).



الشكل (81): نتيجة تحليل طيفي XRD لعينة حبيبات نانو سيليكا المحبة للماء

من خلال هذه المخططات المبينة في الشكل (81) ، لعينة حبيبات نانو سيليكا المحبة للماء، نجد أن القمة ليست حادة والبنية عشوائية، وتتمركز القمة عند الدرجة (25) تقريباً وشدة تقارب (40)، مما يعني أن الرابطة الكيميائية تعود للبولي سيلوكسان فعلاً (Si-O-Si). يعاني الاختبار من تشويش واضح، مما يتطلب برامج خاصة لإزالة هذا التشويش، (يمكن تحقيق ذلك في دراسات وأبحاث لاحقة).

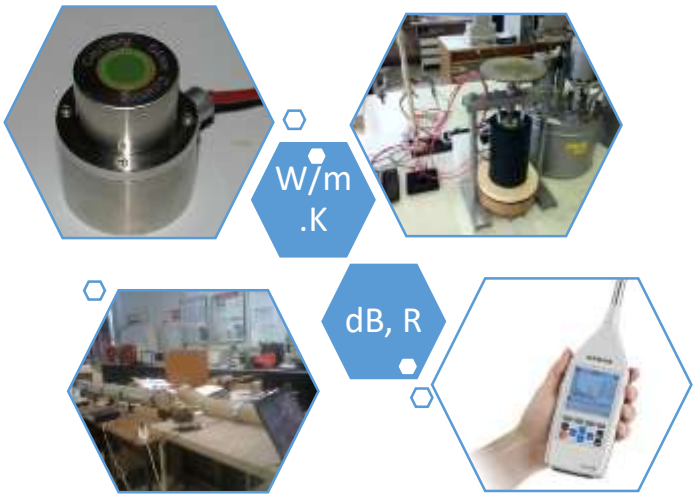


الشكل (82): نتيجة تحليل طيفي XRD لعينة حبيبات نانو سيليكا الكارهة للماء

من خلال هذه المخططات المبينة في الشكل (82)، لعينة حبيبات نانو سيليكا الكارهة للماء، نجد أن القمة ليست حادة والبنية عشوائية، وتتمركز القمة عند الدرجة (25) تقريباً وشدة تقارب (40)، مما يعني أن الرابطة الكيميائية تعود للبولي سيلوكسان فعلاً (Si-O-Si)، بينما القمم الزرقاء الحادة فتعود للصوديوم المتبقي في العينة.

3.5. اختبار العازلية الصوتية والحرارية:

لاختبار كفاءة العزل الحراري لكل عينة، استُخدم الجهاز (Mathis TCI 25 C-therm)، الشكل (83)، والمذكور ضمن الفقرة (4.4) وفق المواصفة (ASTM D7984)، وذلك لاختبار الناقلية الحرارية عبر عينة المادة العازلة بقياس معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (λ (W/m.K))، ومقارنة النتائج مع دراسات مرجعية (كالدراسة (Tomáš *et al.*, 2020) و (Shanaz *et al.*, 2020) والدراسة (Olga et al., 2022)) ذات الصلة بموضوع البحث، ومع خواص منتجات الدليل الشامل للعزل الحراري والصوتي، والأطلس السوري للعزل الحراري، وُجد أنه كلما قلت الناقلية الحرارية، كانت العينة أكثر عازلية للحرارة، وبما أنه اختبار لا اتلافي، فقد أُخضعت العينات نفسها لاختبار عزل الصوت، باستخدام جهاز قياس امتصاص الصوت (Sound card oscilloscope) المقدم من شركة (Christian Zeitnitz) الألمانية، والذي يعمل وفق المواصفة (ASTM C384-04)، والمذكور في الفقرة (4.4).



الشكل (83): يبين الأجهزة المستخدمة في اختبار كفاءة العزل الصوتي والحراري للعينات بغرض عزل الأبنية الحديثة

تم إجراء اختبارات كفاءة العزل الحراري والصوتي على (28) عينة فقط، تُعبّر عن جميع مجموعات عينات هذا البحث، من عازل تقليدي، وأقمشة زجاجية منسوجة وغير منسوجة ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد، وألياف زجاجية وبازلتية مع الإيبوكسي والبولي يوريثان بكثافتين (50-250 kg/m³)، مع أو بدون حبيبات سيليكا نانوية بنسب إضافة (5%) و(7%) و(10%) وزناً وفقاً للدراسات المرجعية ذات الصلة والتي تم ذكرها في الفصل الأول.

1.3.5. اختبار كفاءة العزل الحراري: باستخدام الجهاز (Mathis TCI 25 C-therm).

وتُبين النتائج فيما يأتي: **الجدول (14): نتائج اختبار كفاءة العزل الحراري:**

م	رقم التجربة	رمز العينة	λ (W/m.K)
1	030	PU50E15	0.145
2	032	PU50E30	0.134
3	011	EpE20	0.342
4	016	EpNs7E20	0.316
5	026	PU50Ep63Ns7	0.128
6	046	PU50Ep36.5Ns7E20	0.11
7	050	PU250Ep40Ns5E15	0.093
8	051	PU250Ep36.5Ns7E20	0.092
9	052	PU250Ep30Ns10E30	0.086
10	061	EpNs7Ba20	0.286
11	081	PU50Ep36.5Ns7Ba20	0.084
12	085	PU250Ep40Ns5Ba15	0.072
13	086	PU250Ep36.5Ns7Ba20	0.064
14	090	Pu50EpNs5-2DE15mat	0.091
15	091	Pu50EpNs7-2DE20mat	0.082
16	092	Pu250EpNs7-2DE20mat	0.074
17	096	PU50Ep36.5Ns7-2DE20	0.094
18	097	PU250Ep30Ns7-2DE20	0.084
19	102	Ep35Ns5-3DE10	0.272
20	103	Ep33Ns7-3DE10	0.263
21	117	Pu50Ep20Ns5-3DE10	0.055
22	118	Pu50Ep15Ns7-3DE10	0.047
23	126	Pu250Ep15Ns7-3DE10	0.026
24	107	Ep35Ns5-3DE20	0.225
25	108	Ep33Ns7-3DE20	0.198
26	122	Pu50Ep20Ns5-3DE20	0.045
27	123	Pu50Ep15Ns7-3DE20	0.036
28	129	Pu250Ep15Ns7-3DE20	0.024

2.3.5. اختبار كفاءة العزل الصوتي: باستخدام الجهاز (Sound card oscilloscope).

وتُبين النتائج فيما يأتي: **الجدول (15): نتائج اختبار كفاءة العزل الصوتي:**

م	رقم التجربة	رمز العينة	R_t%
1	030	PU50E15	51.43
2	032	PU250E15	85.55
3	011	EpE20	80.12
4	016	EpNs7E20	91.43
5	026	PU50Ep30Ns7	84.28
6	046	PU50Ep36.5Ns7E20	90.00
7	050	PU250Ep40Ns5E15	93.75
8	051	PU250Ep36.5Ns7E20	95.64
9	052	PU250Ep30Ns10E30	96.05
10	061	EpNs7Ba20	92.37
11	081	PU50Ep36.5Ns7Ba20	84.4
12	085	PU250Ep40Ns5Ba15	94.41
13	086	PU250Ep36.5Ns7Ba20	96.94
14	090	Pu50EpNs5-2DE15mat	87.14
15	091	Pu50EpNs7-2DE20mat	91.43
16	092	Pu250EpNs7-2DE20mat	97.85
17	096	PU50Ep36.5Ns7-2DE20	87.14
18	097	PU250Ep30Ns7-2DE20	98.75
19	102	Ep35Ns5-3DE10	85.71
20	103	Ep33Ns7-3DE10	89.42
21	117	Pu50Ep20Ns5-3DE10	92.86
22	118	Pu50Ep15Ns7-3DE10	99.35
23	126	Pu250Ep15Ns7-3DE10	99.57
24	107	Ep35Ns5-3DE20	90.12
25	108	Ep33Ns7-3DE20	93.21
26	122	Pu50Ep20Ns5-3DE20	94.65
27	123	Pu50Ep15Ns7-3DE20	99.64
28	129	Pu250Ep15Ns7-3DE20	99.7

يُلاحظ من مخططات مطال موجة الصوت، ما يأتي: (انظر الملحق رقم 3، للاستفاضة بصور النتائج):

1- مطال موجة الصوت من دون وجود المادة العازلة (العينة) في المجموعة الأولى (276.2 m)، الشكل (78)، والثانية (346.5 m)، الشكل (79). وأُجريت الاختبارات عند تواتر اهتزاز (1000-47 هرتز).

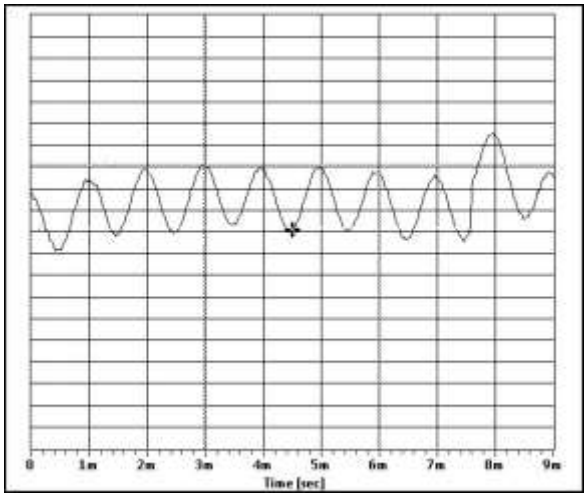
2- من مجموعة الاختبار الثانية: لوحظ انخفاض طول موجة الصوت الصفرية بشكل كبير وواضح بعد وضع المادة العازلة (العينة) لتصل في أفضل العينات حتى (0.8295 m) وفي أسوئها حتى (54.91 m) أي تراوحت كفاءة العزل الصوتي بين (80.12%) و (99.7%).

3- عند اختبار عينة الفوم (العازل التقليدي): انخفض مطال الموجة حتى (168.8) فقط، أي إن كفاءة العزل الصوتي لم تتعدّ (51.43%) باستخدام (PU50)، و (85.55%) باستخدام (PU250).

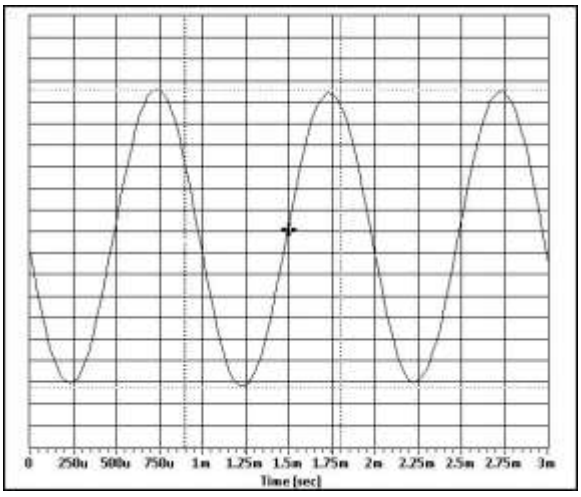
4- أثبتت النتائج فاعلية استخدام تكنولوجيا النانو والحبيبات النانوية البنى والمسام في العزل الصوتي.

الجدول (16): يبين طول موجة الصوت النافذة عبر كل عينة من عينات العزل الصوتي المحضرة

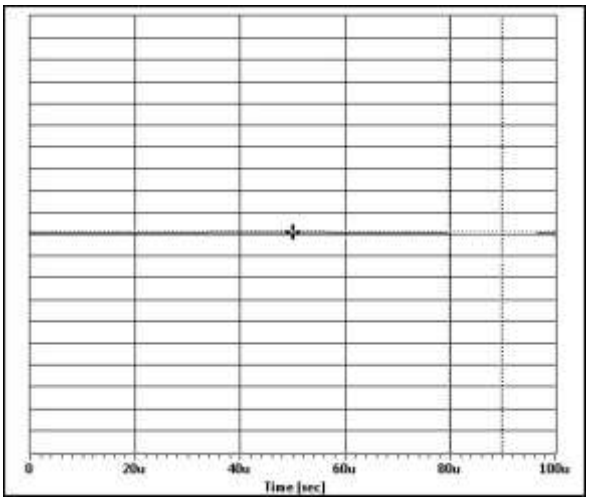
م	رقم العينة	طول موجة الصوت مع العينة [m]	التردد [Hz]	طول الموجة الصفرية [m]	رقم العينة	طول موجة الصوت مع العينة [m]	التردد [Hz]	طول الموجة الصفرية [m]
1	0	276.2	1000	0	0	346.5	1000	0
2	103	29.21	1000	276.2	051	12.042	1000	276.2
3	092	5.941	1000	276.2	052	10.909	1000	276.2
4	097	3.465	1000	276.2	085	15.439	1000	276.2
5	126	1.188	1000	276.2	108	18.753	1000	276.2
6	118	1.782	1000	276.2	102	49.5	47.625	346.5
7	086	8.455	1000	276.2	046	34.65	47.635	346.5
8	061	21.085	1000	276.2	026	54.46	1000	346.5
9	129	0.8295	1000	276.2	016	29.7	47.167	346.5
10	011	54.91	1000	276.2	090	44.55	1000	346.5
11	050	17.262	1000	276.2	030	168.3	1000	346.5
12	122	14.776	1000	276.2	081	54.46	1000	346.5
13	123	0.994	1000	276.2	032	39.91	48.484	346.5
14	096	35.51	1000	276.2	091	29.7	48.192	346.5
15	107	34.65	48.26	346.5	117	24.75	53.139	346.5



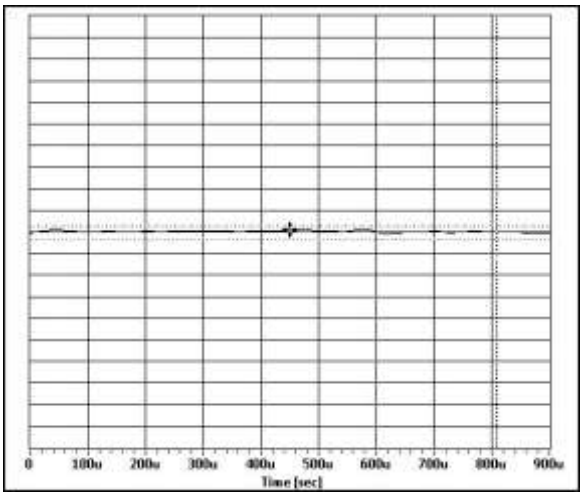
103



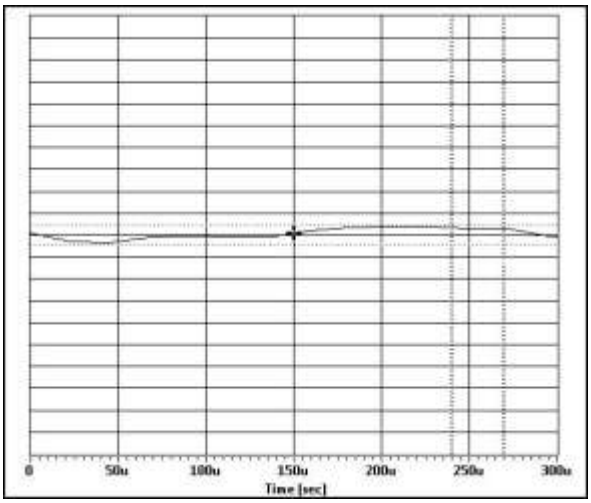
الموجة الصفرية1



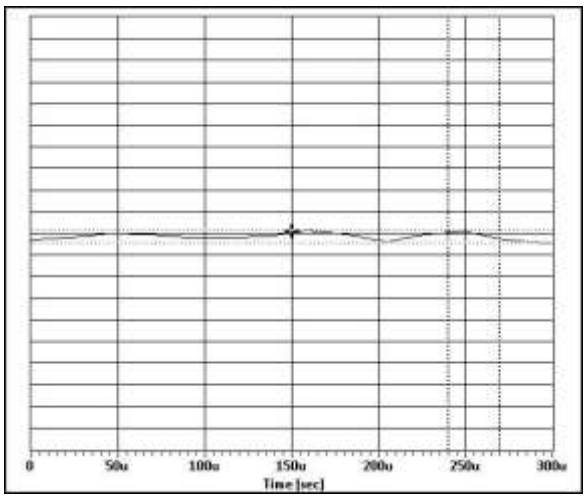
097



092

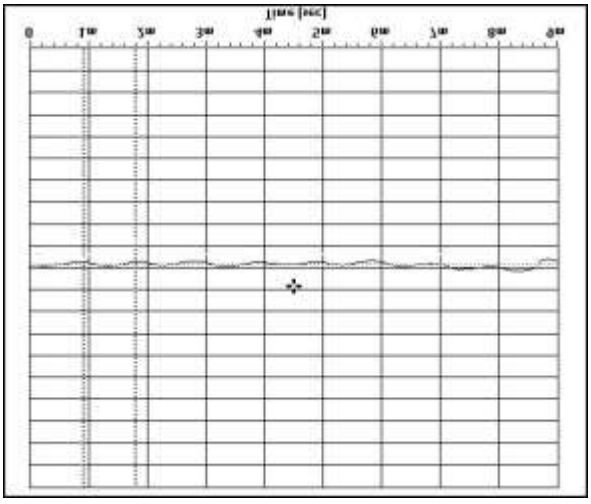


118

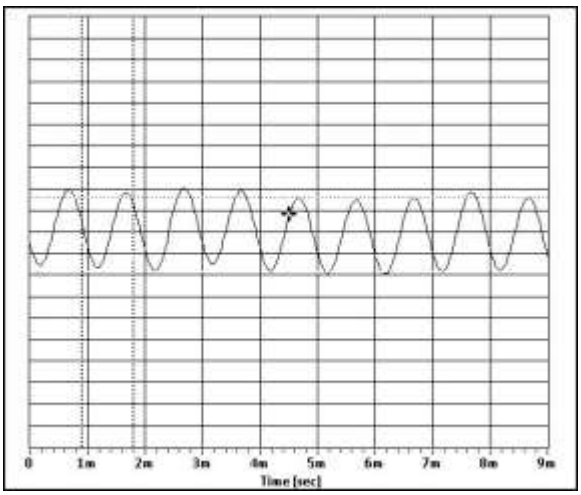


126

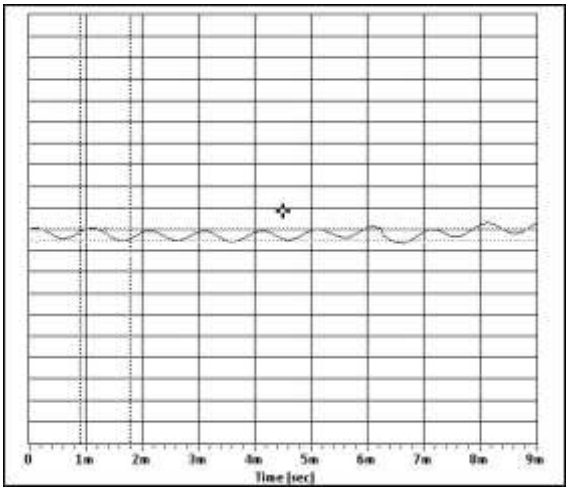
الشكل (84): مخططات اختبار امتصاص الصوت لمجموعة العينات الأولى، طول الموجة الصفرية (276.5م)



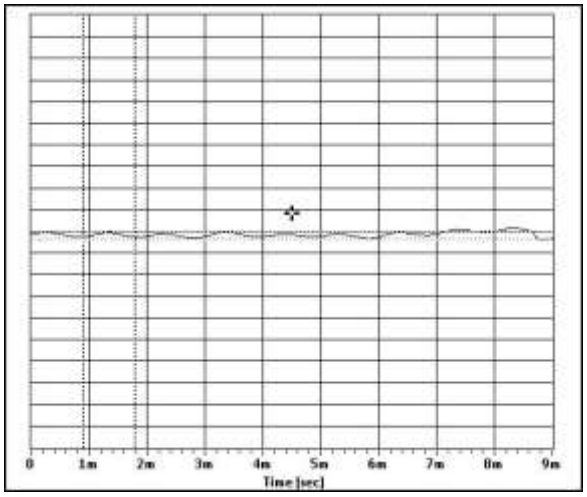
102



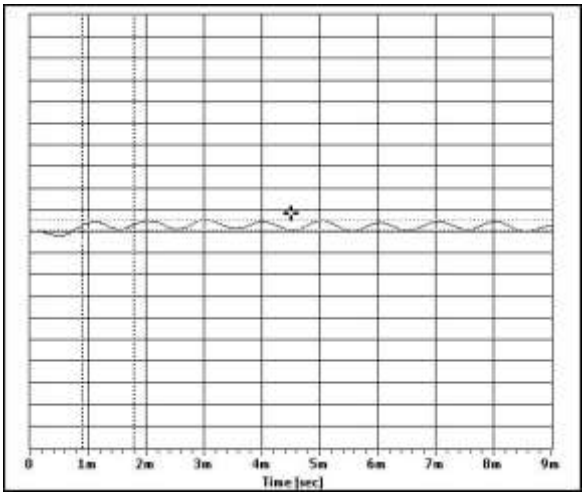
الموجة الصفرية 2



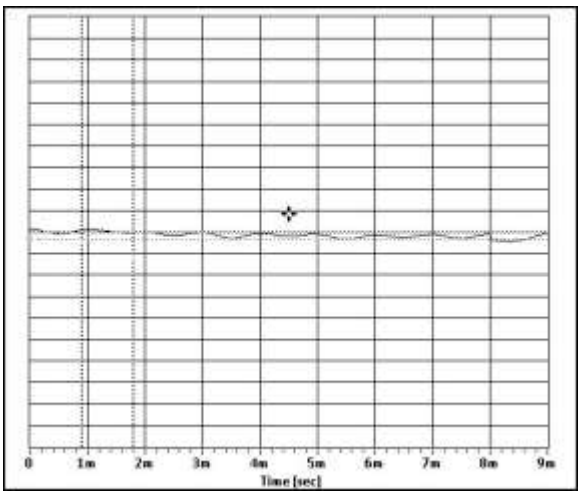
026



046

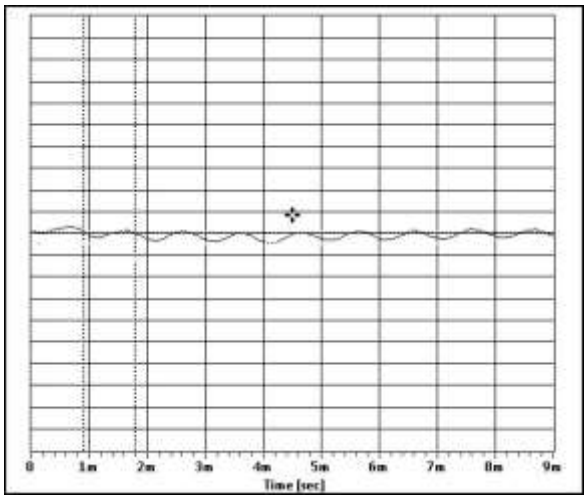


090

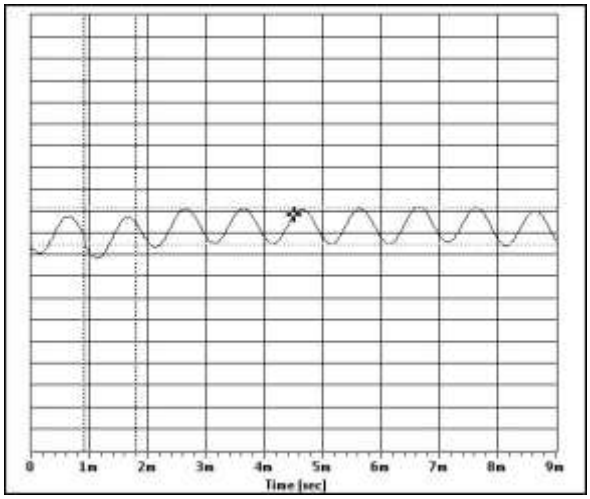


016

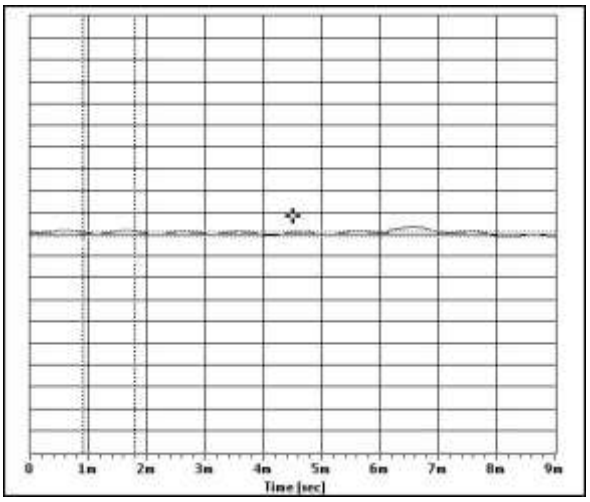
الشكل (85-1): مخططات اختبار امتصاص الصوت لمجموعة العينات الثانية، طول الموجة الصفرية (346.5م)



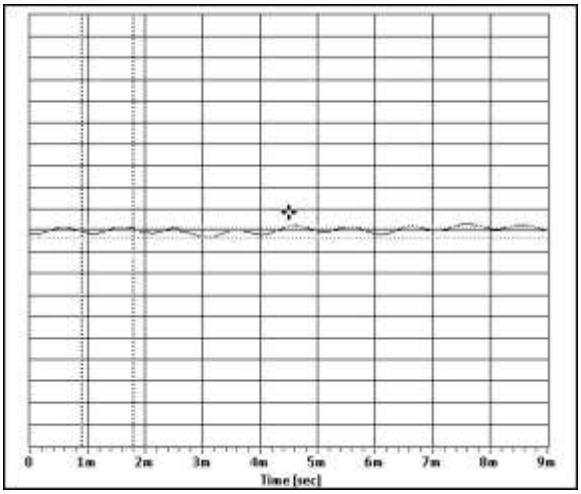
081



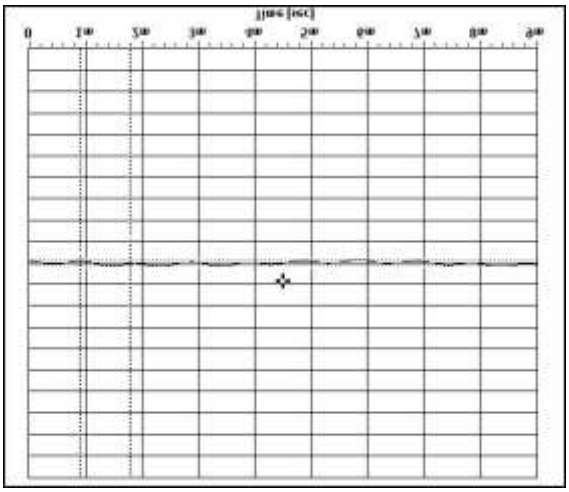
030



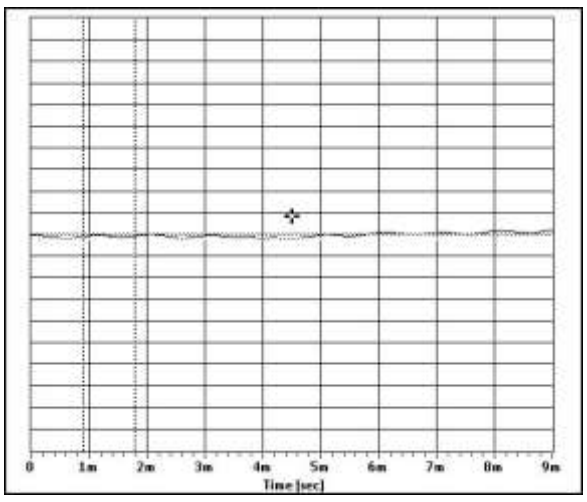
091



032



107



117

الشكل (85-2): مخططات اختبار امتصاص الصوت لمجموعة العينات الثانية، طول الموجة الصفرية (346.5م)

4.5. اختبار الخواص الميكانيكية:

من خلال نتائج اختبار العازلية الصوتية والحرارية، يُلاحظ أن عينات المادة النسيجية المركبة، التي تكون فيها مصفوفة المادة النسيجية الداعمة أقمشة ثلاثية الأبعاد ومُفرَّغة، قد أبدت نتائج جيدة، فكانت جودة عزلها الصوتي من رتبة (99.79%)، ومن ثم هي أفضل العينات لصناعة ألواح العزل الصوتي للجدران والأسقف والأرضيات، في الأبنية الحديثة، وبسماكة لا تتعدى (45 مم). كما أن التأكد من صلاحية هذه الألواح للاستخدام في عزل الجدران والأرضيات والأسقف، يتطلب إخضاع بعض العينات لاختبارات للخواص الميكانيكية من متانة الشد ومقاومة الانحناء ومقاومة الضغط، وسيتم استعراض نتائج الاختبارات الميكانيكية لعينتي مادة نسيجية مركبة من الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمُفرَّغة ذات السماكة (10 مم) مع ريزين الإيبوكسي كمادة رابطة، العينة رقم (103) ذات الرمز (Ep33Ns7-3DE10) والعينة رقم (098) ذات الرمز (Ep-3DE10)، إذاً إحدى هاتين العينتين تم فيها إضافة حبيبات السيليكا النانوية (Ns) لخليط مادة الإيبوكسي، ثم أُشبعت طبقة النسيج ثلاثي الأبعاد بالخليط النهائي، والعينة الثانية أشبعت فيها طبقة النسيج ثلاثي الأبعاد، ومن دون إضافة حبيبات السيليكا النانوية تلك. ومن ثم تم مقارنة الخواص الميكانيكية للعينتين لبيان الأثر الذي أضافه استحضار تكنولوجيا النانو لبنية المادة النسيجية المركبة.

عند إجراء هذه الاختبارات الميكانيكية، سيتم التوصل لقيم من إجهادات ومعاملات الشد والانحناء والضغط. لتصنيع المادة المركبة بالتشريب اليدوي بتقنية (Hand lay-up)، تكون نسبة مصفوفة المادة النسيجية الداعمة (وهي هنا الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمُفرَّغة) في بنية المادة المركبة هي (60%) كنسبة وزنية، ونسبة مادة الريزين (40%)، كون المادة النسيجية هي التي تلعب دور المقاوم لتأثير الاجهادات الخارجية، بينما دور مادة الريزين هو تأمين التوزع المنتظم لتلك الإجهادات عبر مكونات المادة النسيجية الداعمة، بالإضافة لدور الريزين في ربط مكونات المادة النسيجية الداعمة معاً وفي قالب وأبعاد محددة للمادة المركبة النهائية. إذاً فتصبح نسبة مادة ريزين الإيبوكسي في العينة الأولى هي (33%) وزناً، ويتبقى (7%) وزناً هي النسبة الوزنية لمادة حبيبات السيليكا النانوية في بنية المادة النسيجية المركبة ككل، في حين في العينة الثانية تصبح نسبة مصفوفة المادة النسيجية الداعمة (وهي هنا

الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمُفرَّغة) في بنية المادة المركبة هي (60%) كنسبة وزنية، ونسبة مادة الريزين الإيبوكسي هي (40%) وزناً. كما هو مبين في الجداول (17و18و19). ولتفاصيل أكثر حول نسب مكونات هذه العينات، انظر الملحق رقم (2).

1.4.5. اختبار متانة الشد (Tensile Strength):

تم قص واختبار العينات وفق المواصفة (ASTM D3039) من حيث متانة الشد ومعاملاتها، في كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث، باستخدام الجهاز (Testometric)، الشكل (86).

أبعاد العينة وفق (ASTM D3039):

الطول الكامل (250 مم)

الطول الفعال (150 مم)

طول مناطق القمط (10 مم)

العرض (25 مم)

العرض الفعال (6 مم)

السماكة (5 مم)

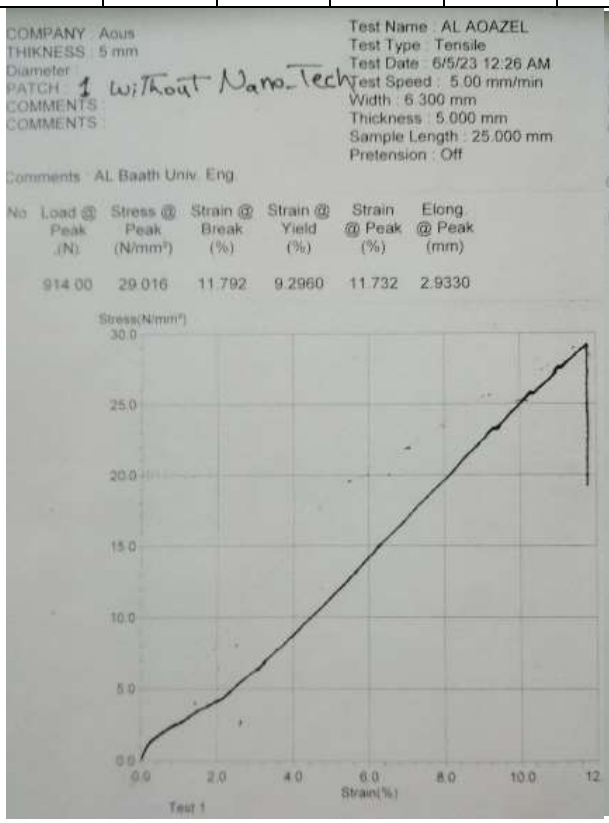
شاشة الاختبار اختبار العينات العينات

الشكل (86): صور اختبار الشد

وتُبين نتائج الاختبار وفق الجدول (17). ومخطط (اجهاد الشد/الانفعال)، الشكل (87).

الجدول (17): نتائج اختبار مقاومة الشد

العينة	نسب مكونات العينة (W%)		السماكة (mm)	اجهاد الشد (MPa)	معامل يونغ (MPa)	الانفعال (ε%)		وسطي معامل يونغ (MPa)	الانحراف المعياري
	نسيج 3D-10 mm	إيبوكسي				عند حد القطع	عند حد المرونة		
1 مع حبيبات نانوية	60	33	5	23	247	11.8	9.3	251.5	6.3
	60	33	5	26	256	12.4	10.15		
2 من دون حبيبات نانوية	60	40	5	22	166	28	13.2	166.5	0.7
	60	40	5	23	167	28.6	13.78		



عينة 1 مع حبيبات نانوية **عينة 2 من دون حبيبات نانوية**

الشكل (87): مخطط (اجهاد الشد/الانفعال) لعينات الشد المختبرة

بملاحظة وسطي نتائج الاختبار لكل عينة، وُجد أن إضافة حبيبات السيليكا النانوية لبنية المادة المركبة، قد حسنت من قيمة معامل يونغ بنسبة (52%)، وهذا يعني زيادة بصلابة المادة وتحملها لتأثير القوة (F) الخارجية بنسبة (23%) التي تم حسابها من نسبة $(F_1 = 914\ Ne)$ إلى $(F_2 = 1124\ Ne)$ بالعلاقة $(\frac{F_2 - F_1}{F_1})$، إذ يُلاحظ انخفاض التشوه بالنسبة نفسها عند حد الخضوع (عند تعرض العينتين لقيم متقاربة جداً من اجهاد الشد).

كما يُلاحظ من مخططات الشد (للعينة 1)، أن هناك تشوه قبل قطع العينة وانهيارها مما يعني زيادة مقاومتها لتأثير القوة بسبب زيادة مساحة السطح النوعي للبنية، وزيادة السطوح البينية بين ألياف النسيج ثلاثي الأبعاد في المحور (Z)، وذلك بعد إضافة الحبيبات النانوية.

2.4.5. اختبار مقاومة الانضغاط (Compressive Strength):

اختُبرت العينات من حيث مقاومة الانضغاط ومعاملاتها وفق المواصفة (ASTM D3410)، في كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث، باستخدام الجهاز (Controls)، الشكل (88):

أبعاد العينة وفق (ASTM D3410):

الطول الكامل (110 مم)

الطول الفعال (10 مم)

طول مناطق القمط (100 مم)

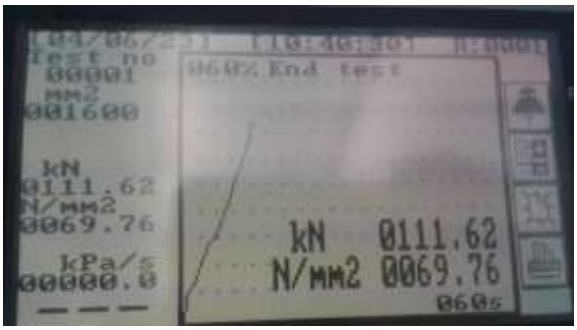
العرض الفعال (25 مم)

السماكة (5 مم)

الشكل (88): اختبار الانضغاط

كما يبين الشكل (89)، شاشة الجهاز خلال اختبار العينات:

عينة 1 مع حبيبات نانوية



عينة 2 من دون حبيبات نانوية

الشكل (89): صور شاشة اختبار مقاومة الانضغاط للعينات

وتُبين نتائج الاختبار وفق الجدول (18)، الآتي:

الجدول (18): نتائج اختبار مقاومة الانضغاط

العينة	نسب مكونات العينة (W%)		السماكة (mm)	مساحة المقطع (mm^2)	القوة (KNe)	الاجهاد (MPa)	وسطي الاجهاد (MPa)	الانحراف المعياري
	نسيج 3D-10 mm	إيبوكسي						
1 مع حبيبات نانوية	60	33	5	1600	113.15	70.72	72.8	2.9
	60	33	5	1600	119.79	74.87		
2 من دون حبيبات نانوية	60	40	5	1600	111.62	69.76	68.2	2.3
	60	40	5	1600	106.36	66.48		

بحساب وسطي نتائج الاختبار لكل عينة، وُجد أن هناك تحسناً في مقاومة الانضغاط بنسبة (6.9%)، وهذا يعود إلى زيادة صلابة المادة المركبة بعد إضافة حبيبات السيليكا النانوية لبنية المادة المركبة.

3.4.5. اختبار مقاومة الانحناء (Flexural Strength):

اختُبرت العينات من حيث مقاومة الانحناء ومعاملاتها وفق المواصفة (ASTM D790)، في كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث، باستخدام جهازين: الجهاز الأول (Controls)، الشكل (90)، والجهاز الثاني (Testometric)، الملحق (4).

أبعاد العينة وفق (ASTM D790):

الطول الكامل (125 مم)

الطول الفعال (40 مم)

طول مناطق القمط (85 مم)

العرض (12,7 مم)

العرض الفعال (12,7 مم)

السماكة (5 مم)

الشكل (90): اختبار مقاومة الانحناء

وتُبين نتائج الاختبار وفق الجدول (19)، على الجهاز الأول (Controls)، ومنه وُجد أن هناك تحسناً في مقاومة الانحناء بنسبة (16.5%) بعد إضافة حبيبات السيليكا النانوية لبنية المادة المركبة.

الجدول (19): نتائج اختبار مقاومة الانحناء

رقم العينة	نسب مكونات العينة (W%)		السماكة (mm)	مساحة المقطع (mm^2)	القوة (Ne)	الاجهاد (MPa)	وسطي الاجهاد (MPa)	الانحراف المعياري
	نسيج 3D-10 mm	إيبوكسي						
1 مع حبيبات نانوية	60	33	5	427	297	0.69	0.705	0.02
	60	33	5	427	306	0.72		
2 من دون حبيبات نانوية	60	40	5	427	257	0.60	0.605	0.002
	60	40	5	427	260	0.61		

5.5. اختبار التقادم المُسرَّع:

يُقصد بتحمل العوامل الجوية أي قدرة المادة على مقاومة ظروف الوسط المحيط بمجال التطبيق، من حرارة ورطوبة وأشعة شمس (UV)، خاصة عند استخدام هذا العازل على السطوح الخارجية. لاستدراك هذه الخاصية، كان لابد من إجراء اختبار لتحمل الظروف والعوامل الجوية، وتم الاختبار وفق المواصفة (م.ق.س 114/2014)، على الجهاز (QUV Accelerated Weathering Tester)، في مخبر النسيج في مركز الأبحاث الصناعية في وزارة الصناعة، وتم الاختبار الذي تُبين نتائجه في الشكل (91)، مع المقارنة بين عينات محضرة باستحضار تكنولوجيا النانو وعينات لا تستخدم فيها تقانة النانو، وعينات أخرى تقليدية وفق الجدول (20).

الجدول (20): يبين نتائج اختبار التقادم (لمدة عام كامل) لأهم العينات

م	رقم العينة	رمز العينة	النتيجة	تأثر البنية الداخلية
1	030	PU50E15	اصفرار	اصفرار واضح
2	011	EpE20	اصفرار	اصفرار
3	046	PU50Ep36.5Ns7E20	اصفرار	تأثر واضح
4	051	PU250Ep36.5Ns7E20	اصفرار	تأثر واضح
5	086	PU250Ep36.5Ns7Ba20	اصفرار	تأثر واضح
6	091	Pu50EpNs7-2DE20mat	اصفرار	اصفرار واضح
7	096	PU50Ep36.5Ns7-2DE20	اصفرار	اصفرار تدريجي
8	118	Pu50Ep15Ns7-3DE10	اصفرار	تأثر طفيف
9	123	Pu50Ep15Ns7-3DE20	اصفرار	لا يوجد
10	129	Pu250Ep15Ns7-3DE20	اصفرار	لا يوجد

أُجري اختبار التقادم المسرّع تحت الظروف:

1- أشعة فوق البنفسجية (UV) (100%). 2- حرارة (50°C). 3- رطوبة (100%).

يُلاحظ من مظهر العينات بعد إجراء الاختبار مدة 24 ساعة (تحمل العوامل الجوية مدة عام كامل) ما يأتي:

1- اصفرار سطحي لجميع العينات، يعود لتدني جودة الإيبوكسي المستخدم، فهو غير مقاوم لأشعة (UV).

2- اصفرار واضح في بنية العينات التي لا تحوي طبقة حماية من النسيج ثلاثي الأبعاد بسماكة (20 مم).

3- اصفرار طفيف متدرج الشدة في بنية العينات التي تحوي طبقة حماية من نسيج ثنائي الأبعاد، العينة (096).

4- مقاومة العينات التي تحوي طبقة حماية من النسيج ثلاثي الأبعاد بسماكة (20 مم)، لظروف اختبار التقادم.

5- تحملت عينات هذا البحث (كتقانات عزل صوتي وحراري مطوَّرة بتقانة النانو) ظروف الاختبار، أفضل من عينات العزل التقليدية، والمنتشرة في الأسواق التجارية وبالأخص المحلية، والمعبر عنها بالعينة رقم (031).

الشكل (91): يبين صور عينات اختبار التقادم المسرع وتحمل العوامل الجوية

6.5. الخلاصة والإضافة العلمية:

1.6.5. أسس التصميم والتصنيع المقترحة التي تم التوصل إليها في هذا البحث:

عند تصميم منتجات عازلة للصوت والحرارة للأبنية، وتصنيعها باستخدام تقانة علم النانو والمواد النسيجية المركبة، تبين أنه يجب مراعاة النقاط الآتية عند وضع أسس التصميم:

1- درجة مسامية البنية الداخلية لمادة العزل: كلما كانت المسامية أعلى، ومن رتبة النانومتر، كان العزل الحراري أفضل، وكلما زادت كثافة البنية (إلى حد ما) ومساحة السطح النوعي لها، زادت كفاءة عزل الصوت على حساب الحرارة، إلا أن الانتقال في أبعاد وأداء البنية من رتبة الميكرو إلى النانو كان له أثر إيجابي واضح.

2- سماكة بنية المادة العازلة: يجب أن تتراوح بين (35-65 مم) لعزل الصوت بالدرجة الأولى، وهو بارامتر مرتبط بكثافة بنية المادة العازلة، التي يزيد انخفاضها من أداء العزل الحراري لكنه يخفض من أداء العزل الصوتي، كما أن زيادة الكثافة يجب أن تكون مدروسة وإلى حد يساعد على تحسين عزل الصوت، دون تخفيض أداء العزل الحراري, إذاً، هناك سماكات اختيارية (بناء على كثافة البنية ودرجة مساميتها) بحسب مجال التطبيق.

3- بارامترات التصنيع: إن اختيار نوع المواد الليفية والنسيجية والبوليميرية التي ستدعم مصفوفة المادة المركبة ككل، وتحمي المادة الوظيفية الفعالة (نانوية البنية)، يتأثر بمجال التطبيق الذي يؤثر في البارامترات أي (الكثافة، السماكة، درجة المسامية، مساحة السطح النوعي للبنية، الجساءة، الكلفة).

إن هذه الأسس تجتمع معاً لتصميم وتصنيع مواد نسيجية مركبة عازلة باستخدام تقانة النانو، لكن يمكن أن تتواجد منفردة في العوازل التقليدية. ويبين الجدول (21)، مجال استخدام كل مادة عازلة وفق تركيب وخواص كل عينة من العينات المميزة في هذا البحث، بغرض العزل الصوتي والحراري في الأبنية. حيث يُلاحظ من الجدول أنه يمكن استخدام عينات العزل التي تحوي مواد فوم البولي يوريثان بالكثافة ($50\ kg/m^3$) في الأسقف والأسقف المستعارة والجدران الداخلية للبناء، لانخفاض وزنها، لكن لا يمكن استخدامها في الجدران الخارجية أو الأرضيات نظراً لضعف مقاومتها لتأثير أي قوة خارجية، والعكس بالنسبة للعينات التي تحوي مواد فوم البولي يوريثان بالكثافة ($250\ kg/m^3$) فيمكن أن تستخدم في الأرضيات، ولكن لا تستخدم في عزل الأسقف بسبب وزنها الكبير، أما بالنسبة للعينات التي لا تحوي مواد فوم فيمكن استخدامها في عزل الأنابيب.

الجدول (21): يبين مجال تطبيق كل عينة من عينات هذا البحث في عزل الأبنية صوتياً وحرارياً

م	رقم التجربة	رمز العينة	$R_t\%$	λ	توصيف الأداء	التطبيق
1	030	PU50E15	51.4	0.14	تقليدي، كلفة أقل، سماكة أكبر، أداء منخفض	جدران، أسقف، غرف تبريد
2	011	EpE20	80.1	0.34	تقليدي، كلفة أعلى، سماكة أقل، عزل صوتي مقبول	أرضيات، مرافق، أنابيب
3	046	PU50Ep36.5Ns7E20	90.0	0.11	سماكة أقل، كثافة أقل، وزن أقل، أداء مقبول	أسقف، جدران
4	051	PU250Ep36.5Ns7E20	95.6	0.09	سماكة أكبر، كثافة أكبر، وزن أكبر، كلفة أكبر، أداء جيد	جدران، أرضيات
5	086	PU250Ep36.5Ns7Ba20	96.9	0.06	سماكة أكبر، كثافة أكبر، وزن أكبر، كلفة أقل، عزل صوتي جيد جداً	جدران، أرضيات
6	091	Pu50EpNs7-2DE20mat	91.4	0.08	سماكة متوسطة، وزن أقل، كلفة متوسطة، أداء جيد جداً، جساءة متوسطة	أسقف، جدران
7	096	PU50Ep36.5Ns7-2DE20	87.2	0.09	سماكة أكبر، وزن متوسط، كلفة مرتفعة، عزل حراري جيد، جساءة جيدة	أسقف، جدران

8	118	Pu50Ep15Ns7-3DE10	99.4	0.05	سماكة أكبر، وزن متوسط، كلفة مرتفعة، أداء فائق (صوتياً وحرارياً)، جساءة جيدة	أسقف، جدران، أرضيات
9	107	Ep35Ns5-3DE20	90.2	0.22	سماكة أقل، وزن مرتفع، أداء جيد جداً، جساءة عالية	أرضيات، مرافق، أنابيب
10	108	Ep33Ns7-3DE20	93.2	0.19	سماكة أقل، وزن أكبر، كلفة أقل، أداء جيد (صوتياً وحرارياً)، جساءة عالية	أرضيات، مرافق، أنابيب
11	123	Pu50Ep15Ns7-3DE20	99.6	0.03	سماكة أكبر، وزن أكبر، كلفة مرتفعة، أداء فائق (صوتياً وحرارياً)، جساءة عالية	أسقف، جدران، أرضيات
12	129	Pu250Ep15Ns7-3DE20	99.7	0.02	سماكة أكبر، وزن أكبر، كلفة مرتفعة جداً، أداء فائق (صوتياً وحرارياً)، جساءة عالية	أسقف، جدران، أرضيات

الخلاصة:

يتبين وبالمقارنة مع الدراسات المرجعية والمنتجات والتقانات ذات الصلة بموضوع هذا البحث، تميز نتائجه وعيناته، من خلال القدرة على تطوير وجمع مفهومي العزل الصوتي شبه التام والحراري للأبنية، وبمنتج واحد، يتحمل تأثر العوامل الجوية، وباستحضار علم النانو، وبقدرات ومواد متوافرة بالسوق المحلية، وتخفيض الكلفة والسماكة والوزن ما أمكن، ما ساعد على التغلب على احتكار الشركات الأوروبية والعالمية لتقانات العزل الحديثة والتي تستخدم تكنولوجيا النانو المكلفة كـ (Spray Drying)، ويمكن اعتماده اللبنة الأولى لتوطين هذه الصناعة في سورية.

7.5. الدراسة الاقتصادية:

إن دراسة الجدوى الاقتصادية لعينات عزل الأبنية في هذا البحث، تتم بالمقارنة مع منتجات مصنعة باستخدام تقانات عالية والتي تدخل تكنولوجيا النانو في صناعتها، وتبقى منتجات من الصعوبة بمكان إدخالها للسوق المحلية ومنها:

(VIPs ;Vacuum Insulation Panels 120$/sqm)، (Aerogel Blanket 90$/sqm)، (Airloy Tiles 70$/sqf)، (Aspen Aerogel Granules 20$/gr).

ومن خلال حساب كلفة كل عينة من العينات وفقاً لأسعار السوق المحلية، كما هو مبين في الجدول (22)، وصل الوفر الاقتصادي على مستوى السوق المحلية بنسبة حتى (18%)، لأفضل العينات، التي بلغت كلفتها حتى (25 دولار أمريكي للمتر المربع)، وبالمقارنة مع أسعار ألواح الفوم ((Foam Panel 30$/sqm) المتوفرة في الأسواق)، ومنظومات الحماية من الرطوبة والحرائق والعزل الصوتي والحراري التي وصلت سماكتها حتى (24 سم)، والمقدمة من شركة (Beam Batec)، والتي تتألف من ألواح جيبسن بورد مطلية باللون الزهري، وأخرى مشبعة بالألياف الزجاجية المقطعة ومطلية باللون الأزرق والمحشوّة بطبقات من الصوف الزجاجي العازل، والمحفوظة ضمن صفائح من الألمنيوم، والتي تم الاطلاع عليها في كل من معرض بيلدكس للبناء ومعرض الصناعات الكيميائية صيف عامي (2022) (2023).

أما إن قورنت دراسة الكلفة الاقتصادية المبينة في الجدول (22)، بتلك التقانات المتطورة فالفارق واضح، فضلاً عن توافر المواد الأولية في السوق المحلية. أي إن هناك جدوى اقتصادية واضحة من تطبيق هذا العازل، وتبقى قدرة الزبون الشرائية ومدى رغبته في تطوير جودة العزل الحراري والصوتي للأبنية الحديثة، الكلمة الفصل في هذا السياق.

يبين الجدول الآتي (22)، كلفة تقديرية لكل متر مربع واحد من لوح مادة عازلة مصنع من كل عينة من العينات التي أبدت أفضل نتائج الأداء الوظيفي للعزل الصوتي والحراري للأبنية في هذا البحث، حيث من خلال أن كل عينة تم تحضيرها في الجزء العملي كانت بالأبعاد (10 x 10 cm) أي كل متر مربع واحد يعادل مساحة

مائة عينة ذات السماكة (45 مم)، ومن خلال مكونات كل عينة مبينة في الملحق رقم (2)، وكلفة كل عينة وفقاً لأسعار السوق المحلية تم التوصل لقيم الأسعار التقديرية المبينة في الجدول (22).

الجدول (22): يبين الكلفة التقديرية للمتر المربع الواحد لأفضل عينات هذا البحث:

م	رقم العينة	الكلفة $ بالمتر المربع	رمز العينة	توصيف النسيج الداعم
1	091	12	Pu50Ep36Ns7-2DE20	NONWOVEN
2	096	17	Pu50Ep36Ns7-2DE20	PLAIN 1/1
3	098	18	Ep40-3DE10	3D-Woven Spacer Fabric 10 mm
4	103	20	Ep33Ns7-3DE10	3D-Woven Spacer Fabric 10 mm
5	118	22	Pu50Ep20Ns7-3DE10	3D-Woven Spacer Fabric 10 mm
6	126	25	Pu250Ep15Ns7-3DE10	3D-Woven Spacer Fabric 10 mm
7	108	25	Ep33Ns7-3DE20	3D-Woven Spacer Fabric 20 mm
8	123	30	Pu50Ep20Ns7-3DE20	3D-Woven Spacer Fabric 20 mm
9	129	35	Pu250Ep15Ns7-3DE20	3D-Woven Spacer Fabric 20 mm
10	086	8	Pu250Ba20Ep37Ns7	Basalt Fibers
11	061	6	Ba20Ep73Ns7	Basalt Fibers
12	051	10	Pu250Ep37Ns7E20	E-glass Fibers

في الختام، لابد من القول إن اختيار العزل الحراري والصوتي الأنسب للأرضيات والأسقف والجدران، عندما تدعو الحاجة إلى تحقيق عزل صوتي شبه تام بنسبة تقارب (100%)، سيصبح تأثير الكلفة ثانوياً، وخاصة عند الجمع مع خاصية العزل الحراري، إذ نظراً لارتفاع كلف وأسعار مواد حبيبات السيليكا (Ns)، تم خلطها مع حبيبات الأيروسيل التجارية منخفضة الكلفة بنسبة تحافظ على جودة أداء العزل (لتعطي بنية نصف مسامية) في الأبنية. وهذا يتطلب اعتبار كل ما ذكر أعلاه، ورهناً بحاجة السوق وإعادة الاعمار، خطاً لا حياد عنه وموازياً في هذا البحث لخط استحضار تكنولوجيا النانو لمواد وحبيبات مسامية البنى تدخل في تركيب المادة العازلة، وبنسب كافية لإحداث الفرق من حيث الأداء والكلفة.

الخاتمة

6. مناقشة النتائج:

من خلال عينات الاختبارات الخاصة بهذا البحث ونتائجها، لبيان تأثير كل من نوع مادة الليف والقماش الداعم، والتركيب النسيجي، وكثافة وسماكة بنية المادة العازلة ومساحة سطحها النوعي، واستحضار تقانة النانو، وُجد أنه:

1- بالنسبة لاستخدام الألياف البازلتية والزجاجية، لوحظ أن استخدام الألياف البازلتية قد حسَّن بنسبة (43%) من كفاءة العزل الحراري مقارنة باستخدام الألياف الزجاجية، العينتان (086) و (051)، وهذا يعود إلى ارتفاع نسبة (SiO_2) حتى (65%) في تركيب الالياف البازلتية، في حين هي لا تتعدى النسبة (54%) في تركيب الألياف الزجاجية. وبمقارنة العينات (016) و (051) و (052) من جهة، و (061) و (085) و (086) من جهة أخرى، وبالرغم من أن كثافة الألياف البازلتية تصل حتى ($2900\ kg/m^3$)، في حين هي أقل لدى الألياف الزجاجية ($2540\ kg/m^3$)، ولم يبدُ هذا الفارق فعالاً إلا باستخدام (PU250)، مما كان سبباً في تحسن كفاءة عينات الألياف البازلتية لعزل الصوت والحرارة بالمقارنة مع الألياف الزجاجية المقطعة، وهذا يدل على ضرورة إضافة عامل السماكة والكثافة في العزل الصوتي.

2- بالنسبة لاستخدام الأقمشة ثنائية الأبعاد، فتجدر المقارنة بين عينات الأقمشة المنسوجة وغير المنسوجة، ليتبين أن استخدام الأقمشة غير المنسوجة أفضل بنسبة (13.5%) من تلك المنسوجة، في العزل الحراري والصوتي معاً في الأبنية، وذلك يعود إلى الكثافة العالية وغير المرغوبة في التركيب النسيجي للأقمشة المنسوجة (Plain1/1)، أي إن معامل تغطية القماش أعلى، كما أن الأقمشة غير المنسوجة تمتاز بفراغات وجيوب هوائية (عشوائية)، تساعد على زيادة معدل امتصاص مادة الريزين (إيبوكسي/بولي يوريثان) وتغلغلها، والمعززة بحبيبات السيليكا النانوية، بين مكونات المادة الداعمة (القماش غير المنسوج).

3- إن استخدام الأقمشة المنسوجة ثلاثية الأبعاد والمُفرَّغة بأي سماكة كانت، قد رفع من أداء العزل الحراري بنسبة (71.4%)، بالمقارنة مع استخدام الأقمشة ثنائية الأبعاد (المنسوجة)، بينما الصوتي فلم تتجاوز النسبة (2%)، مما يعني أفضلية استخدام الأقمشة ثنائية الأبعاد وبالأخص غير المنسوجة منها نظراً لتأثير عامل الكلفة الاقتصادية. كما ساعد استخدام الأقمشة ثلاثية الأبعاد أيضاً، في زيادة مقاومة مواد عزل الأبنية لتأثير الظروف الجوية (حرارة، رطوبة، UV)، وحمايتها للبنية الداخلية للمادة العازلة.

4- بالإشارة إلى تأثير معامل سماكة العازل، لوحظ أن لها دوراً في تحسين كفاءة العزل الصوتي والحراري، فبالمقارنة بين العينات (011) و (016) و (026)، وُجد أنه وبالرغم من استخدام حبيبات السيليكا النانوية (Ns)، في العينة (016)، لم تتحسن العازلية الحرارية، حتى زيادة السماكة في العينة (026) بإضافة البولي يوريثان (PU50)، مما خفض من الناقلية الحرارية حتى النصف، ثم بإضافة حبيبات السيليكا النانوية (Ns) بنسبة وزنية لا تتعدى (7%) وباستخدام البولي يوريثان (PU250)، انخفضت الناقلية الحرارية بمقدار عشر مرات في العينة رقم (051)، حتى القيمة (0.092 W/m.K)، وذلك بسبب زيادة درجة المسامية ومساحة السطح النوعية للبنية النانوية الجديدة (حبيبات السيليكا/البولي يوريثان)، وهذا يعد أفضل مثال على الأثر الواضح الذي أضافه استخدام تكنولوجيا النانو في تحسين العزل الصوتي والحراري.

5- بالإشارة إلى تأثير عامل الكثافة أيضاً، وبالمقارنة بين نتائج عزل الصوت للعينات (016) و (026) و(046) و(051)، يُلاحظ انخفاض كفاءة العزل الصوتي بانخفاض كثافة العينة (026)، والتي استخدم فيها البولي يوريثان (PU50)، والسبب يعود لزيادة تلك الجيوب الهوائية بأبعاد مسام كبيرة، ثم بإدخال الألياف الزجاجية بالعينة (046) ارتفعت الكثافة بالبنية وزادت مساحة السطح النوعي، وزادت كفاءة عزل الصوت حتى (90 %)، ثم باستخدام البولي يوريثان (PU250)، ارتفعت الكثافة مجدداً ومع ادخال تكنولوجيا النانو، ارتفع معها العزل الصوتي، كما في العينة (51) حتى القيمة (95.64%).

6- إن استخدام البولي يوريثان (PU250) ذي الكثافة ($250\ kg/m^3$)، ساعد على رفع كفاءة العزل الصوتي والحراري معاً، أفضل من استخدام البولي يوريثان (PU50) ذي الكثافة ($50\ kg/m^3$)، كما أن تلك الكثافة العالية كانت سبباً في زيادة جساءة الفوم ومن ثم عينة العازل ككل (إذ لُمس ذلك باليد دون الحاجة لاختبارات ميكانيكية خاصة بالفوم وفق المواصفة ASTM D1622)، وذلك يعود إلى زيادة مساحة السطح النوعي للبنية، وزيادة كثافة المسام المغلقة بالبنية، وانخفاض أبعادها من رتبة الميكرو حتى النانو، عندما تم تغيير نوع وكثافة مادة الفوم، أي إن زيادة الكثافة إلى حد ما (حتى $250\ kg/m^3$)، كان له أثر إيجابي لرفع كفاءة العزل الصوتي، وبما لا يؤثر سلباً على العزل الحراري، وبسماكة لا تتعدى (45 مم).

7- من خلال نتائج اختبار كفاءة العزل الصوتي والحراري يُلاحظ أن استخدام الأقمشة ثلاثية الأبعاد والمُفرَّغة، كمادة نسيجية داعمة بسماكة (20 مم) مع (PU250) وحبيبات (Ns) النانوية والإيبوكسي، ساعد على رفع كفاءة العزل الصوتي حتى القيمة (99.7%) وانخفض معامل انتقال الحرارة حتى (0.024 W/m.K).

8- إن إدخال تكنولوجيا النانو على مصفوفة المادة النسيجية المركبة ساعد في تحسين الخواص الميكانيكية (شد، ضغط، انحناء) للمادة المركبة ككل، وفي رفع جودة العزل الصوتي والحراري معاً للأبنية.

9- إن استخدام التقانات التقليدية (كالصوف الصخري والزجاجي، والألياف الزجاجية، والأقمشة غير المنسوجة)، مازال متوافراً في السوق الصناعية والتجارية وبالأخص المحلية، الخاصة بمنتجات العزل الصوتي والحراري للأبنية، لكن لها مساوئ عديدة رغم انخفاض كلفها، منها تدني مقاومتها للرطوبة والحرارة العالية، وثم أهمها السماكة العالية، التي لا تقل عن (10-15 سم)، وكما وصلت بعض منظومات العزل المتوافرة في السوق المحلية، والتي تم الاطلاع عليها في معرض بيلدكس المتخصص بصناعة البناء، في صيف عامي 2022 و 2023، وبسماكات حتى (24 سم)، استخدمت فيها أنواع عدة من مواد العزل (ألواح الجيبسن بورد المدعمة بالألياف الزجاجية وسماكات عالية من الصوف الزجاجي، وطبقات تغليف خارجي من صفائح الألمنيوم)، لذا يمكن القول إن عينات هذه الدراسة قد تميزت بفارق واضح عن تقانات العزل الأخرى، من حيث تخفيض السماكة حتى (45 مم)، وتخفيض الوزن، ومن ثم سهولة المناولة والتركيب، وزيادة مساحة الفراغ، وتحسين مقاومة العوامل والظروف الجوية من رطوبة وحرارة و(UV).

10- كانت اختبارات (التقادم المسرّع) لبيان تحمل عينات العزل لتأثير العوامل الجوية، ولمدة عام واحد فقط، كافية من وجهة نظر الباحث، لإظهار تميز عينات هذا البحث عن مواد وتقانات العزل التقليدية، في حين وفي أبحاث لاحقة، قد تسهم إطالة مدة الاختبار إلى (120 ساعة متواصلة) أي تقادم لخمس سنوات أو أكثر، إلى معرفة مدى الاستخدام الحقيقي وعمره لعينات هذا البحث، والتي تحوي مواد نانوية، للعزل الصوتي والحراري للأبنية. كما يُنصح باستخدام طلاء إيبوكسي مقاوم للأشعة فوق البنفسجية (UV)، مع العلم أن لذلك أثراً سلبياً على عامل الكلفة.

7. المقترحات والتوصيات:

تؤدي صناعة البناء ومجالات تطويرها، دوراً فاعلاً على مسرح الدراسات والأبحاث المعاصرة، بما يؤمن الراحة والأداء الأفضل للمستهلك والبيئة والكلفة بالوقت ذاته، أي يُعدُّ الدور الذي تؤديه تقانة علم النانو والمواد النسيجية المركبة في هذا الإطار حديثاً ومازال قيد البحث والتطوير، بدءاً من تحسين الخلطات الاسمنتية وإحداث تغيير جذري في قضبان التدعيم والتسليح الاسمنتي، وصولاً إلى تحسين أداء مواد وتقنيات العزل الصوتي والحراري للأبنية والمنشآت. لذا لا بد من توطين صناعة الألياف التقنية، وإدخال التجهيزات والأنوال النسيجية الخاصة بحياكتها ومعالجتها.

إذاً بوجود تقانة النانو، ستصبح المنتجات النهائية بخواصها الجديدة، قادرة على رفع سوية أدائها ضمن مجال التطبيقات الإنشائية والهندسية والبيئية (تحسين الأداء الإنشائي للأبنية العمرانية والخرسانات الإسمنتية، وتحسين أداء العزل الحراري والصوتي). بدأ الاهتمام بتوطين صناعة النانو في سورية منذ عدة أعوام، بفضل جملة من ورش العمل والمؤتمرات والمحاضرات المحلية والدولية، التي ألقاها باحثون وأكاديميون متخصصون في صناعة النانو وعلم النسيج ومعالجاته، وانطلاقاً منها ومن الحاجة لتطوير صناعة البناء وتلبية متطلبات خطة إعادة الاعمار، بما تؤمنه السوق المحلية من مواد أولية وتقانات بسيطة، بدأ العمل بهذا البحث ليكون باكورةً تنطلق منها أسس توطين وتطبيق صناعة العزل الصوتي والحراري في الأبنية الحديثة، في سورية.

من خلال نتائج هذا البحث، تم التوصل لمجموعة من المقترحات والتوصيات، المبينة في النقاط الآتية:

1. إعطاء مجال المواد المركبة العازلة للأبنية بتقنية النانو **اهتماماً أكبر** على المستوى البحثي والتطبيقي.
2. التعمق بدراسة تأثيرات **التقادم** وتحمل العوامل الجوية على خواص العازلية للأبنية.
3. التعمق بدراسة الخواص **الميكانيكية** للمواد النسيجية المركبة ذات البنى النانوية.
4. التعمق بدراسة المواد المركبة ذات البنى النانوية من مواد الفوم مع حبيبات نانومترية باستخدام (SEM)، ودراسة الخواص البنيوية للمواد النانوية، باستخدام تقانات أخرى مثل (TEM) و(FTIR) و(TGA-DSC).
5. إجراء **النمذجة** والمحاكاة الحاسوبية من خلال برامج خاصة، لتقلل من **زمن البحث** واختيار العينات الأمثل.
6. دراسة إمكانية تطوير عينات هذا البحث لتصبح مقاومة **للاحتراق** والرطوبة وللأوساط **الكيميائية** الأكالة.
7. إجراء دراسة لإمكانية **إعادة تدوير** مواد العزل الصوتي والحراري للأبنية لاستخدامها المتكرر، وبالتالي يؤدي إلى خفض كلفة البناء والعزل.
8. البحث عن مواد **صديقة للبيئة** تلبي متطلبات العزل الصوتي والحراري للأبنية دون الإضرار بالمحيط.
9. دراسة إمكانية تحضير المواد النانومترية على **مستوى صناعي محلي**، بما يسهم بتطوير قطاع البناء.
10. إجراء اختبارات على عينات نصف **صناعية** وصناعية من قبل المختصين.
11. إجراء دراسة حول مدى الدور الذي يمكن أن تلعبه هذه المواد خفيفة الوزن في مقاومة **الهزات الأرضية**، وتخفيف الأضرار البشرية، ومدى صلاحيتها للعزل بعد **الزلازل**.
12. **استبدال** المعدن بالمواد النسيجية المركبة من الألياف الزجاجية والبازلتية.
13. توطين صناعة الخيوط الزجاجية والبازلتية، وإدخال التقانات **والأنوال النسيجية** الخاصة بحياكتها.
14. تطوير صناعة البناء والعزل وتلبية متطلبات خطة **إعادة الاعمار**.

المراجع

8. المراجـع:

أولاً: المراجع العربية:

1. إبراهيم، أحمد كاسر، (1995)، **(انتقال الحرارة – 1)**، جامعة البعث، كلية الهندسة الكيميائية والبترولية.
2. الرشيد الأحمد، مصطفى. (2009)، **العوامل المؤثرة في درجة امتصاص الصوت في المنسوجات**، هندسة الغزل والنسيج، كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب، سورية. ص:104.
3. قدّار، طاهر، (2011)، **كتاب تحليل المنسوجات**، الصادر عن مديرية الكتب مطبعة جامعة البعث، كلية الهندسة الكيميائية والبترولية، قسم هندسة الغزل والنسيج.
4. قدّار، طاهر، (2022)، **كتاب المواد الأولية النسيجية الصنعية والتركيبية**، منشورات جامعة دمشق، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها.
5. قدّار، طاهر، (2022)، **كتاب تكنولوجيا النسيج**، الصادر عن مديرية الكتب مطبعة جامعة دمشق، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها.
6. ناعمة، وجيه، وآخرون، (2010)، **الأطلس السوري للعزل الحراري في الأبنية (STIBA)**، الصادر عن وزارة الكهرباء، المركز الوطني لبحوث الطاقة (NERC)، الجمهورية العربية السورية.

ثانياً: المراجع الأجنبية:

1. 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.
2. Ajay Kumar Mishra, (2017), **Sol-gel Based Nanoceramic Materials: Preparation, Properties and Applications**, Nanotechnology and Water Sustainability, Research Unit University of South Africa, Johannesburg, South Africa, Springer, P: 307.
3. Ákos Lakatos, Zsolt Kovács, (2021), **Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods**, Energy & Buildings, 236-110771, P-P: 1-12, Debrecen, Budapest, Hungary, Elsevier.
4. 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.

5. 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.
6. Armacell, (2017), **Acoustic Insulation Armacomfort - The Comfort of Quiet Equipment**, Münster Germany, GmbH.
7. Arval, (2009), **Acoustic and thermal guide (A guide for energy saving and noise comfort in buildings)**, ArcelorMittal, P: 130.
8. ASTM standard C384-04, **Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustic Materials by Impedance Tube Method.**
9. ASTM standard D3039/D3039M-08, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.**
10. ASTM Standard D790-17, **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.**
11. ASTM Standard D7984 − 21, **Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument.**
12. ASTM D3410/D3410M-16, **Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading**.
13. Basfiber®, Kamenny Vek, **Advanced Basalt Fiber**, Dubna, Moscow reg., Russia.
14. Benjamin Gebhart, (1971), **Heat Transfer**, Literary Licensing, LLC, March 17,2012, University of California, California, USA, P:454.
15. Bharat Bhushan, (2004), **Springer Handbook of Nanotechnology**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, SPRINGER, P: 1258.
16. Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, and Ruben Baetens, (2012), **Innovative High Performance Thermal Building Insulation Materials**, Building Enclosure Science & Technology, P-P: 66, Atlanta, U.S.A.
17. Chang Penga, Mengyue Chena, James B. Spicerb, and Xiaoning Jianga, (2021), **Acoustics at the nanoscale (nanoacoustics): A comprehensive literature Review,** ScienceDirect, S0924424721001825, P: 116, Raleigh, and Baltimore, USA, Elsevier.
18. Christiansen Lasse, (2021), **Electrospinning of Composite Materials**, Aalborg University, Aalborg, Denmark, Aalborg University Press by Rosendahls, P: 86.
19. Chunpeng Zhang, Chaoming Pang, Yunrui Mao, And Zhiyuan Tang, (2022), **Effect And Mechanism Of Polyethylene Glycol (PEG) Used As A Phase Change Composites (PCMs),** Basel, Switzerland, MDPI.
20. D.V. Bihola, H N Amin ,V D Shah, (2016), **Application of Nano Material to Enhance Acoustic Properties**, International Journal of Engineering Science and Futuristic Technology, IJESFT 12 (2015), P-P: 001-009, Gujarat, India, A D Publication.
21. David Bozsaky, (2015), **Laboratory tests with liquid nano-ceramic thermal insulation coating**, Science Direct, Procedia Engineering 123/2015, P-P: 68 – 75, Gyor, Hungary, Elsevier.
22. David Bozsaky, (2016), **Application Of Nanotechnology-Based Thermal Insulation Materials In Building Construction**, Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 1, P-P: 17 – 23, Győr, Hungary, DE Gruyter.
23. Dávid Bozsaky, (2018), **Moisture Behavior of Thermal Insulation Coating Consisted of Vacuum Hollow Nano Ceramic Microspheres**, Periodica Polytechnica Civil Engineering, P-P: 980-985, Győr, Hungary.

24. Dmitry Bokov, Abduladheem Turki Jalil, Supat Chupradit, Wanich Suksatan, Mohammad Javed Ansari, Iman H. Shewael, Gabdrakhman H. Valiev, and Ehsan Kianfar, (2021), **Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application**, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2021, P: 1-21, Hindawi.
25. Dr. Phalguni Mukhopadhyaya, Dr. M. Kumar Kumaran, and co-authors, (2009), **Fibre-Powder Composite As Core Material For Vacuum Insulation Panel**, 9th International Vacuum Insulation Symposium, 17th and 18th September 2009 at the Royal Institution of Great Britain, P-P: 1-9 London, UK.
26. Evonik Endustries, (2015), **Aerosil®-Fumed Silica**, Technical Overview, Hanau-Wolfgang Germany, P: 104.
27. F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. Nazari and C-G. Granqvist, (2013), **Nanotechnology in eco-efficient construction**, Woodhead Publishing Limited, 2013, Cambridge CB22 3HJ, UK, P: 453.
28. Ferhat Yildirima , Mustafa Aydinb , Ahmet Avcic, (2017), **Mechanical properties of nano-SiO2 reinforced 3D glass fiber/epoxy composites**, International Journal of Materials, 108 (2017) 4, P-P: 308– 321, Kutahya, Turkey, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
29. G. Q. Lu, and X. S. Zhao, (2004), **Nanoporous Materials: Science And Engineering, Series on Chemical Engineering**, Vol.4, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Imperial College Press, by World Scientific Printers, Singapore, P: 917.
30. Ghosh, A.K., Dwivedi, M., (2020), **Process ability of Polymeric Composites**. Springer, New Delhi, P: 270.
31. ICANZ, (2012)**, Insulation Handbook Part 2: Insulation installation for ceilings, walls & floors,** Insulation Council of Australia and New Zealand, P: 97.
32. Index, (2009), **Acoustic And Thermal Insulation For Buildings**, INDEX Construction System and Products, Ed. 2009-2, Rosini, Castel D Azzano, Italy,INDEX S.P.A.
33. Isover, (2019), **The Insulation Handbook; Acoustic and thermal insulation solution guide**, P: 50.
34. 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.
35. 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- 3, P-P: 882-894, London, UK., Taylor &Francis.
36. Kaddar .T, (2021), **Nano Science and Nanotechnology Research, Journal of Textile Science and Engineering**, ISSN: 2165-8064, Volume 11:4, 2021: 433.
37. Krishan K. Chawla, (2012), **Composite Materials, Science and Engineering, Third Edition**, Department of Materials Science and Engineering, University of Alabama at Birmingham, Birmingham, AL 35294, USA, P: 548.
38. Lamrani, B., Johannes, K., Kuznik, F., (2021), **Phase change materials integrated into building walls: An updated review,** ScienceDirect, P-P: 1-41, Villeurbanne, France, Elsevier.
39. 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.
40. Liu Q, Yan K, Chen J, et al, (2021)**, Recent advances in novel aerogels through the hybrid aggregation of inorganic nanomaterials and polymeric fibers for thermal insulation,** Aggregate Wiley. 2021;2:e30, P: 1-27, South China University of Technology; AIE Institute and John Wiley & Sons Australia, Ltd.

41. M. S. Bhatnagar, (1996), **Epoxy Resins (Overview)**, The Polymeric Materials Encyclopedia © 1996 CRC Press, P: 11.
42. Malin Sletnes, Kristin Elvebakk, Jørn Emil Gaarder, Egil Rognvik, Steinar Grynning, (2019), **Thermal conductivity of high-performance insulation - a laboratory study/Realistic design values for use in energy-efficient buildings**, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 352, 012046, P-P: 1-8, Trondheim, Norway, IOP Publishing.
43. Marco Casini, (2016), **Smart Buildings Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance**, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 69, Rome, Italy, Elsevier Woodhead, P: 384.
44. Minju N., abc Balagopal N. Nairde and Savithri S, (2021), **Sodium silicate-derived aerogels: effect of processing parameters on their applications,** this: RSC Adv., 2021, 11, 15301, Royal Society of Chemistry.
45. NAIMA, (2009), **Building Insulation**, Pub. No.NCA101 1/14, P-P: 1-9, Ottawa, Canada.
46. Olga V.soloveva, Sergei A. Solovev, Yuri V. Vankov and Rozalina Z. Shakurova, (2022), **Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies**, Processes MDPI 10, 2257, P-P: 1-18, Kazan, Russia, MDPI.
47. Owens Corning, (2004), **Noise Control Design Guide**, Pub. No. 00000 Printed in U.S.A., December 200, Toledo, Ohio, USA 43659, The Pink Panther ™, P: 42.
48. P.M. Visakh, Gordana Markovic and Daniel Pasquini, (2017), **Recent Developments in Polymer Macro, Micro and Nano Blends, Preparation and Characterization**, Woodhead Publishing in Materials, Copyright © 2017 Elsevier Ltd, P:331.
49. Prof.P.C.Pandey, (2004), **Composite Materials** (Web-based Course), Dept.of Civil Eng., IISc Bangalore, p:176.
50. Qiang Xu, (2013), **Nanoporous Materials: Synthesis and Applications**, CRC Press Taylor & Francis Group, USA, P: 371.
51. Rajak, D.K.;Wagh, P.H.Linul, E., (2021), **Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review.** Polymers, 13, 3721, P-P: 1-42, Basel, Switzerland, MDPI.
52. Satoshi Yoda, Satoru Takeshita, Takumi Ono, Ryosuke Tada and Hideo Ota, (2021), **Development of a New Silica Aerogel-Polypropylene Foam Composite as a Highly Flexible Thermal Insulation Material**, Polymeric and Composite Materials, a section of the journal, P-P: 1-9, Tsukuba, Hadano, Japan, Frontiers in Materials.
53. 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.
54. 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.
55. Sherif Attallah, Bakhtiyor Khafizof, Jim Jones, and Tarek Mahfouz, (2015), **Improving Envelope Thermal Insulation In Construction Projects Using Nanotechnology Applications**, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 04 Issue: 12, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308, P-P: 70-75, Indiana, USA, Academia.
56. SIGA®, (1966), **Majrex® The safe vapour control layer – thanks to Hygrobrid® technology,** Switzerland.

57. Stephen L Ogin, (2000), **Textile-reinforced composite materials**, School of Mechanical and Materials Engineering, University of Surrey, Guildford, GU2 7XH, UK, P: 264-281.
58. Takashi Kodama, Nobuhiro Shinohara, Shih-Wei Hung, Masanao Obori, Donguk Suh, Junichiro Shiomi, **Modulation of interfacial thermal transport between fumed silica nanoparticles by surface chemical functionalization for advanced thermal insulation**, Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, Research center, P-P: 1-21, Tokyo, Japan.
59. Tiasa, (2001), **Thermal Insulation Handbook**, The Thermal Insulation Association of Southern Africa, Lyttelton, Southern Africa, The AAAMSA Studio, P: 60.
60. 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.
61. V Kartik Ganesh, (2021), **Nanotechnology in Civil Engineering**, ACADEMIA, Department of Civil Engineering, SRM University Kattankulathur, Chennai-603203, P-P: 1-11, INDIA, Academia.
62. Vishal Pandurang Kumbhar, (2014), **An Overview: Basalt Rock Fibers - New Construction Material**, Acta Eng Intl 2014, 2(1), 11- 18, Aufau Periodicals, India, Researchgate.
63. 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-P: 1-6, Hangzhou, China, Frontiers.
64. Xiao-Su Yi, Shanyi Du, and Litong Zhang, (2018), **Composite Materials Engineering, Volume 2, Fundamentals of Composite Materials**, © Springer Nature Singapore Pte Ltd and Chemical Industry Press, Beijing 2018, China, P: 786.
65. Xin Min, Minghao Fang, Zhaohui Huang, Yan'gai Liu, Yaoting Huang, Ruilong Wen, Tingting Qian & Xiaowen Wu, (2015), **Enhanced thermal properties of novel shape-stabilized PEG composite phase change materials with radial mesoporous silica sphere for thermal energy storage**, Sci.Rep. 5, 12964; doi: 10.1038/srep12964, P-P: 1-11, Scientific Reports.
66. 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.
67. 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.
68. Yury Gogotsi, (2006), **Nanomaterials Handbook**, United States of America, Taylor & Francis Group, LLC, P: 779.
69. Z. M. Zhang, (2020), **Nano/Microscale Heat Transfer**, Second Edition, Mechanical Engineering Series, ISSN 0941-5122, Switzerland, © Springer Nature AG 2020, P: 780.
70. A. A. Filippov, (2019), **Effect of the Size of Silica Nanoparticles on the Mechanical Characteristics of Heterogeneous Epoxy Resin Materials,** AIP Conference Proceedings 2053, 030014 (2018), P-P: 030014-(1-4). St., Novosibirsk, Russia, AIP Publishing.

الملاحق

الملاحق Appendices:

الملحق رقم (1)

الجداول الخاصة بالمعايير العالمية، وتصنيف التوهين الصوتي وفقد نقل الصوت (STC)

Table 5:

Multiplicative factors for estimating room absorption from the floor area; these factors are multiplied by the floor area to obtain the estimated total absorptions in the room.

	Type of office furnishings			
	Hard: sound reflective walls, floor and ceiling, no drapes	Standard: reflective walls, acoustical ceiling, hard floor	Soft: acoustical ceiling, carpet or drapes	Very Soft: acoustical ceiling, carpet or drapes and wall furniture
Factor for multiplying floor area to obtain normal absorption	0.3	0.8	0.9	1.0

(Owens Corning, 2004)

Table: 6 (A)

Sound Transmission Class of Exterior Walls (B)

Construction details:

(1) Wood siding – 2 x 4 wood studs, 16" centers; ½" wood fiberboard sheathing nailed to studs; ⅝" x 10" redwood siding nailed through sheathing into studs; _" gypsum wallboard interior, screwed to studs or resilient channels.

(2) Stucco – 2 x 4 wood stud, 16" centers; No. 15 building felt and 1" wire mesh nailed to studs; stucco applied in three coats to ⅞" total thickness, dry weight of stucco 7.-9 lb/sq.ft; ½" gypsum wallboard interior, screwed to studs or resilient channels.

(3) Brick veneer – 2 x 4 wood studs, 16" centers; ¾" wood fiberboard sheathing nailed to studs; standard face brick 3½" " wide, spaced ½" out from sheathing with metal ties nailed through sheathing into studs, dry weight of brick and mortar 41 lb/sq.ft.; ½" gypsum wallboard interior, screwed to studs or resilient channels.

Taken from the U.S. Department of Commerce [redacted]al Bureau of Standards Building Science 77.

Exterior	Finish	Cavity Insulation	Resilient Channel	STC
Wood Siding (1)		None	No	37
		3½" Fiberglas wood framing batt insulation	No	39
		None	Yes	43
		3½" Fiberglas wood framing batt insulation	Yes	47
Stucco (2)		3½" Fiberglas wood framing batt insulation	No	46
		None	Yes	49
		3½" Fiberglas wood framing batt insulation	Yes	57
Brick Veneer (3)		3½" Fiberglas wood framing batt insulation	No	56
		None	Yes	54
		3½" Fiberlgas wood framing batt insulation	Yes	58
Concrete Block		None	No	45

Table: 7

Sound Transmission Class of Exterior Doors

Construction Details:

(1)Flush solid core wood door – width 1¾" weight 78 lb, 3.9 lb/sq.ft.

(2)Flush steel door – width 1¾"; faces 0.028" steel, separated by plastic perimeter strip; core rigid polyurethane, 2 to 2½" lb/cu.ft. foamed in place; weight 64 lb, 3.2 lb/sq.ft.

Taken from the U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards. Building Science Series 77.

Door	Weather Strip	Normally Closed STC
Wood, flush solid core (1)	Brass	27
Wood, flush solid core (1)	Plastic	27
Steel, flush (2)	Magnetic	28

(Owens Corning, 2004)

Table: 8

Sound Transmission Class of Windows

*Abbreviations:
ss = single strength
ds = double strength
d = divided lights
in = insulating glass of indicated overall thickness
lam = laminated safety glass of indicated thickness

Taken from the U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards Building Science Series 77.

Material	Type	Size	Glazing*	Sealed STC	Locked STC	Unlocked STC
Wood	Double hung	3'x5'	ss	29		23
			ss-d	29		
			ds	29		
			ds-d	30		
			in 1/16"	28	26	22
	Fixed Picture	6'x5'	ss-d	28		
			ds	29		
			in 1"	34		
Wood/Plastic	Double hung	3'x5'	ss	29	26	26
			in 3/8"	26	26	25
	Storm sash		ds	30	27	
			in 3/8"	28	24	
	Fixed casement		ds	31		
	Operable casement		ds	30	22	
	Sliding glass door		lam 3/16"	31	26	26
Aluminum	Siding		ss	28	24	
	Operable casement		ds	31	21	17
	Single hung		in 7/16"	30	27	25
Single pane 1/4"	laminated glass					34

(Owens Corning, 2004)

Table: 9

Sound Transmission Class of Metal Building Walls

Construction Type	Octave Band Center Frequencies, Hz 125	250	500	1000	2000	4000	STC
Metal building wall, 26 gauge [1]	12	14	15	21	21	25	20
Metal building wall + 3" insulation [2]	12	16	18	31	32	39	25
Metal building wall + 4" insulation [3]	11	17	21	34	35	42	27

Table: 10

Sound Insertion Loss, dB (1), of Fiberous Glass Reinforced Plastics (2)

Product Type & Thickness	Octave Band Center Frequencies, Hz 125	250	500	1000	2000	4000	NIC
FRP 1/4" thick, 1.13 lb/sq. ft. (3) [4]	15	18	25	26	29	36	27
FRP 1/4" thick, 2.08 lb/sq. ft. [5]	19	22	28	31	32	25	29
FRP 1/2" thick, 4.20 lb/sq. ft. [6]	21	27	29	34	27	36	29

Table: 11

Sound Insertion Loss, dB (1), of Typical Building Materials

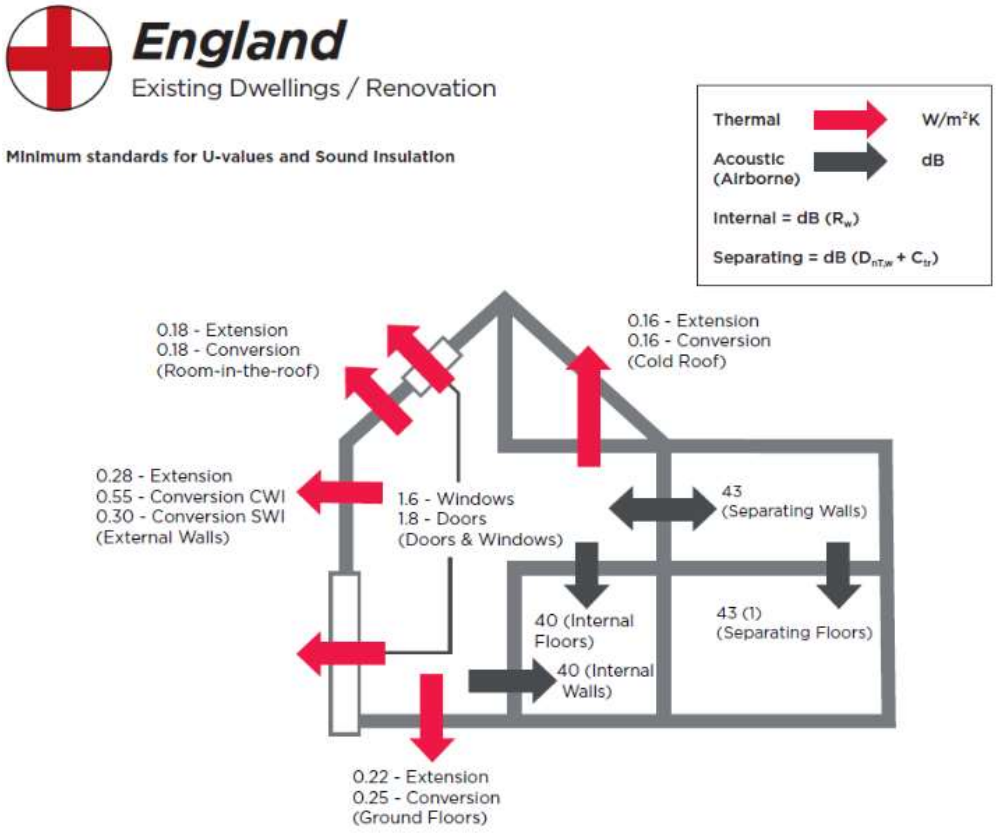
Product Type & Thickness	Octave Band Center Frequencies, Hz 125	250	500	1000	2000	4000	NIC
Plywood, 1/2", 1.33 lb/sq. ft. (3) [7]	17	20	23	23	23	24	21
Plywood, 3/4", 2.00 lb/sq. ft. (3) [8]	19	23	27	25	22	30	24
Sheet metal, 16 gauge, 2.38 lb/sq. ft. [9]	18	22	28	31	35	41	31
Sheet metal, 20 gauge, 1.50 lb/sq. ft. [10]	16	19	25	27	32	39	27
Sheet metal, 24 gauge, 1.02 lb/sq. ft. [11]	13	16	23	24	29	36	25
Gypsum Board, 1/2", 1.80 lb/sq. ft. [12]	18	22	26	29	27	26	26
Gypsum Board, 3/4", 2.20 lb/sq. ft. [13]	19	22	25	28	22	31	26
Glass, single strength, 3/32", 1.08 lb/sq. ft. [14]	15	18	25	26	28	29	26
Glass, double strength, 1/8", 1.40 lb/sq. ft [15]	16	19	25	29	30	20	24
Glass, plate, 1/4", 2.78 lb/sq. ft. [16]	20	25	26	30	23	30	27
Acrylic sheet, 1/8", 0.75 lb/sq. ft. [17]	14	17	22	24	27	34	24
Acrylic sheet, 1/4", 1.45 lb/sq. ft. [18]	16	19	26	27	30	29	27
Acrylic sheet, 1/2", 2.75 lb/sq. ft. [19]	20	24	27	30	29	35	29
Lead vinyl, 1.25 lb/sq. ft. [20]	17	19	28	30	34	39	29

(Owens Corning, 2004)

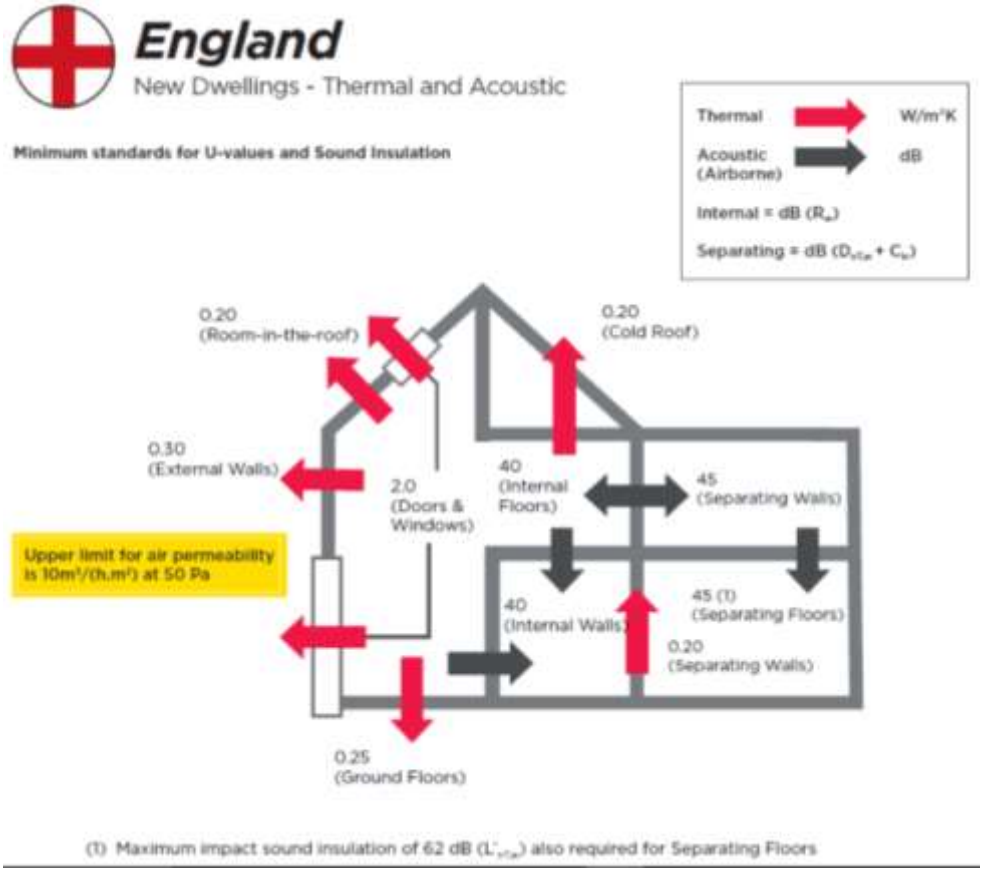
Area of 1 unit (Square foot)	Empty Space	Absorpent material
Sound absorption	100%	35%
Sabins	1.00	0.35

جدول يبين تعريف واحدة السابين (Sabin) التي تعبر عن امتصاص الصوت داخل الغرفة بالنسبة لواحدة المساحة.

القيم العظمى لكل من معامل انتقال الحرارة الكلي (U) وعزل الصوت لمواد عزل الأبنية وفق المعايير البريطانية،(Isover, 2019).



(1) Maximum impact sound insulation of 64 dB ($L'_{nT,w}$) also required for Separating Floors



(1) Maximum impact sound insulation of 62 dB ($L'_{nT,w}$) also required for Separating Floors

الملحق رقم (2)

الجداول الخاصة بالتركيب والنسب الوزنية لمكونات عينات البحث

مادة عازلة من الإيبوكسي (Pure Ep) " لعزل الأرضيات والجدران كدهان عازل"					
تعريف العينة					
م	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة	المادة المالئة	المادة الفعالة
1	000	Ep	–	–	–

مادة عازلة من البولي يوريثان الصلب ذي المسامات ميكروية البنية (PurePu) " لعزل الجدران والأسقف والأرضيات"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة	المادة المالئة	المادة الفعالة
1	001	Pu50	–	–	–
	002	Pu250	–	–	–

مادة عازلة من الإيبوكسي والمحسنة بالحبيبات النانوية (EpNs) " لعزل الأرضيات والجدران والأسقف كدهان عازل"								
م	تعريف العينة							
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
			المادة الداعمة	المادة المالئة (Epoxy)			المادة الفعالة (NanoSi)	
			% W	% W	B gr	A gr	% W	gr
1	003	EpNs1	0	99	22	22	1	0.44
2	004	EpNs3	0	97	22	22	3	1.36
3	005	EpNs5	0	95	22	22	5	2.32
4	006	EpNs7	0	93	22	22	7	3.31
5	007	EpNs10	0	90	22	22	10	4.89

مادة عازلة مركبة من الإيبوكسي المدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E " لعزل الأرضيات والأسقف" (EpE)								
م	تعريف العينة							
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
			المادة الداعمة (E-Glass)		المادة المالئة (Epoxy)			المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	gr	% W	B gr	A gr	% W
1	008	EpE5	5	2.32	95	22	22	0
2	009	EpE10	10	4.89	90	22	22	0
3	010	EpE15	15	7.76	85	22	22	0
4	011	EpE20	20	11.00	80	22	22	0
5	012	EpE30	30	18.86	70	22	22	0

مادة عازلة مركبة من الإيبوكسي المدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E والمحسنة بالحبيبات النانوية (EpNsE)									
م	تعريف العينة								
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة						
			المادة الداعمة (E-Glass)		المادة المالئة (Epoxy)			المادة الفعالة (NanoSi)	
			% W	gr	% W	B gr	A gr	% W	gr
1	013	EpNs1E5	5	2.34	94	22	22	1	0.47
2	014	EpNs3E10	10	5.06	87	22	22	3	1.52
3	015	EpNs5E15	15	8.25	80	22	22	5	2.75
4	016	EpNs7E20	20	12.05	73	22	22	7	4.22
5	017	EpNs10E30	30	22.00	60	22	22	10	7.33

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) المحسنة بالحبيبات النانوية (Pu50Ns) " لعزل الجدران والأسقف"								
م	تعريف العينة							
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
			المادة الداعمة	المادة المالئة (PU)			المادة الفعالة (NanoSi)	
			% W	% W	VR gr	VA gr	% W	gr
1	018	Pu50Ns1	0	99	6	5	1	0.11
2	019	Pu50Ns3	0	97	6	5	3	0.24
3	020	Pu50Ns5	0	95	6	5	5	0.37
4	021	Pu50Ns7	0	93	6	5	7	0.51
5	022	Pu50Ns10	0	90	6	5	10	0.72

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) مع الإيبوكسي والمحسنة بالحبيبات النانوية (Pu50EpNs) " لعزل الجدران والأسقف"									
تعريف العينة									م
مكونات العينة							رمز العينة	رقم العينة	
المادة الفعالة (NanoSi)		المادة المالئة (PU50)			مادة الطلاء السطحي (Epoxy)				
gr	% W	VA gr	VR gr	% W	Total gr	% W			
0.12	1	5	6	94	0.59	5	Pu50Ep5Ns1	023	1
0.40	3	5	6	82	2.01	15	Pu50Ep15Ns3	024	2
0.73	5	5	6	75	2.93	20	Pu50Ep20Ns5	025	3
1.45	7	5	6	53	6.23	30	Pu50Ep30Ns7	026	4
2.20	10	5	6	50	8.80	40	Pu50Ep40Ns10	027	5

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) و (كثافة 250 كغ/م³)، والمدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E " لعزل الجدران والأسقف" (Pu50E)، (Pu250E)								
تعريف العينة								م
مكونات العينة						رمز العينة	رقم العينة	
المادة الفعالة (NanoSi)	المادة المالئة (PU50)			المادة الداعمة (E-Glass)				
% W	VA gr	VR gr	% W	gr	% W			
0	5	6	95	0.58	5	Pu50E5	028	1
0	5	6	90	1.22	10	Pu50E10	029	2
0	5	6	85	1.94	15	Pu50E15	030	3
0	5	6	80	2.75	20	Pu50E20	031	4
0	11	11	85	1.94	15	Pu250E15	032	5

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) مع الإيبوكسي والمدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E " لعزل الجدران والأسقف" (Pu50EpE)									
م	تعريف العينة								
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة						
			المادة الداعمة (E-Glass)		المادة المالئة 1 (Epoxy)		المادة المالئة 2 (PU50)		المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	gr	% W	Total gr	% W	VR gr	VA gr	% W
1	033	Pu50Ep47.5E5	5	1.16	47.5	11	47.5	6	5	0
2	034	Pu50Ep45E10	10	2.44	45	11	45	6	5	0
3	035	Pu50Ep42.5E15	15	3.88	42.5	11	42.5	6	5	0
4	036	Pu50Ep40E20	20	5.50	40	11	40	6	5	0
5	037	Pu50Ep33E30	30	9.43	35	11	35	6	5	0

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) والمدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E والمحسنة بالحبيبات النانوية " لعزل الجدران والأسقف" (Pu50NsE)								
م	تعريف العينة							
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
			المادة الداعمة (E-Glass)		المادة المالئة (PU)		المادة الفعالة (NanoSi)	
			% W	gr	% W	VR gr	VA gr	% W	gr
1	038	Pu50Ns1E5	5	0.59	94	6	5	1	0.12
2	039	Pu50Ns3E10	10	1.26	87	6	5	3	0.38
3	040	Pu50Ns5E15	15	2.06	80	6	5	5	0.69
4	041	Pu50Ns7E20	20	3.01	73	6	5	7	1.05
5	042	Pu50Ns10E30	30	5.50	60	6	5	10	1.83

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) مع الإيبوكسي والمدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E والمحسنة بالحبيبات النانوية " لعزل الجدران والأسقف" (Pu50EpNsE)							
تعريف العينة							م
رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
		المادة الداعمة (E-Glass)		المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU50)	المادة الفعالة (NanoSi)	
		% W	gr	% W	% W	% W	gr
043	Pu50Ep47Ns1E5	5	1.17	47	47	1	0.23
044	Pu50Ep43.5Ns3E10	10	2.53	43.5	43.5	3	0.76
045	Pu50Ep40Ns5E15	15	4.13	40	40	5	1.38
046	Pu50Ep36.5Ns7E20	20	6.03	36.5	36.5	7	2.11
047	Pu50Ep30Ns10E30	30	11.00	30	30	10	3.67

مادة عازلة مركبة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 250 كغ/م³) مع الإيبوكسي والمدعم بالألياف الميكروية الزجاجية نوع E والمحسنة بالحبيبات النانوية " لعزل الجدران والأسقف والأرضيات" (Pu50EpNsE)							
تعريف العينة							م
رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
		المادة الداعمة (E-Glass)		المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU250)	المادة الفعالة (NanoSi)	
		% W	gr	% W	% W	% W	gr
048	Pu250Ep47Ns1E5	5	1.28	47	47	1	0.26
049	Pu250Ep43.5Ns3E10	10	2.76	43.5	43.5	3	0.83
050	Pu250Ep40Ns5E15	15	4.50	40	40	5	1.50
051	Pu250Ep36.5Ns7E20	20	6.58	36.5	36.5	7	2.30
052	Pu250Ep30Ns10E30	30	12.00	30	30	10	4.00

مادة مركبة عازلة من الإيبوكسي المدعم بألياف بازلتية (EpBa) " لعزل الأسقف والأرضيات"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة (Basalt)	المادة المالئة (Epoxy)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W
1	053	EpBa5	5	95	0
2	054	EpBa10	10	90	0
3	055	EpBa15	15	85	0
4	056	EpBa20	20	80	0
5	057	EpBa30	30	70	0

مادة مركبة عازلة من الإيبوكسي المدعم بألياف بازلتية والمحسنة بالحبيبات النانوية (EpNsBa) " لعزل الأسقف والأرضيات"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة (Basalt)	المادة المالئة (Epoxy)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W
1	058	EpNs1Ba5	5	94	1
2	059	EpNs3Ba10	10	87	3
3	060	EpNs5Ba15	15	80	5
4	061	EpNs7Ba20	20	73	7
5	062	EpNs10Ba30	30	60	10

مادة مركبة عازلة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) المدعم بألياف بازلتية (Pu50Ba) " لعزل الجدران والأسقف"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة (Basalt)	المادة المالئة (PU)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W
1	063	Pu50Ba5	5	95	0
2	064	Pu50Ba10	10	90	0
3	065	Pu50Ba15	15	85	0
4	066	Pu50Ba20	20	80	0
5	067	Pu50Ba30	30	70	0

مادة مركبة عازلة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) والإيبوكسي المدعم بألياف بازلتية (Pu50EpBa) " لعزل الجدران والأسقف"									
تعريف العينة									م
مكونات العينة								رقم العينة	
المادة الفعالة (NanoSi)	المادة المالئة 2 (PU50)			المادة المالئة 1 (Epoxy)		المادة الداعمة (Basalt)		رمز العينة	
% W	VA gr	VR gr	% W	Total gr	% W	gr	% W		
0	5	6	47.5	11	47.5	1.16	5	Pu50Ep47.5Ba5	068	1
0	5	6	45	11	45	2.44	10	Pu50Ep45Ba10	069	2
0	5	6	42.5	11	42.5	3.88	15	Pu50Ep42.5Ba15	070	3
0	5	6	40	11	40	5.50	20	Pu50Ep40Ba20	071	4
0	5	6	35	11	35	9.43	30	Pu50Ep33Ba30	072	5

مادة مركبة عازلة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) المدعم بألياف بازلتية والمحسنة بالحبيبات النانوية (Pu50NsBa) " لعزل الجدران والأسقف"					
تعريف العينة					م
مكونات العينة			رمز العينة	رقم العينة	
المادة الفعالة (NanoSi)	المادة المالئة (PU)	المادة الداعمة (Basalt)			
% W	% W	% W			
1	99	5	Pu50Ns1Ba5	073	1
3	97	10	Pu50Ns3Ba10	074	2
5	95	15	Pu50Ns5Ba15	075	3
7	93	20	Pu50Ns7Ba20	076	4
10	90	30	Pu50Ns10Ba30	077	5

مادة مركبة عازلة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 50 كغ/م³) والإيبوكسي المدعم بألياف بازلتية والمحسنة بالحبيبات النانوية (Pu50EpNsBa) " لعزل الجدران والأسقف"								
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
			المادة الداعمة (Basalt)		المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU50)	المادة الفعالة (NanoSi)	
			% W	gr	% W	% W	% W	gr
1	078	Pu50Ep47Ns1Ba5	5	1.17	47	47	1	0.23
2	079	Pu50Ep43.5Ns3Ba10	10	2.53	43.5	43.5	3	0.76
3	080	Pu50Ep40Ns5Ba15	15	4.13	40	40	5	1.38
4	081	Pu50Ep36.5Ns7Ba20	20	6.03	36.5	36.5	7	2.11
5	082	Pu50Ep30Ns10Ba30	30	11.00	30	30	10	3.67

مادة مركبة عازلة من البولي يوريثان الصلب (كثافة 250 كغ/م³) والإيبوكسي المدعم بألياف بازلتية والمحسنة بالحبيبات النانوية (Pu250EpNsBa) " لعزل الجدران والأسقف والأرضيات"								
م	تعريف العينة							
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة					
			المادة الداعمة (Basalt)		المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU250)	المادة الفعالة (NanoSi)	
			% W	gr	% W	% W	% W	gr
1	083	Pu250Ep47Ns1Ba5	5	1.28	47	47	1	0.26
2	084	Pu250Ep43.5Ns3Ba10	10	2.76	43.5	43.5	3	0.83
3	085	Pu250Ep40Ns5Ba15	15	4.50	40	40	5	1.50
4	086	Pu250Ep36.5Ns7Ba20	20	6.58	36.5	36.5	7	2.30
5	087	Pu250Ep30Ns10Ba30	30	12.00	30	30	10	4.00

مادة مركبة عازلة ساندويش (طبقتين من النسيج الزجاجي ثنائي البعد غير منسوج **Mat**) (**VIP**) من البولي يوريثان والإيبوكسي (**Pu50EpNs2DEMat**) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"						
م	تعريف العينة					
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة			
			المادة الداعمة (2D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU50)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W	% W
1	088	Pu50EpNs2DE5Mat	5	47	47	1
2	089	Pu50EpNs2DE10Mat	10	43.5	43.5	3
3	090	Pu50EpNs2DE15Mat	15	40	40	5
4	091	Pu50EpNs2DE20Mat	20	36.5	36.5	7
5	092	Pu250EpNs2DE20Mat	20	36.5	36.5	7

مادة مركبة عازلة ساندويش (طبقتين من النسيج الزجاجي ثنائي البعد) (**VIP**) من البولي يوريثان الصلب والإيبوكسي والمحسنة بالحبيبات النانوية (**Pu50EpNs2DE**) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"						
م	تعريف العينة					
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة			
			المادة الداعمة (2D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU50)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W	% W
1	093	Pu50EpNs12DE5	5	47	47	1
2	094	Pu50EpNs32DE10	10	43.5	43.5	3
3	095	Pu50EpNs52DE15	15	40	40	5
4	096	Pu50EpNs72DE20	20	36.5	36.5	7
5	097	Pu250EpNs72DE20	20	36.5	36.5	7

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (**10** مم) (**VIP**) مع الإيبوكسي (**Ep3DE10**) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"				
م	تعريف العينة			
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة	
			المادة الداعمة (3D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)
			% W	% W
1	098	Ep-3DE10	60	40

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (20 مم) (VIP) مع الإيبوكسي (Ep3DE20) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"				
تعريف العينة				
م	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة	
			المادة الداعمة (3D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)
			% W	% W
1	099	Ep-3DE20	60	40

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (10 مم) (VIP) مع الإيبوكسي والمحسنة بالحبيبات النانوية (EpNs3DE10) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة (3D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W
1	100	Ep39Ns1-3DE10	60	39	1
2	101	Ep37Ns3-3DE10	60	37	3
3	102	Ep35Ns5-3DE10	60	35	5
4	103	Ep33Ns7-3DE10	60	33	7
5	104	Ep30Ns10-3DE10	60	30	10

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (20 مم) (VIP) مع الإيبوكسي والمحسنة بالحبيبات النانوية (EpNs3DE20) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة (3D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W
1	105	Ep39Ns1-3DE20	60	39	1
2	106	Ep37Ns3-3DE20	60	37	3
3	107	Ep35Ns5-3DE20	60	35	5
4	108	Ep33Ns7-3DE20	60	33	7
5	109	Ep30Ns10-3DE20	60	30	10

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (10 مم) (VIP) مع الإيبوكسي والبولي يوريثان (50 كغ/م³) (PuEp3DE10) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"					
م	تعريف العينة				
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة		
			المادة الداعمة (3D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU50)
			% W	% W	% W
1	110	Pu30Ep30-3DE10	40	30	30
2	111	Pu35Ep25-3DE10	40	25	35
3	112	Pu40Ep20-3DE10	40	20	40
4	113	Pu45Ep15-3DE10	40	15	45
5	114	Pu50Ep10-3DE10	40	10	50

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (10 مم) (VIP) مع الإيبوكسي والبولي يوريثان (50 كغ/م³) والمحسنة بالحبيبات النانوية (PuEpNs3DE10) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"						
م	تعريف العينة					
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة			
			المادة الداعمة (3D-EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W	% W
1	115	Pu29Ep30Ns1-3DE10	40	30	29	1
2	116	Pu32Ep25Ns3-3DE10	40	25	32	3
3	117	Pu35Ep20Ns5-3DE10	40	20	35	5
4	118	Pu43Ep15Ns7-3DE10	40	15	38	7
5	119	Pu40Ep10Ns10-3DE10	40	10	40	10

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (20 مم) (VIP) مع الإيبوكسي والبولي يوريثان (50 كغ/م³) والمحسنة بالحبيبات النانوية (PuEpNs3DE20) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"

م	تعريف العينة					
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة			
			المادة الداعمة (3D–EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W	% W
1	120	Pu29Ep30Ns1–3DE20	40	30	29	1
2	121	Pu32Ep25Ns3–3DE20	40	25	32	3
3	122	Pu35Ep20Ns5–3DE20	40	20	35	5
4	123	Pu43Ep15Ns7–3DE20	40	15	38	7
5	124	Pu40Ep10Ns10–3DE20	40	10	40	10

مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (10 مم) مع الإيبوكسي والبولي يوريثان (250 كغ/م³) والمحسنة بالحبيبات النانوية (Pu250EpNs3DE10) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"

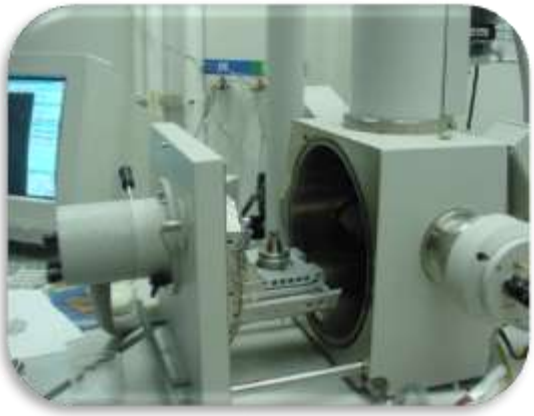
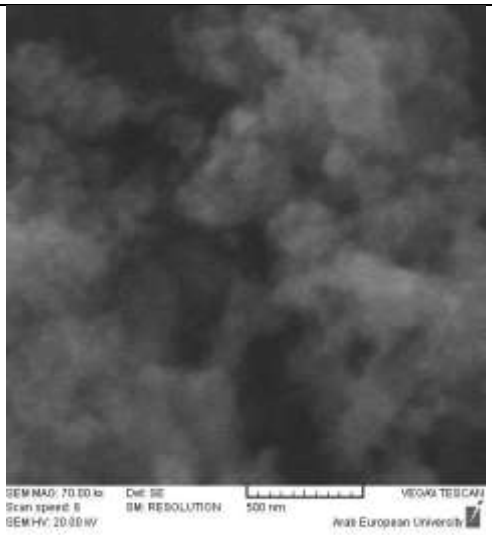
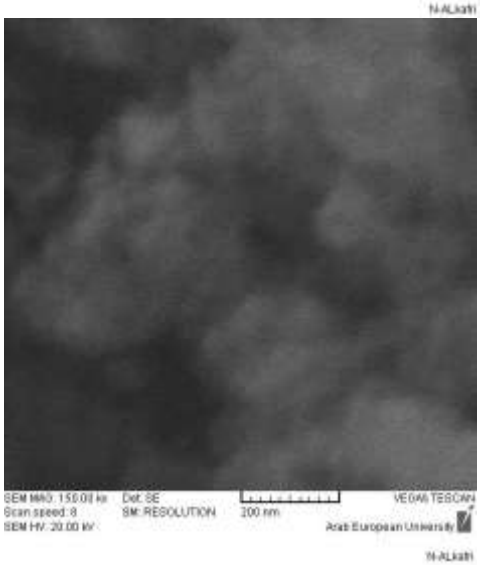
م	تعريف العينة					
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة			
			المادة الداعمة (3D–EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W	% W
1	125	Pu35Ep20Ns5–3DE10	40	20	35	5
2	126	Pu43Ep15Ns7–3DE10	40	15	38	7
3	127	Pu40Ep10Ns10–3DE10	40	10	40	10

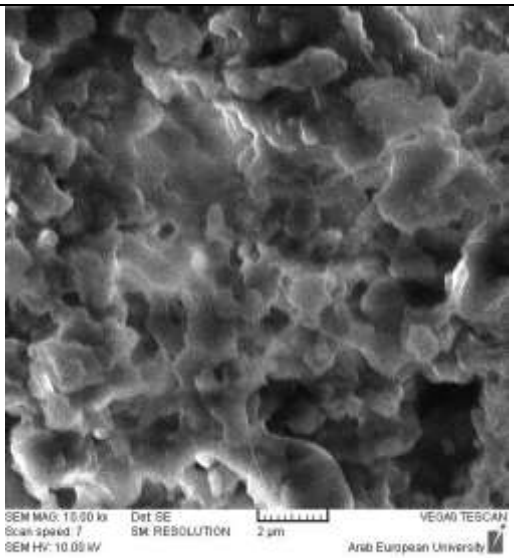
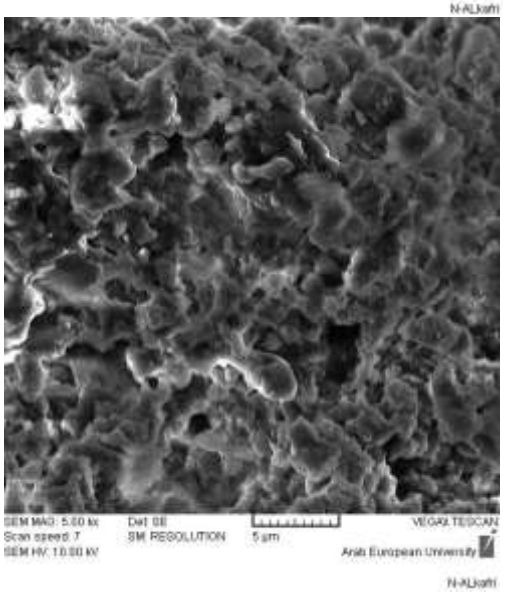
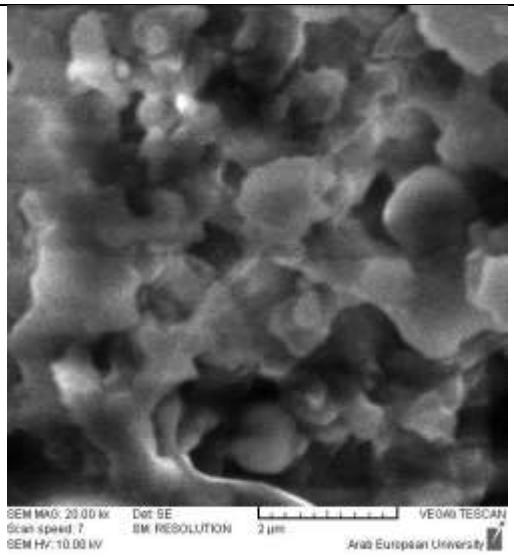
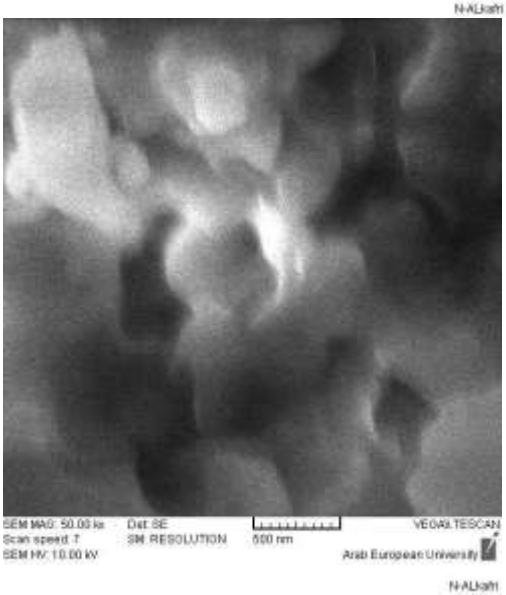
مادة مركبة عازلة ساندويش بطبقتين من النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد والمفرغ ذي السماكة (20 مم) مع الإيبوكسي والبولي يوريثان (250 كغ/م³) والمحسنة بالحبيبات النانوية (Pu250EpNs3DE20) " لعزل الجدران والأسقف والأنابيب والأرضيات"

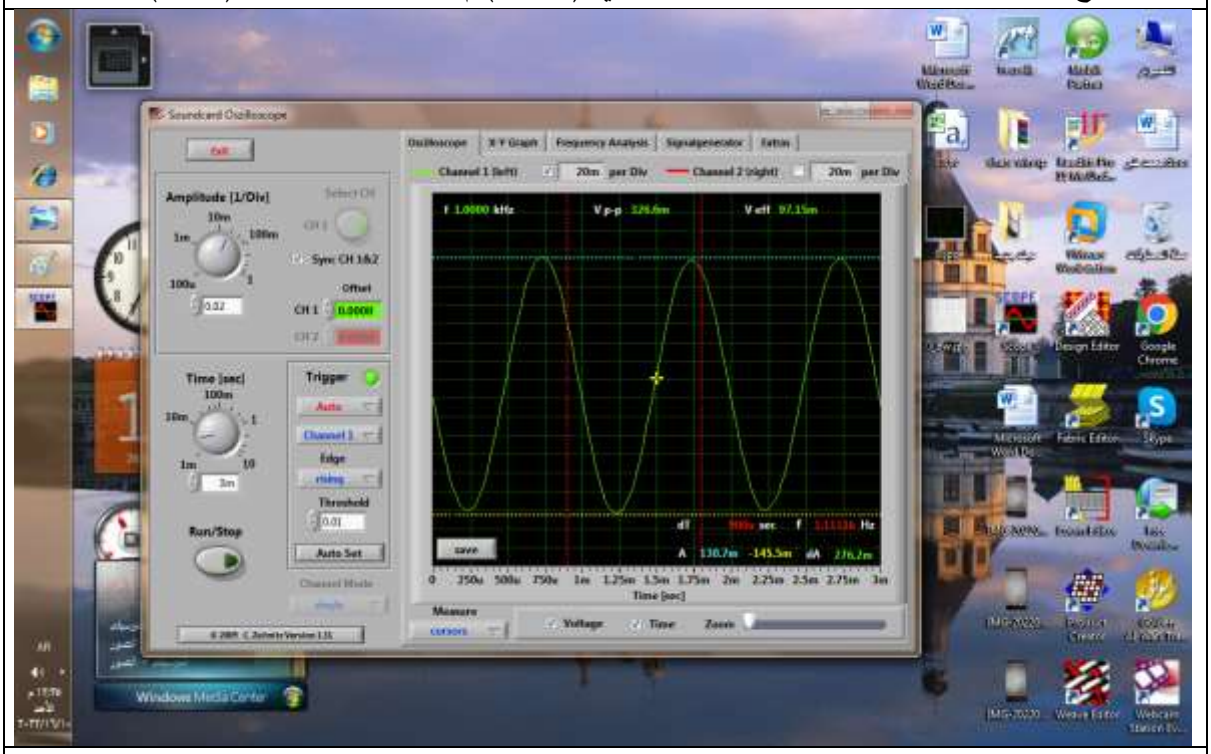
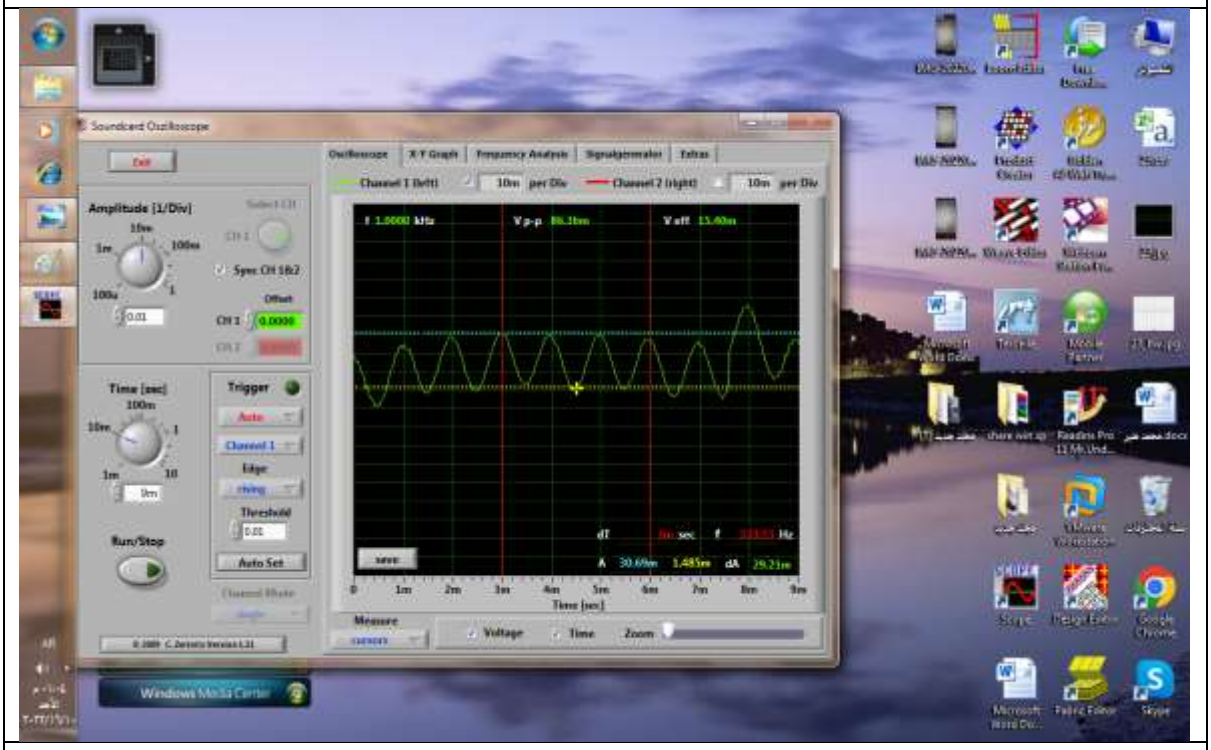
م	تعريف العينة					
	رقم العينة	رمز العينة	مكونات العينة			
			المادة الداعمة (3D–EGlass)	المادة المالئة 1 (Epoxy)	المادة المالئة 2 (PU)	المادة الفعالة (NanoSi)
			% W	% W	% W	% W
1	128	Pu35Ep20Ns5–3DE20	40	20	35	5
2	129	Pu43Ep15Ns7–3DE20	40	15	38	7
3	130	Pu40Ep10Ns10–3DE20	40	10	40	10

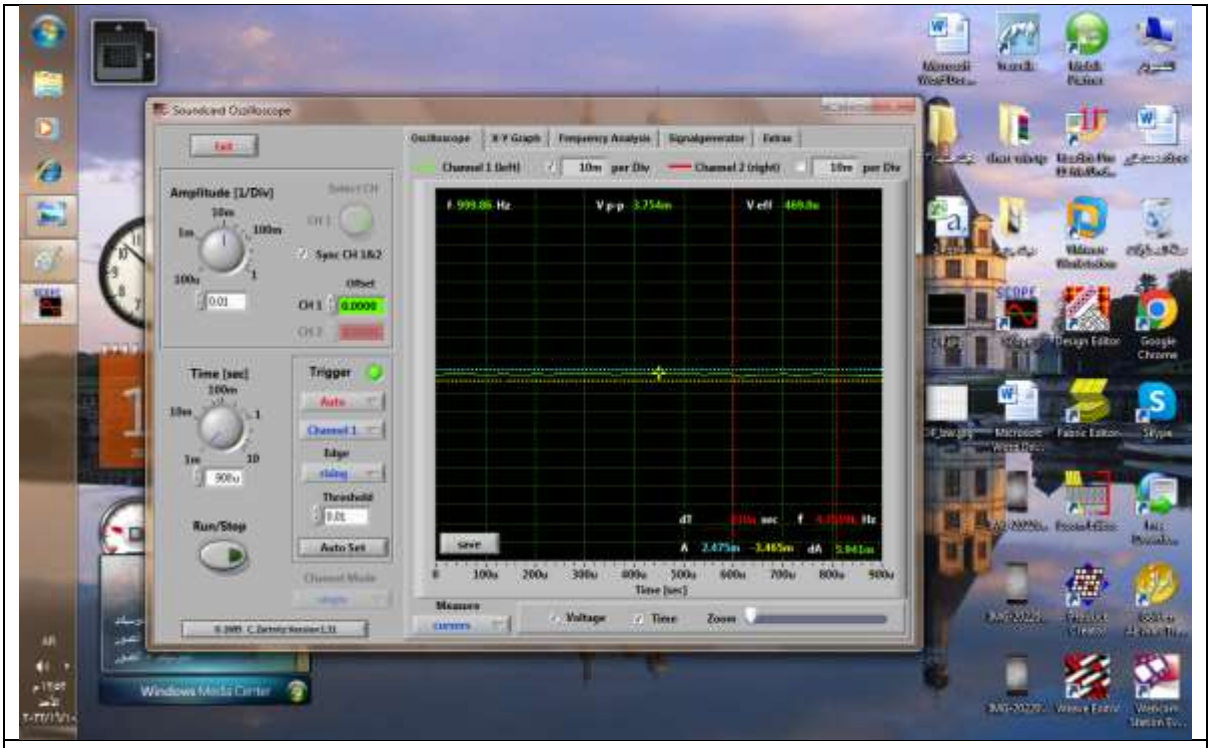
الملحق رقم (3)

للاستفاضة بصور الماسح (SEM) ونتائج تحليله للحبيبات النانوية، واختبار عزل الصوت للعينات

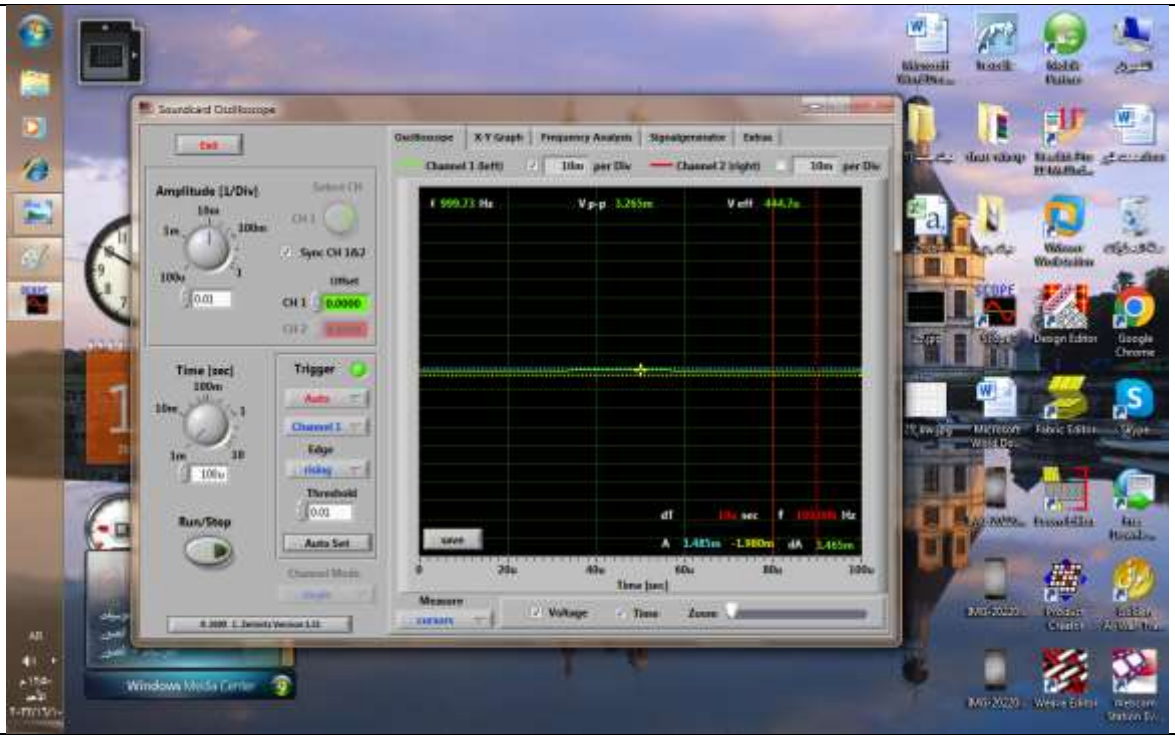
نتيجة الاختبار بالماسح الإلكتروني وفقاً لكل عينة	
	 
صور الجهاز الماسح الالكتروني الضوئي (SEM)	أبعاد المسام 20 نانومتر–300 نانومتر
	بملاحظة مقياس التكبير برتبة النانومتر وُجد أن أبعاد المسام تصل حتى 20 نانومتر حتى وإن كانت غير واضحة، تبدو الصورة ضبابية كون العينة بودرة غبارية تتعرض حبيبتها للتخريب تحت تأثير الحزمة الالكترونية للماسح، تحتاج العينات لاختبار (TEM) مجهر الكتروني نافذ. (في دراسات لاحقة).

 	 
أبعاد الحبيبات بوضوح في البنية 100 نانومتر–2 ميكرون	أبعاد المسام بوضوح 80 نانومتر–500 نانومتر
بملاحظة مقياس التكبير ومن الصور وُجد أن أبعاد الحبيبات تبدو واضحة شكلاً وحجماً وضمن المجال من 100 نانو حتى 20 ميكرون والبنية الشبكية واضحة للعينة – السيليكا من سيليكات الصوديوم – أعناق الربط واضحة بين الحبيبات	بملاحظة مقياس التكبير برتبة النانومتر وُجد أن أبعاد المسام تصل حتى 80 نانومتر حتى وإن كانت غير واضحة لكن البنية الشبكية للبولي سيلوكسان تبدو واضحة، تبدو الصورة ضبابية كونها تعرضت للتخريب تحت تأثير الحزمة الالكترونية للماسح، تحتاج العينات لاختبار (TEM)، (في دراسات لاحقة).

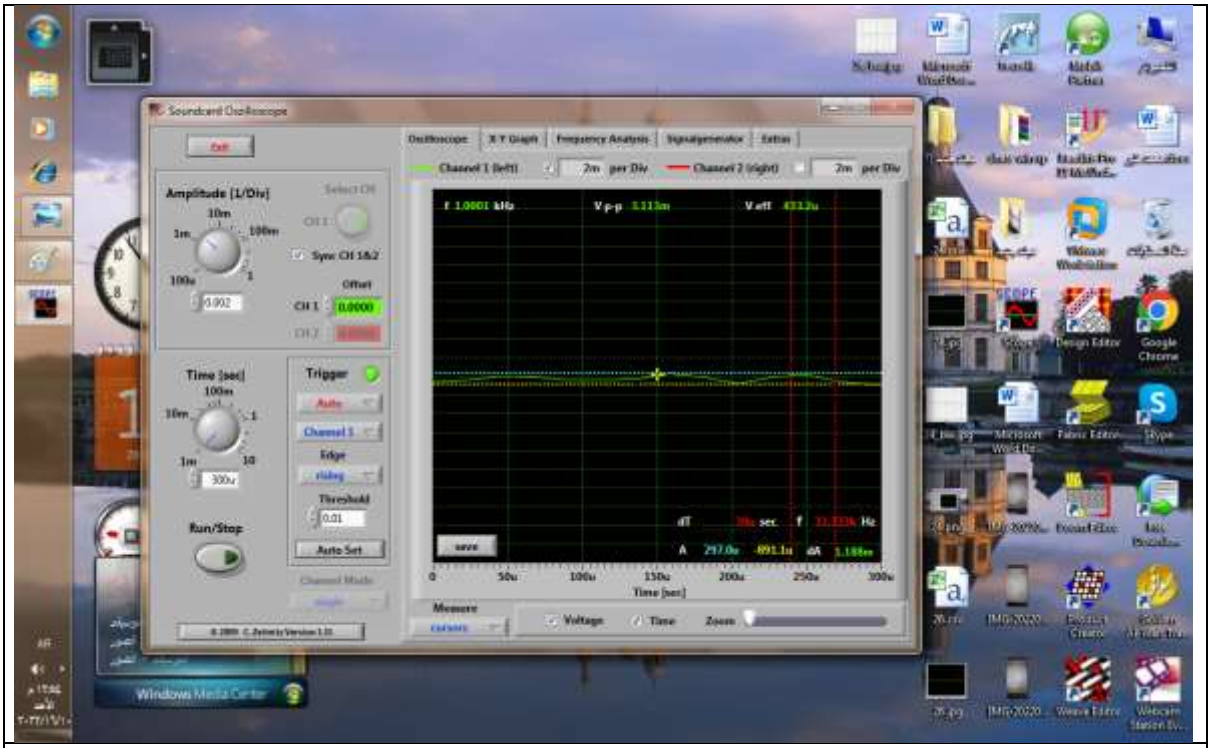
نتائج مجموعة الاختبار الأولى، طول الموجة الصفرية (276.2) م، والاختبار عند التردد (1000) هرتز

0

103


Soundcard Oscilloscope
Exit
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Amplitude [1/Div]
Sync CH 1&2
Offset
CH 1
0.0000
Time [sec]
Trigger
Auto
Channel 1
Edge
Threshold
Auto Set
Run/Stop
save
Measure
Voltage
Time
Zoom
Windows Media Center

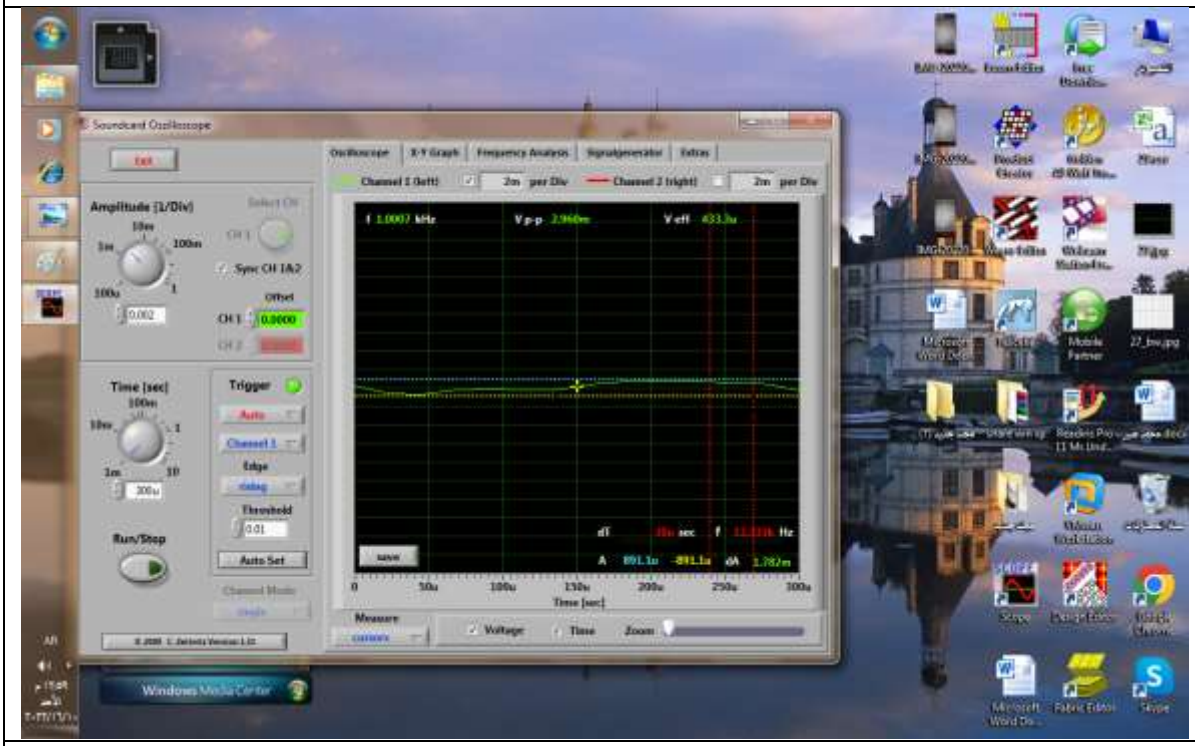
092


Soundcard Oscilloscope
Exit
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Amplitude [1/Div]
Sync CH 1&2
Offset
CH 1
0.0000
Time [sec]
Trigger
Auto
Channel 1
Edge
Threshold
Auto Set
Run/Stop
save
Measure
Voltage
Time
Zoom
Windows Media Center

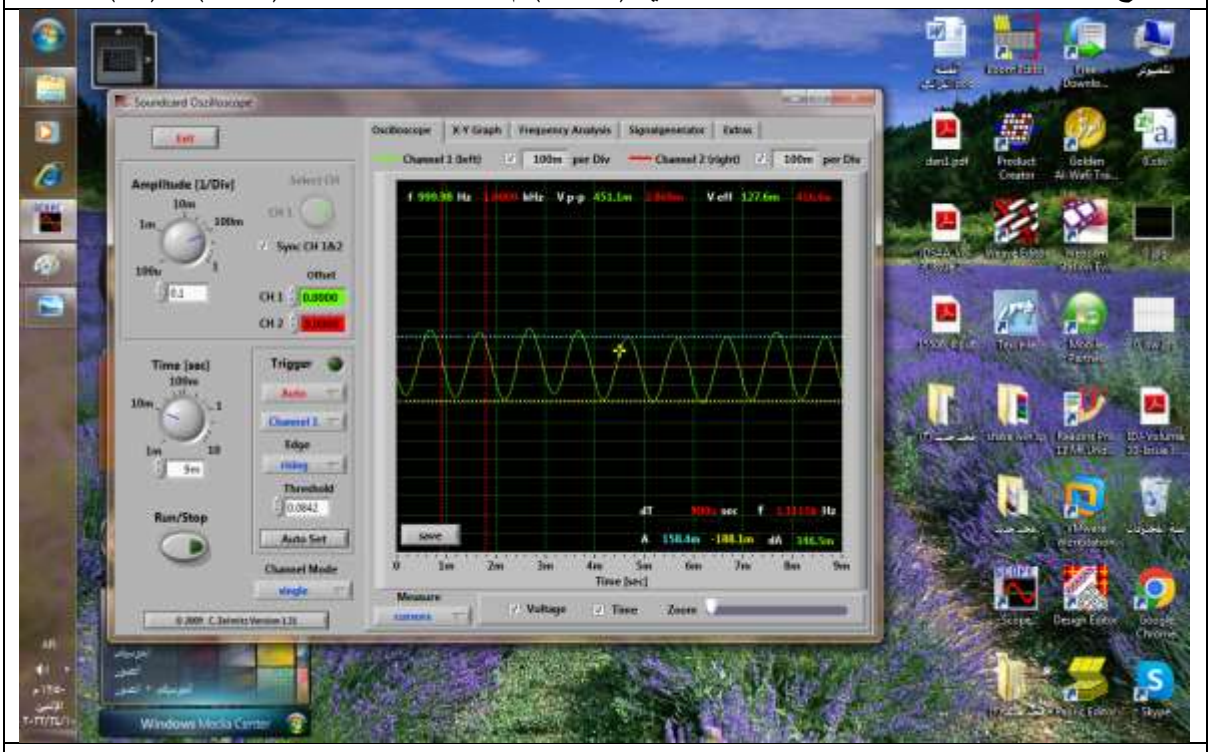
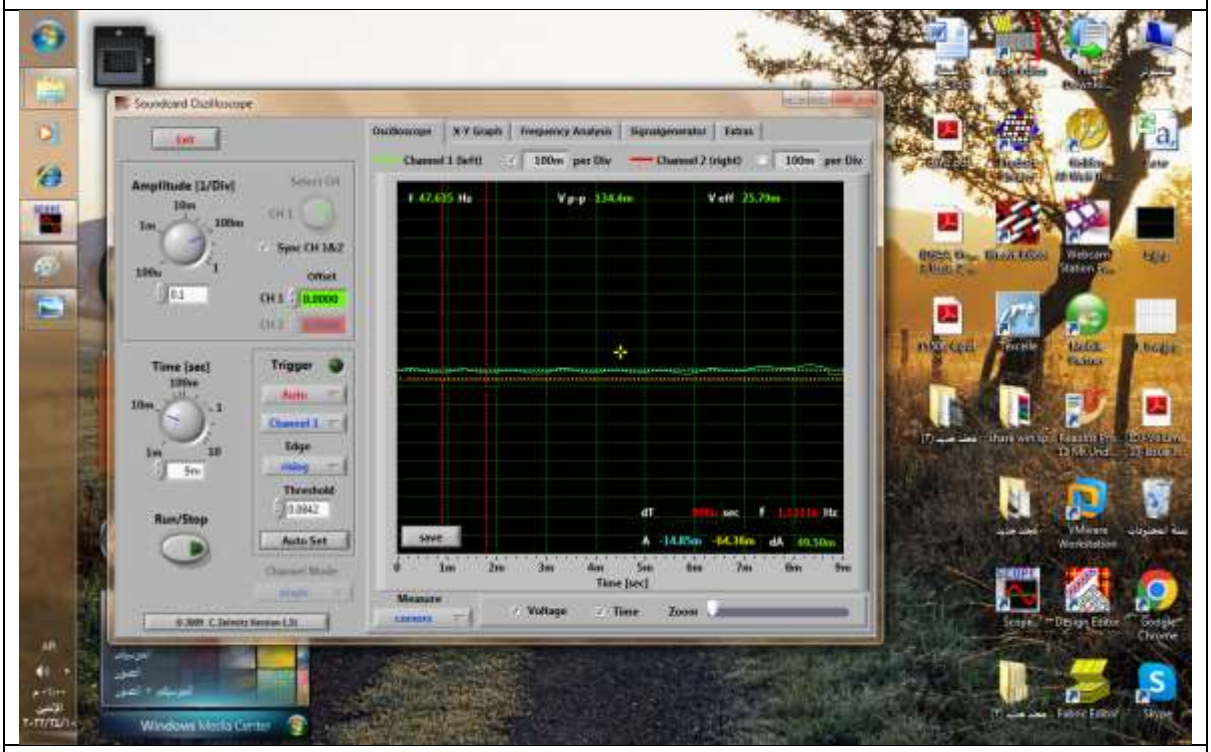
097

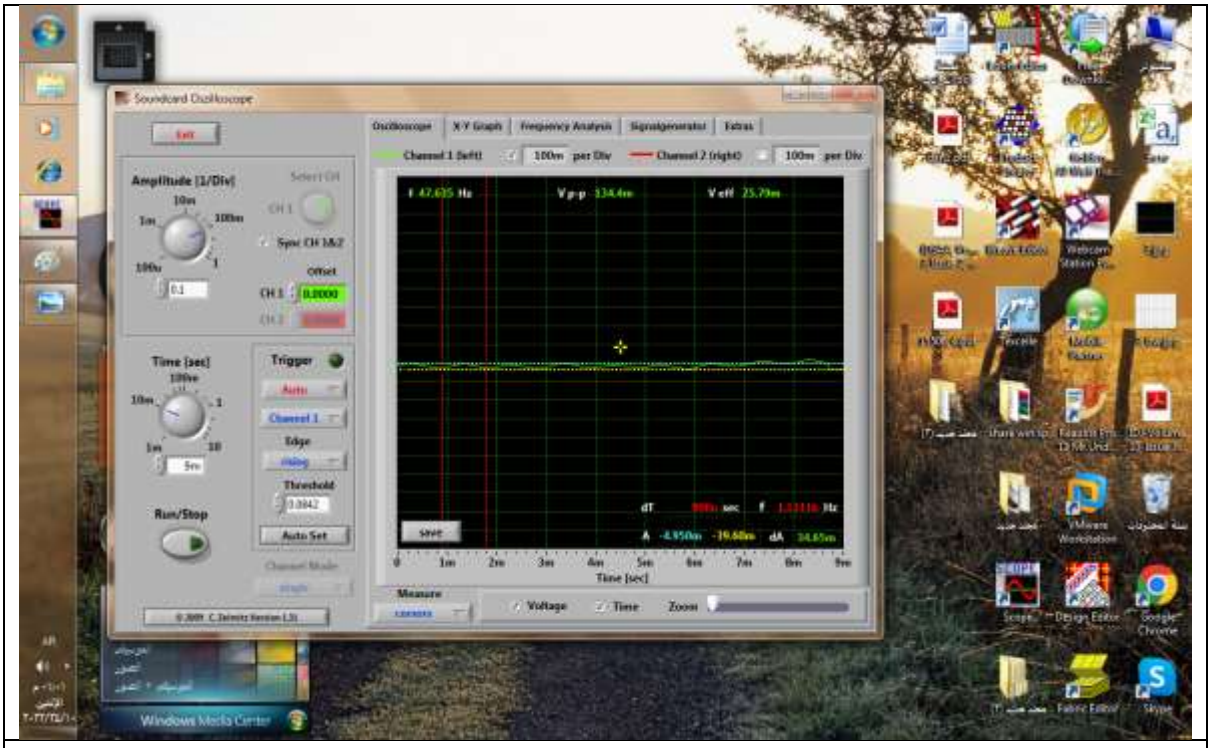

Soundcard Oscilloscope
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Windows Media Center

126

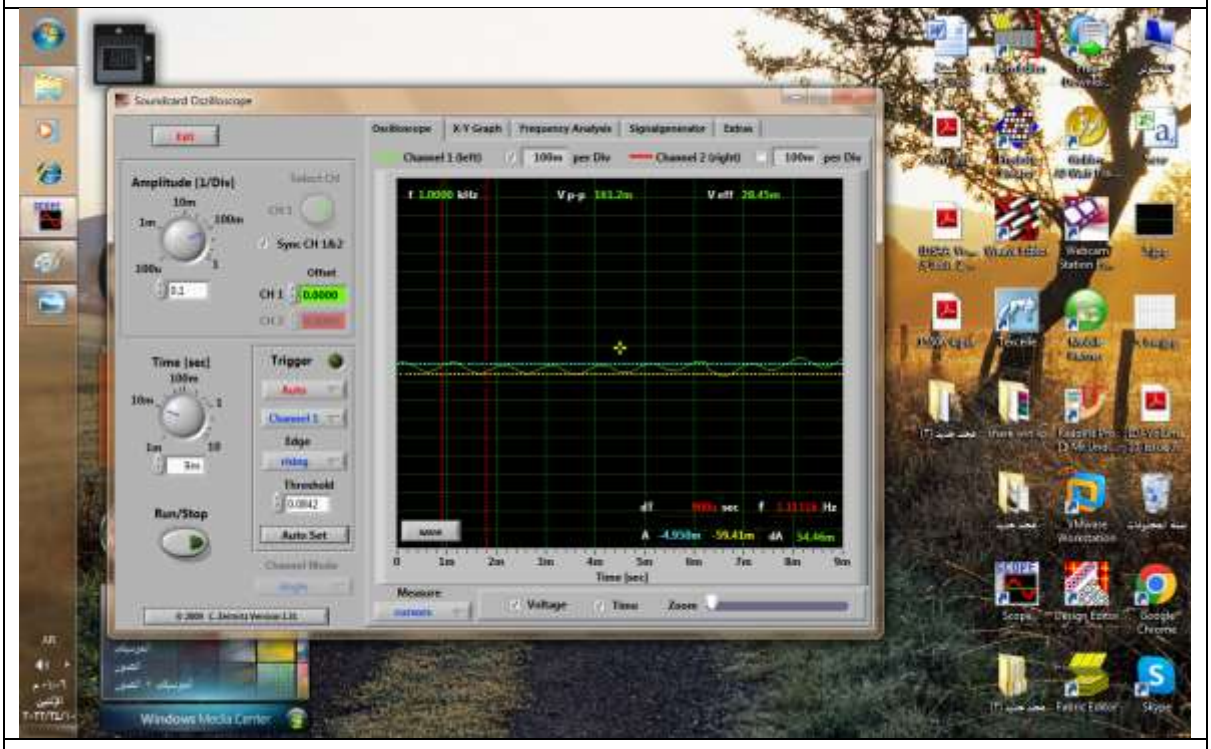

Soundcard Oscilloscope
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Windows Media Center

118

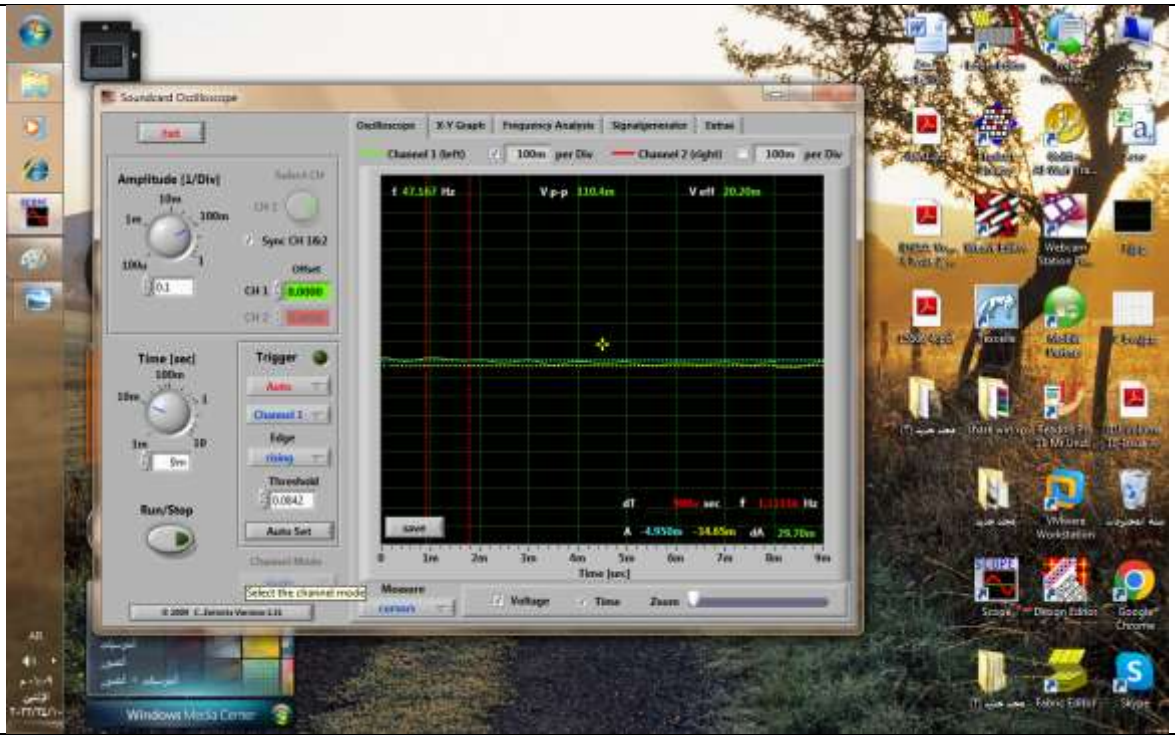
نتائج مجموعة الاختبار الثانية، طول الموجة الصفرية (346.5) م، والاختبار عند التردد (1000) و (50) هرتز

0

102


Soundcard Oscilloscope
Exit
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Measure
Voltage
Time
Zoom
Windows Media Center

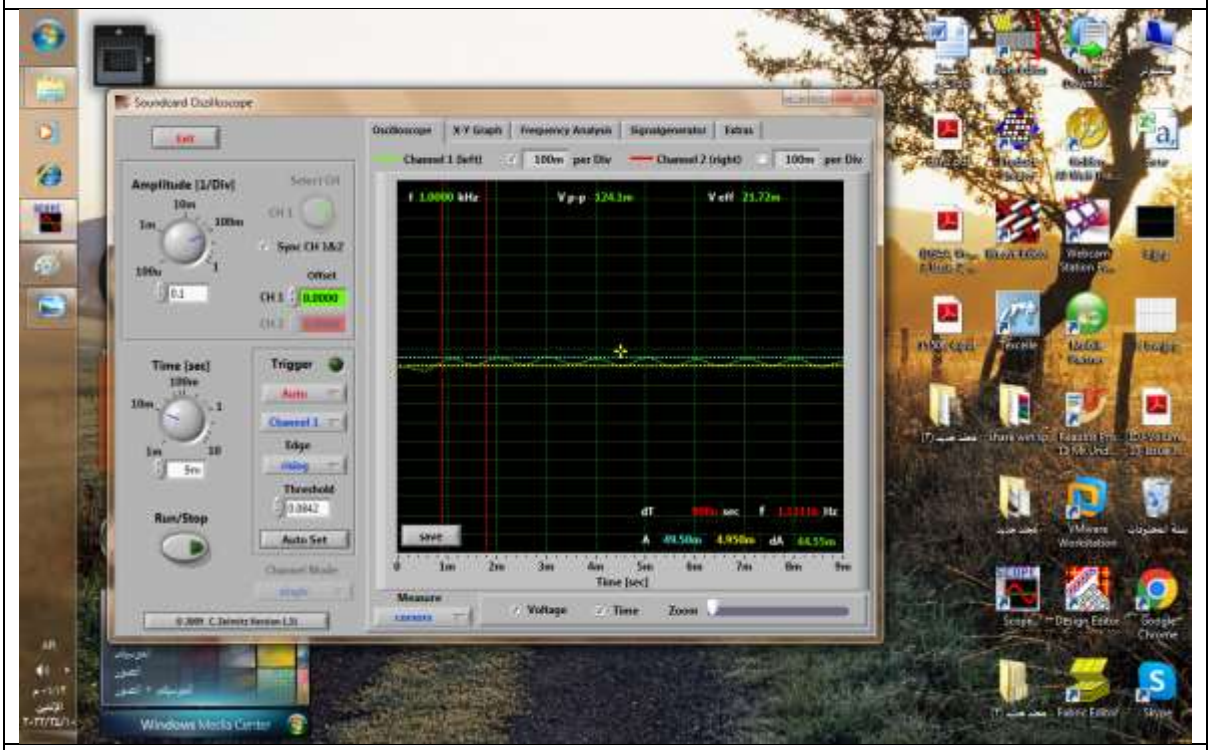
046


Soundcard Oscilloscope
Exit
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Measure
Voltage
Time
Zoom
Windows Media Center

026


Soundcard Oscilloscope
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Windows Media Center

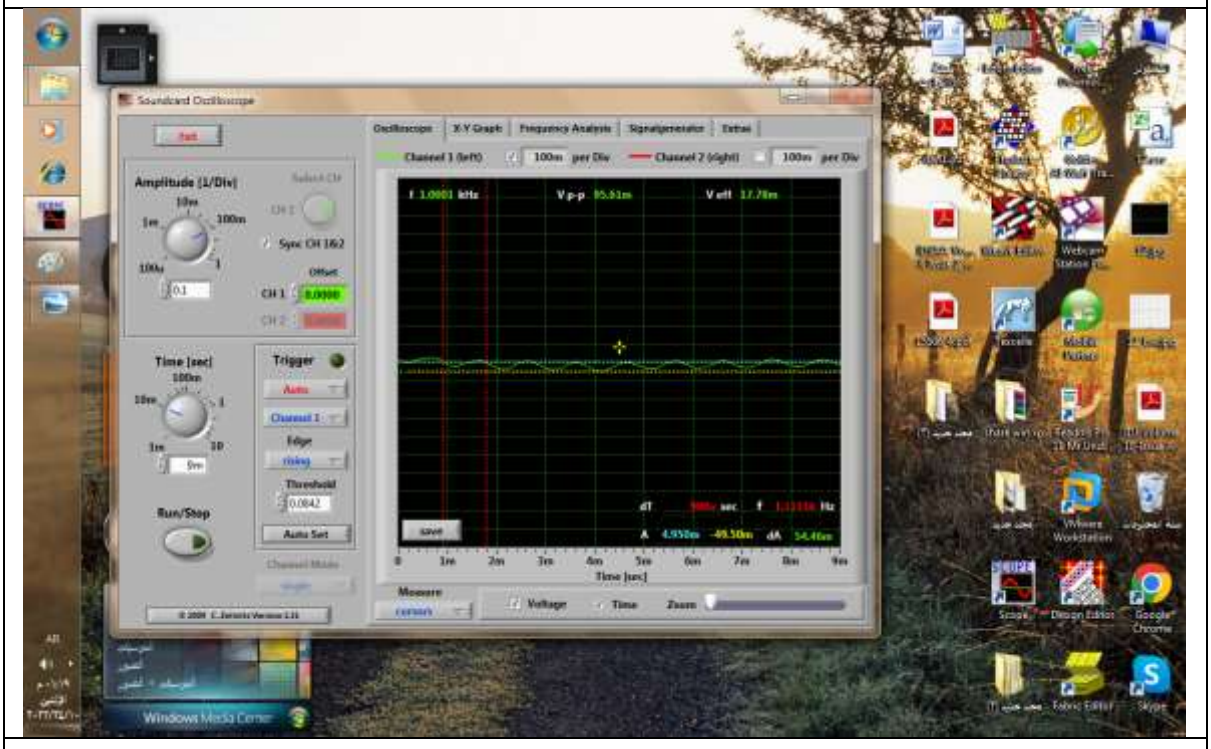
016


Soundcard Oscilloscope
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Windows Media Center

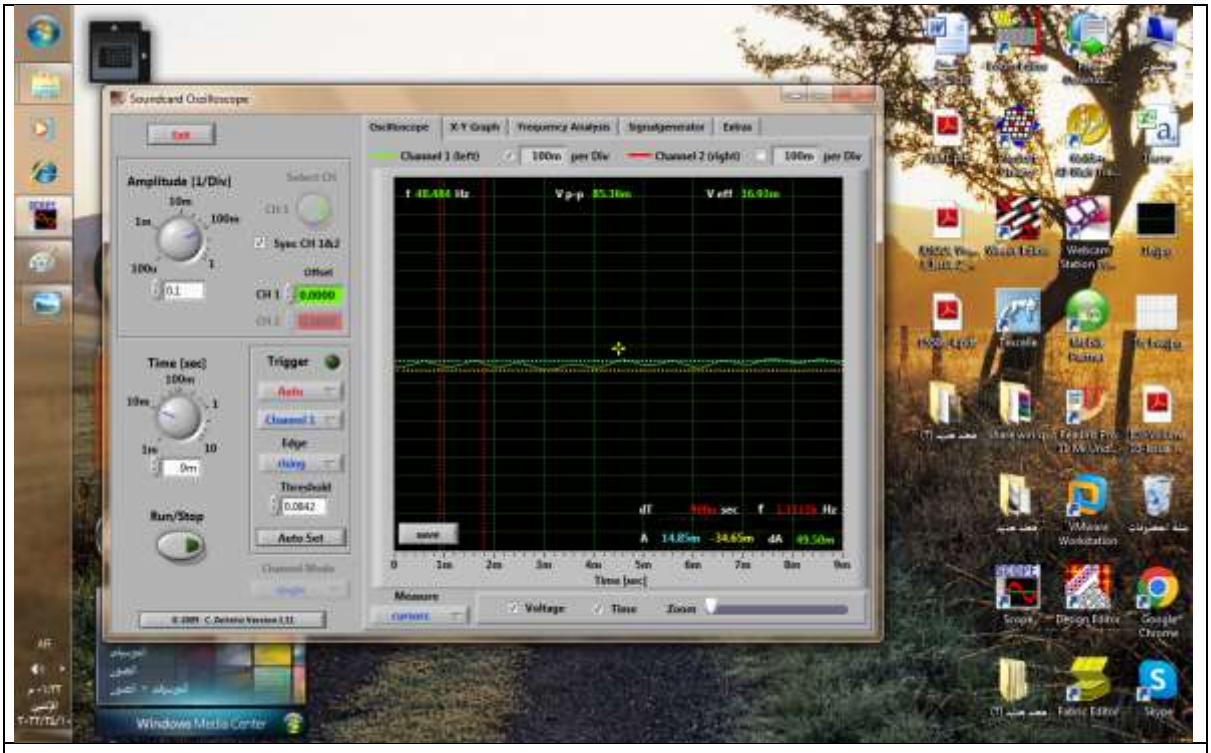
090

Soundcard Oscilloscope
Amplitude (1/Div)
Time (sec)
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Measure
Windows Media Center

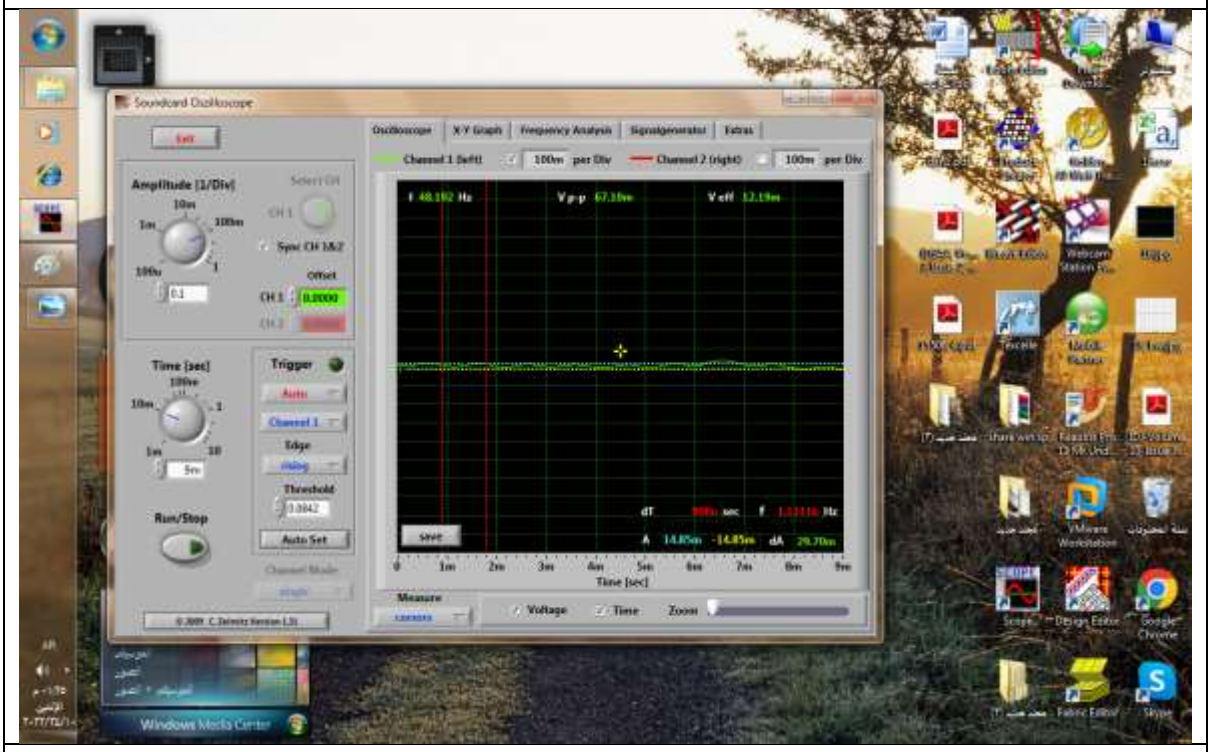
030


Soundcard Oscilloscope
Amplitude (1/Div)
Time (sec)
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Measure
Windows Media Center

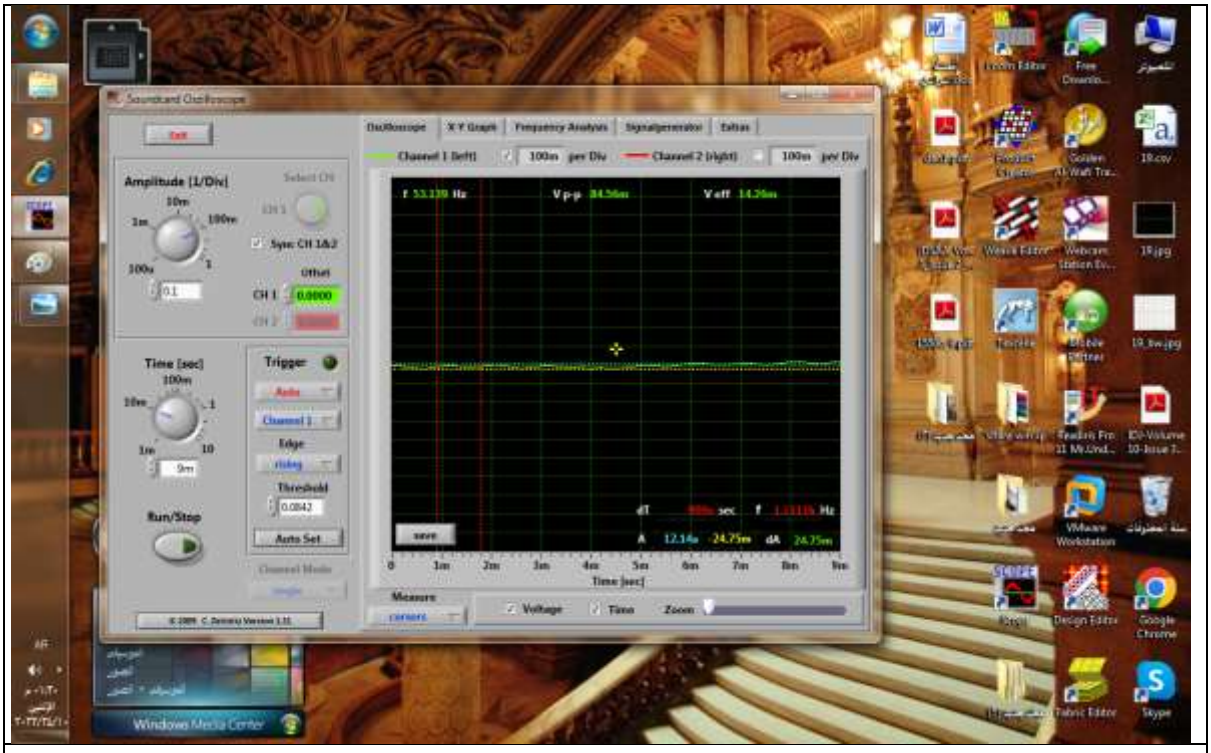
081


Soundcard Oscilloscope
Exit
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Edge
Threshold
Auto Set
Run/Stop
Measure
Voltage
Time
Zoom
Windows Media Center

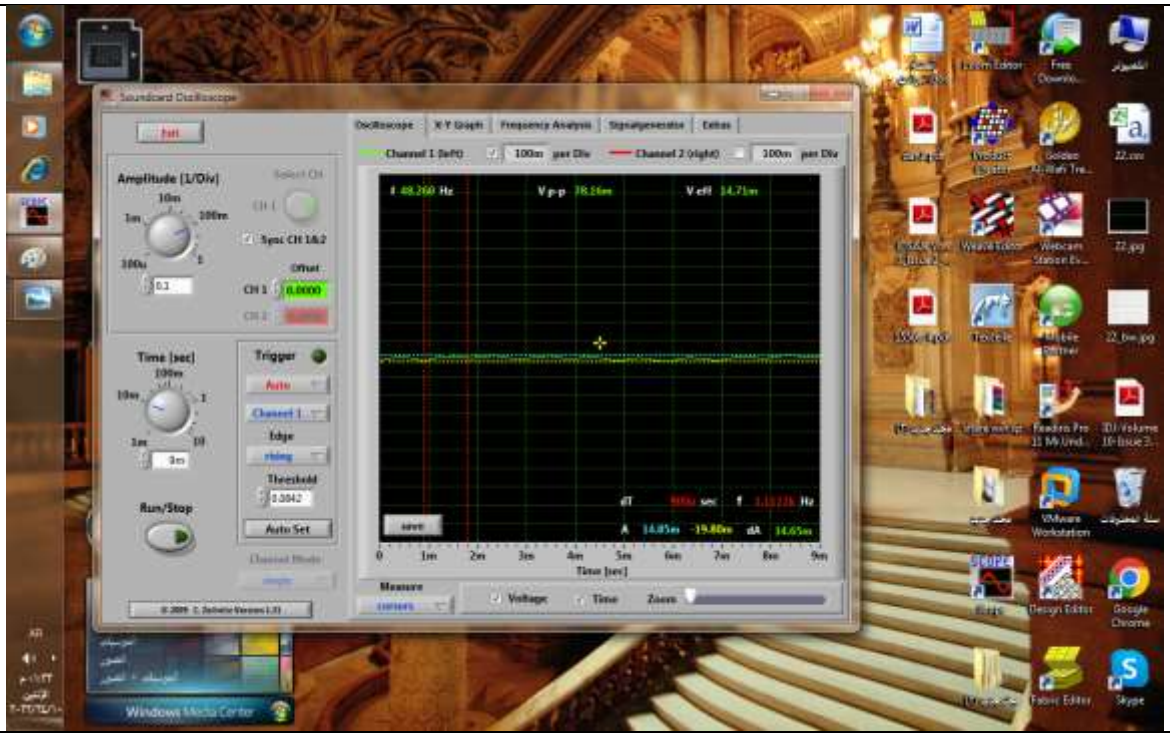
032


Soundcard Oscilloscope
Exit
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Edge
Threshold
Auto Set
Run/Stop
Measure
Voltage
Time
Zoom
Windows Media Center

091


Soundcard Oscilloscope
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Measure
Windows Media Center

117


Soundcard Oscilloscope
Oscilloscope
X-Y Graph
Frequency Analysis
Signalgenerator
Extras
Amplitude [1/Div]
Time [sec]
Trigger
Run/Stop
Auto Set
Measure
Windows Media Center

107

الملحق (4)

جداول خواص بعض المواد، وصور بعض الاختبارات والأجهزة

التركيب الكيميائي لأشهر أنواع الألياف الزجاجية، لاحظ نسبة (SiO_2) في كل منها، (Xiao-Su Yi *et al.*,2018)

Type	Composition/%						
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	Others
A	72	0.6–1.5	–	10	14.2	2.5	0.7%SO_3
C	65	4	6	14	8	3	
D	74	0.3	22	0.5	1.0	–	0.5%LiO_2
E	52–56	12–16	5–13	16–25	0–2	0.6	0–1.5%TiO_2
E-CR	58–63	10–13	1.0–2.5	21–23	0–1.2	–	1–2.5%TiO_2, 0–3.5%ZnO
M	53.7	–	–	12.9	–	9.0	2.0%ZrO_2, 8%BeO_2, 8%TiO_2, 3%CeO_2
S	65	25	–	–	–	10	–
Z or AR	71	–	–	–	11	–	16%ZrO_2, 2%TiO_2

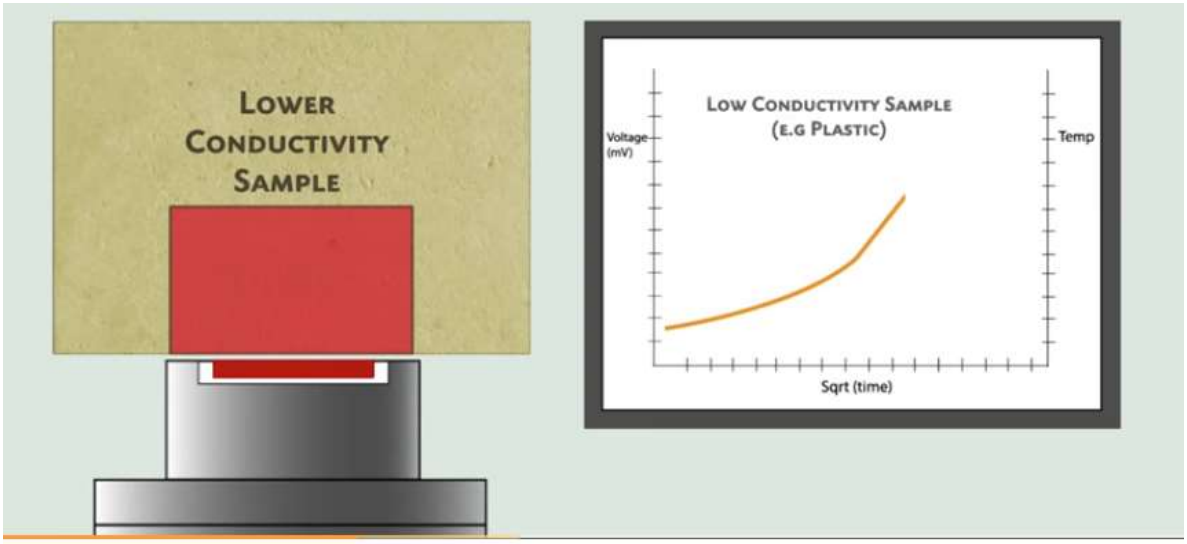
جدول ببعض خواص مادة الإيبوكسي، (Krishan K. Chawla,2012).

Density, ρ (g/cm^3)	Strength, σ (MPa)	Modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν	CTE, α ($10^{-6}\ K^{-1}$)	Cure shrinkage (%)	Use temp. (°C)
1.2–1.3	50–125	2.5–4	0.2–0.33	50–100	1–5	150

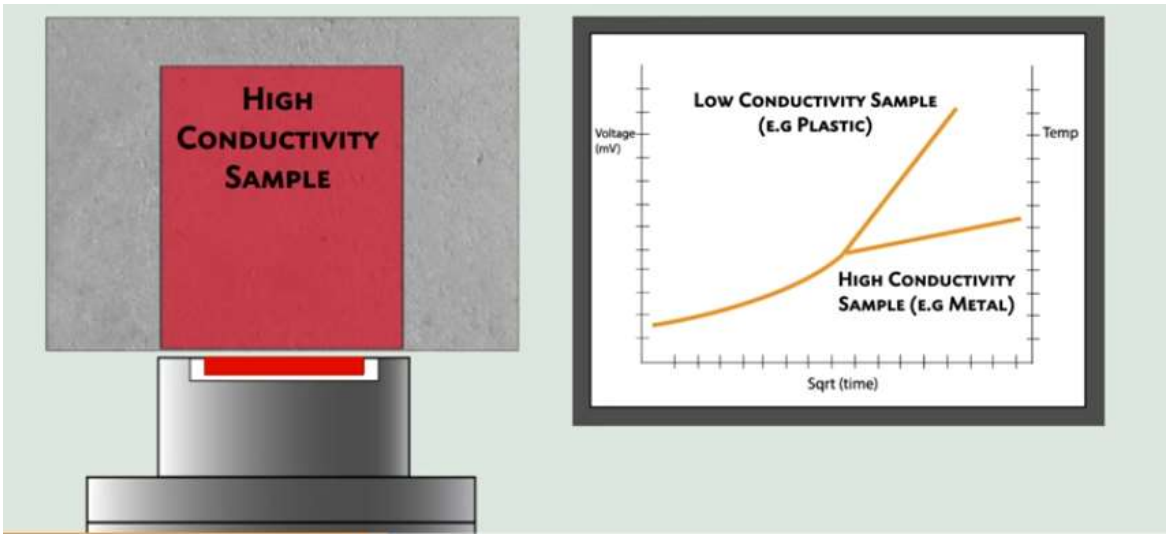
جدول بتصنيف بعض المواد المسامية النانوية، (G.Q.Lu *et al.*,2004).

	Polymeric	Carbon	Glass	Alumino-silicate	Oxides	Metal
Pore size	Meso-macro	Micro-meso	Meso-macro	Micro-meso	Micro-meso	Meso-macro
Surface area / Porosity	Low >0.6	High 0.3-0.6	Low 0.3-0.6	High 0.3-0.7	Medium 0.3-0.6	Low 0.1-0.7
Permeability	Low-medium	Low-medium	High	Low	Low-medium	High
Strength	Medium	Low	Strong	Weak	Weak-medium	Strong
Thermal stability	Low	High	Good	Medium-high	Medium-high	High
Chemical stability	Low-medium	High	High	High	Very high	High
Costs	Low	High	High	Low-medium	Medium	Medium
Life	Short	Long	Long	Medium-long	Long	Long

شكل يبين أجزاء الجهاز (TCI 25 C-therm)، من حساس الحرارة وأدوات اختبار السوائل والبودرة ومواد الفوم والمواد المركبة

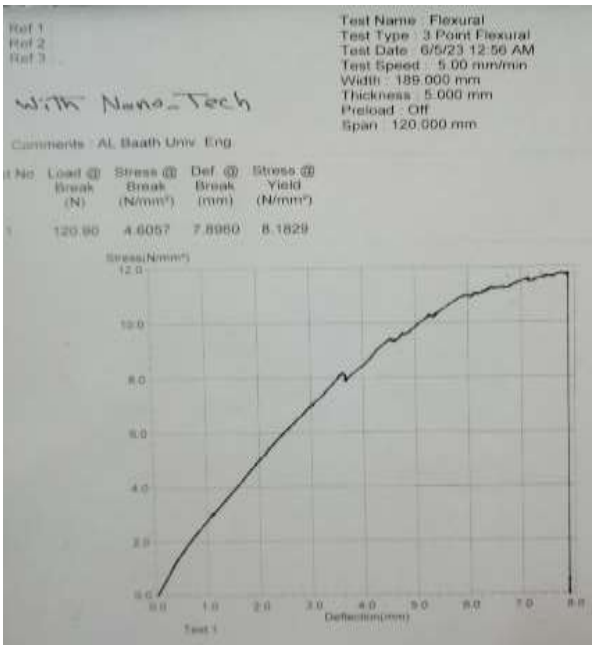


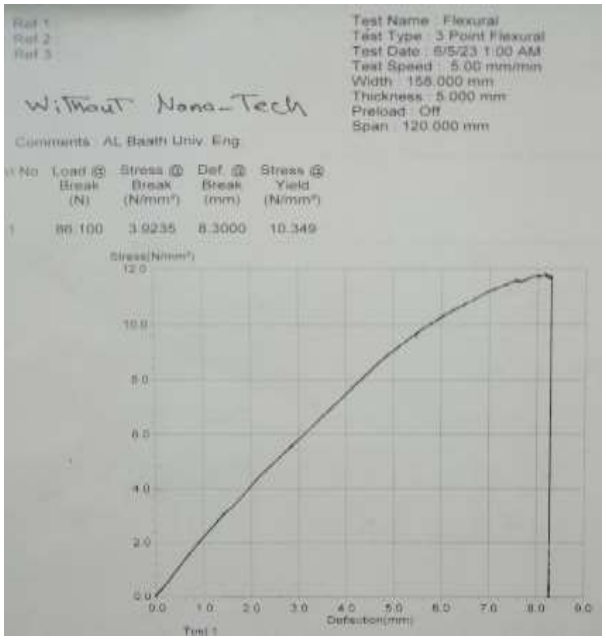
شكل يبين مبدأ عمل حساس الجهاز (TCI 25 C-therm)، وكيفية مراقبة التدفق الحراري عبر عينة عازلة للحرارة



شكل يبين مبدأ عمل حساس الجهاز (TCI 25 C-therm)، وكيفية مراقبة التدفق الحراري عبر عينة ناقلة للحرارة

صور تبين اختبار إضافي لمقاومة الانحناء على الجهاز (Testometric)، ومخططات نتائج الاختبار





عينة 1 مع حبيبات نانوية **عينة 2 بدون حبيبات نانوية**

تم إجراء هذا الاختبار وفق المواصفة القياسية (ASTM D790)، وهو اختبار إضافي للتأكد للمرة الثانية من صحة نتائج اختبار مقاومة الانحناء التي أجريت على الجهاز (Controls) وفق الفقرة (5.5) في متن الجزء العملي من هذا البحث.

Abstract

Energy saving is one of the terms and considerations that can no longer be ignored or overlooked in the modern era, especially when researches and industries are moving towards developing thermal and acoustic insulation technologies, with the aim of providing a comfortable and quiet work environment. Moreover, the volume of carbon dioxide emissions from residential buildings constitutes (25%) of the total volume of pollution in the world according to the Kyoto Protocol, which implies that real solutions must be sought to reduce greenhouse gases caused by population densities, this is if we do not talk about pollution resulting from industrial plants and facilities.

So, this research presents a scientific and design vision for the possibility of preparing real alternatives for existing insulating products for buildings, plants and their facilities using composite materials of two-dimensional and three-dimensional technical fabrics made of glass and basalt fibers with binders of epoxy and rigid polyurethane and structurally reinforced with silica-based nanoparticles. The properties and specifications of these nanoparticles and the dimensions of the pores between them were analyzed using the latest technologies including optical scanning electron (SEM) and X-ray diffraction spectroscopy using the powder method (XRD). After producing samples of the designed insulating product, acoustic insulation efficiency has been reached to (99.7%), and thermal insulation efficiency with thermal conductivity of (0.024 W/m.K), then accelerated aging and weather tolerance tests were conducted to figure out the life of use for this insulator, until establishing the design and manufacturing fundamentals of those composite textile materials by resorting to the suitable nanoscience technique with the acceptable cost, in a way that meets the requirements of acoustic and thermal insulation in the modern buildings field, and the reconstruction plan for our beloved country, Syria, in order to reduce energy consumption and limit environmental pollution.

Keywords:

Textile Composite Materials, Nanoscience, 3D-Woven Spacer Fabrics, 2D-Woven Fabrics, Silica Nanoparticles, Glass Fibers, Basalt Fibers, Acoustic Insulation, Thermal Insulation.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department of Textile Industries Mechanical Engineering and Their Techniques

"Foundations for Designing and Manufacturing Composite Textile Materials by Using Nano Technology for Thermal and Acoustic Insulation"

A dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the degree of (PhD) in Textile Technology

By

Aous Ali Ibrahim

Supervisor

Prof. Dr. Eng. Taher Kaddar

Damascus (2023)