الأكاديمية العربية الدولية
Arab International Academy

# الإضاءة والصوتيات

## Acoustics and Lighting

م. سنا بي أوغلو

كلية الفنون – بكالوريوس تصميم داخلي

الأكاديمية العربية الدولية
Arab International Academy

# الصوتيات

# Acoustics

# المحاور

- المخرجات المتوقعة من الدرس
- أسس صوتيات الفراغات المغلقة
  - انعكاس الصوت
  - امتصاص الصوت
  - معامل الامتصاص
  - ارتداد الصوت

# المخرجات المتوقعة من الدرس

1. **فهم أساسيات سلوك الصوت**
2. **معرفة انعكاس الصوت**
3. **مقارنة بين المواد الليفية والمواد الغشائية في امتصاص الصوت. تأثير سماكة المادة على كفاءة الامتصاص.**
4. **استنتاج الزمن الأمثل للارتداد باستخدام معادلة Stephens & Bates.**
5. **تطبيق عملي على القاعات**
6. **تأثير تصميم الأسطح** كيفية تشطيب الأسطح بالمواد الماصة الصحيحة لتجنب الصدى أو "موت الصوت".

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

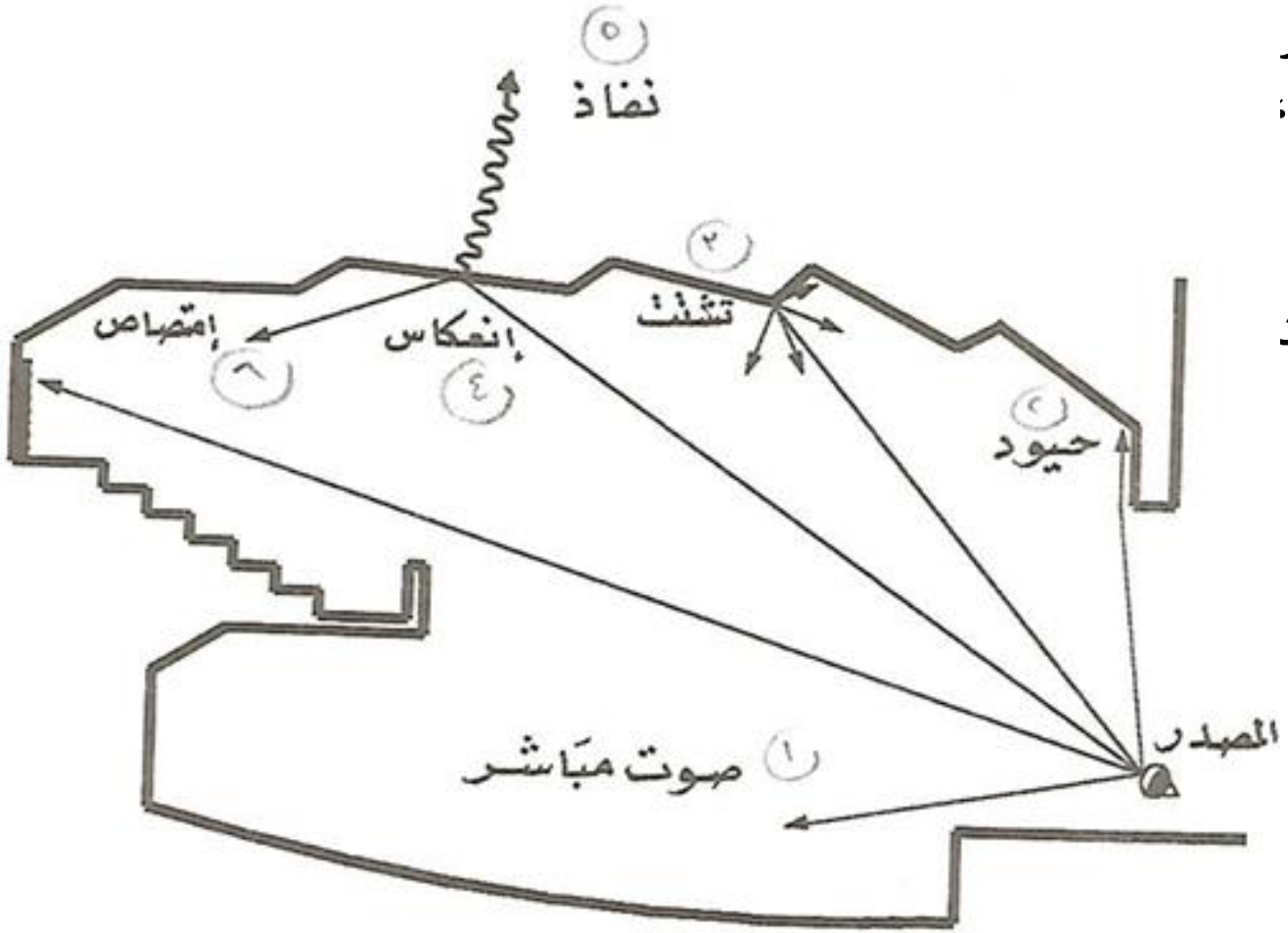
- الصوت المنبعث من مصدر صوتي على هيئة نقطة في الهواء ينتشر على شكل موجات كروية وتتناقص شدته بالبعد عن المصدر. إلا أن وجود المصدر داخل فراغ مغلق (كغرفة أو طرقة أو قاعة مثلاً) يؤدي إلى حدوث تغيرات جمة في نوعية وشدة الصوت الذي يصل إلى المستمعين. وهذه التغيرات إما أن تكون إلى الأحسن مثل تقوية الصوت أو مزج صوت الآلات الموسيقية معاً. أو إلى الأسوأ مثل حدوث صدى مصاحب للصوت، أو عدم وضوح بعض المقاطع في الحديث.
- وحتى يمكن دراسة هذه التغيرات والاستفادة منها لابد من دراسة سلوك الصوت في الفراغات المغلقة، ذلك السلوك الذي يختلف تماماً عن سلوكه في الهواء الطلق حيث لا عوائق على الإطلاق.

- الشكل التالي يوضح سلوك الصوت في الفراغات المغلقة. فنجد مثلاً أنه عندما تصطدم موجات الصوت بجدار ما فإن جزءاً من الطاقة الصوتية ينعكس بينما يتسلل الجزء الآخر إلى داخل الجدار حيث يتبقى جزء منه ينفذ الباقي إلى الجانب الآخر من الجدار. وإذا ما قابلت موجات الصوت حاجزاً أو عائقاً فإنها غالباً ما تنحرف عن مسارها، أو تنحسر إذا كان السطح متعرجاً.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

وفي علم الصوتيات في العمارة نفترض أن الصوت يسير في شكل أشعة تعتمد على جبهة الموجة Wave Front؛ وبالتالي يمكن إخضاعه لقواعد الضوء.

في الشكل أهم التغيرات التي تطرأ على موجات الصوت عند اصطدامها بأسطح وعوائق في مسارها

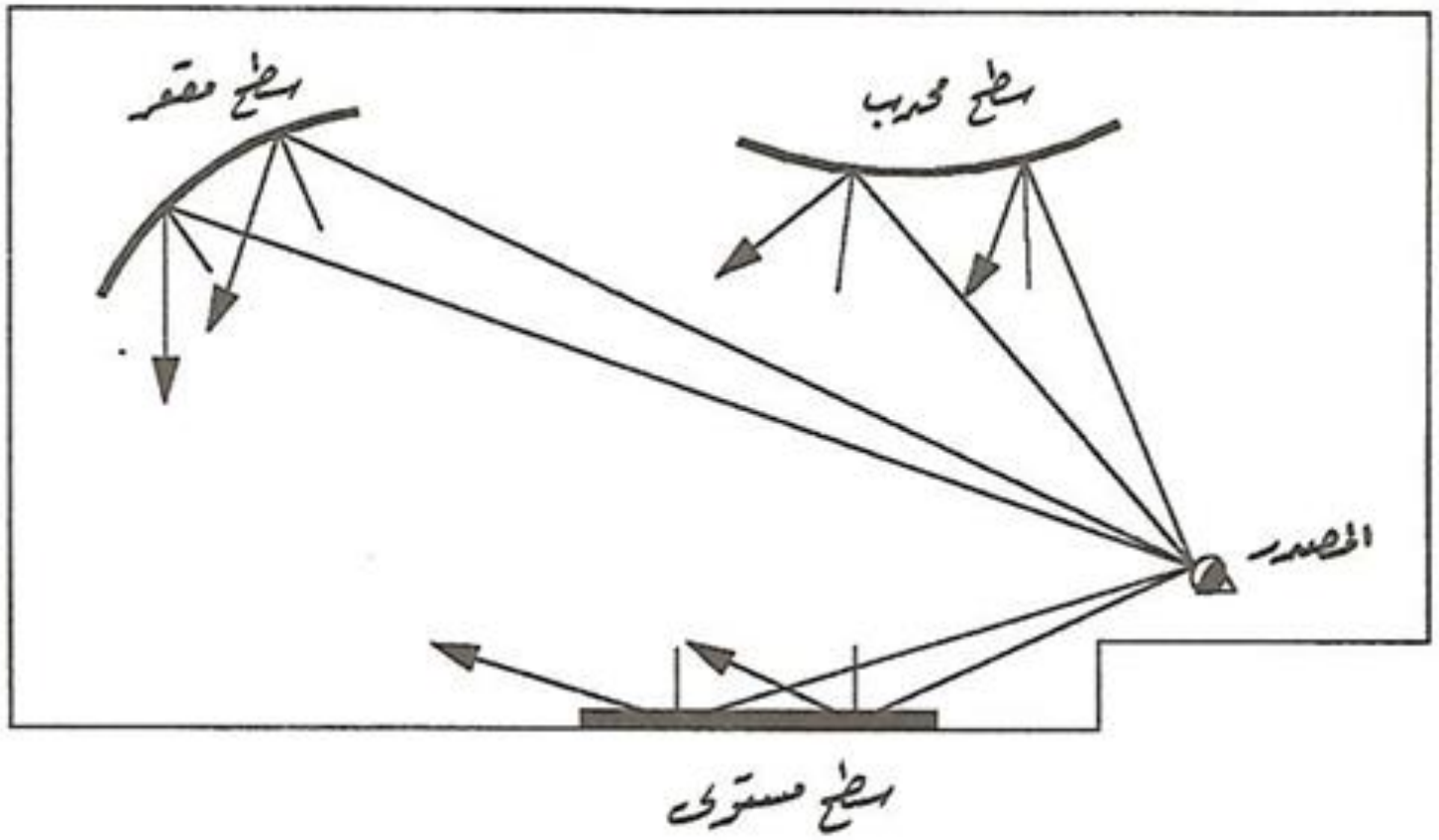


# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 1- انعكاس الصوت Reflection of Sound

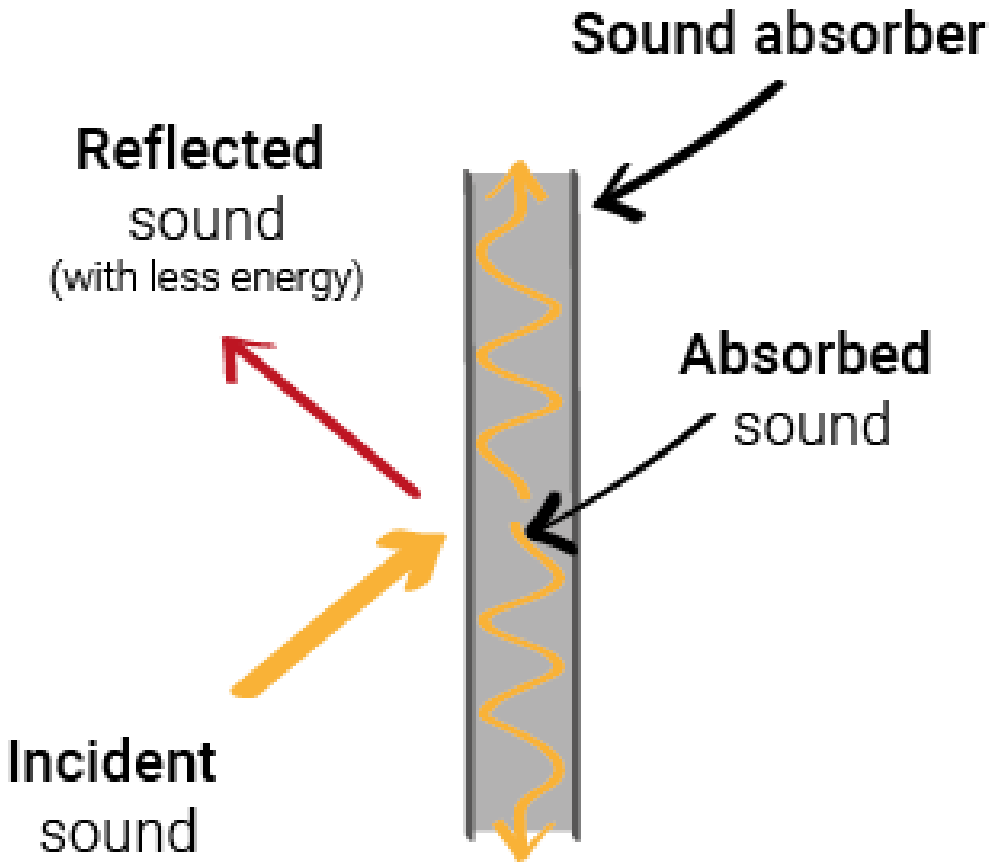
- تلعب العلاقة بين طول موجة الصوت وأبعاد السطح العاكس لها دوراً كبيراً في تحديد كيفية الانعكاس. فإذا ما كانت أبعاد السطح العاكس أكبر من طول الموجة فإن الانعكاس يخضع لقواعد انعكاس الضوء. أما إذا كان أصغر أبعاد السطح مقارباً لطول الموجة الساقطة فإنها تنعكس في شتى الاتجاهات، أي تتشتت.
- ولذا يجب مراعاة هذه العلاقة قبل تطبيق قواعد الانعكاس في حالة الترددات المنخفضة (الموجات الطويلة).
- عند سقوط موجات الصوت على سطح مستوٍ صلب أبعاده أكبر من طول الموجة الساقطة فإنه، طبقاً لقوانين انعكاس الضوء، تكون زاوية الانعكاس مساوية لزاوية السقوط، وكل من الشعاع الساقط والشعاع المنعكس في مستوى واحد معتمد على السطح العاكس. واتباع هذه القواعد بالنسبة للأسطح المنحنية فإننا نجد أن الأسطح المقعرة Concaveتعكس الصوت بطريقة مجمعة، بينما تعكس الأسطح المحدبة Convexالصوت بطريقة مفرقة

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة




باستخدام الشبهية بين انعكاس الصوت وانعكاس الضوء فإنه من الممكن تصور أن السطح العاكس ما هو إلا مرآة تكون خلفها صورة تخيلية للمصدر، على مسافة مساوية لبعد المصدر عن السطح بحيث يكون الخط الواصل بين المصدر وصورته عمودياً على السطح (أو عمودياً على المماس لهذا السطح إذا كان منحنياً).

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة




**2- امتصاص الصوت Absorption of Sound**

امتصاص الصوت هو إخماد الصوت أو الموجة الصوتية عند مرورها في وسط مادي أو ملامستها لسطح ما. ويُعرف امتصاص الصوت أيضاً بالخاصية التي تمتلكها الكتل والمواد لامتصاص الصوت.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 3- معامل الامتصاص Absorption Coefficient

- معامل امتصاص الصوت هو ذلك الجزء من الصوت الساقط والذي لا يقوم السطح أو المادة بعكسه وتختلف قيمة هذا المعامل باختلاف التردد والتركيب البنائي والمادة المكونة
- ويختلف امتصاص الصوت عن عزل الصوت، ففي معظم الأحيان تكون المواد ذات الامتصاص العالي فقيرة في خاصية عزل الصوت.
- تستعمل المواد الماصة للصوت في خفض الضوضاء الصادرة عن الآليات والمكائن داخل الأماكن المغلقة. ويكون التخفيض في حدود 10 ديسيبل بسبب نسبة التكلفة العالية لهذه المواد.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

الجدول ( 1 ) : أمثلة لمعاملات الامتصاص لمواد البناء العامة

| المادة وطريقة التركيب | معاملات الامتصاص | | | |
|---|---|---|---|---|
| | تردد أدنى | تردد متوسط | تردد أعلى | |
| | 125هرتز | 500 هرتز | 2000 هرتز | 4000 هرتز |
| سقف خشبي مائل ببلاط سقف (مارسليا) | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| مباني طوب كحلة أو مطلية | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.05 |
| موكيت متوسط على أرضية مصمته | 0.10 | 0.30 | 0.50 | 0.60 |
| موكيت متوسط على أرضية خشبية مجوفة | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 0.60 |
| أرضية خرسانة بيضاء / حجر | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| بلاط فنيل / خشب / مطاط على أرضية صلبة | 0.05 | 0.05 | 0.10 | 0.10 |
| الستائر ( قماش وسط ) عامودية وعلى مسافة قريبة من الحائط | 0.55 | 0.25 | 0.30 | 0.50 |
| بلاطات ليفية ناعمة بسمك 13ملم مركبة على خلفية مصمته | 0.05 | 0.15 | 0.30 | 0.30 |
| كما أعلاه مشطبة بالطلاء | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.15 |

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| بلاطات ليفية ناعمة بسمك 12ملم مركبة على خلفية مع وجود فجوه هواء | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| كما اعلاه مشطبة بالطلاء | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.15 |
| بلاط أرضيات عادي | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 |
| زجاج نوافذ حتى 3 ملم | 0.20 | 0.10 | 0.05 | 0.02 |
| طوب زجاجي وبلاط صيني أو رخام مصقول | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| بياض جير أو جبس على حائط مصمت | 0.02 | 0.02 | 04. | 0.04 |
| بياض على شبك بفجوات هوائية وخلفية صلبة أو حواجز خشبية | 0.30 | 0.10 | 0.04 | 0.04 |
| خشب ابلكاش مثبت مباشرة | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| خشب ابلكاش مثبت بوجود فجوة هوائية بينه وبين خلفية مصمتة | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.05 |
| الماء ( حمامات السباحة) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| أرضية خشبية ، ألواح على عوارض | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| بلاطات ألياف خشبية 25 ملم | 0.10 | 0.40 | 0.60 | 0.60 |
| كما أعلاه بوجود فجوة هوائية | 0.15 | 0.60 | 0.60 | 0.70 |
| بلاطات ألياف خشبية سمك 80ملم مثبتة على خلفية صلبة بوجود فجوة هوائية | 0.20 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 3- معامل الامتصاص Absorption Coefficient

- معامل امتصاص الصوت هو ذلك الجزء من الصوت الساقط والذي لا يقوم السطح أو المادة بعكسه وتختلف قيمة هذا المعامل باختلاف التردد والتركيب البنائي والمادة المكونة
- ويختلف امتصاص الصوت عن عزل الصوت، ففي معظم الأحيان تكون المواد ذات الامتصاص العالي فقيرة في خاصية عزل الصوت.
- تستعمل المواد الماصة للصوت في خفض الضوضاء الصادرة عن الآليات والمكائن داخل الأماكن المغلقة. ويكون التخفيض في حدود 10 ديسيبل بسبب نسبة التكلفة العالية لهذه المواد.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

الجدول ( 2 ) : أمثلة لمعاملات الامتصاص لبعض البنود الخاصة

| البند | معاملات الامتصاص | | | |
|---|---|---|---|---|
| | تردد أدنى | تردد متوسط | تردد اعلي | |
| | 125هرتز | 500 هرتز | 2000 هرتز | 4000 هرتز |
| الهواء ( لكل متر مكعب ) | – | – | 0.007 | 0.002 |
| مستمعين على مقاعد منجدة تنجيد | 0.19 | 0.47 | 0.51 | 0.47 |
| مستمعين على مقاعد خشبية / معدنية ( للشخص الواحد ) | 0.16 | 0.40 | 0.43 | 0.40 |
| مقاعد منجدة تنجيد كامل خالية من المستمعين ( للمقعد الواحد ) | 0.12 | 0.28 | 0.31 | 0.37 |
| مقاعد خشبية أو معدنية خالية من المستمعين (للمقعد الواحد ) | 0.07 | 0.15 | 0.18 | 0.19 |

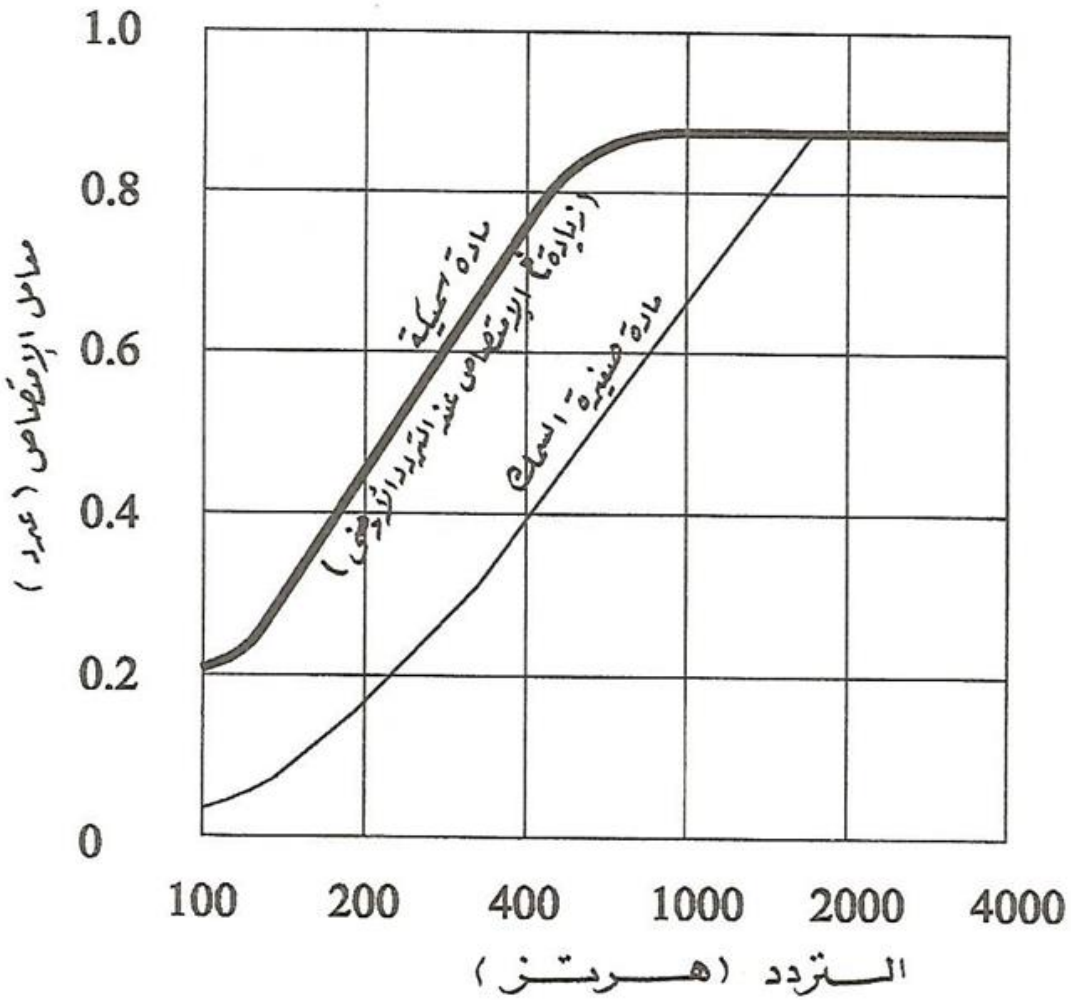
# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 4- المواد الماصة الليفية Fibrous Absorbers

المواد الليفية هي الأفضل عادةً للامتصاص العام، وتستعمل الأنسجة والألياف المعدنية عادةً لامتصاص الصوت.

وعملية الامتصاص عبارة عن تحويل الطاقة الصوتية إلى طاقة حرارية بامتزاز الألياف، وهنا يجب ملاحظة أن الطاقة الصوتية تكون ذات كمية قليلة جدًا حتى بالنسبة للضوضاء العالية، ولذلك فإن ارتفاع أو درجة حرارة تلك الألياف يمكن إهمالها.

تعتمد فاعلية الامتصاص على التردد الصوتي وسمك المادة المستعملة للامتصاص، فكلما ازداد السمك كلما تحسنت فاعلية الامتصاص خاصةً في الأصوات ذات التردد الأدنى.



# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

ويمكن زيادة سماكة المادة الممتصة للصوت بوضعها على مسافة من السطح الصلب الجدار أو السقف حيث تزيد الفجوة الهوائية من فاعلية الامتصاص.

وتعتمد فاعلية السطح والتركيب البنيوي للمادة في معرفة مقدار معامل الامتصاص، وكذلك التشطيب النهائي للسطح، خاصةً عند التردد العالي للصوت.

ومثال على الألواح الصوتية Acoustic Tiles والتي تكون بها ثقافات صغيرة (حوالي 8/1 من مساحة البلاطة)، حيث يتم امتصاص الصوت عند عدم ملامسة النقاط.

ويقل معامل الامتصاص للمادة مع أيضًا اختلاف زاوية سقوط الصوت. وعمليًا فإن الصوت يسقط على كل الزوايا، ومن الأفضل أخذ المعدلات عند التصميم.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

ويمكن زيادة سماكة المادة الممتصة للصوت بوضعها على مسافة من السطح الصلب الجدار أو السقف حيث تزيد الفجوة الهوائية من فاعلية الامتصاص.

وتعتمد فاعلية السطح والتركيب البنيوي للمادة في معرفة مقدار معامل الامتصاص، وكذلك التشطيب النهائي للسطح، خاصةً عند التردد العالي للصوت.

ومثال على الألواح الصوتية Acoustic Tiles والتي تكون بها ثقافات صغيرة (حوالي 8/1 من مساحة البلاطة)، حيث يتم امتصاص الصوت عند عدم ملامسة النقاط. فننتبه إلى عدم ملء هذه الفتحات بالدهان عند طلائها لأن ذلك سيخفض من فاعلية امتصاصها

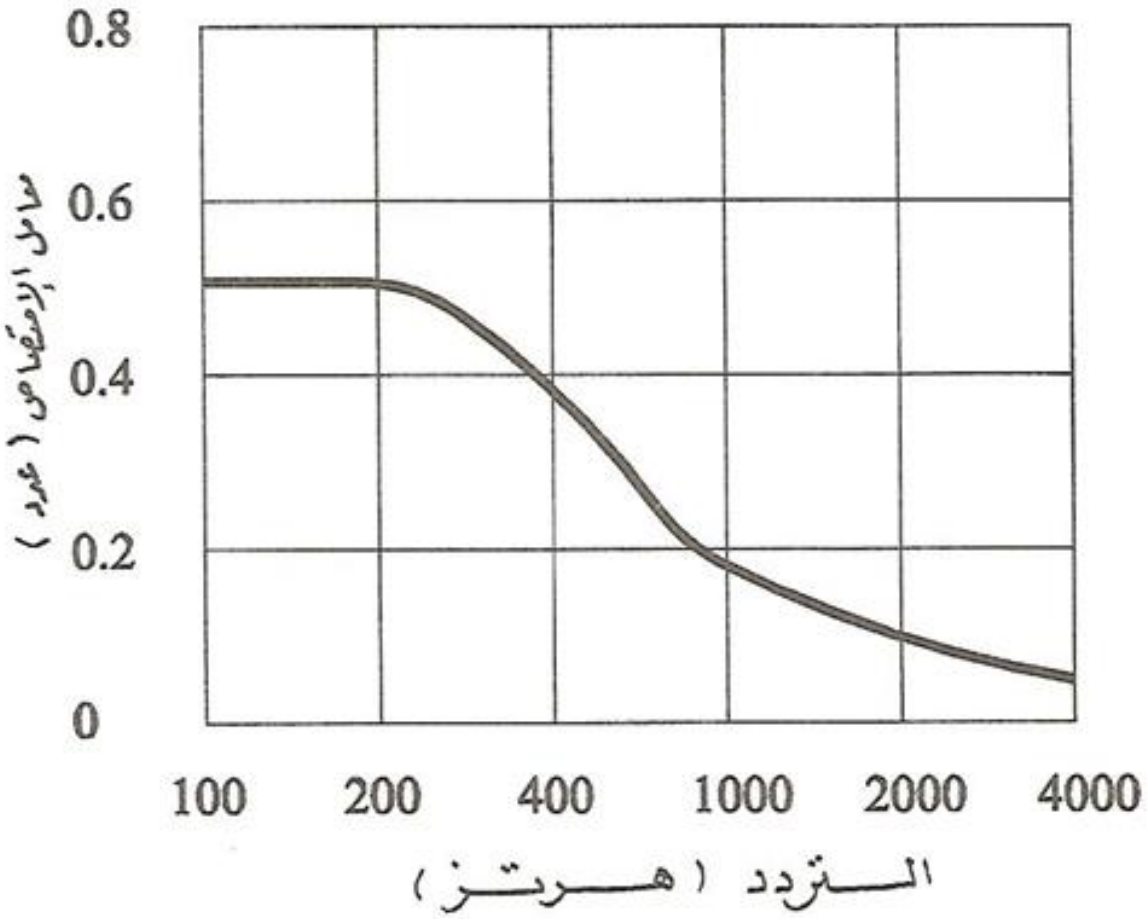
ويختلف معامل الامتصاص للمادة مع اختلاف زاوية سقوط الصوت. وعمليًا فإن الصوت يسقط على كل الزوايا، ومن الأفضل أخذ القياسات عشوائيا.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 5- المواد الماصة الغشائية Membrane Absorbers

وهي عبارة عن ألواح أو صفائح، وهنا تقوم المادة كلها بالاهتزاز حيث يتحول جزء من الصوت إلى حرارة والجزء الأكبر يتم انتقاله عبر المادة. وتختلف الخواص الماصة للمواد الغشائية تمامًا عن المواد الليفية، والفرق الرئيسي بينهما هو أن المواد الغشائية أفضل ما تكون عند التردد الأدنى للصوت .

أما مواد البناء الثقيلة كالطوب والبياض، فإنها تعكس كل الصوت الساقط عليها تقريبًا (معامل الامتصاص 0.02 تقريبًا).



# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

**6- زيادة الصدى وموات الصوت**

في أي حجرة أو قاعة يكون من المهم تشطيب الأسطح بالمواد الماصة الصحيحة. فإذا قلت المادة ستكون هناك أثر كبير للصدى وإذا ما ازدادت المواد الماصة كثيرًا فإن الصوت سيبدو "ميتًا"، وفي كلا الحالتين فإن وضوح الحديث سيكون دون المستوى المطلوب.

**7- الامتصاص الكلي Total Absorption**

الامتصاص الكلي في حجرة ما هو ناتج المجموع لامتصاص كل الأسطح والكتل والموجودات داخل فراغ الحجرة (الأسطح والأثاثات والإنسان... إلخ).

ويحسب الامتصاص الكلي بحاصل ضرب مساحة سطح المادة في معامل امتصاصها.

أما المستمعين والأثاثات فيحسب امتصاصها بمتوسطات (لا توجد مساحات) تعتمد على المقاس والملابس. والنتائج في كلا الحالتين هو أرقام أمتار مربعة من الامتصاص.

ويترك مجال لتخفيض الامتصاص بواسطة المقاعد والمستمعين الذين يغطنون سطح الأرضية، وهذا الغطاء يمثل أهمية بالنسبة للأصوات ذات التردد العالي وعليه فإن هناك تخفيض بما يوازي 40% عند التردد من 125 إلى 500 هرتز و 60% عند 2000 هرتز من امتصاص الأرضية.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

**6- زيادة الصدى وموات الصوت**

في أي حجرة أو قاعة يكون من المهم تشطيب الأسطح بالمواد الماصة الصحيحة. فإذا قلت المادة ستكون هناك أثر كبير للصدى وإذا ما ازدادت المواد الماصة كثيرًا فإن الصوت سيبدو "ميتًا"، وفي كلا الحالتين فإن وضوح الحديث سيكون دون المستوى المطلوب.

**7- الامتصاص الكلي Total Absorption**

الامتصاص الكلي في حجرة ما هو ناتج المجموع لامتصاص كل الأسطح والكتل والموجودات داخل فراغ الحجرة (الأسطح والأثاثات والإنسان... إلخ).

ويحسب الامتصاص الكلي بحاصل ضرب مساحة سطح المادة في معامل امتصاصها.

أما المستمعين والأثاثات فيحسب امتصاصها بمتوسطات (لا توجد مساحات) تعتمد على المقاس والملابس. والنتائج في كلا الحالتين هو أرقام أمتار مربعة من الامتصاص.

ويترك مجال لتخفيض الامتصاص بواسطة المقاعد والمستمعين الذين يغطنون سطح الأرضية، وهذا الغطاء يمثل أهمية بالنسبة للأصوات ذات التردد العالي وعليه فإن هناك تخفيض بما يوازي 40% عند التردد من 125 إلى 500 هرتز و 60% عند 2000 هرتز من امتصاص الأرضية.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

| | | |
|---|---|---|
| مثال 10-1 : أحسب الامتصاص الكلي عند التردد 500 هرتز لقاعة تحتوي التشطيبات التالية ؛ | | |
| بياض على جدار من الطوب | م2 | 265 |
| نوافذ بزجاج 3 ملم | م2 | 43 |
| للمسرح بأرضية من الخشب | م2 | 70 |
| بلاطات ألياف خشبية سمك 25 ملم | م2 | 60 |
| شاشة من الصفائح الزجاجية | م2 | 96 |
| بياض على السقف | م2 | 310 |
| أرضية خشبية | م2 | 300 |

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

**6- زيادة الصدى وموات الصوت**

في أي حجرة أو قاعة يكون من المهم تشطيب الأسطح بالمواد الماصة الصحيحة. فإذا قلت المادة ستكون هناك أثر كبير للصدى وإذا ما ازدادت المواد الماصة كثيرًا فإن الصوت سيبدو "ميتًا"، وفي كلا الحالتين فإن وضوح الحديث سيكون دون المستوى المطلوب.

**7- الامتصاص الكلي Total Absorption**

الامتصاص الكلي في حجرة ما هو ناتج المجموع لامتصاص كل الأسطح والكتل والموجودات داخل فراغ الحجرة (الأسطح والأثاثات والإنسان... إلخ).

ويحسب الامتصاص الكلي بحاصل ضرب مساحة سطح المادة في معامل امتصاصها.

أما المستمعين والأثاثات فيحسب امتصاصها بمتوسطات (لا توجد مساحات) تعتمد على المقاس والملابس. والنتائج في كلا الحالتين هو أرقام أمتار مربعة من الامتصاص.

ويترك مجال لتخفيض الامتصاص بواسطة المقاعد والمستمعين الذين يغطون سطح الأرضية، وهذا الغطاء يمثل أهمية بالنسبة للأصوات ذات التردد العالي وعليه فإن هناك تخفيض بما يوازي 40% عند التردد من 125 إلى 500 هرتز و 60% عند 2000 هرتز من امتصاص الأرضية.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

**مثال:**

احسب الامتصاص الكلي عند التردد 500 هرتز لقاعة تحتوي على التشطيبات التالية:

| | | |
|---|---|---|
| بياض على جدار من الطوب | م2 | 265 |
| نوافذ بزجاج 3 ملم | م2 | 43 |
| للمسرح بأرضية من الخشب | م2 | 70 |
| بلاطات ألياف خشبية سمك 25 ملم | م2 | 60 |
| شاشة من الصفائح الزجاجية | م2 | 96 |
| بياض على السقف | م2 | 310 |
| أرضية خشبية | م2 | 300 |

**أفترض أن غطاء الأرضية بواسطة المستمعين يخفض امتصاصها بما يعادل 40%**

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

**الحل:**

يتم الحصول على معاملات الامتصاص للمواد من الجداول السابقة والتي يتم الحصول عليها من الشركات المصنعة للمواد ويتم عمل الحسابات في شكل جدول كما يلي:

| البند | المساحة (م2) | معامل الامتصاص | الامتصاص (م2) |
|---|---|---|---|
| بياض الجدران | 265 | 0.02 | 5.3 |
| زجاج 3 ملم | 43 | 0.10 | 4.3 |
| المسرح الخشبي | 70 | 0.10 | 7.0 |
| بلاطات ألياف خشبية25 ملم | 60 | 0.40 | 24.0 |
| الصفائح الزجاجية | 96 | 0.04 | 3.8 |
| بياض السقف | 310 | 0.10 | 31.0 |
| الأرضية الخشبية (ناقصاً الغطاء 40 %) | 300 | 0.05 | 9.0 |
| المستمعين | 250 عدد | 0.43 للشخص | 107.0 |
| الأمتصاص الكلي | | | 191.9 م2 |

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

**8- ارتداد الصوت Reverberation**

الارتداد هو دوام الصوت في مكان مغلق نتيجة للانعكاسات المتكررة لهذا الصوت من حدود هذا المكان والصوت الارتدادي ليس هو الصدى، فالصدى عبارة عن انعكاس مفرد وواضح بينما الصوت الارتدادي عبارة عن آلاف الانعكاسات في الثانية الواحدة. ويأخذ الصوت تزايدًا في مستوى الصوت إلى أن يخبو. أما إذا ما خبا الصوت بسرعة، فإن وضوح الحديث يكون جيدًا. وفي بعض الأوضاع يأخذ الصوت وقتًا طويلًا ليخبو فينخفض الوضوح نتيجة لذلك ولكن الصوت يكون قويًا وممتلئًا. وعليه فإن الوضع الأمثل يختلف باختلاف الاستعمال، للحديث أو الموسيقى.

**9- زمن الارتداد Reverberation Time**

هو الزمن الذي يأخذه الصوت ليخبو بمقدار 60 ديسيبل ويعتمد زمن الارتداد على حجم القاعة وكمية الامتصاص بها.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 10- معادلة سابين Sabines Formula

وهي معادلة لحساب زمن الارتداد الفعلي في أي قاعة **Actual Reverberation time** وهي كما يلي:

$$t=0.16V/A$$

حيث:

t :زمن الارتداد بالثواني

V: حجم القاعة بالأمتار المكعبة

A :مساحة الامتصاص بالأمتار المربعة.

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 10- معادلة سابين Sabines Formula

وهي معادلة لحساب زمن الارتداد الفعلي في أي قاعة **Actual Reverberation time** وهي كما يلي:

$$t=0.16V/A$$

حيث:

t :زمن الارتداد بالثواني

V: حجم القاعة بالأمتار المكعبة

A :مساحة الامتصاص بالأمتار المربعة.

**مثال:**

احسب زمن الارتداد للقاعة في المثال السابق إذا كان حجم القاعة 2500 متراً مكعبا.

**الحل:**

باستعمال معادلة سابين:

باستعمال معادلة سابين $t=0.16\ V/A$

$t= ( 0.16 \times 2500 ) / 191.9 = 2.1$ ثانية

# أسس صوتيات الفراغات المغلقة

## 11- زمن الارتداد الأمثل Optimum Reverberation Time

يعتمد زمن الارتداد المرغوب فيه على مقاس واستعمال الفراغ. والزمن الأمثل للارتداد يمكن استنتاجه من التجارب العملية الذاتية. **Subjective experiments**

وضع العالمان ستيفنس وبيترز **Stephens & Bates** معادلة يتم استعمالها لحساب زمن الارتداد الأمثل، وهي من معادلات حساب زمن الارتداد ولكنها تقريبية وتستعمل فقط عند تردد **500 هرتز**:

$$t = r\,(\,0.012\ \sqrt[3]{V}\ + 0.1070\,)$$

حيث : t = زمن الارتداد الأمثل بالثواني

V = حجم القاعة بالأمتار المكعبة

r. = 4 للقاعات المستعملة في الحديث ( محاضرات .. الخ )

= 5 للقاعات المستعملة للموسيقى الأوركسترالية

= 6 للقاعات المستعملة للموسيقى الكورالية

وينصح بزيادة هذه الأرقام بما يعادل 40 % عند الترددات الأدنى .

# المصادر

- الإضاءة والصوتيات – د. سعود صادق حسن

# شكرا لكم