اثر التقانة المعلوماتية في توفير الراحة الصوتية في قاعات المعارض باستخدام برنامج Ecotect

م.أ رضاب احمد محمود
وزارة الاعمار والاسكان/ مهندس معماري
eng_rudhab@yahoo.com

م. د. صفاء الدين حسين
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي/ استاذ جامعي
inana_ar@yahoo.com

ملخص البحث:

لا يقتصر مفهوم الراحة في المباني كما يظن البعض على الراحة الحرارية فقط وانما هو مفهوم واسع يشمل العديد من الجوانب الواجب مراعاتها في التصميم، وتعد الراحة الصوتية من اهم هذه الجوانب خاصة في المباني ذات الفضاءات الكبيرة. فالتصميم الصوتي يمثل احد اهم المتطلبات التصميمية الاساسية التي بتكاملها مع المتطلبات التصميمية الاخرى يمكن تحقيق الراحة بمفهومها الاشمل.

وقد تناولت العديد من الدراسات عملية التصميم الصوتي وتحقيق المتطلبات الصوتية في القاعات السمعية المتخصصة وفي المساجد. الا ان ندرة الدراسات (ان لم يكن انعدامها) التي تناولت الراحة الصوتية في انواع المباني الاخرى ومنها قاعات المعارض قد دفعنا الى استهداف هذا النوع من القاعات التي تتطلب الوضوح الصوتي والبصري فيها لتحقيق غايتها الثقافية والترفيهية في آن واحد.

ولما كانت المشاكل الحاصلة في ادائية المباني بصورة عامة ومشاكل الراحة والراحة الصوتية بصورة خاصة لا يتم اكتشافها عادة الا بعد اشغال المبنى، لذلك فقد تم الاستعانة بالتقانة المعلوماتية وما توفره من وسائل لحل هذه المشكلة، والتي تعد برامج المحاكاة الحاسوبية من اهمها خلال مرحلة التصميم كونها تعمل بصورة متزامنة مع عملية التصميم مما يتيح الفرصة لايجاد الحلول للمشاكل المتوقعة قبل حدوثها واجراء التعديلات اللازمة على التصميم وذلك من خلال عمليات التغذية الراجعة بين هذه البرامج والعمليات التصميمية.

ولاجل تحقيق ذلك عمليا فقد اعتمد البحث منهجية تقوم على استخلاص مؤشرات الاداء الصوتي واختبار المنتخب منها بعدة اختبارات تطبيقية وذلك بالاستعانة ببرنامج المحاكاة الحاسوبي Ecotect. وقد تم ادراج النتائج بهيئة مخططات وجداول تبين ما تم التوصل اليه في هذا المجال.

The Information Technology Effects on Acoustic Comfort in Exhibition Halls by Using "Ecotect" Program

eng. Rudhab Ahmed
ministry of construction &housing
eng_rudhab@yahoo.com

Dr. Safaa Uddin Husain
ministry of high education and scientific research
inana_ar@yahoo.com

Abstract:

Comfort concept is not only limited to thermal comfort, as some people think. On the contrary, it is a broad concept which includes several aspects that must be taken into consideration when designing. Acoustic comfort is considered as one of the most important of these aspects, especially in large space buildings, as acoustic design is an essential designing need whose integration with other designing needs brings about comfort in its broadest concept.

The acoustic design and achieving the acoustic needs in specialized audio halls and mosques has been the topic of several studies. But the lack of studies, if any, on acoustic comfort in other kinds of buildings like exhibition halls was the reason behind targeting on these kinds of halls which require both audio and vision clarity in order to achieve its entertaining and educational goals.

Problems in buildings performance, specifically comfort and acoustic comfort problems, can't be discovered until the buildings are occupied. So, information technology means, of which computer simulation programs are the most important because they work simultaneously with the designing process, are used to help solve these problems. As they offer the opportunity to find solutions for the expected problems and to amend the design accordingly.

To put the above mentioned theory in action, the methodology used in this research is that of setting acoustic performance parameters and testing the elected ones by simulation program 'Ecotect'. Tables and figures showing the results are included.

المحور الاول: الراحة الصوتية:

١-١ ما هو الصوت:

يطلق الصوت على الاحساس الحاصل بسبب اهتزاز وسط ما كما تحسه الاذن البشرية. كما ويطلق على الاهتزاز نفسه الذي يسبب ذلك الاحساس[١،ص١٤٥]. حيث يعرف على انه اهتزاز يحدث بترددات مختلفة ضمن وسط مرن.

يتم تمثيل مستوى الضغط الصوتي بالديسيبل، وهو النسبة بين شدة الصوت الى الشدة المساوية لعتبة السمع. ويتبع التغير في مستويات الضغط قاعدة لوغارتمية وليست رياضية. فالتغير في مستوى الضغط الصوتي بمقدار ١٠ ديسيبل يؤدي الى ادراك الصوت بمقدار ضعف او نصف العلو[٢، ص٥٠٨-٥٠٩].

ويؤثر تصميم الفضاءات في كفائتها الصوتية ومستوى الاداء الصوتي فيها، وهذا ما ستتناوله الفقرات اللاحقة.

١-٢ التصميم الصوتي ودور المصمم:

يعد التصميم الصوتي احد المتطلبات التصميمية الاساسية التي يجب ان تتكامل مع المتطلبات المعمارية الاخرى عند تصميم أي مبنى. فالتصميم والتخطيط الدقيق لفضاءات المبنى وهيكله الانشائي له دور فاعل في التأثير على الاداء الصوتي من خلال السيطرة على سلوكيات الصوت الاساسية في الانعكاس والامتصاص والتي تحدد محصلة ناتجها طبيعة كفاءة الاداء الصوتي في الفضاء.

وفي الحالات الخاصة فانه يجب اشراك فريق مختص بالتصميم الصوتي في العملية التصميمية في ابكر مرحلة ممكنة. كونه يلعب دورا هاما في اختيار مواد وتفاصيل المركبات البنائية، ومواد الانهاءات الداخلية، كما انه يعمل على تصميم وتحديد الانظمة الصوتية وانظمة الاتصالات، وتفصيل المركبات المستخدمة للتحكم بالضوضاء والاهتزازات في الانظمة الميكانيكية. مع الاخذ بالاعتبار ان جميع اجزاء وسطوح البناية تمثل مسارات محتملة لحركة الصوت[٣،ص٤٠٤].

لذا فان للتصميم دور كبير في السيطرة على الضوضاء بتقليل منسوبها بما يعزز الكفاءة الصوتية، وبشكل خاص الضوضاء الخارجية لعدم امكانية السيطرة على مصدرها.

١-٢-١ الضوضاء:

وتعرف ببساطة على انها أي صوت غير مرغوب فيه، والتي قد تكون ناتجة عن القوى الطبيعية مثل الرياح والمطر او قد تكون اصوات ميكانيكية ناتجة عن المحركات والمراوح... الخ. وان مقياس مقدار الانزعاج الذي تسببه يعتبر ذاتي، سايكولوجي، ونسبي لمدى علو الصوت. وتكون معظم الاصوات المزعجة ذات ترددات صوتية عالية، وتكون متقطعة اكثر منها مستمرة، وغالبا ما تكون من مصادر متحركة وليست ثابتة[٣، ص٤٠١].

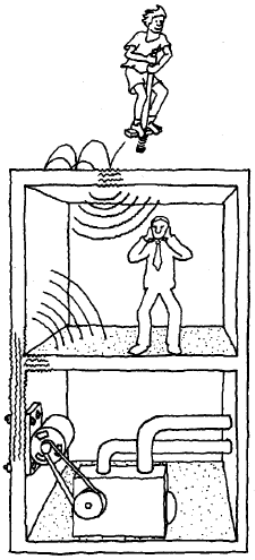
وبصورة عامة فان انواع الاصوات التي يمكن ان تصنف على انها ضوضاء مختلفة وعديدة، كما ان مصادرها في المجتمع المعاصر متنوعة جدا في مميزات الصوت الذي تنتجه مما يجعل امكانية اعطاء أي تعميمات حول خصائصها امرا مستحيلا، لذلك يجب تحليل كل مشكلة ضوضاء على حدة وتحديد مصدرها، مدى ترددتها، وضغط الصوت الذي تسببه قبل اتخاذ أي خطوة لمعالجتها[٤، ص٤١٠].

وتصنف الضوضاء بحسب موقع مصدرها نسبة الى موقع المستلم داخل المبنى الى نوعين رئيسيين:

١- الضوضاء الداخلية:

وهي الضوضاء التي يكون منشأها من داخل المبنى، وتعتمد طبيعة مصدرها على[٥، ص١٥]:

- طبيعة استعمال المبنى: وتشمل ضوضاء شاغلي المبنى، وتعتمد على نوع الفعاليات في المبنى وطبيعة المستعملين.
- منظومة الخدمات في المبنى: وتشمل الضوضاء الصادرة عن المكائن والاجهزة والمعدات الميكانيكية والكهربائية للمنظومات الخدمية داخل المبنى.



شكل ١-١ انتقال اهتزازات الصوت الى الفضاءات المجاورة

ولما كان للصوت القابلية على الانتقال في الاوساط الصلبة،وان أي جسر في البناء ممكن ان ينقل اهتزازات الصوت الى الفضاءات المجاورة (شكل١-١)، لذلك فعلى المصمم التقليل من هذه الضوضاء وتعطى الاولوية في السيطرة عليها بتقليلها من منشأها باختيار المكائن ذات الاصوات الواطئة بالنسبة للضوضاء الميكانيكية، ووضع هذه الاجهزة ابعد ما يكون عن المناطق المأهولة من المبنى وتثبيتها بمواد مرنة لتقليل الضوضاء المنتقلة عبر الهيكل، ووضعها ضمن محتوى معزول صوتيا لتقليل الضوضاء المنتقلة عبر الهواء[٤، ص١٤١]. ومن ثم يصار الى التحكم في الخصائص التصميمية للمبنى ذات العلاقة (طبيعة الفواصل البنائية، سمكها، عددها، نوع موادها)، والخصائص التصميمية للعلاقة بين الفضاءات داخل المبنى.

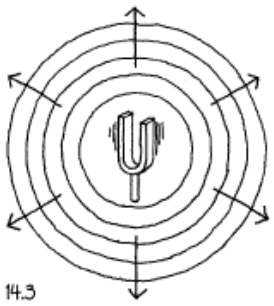
٢- الضوضاء الخارجية:

وهي الضوضاء التي يكون منشأها من خارج المبنى وتكون دخيلة على الفضاءات عبر منفذين:الاول عبر الفتحات والنوافذ وتدعى عندها بالضوضاء المنتقلة هوائيا(Air born noise)، والثاني عبر الهيكل وتدعى بضوضاء الارتطام (Impact noise) او بالاهتزاز الرنيني لبعض الاجسام الكائنة في الفضاء[٦، ص٣٩].

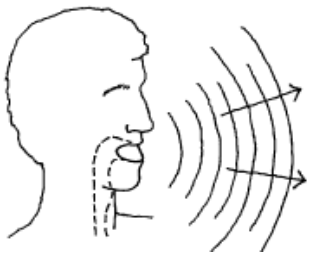
ولما كانت الطاقة الصوتية تقل شدتها كلما انتشرت على مساحة واسعة، لذا فالسيطرة على الاصوات الخارجية تبدأ بتوقيع البناية ابعد ما يمكن عن مصدر الضوضاء. كما تحجب الجدران الثقيلة الضوضاء على طول خط النظر بين المناطق الهادئة ومصدر الضوضاء اذا كانت بالارتفاع والعرض الكافي. ولتجنب حيود الصوت[*] حول حافات الحواجز، فان هذه الحواجز يجب ان تكون قريبة اما من مصدر الصوت او من المبنى او الفضاء المعني. كما ان المسطحات العشبية او أي غطاء نباتي آخر يوفر امتصاص اضافي للصوت اكثر من السطوح الصلدة العاكسة[٣، ص٤٠٥]

١-٢ -٢ كفاءة توزيع الطاقة الصوتية في الفضاء:

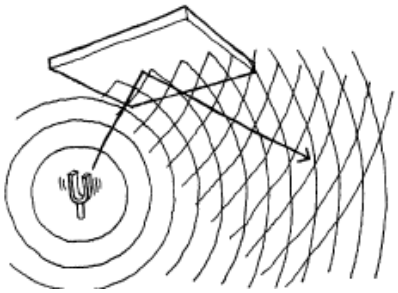
نظريا تنتشر الامواج الصوتية بشكل كروي في حالة المصدر الصوتي النقطي (شكل١-٢)، واذا كان المصدر الصوتي معلق في حجم مثالي من الهواء، فان الضغط الصوتي سيقل نسبة الى مربع المسافة بين المستمع والمصدر. ولكن عادة تتولد الامواج الصوتية من مصادر معينة مثل صوت الانسان والتي يكون انتشارها اقوى في بعض الاتجاهات عنه في الاتجاهات الاخرى (شكل١-٣). ورغم السلوك الثابت للامواج الصوتية الا ان نتائج هذا السلوك تتغير حسب المعوقات او الاجسام التي تصدم بها مما ينتج عنه تشكيل الحقل الصوتي الذي لا يمكن ان يتم وصفه بالتعبيرات الرياضية البسيطة (شكل ١-٤)[٤، ص١٤٠].



شكل (١-٢) انتشار الصوت من المصدر النقطي



شكل (١-٣) انتشار صوت الانسان



شكل (١-٤) تشكيل الحقل الصوتي

وعموما فان هناك ثلاث جواب رئيسية تؤثر في كفاءة توزيع الطاقة الصوتية ضمن الفضاء وهي:

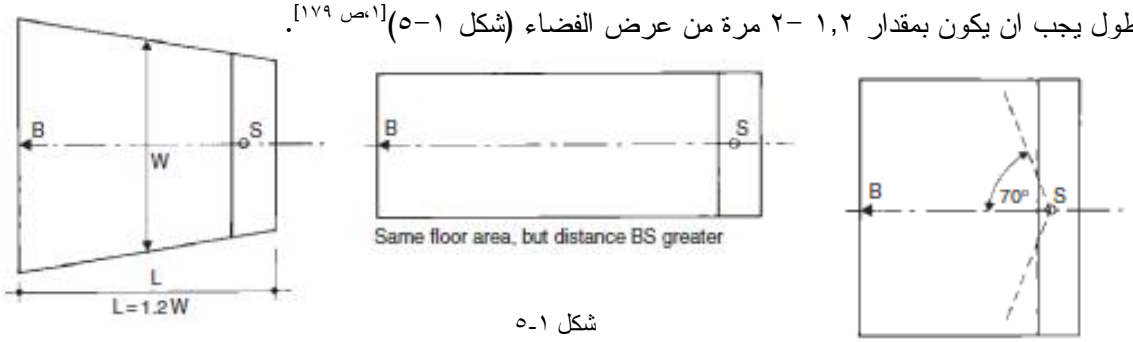
[*] سيتم توضيح الحيود الصوتي في مرحلة لاحقة ضمن موضوع انعكاس الصوت

١- **جوانب تتعلق بالمصدر الصوتي:** وتشمل:

أ- طبيعة المصدر الصوتي: حيث تصنف المصادر الصوتية الى مصادر كلامية ومصادر موسيقية، ولكل نوع صفاته وحدوده ضمن المديات الترددية المختلفة مثل العلو والجهارة ، وشدة الطاقة الصوتية[٧، ص١٤].

ب- موقع المصدر الصوتي: من حيث مكانه وارتفاعه وامكانية تحركه في الفضاء ضمن مجال معين[٨، ص٦٧-٦٩].

ان افضل صوت يتم استلامه هو في الحقل القريب (near field) عندما يهيمن الصوت المباشر على أي انعكاسات. ولذلك فان الفضاءات القصيرة العريضة تعد افضل من تلك بنفس المساحة ولكن ذات شكل طولي. ان وضوحية الصوت تقل بعد زاوية ٧٠ عن المحور العمودي على المصدر، وهذا ما يضع حدود لعرض الفضاء، حيث ان الطول يجب ان يكون بمقدار ١,٢ -٢ مرة من عرض الفضاء (شكل ١-٥)[١،ص ١٧٩].

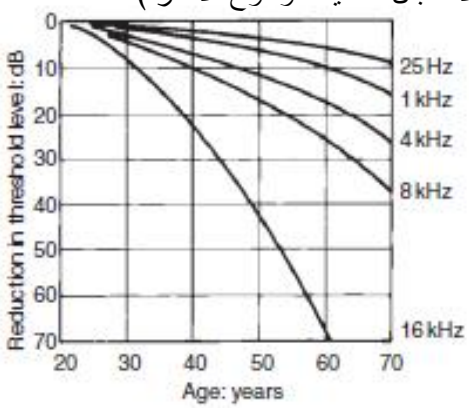


شكل ١-٥

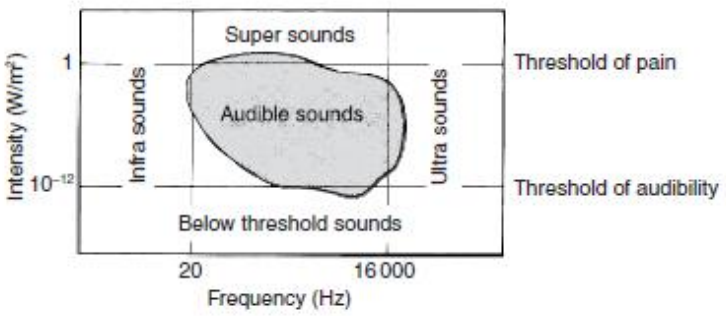
٢- **جوانب تتعلق بالمتلقي:** وتشمل:

أ- حساسية الاذن: ان الاذن البشرية حساسة للاهتزازات بين ٢٠هرتز-١٦كيلو هرتز (شكل١-٦)، وان هذه الحساسية تختلف باختلاف الترددات. ويمكن لهذا المدى المسموع من الترددات ان يقل (خاصة للترددات العالية) وذلك حسب حالة المتلقي الصحية والعمرية. ويبين الشكل(١-٧) ان الانسان في عمر الـ٦٠ يمكن ان يتوقع فقدان في السمع بمقدار ٧٠ ديسيبل عند الـ١٦ كيلو هرتز، و١٠ ديسيبل فقط عند الـ١ كيلو هرتز[١، ص١٥٢].

ب- حالة المتلقي الشخصية: وهذا ما يتعلق بالشخص السامع والتي تعتمد على درجة الاحساس بالمجال السمعي، ودقة السمع، ودرجة التذوق، وخلفية السامع(يفهم لغة المخاطبة وعلى استعداد لاستقبال الحديث او نوع الاشارة)[٧، ص١٦].



شكل ١-٧ علاقة العمر بحساسية الاذن



شكل ١-٦ المدى الصوتي المسموع

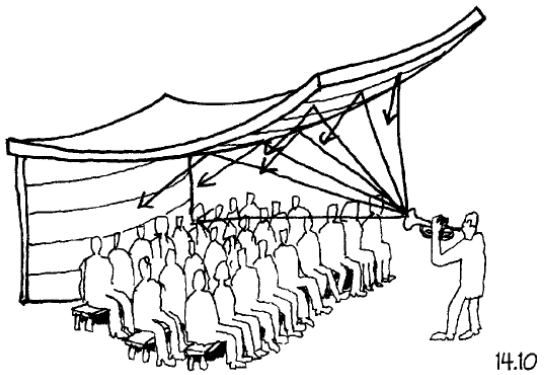
٣- **جوانب تتعلق بالفضاء نفسه:**

يأخذ انتشار الصوت في الفضاء المغلق تعقيدا كبيرا، اذ تعاني الموجات الصوتية المنتشرة ظواهر مختلفة داخل الفضاء السمعي. ومع ذلك فان انتشار الطاقة الصوتية يمكن التنبؤ به وذلك بتتبع مسارات الامواج الصوتية وانعكاساتها في المخطط الافقي والمقطع اما بالرسم اليدوي او بواسطة الكومبيوتر[٣،ص٤٠٦].

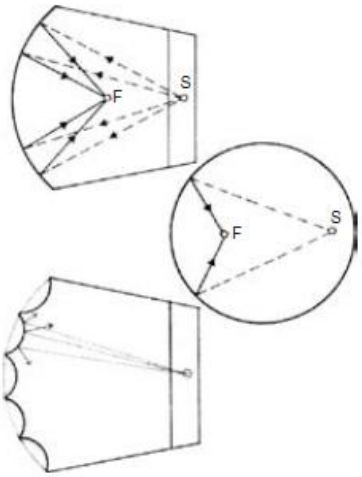
ويعتمد الاداء الصوتي للفضاء بشكل عام على شكل، حجم، ونسب ذلك الفضاء وكذلك على مقدار امتصاص، انعكاس، وانتشار الصوت بتردداته المختلفة بسبب سطوح ومحتويات الفضاء المعني وكما يلي.

أ- شكل الفضاء: ويعد من العوامل المهمة جدا كونها تحدد المسارات التي ينعكس خلالها الصوت. ففي الفضاءات الصغيرة ذات الجدران المتوازية تكون الامواج الواقفة واضحة والتي يحدث فيها تضخيم لبعض الترددات الصوتية بسبب ارتدادها المتكرر ذهابا وايابا بين الجدران المتوازية[٤،ص ١٤٣].

بينما تعمل الفضاءات ذات السطوح المقعرة على تركيز الاصوات المنعكسة في منطقة معينة او اكثر، مخلفة ما يسمى بالاماكن الميتة صوتيا (acoustic dead spots) في المناطق الاخرى [٤، ص١٤٣].اما السطوح المحدبة من جهة اخرى، فانها تعمل على نشر الاصوات المنعكسة على نطاق واسع، مما يساعد على تقوية مستويات الصوت في جميع انحاء الفضاء (شكل ١-٨). وبذلك يمكن تصميم سطوح الفضاء بشكل غير منتظم لنشر وعكس الاصوات بشكل اكثر او اقل تساويا لجميع المستمعين. وبصورة عامة فان اشكال الفضاءات الدائرية والفضاءات الحاوية على قباب ممكن ان تخلق حقول صوتية غير منتظمة، ولكن الفضاءات ذات الجدار الخلفي المنحني ممكن ان تؤدي الى حصول تقوية صوتية، كما ويمكن تقسيمه الى عدد من السطوح المحدبة لغرض نشر الصوت (شكل ١-٩)[١، ص١٨٠].

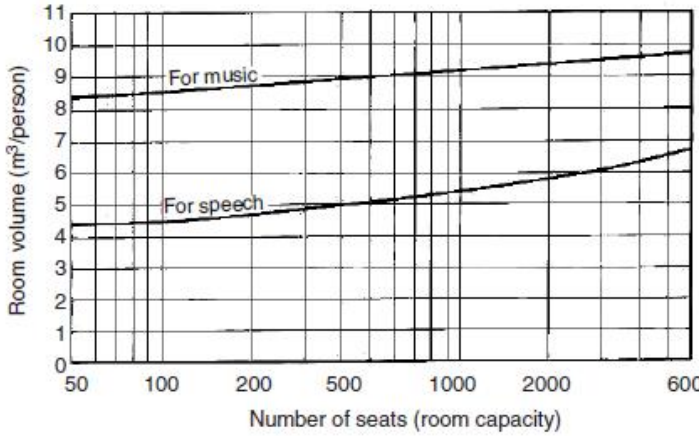


شكل ١-٨ انتشار الصوت عن السطوح المحدبة



شكل ١-٩ تركيز ونشر الصوت عن السطوح المنحنية

ب- حجم الفضاء: لغرض تحقيق الكفاءة الصوتية، يجب ان تكون القاعة اصغر ما يمكن. ولكن هذه النسبة الدنيا من الحجم تتحدد حسب الحاجة الى الترديد المناسب للاستعمال. ويبين الشكل (١-١٠) الحد الادنى لاحجام القاعات السمعية مع الاخذ بالاعتبار ان القاعة يمكن ان تكون اكبر من الحدود المعطاة ولكن ذلك يتطلب زيادة في المواد الماصة[١، ص١٧٩] لغرض الحفاظ على زمن الترديد* المناسب.



شكل ١-١٠ الحدود الدنيا لاحجام القاعات

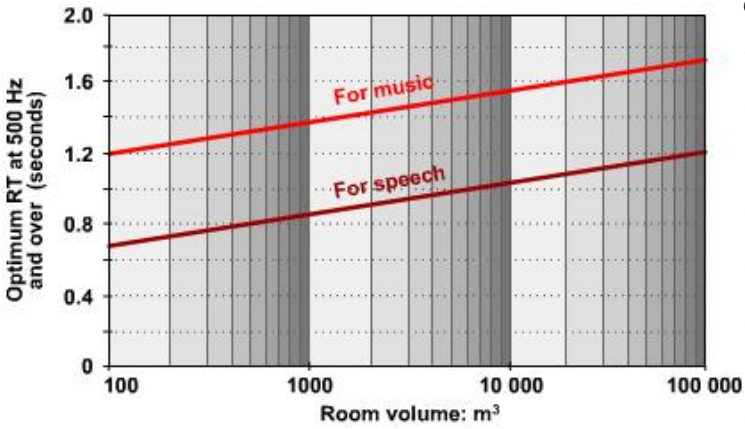
جـ- السطوح الداخلية للفضاء: يتكون غلاف الفضاء الداخلي بشكل عام من سطوح الاجزاء الصلدة التي تتخللها الفتحات (الابواب والشبابيك) ويختلف تأثير كل منها على الاداء الصوتي وكما يلي[٩، ص١٨٦]:

- الاجزاء الصلدة من الغلاف: وتعتبر سطوح عاكسة بشكل عام، وتختلف هذه السطوح من حيث طبيعة تكوينها وملمسها، وبثبوت معامل امتصاص هذه السطوح تعمل السطوح الناعمة على عكس الموجات الصوتية بشكل تام تقريبا، بينما تعمل السطوح الخشنة على تشتيت قسم من الطاقة الصوتية للموجات الساقطة لجميع الاتجاهات.

* سيتم التعريف به في مرحلة لاحقة ضمن هذا المحور

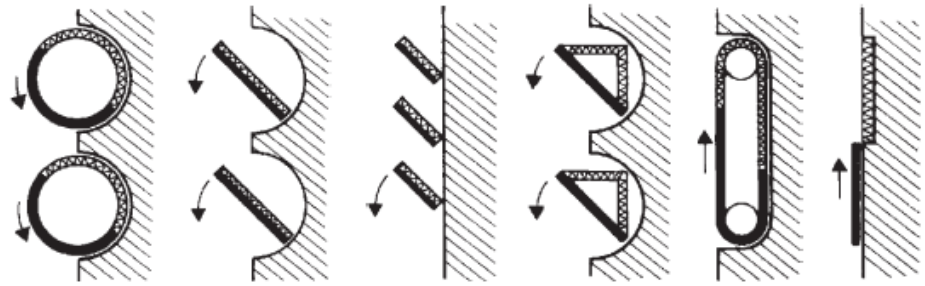
- الفتحات في الغلاف: تماثل الفتحات داخل الفضاء المغلق في عملها المواد تامة الامتصاص بالنسبة للموجات الصوتية المنبثة داخل الفضاء.

وبصورة عامة تؤثر طبيعة مواد السطوح الداخلية على زمن الترديد الصوتي في الفضاء والذي يتحدد مقداره حسب طبيعة الاستعمال للفضاء. فالقاعات الكلامية تتطلب زمن ترديد قصير لتحقيق الوضوحية التي تعد العامل الاكثر اهمية فيها. اما بالنسبة للموسيقى فان عامل اكتمال النغمة (fullness of tone) هو الاكثر اهمية مما يتطلب زمن ترديد اطول(شكل ١-١١). اما زمن الترديد للقاعات متعددة الاغراض فانه يجب ان يكون بين هذين الحدين[١، ص١٨٠].



شكل ١-١١ علاقة زمن الترديد الصوتي بحجم الفضاء

ولتحقيق ذلك واعطاء نوع من المرونة في استخدام القاعة (من ناحية الغرض والاشغال) فانه يمكن استخدام بعض المواد الماصة المتغيرة مثل الالواح الدوارة او المتحركة والتي يبين الشكل (١-١٢) عدة نماذج منها حيث يكون احد سطوحها ماصا والاخر عاكسا للصوت[١، ص١٨١].



شكل ١-١٢ الالواح المتحركة

ومن ذلك فان هذه العوامل مجتمعة تؤثر على سلوك الامواج الصوتية في الفضاء وما تعانيه من عمليات امتصاص وانعكاس والتي سيتم تناولها في الفقرات اللاحقة وبيان تأثيرها على ازمان التأخير الابتدائي والترديد الصوتي والتعريف بهما بشكل مفصل بالاضافة الى بيان بعض العيوب الصوتية التي يمكن ان تنتج عن التصميم غير الملائم للفضاء ومواد سطوحه وطرق معالجتها.

١-٣ سلوك الامواج الصوتية:

وسيتم في هذه الفقرة تناول عمليات الامتصاص والانعكاس التي يعانيها الصوت داخل الفضاء وكما يلي:

١-٣-١ امتصاص الصوت:

ويعد من التقنيات الصوتية الاساسية التي تستخدم في التصميم الداخلي. فعند ارتطام الموجة الصوتية بجسم ما ينعكس قسم من الطاقة الصوتية والقسم الاخر ينفذ الى داخل الجسم ويتلاشى[٣، ص٤٠١]. تمتص المواد المسامية كمية كبيرة من الطاقة الصوتية الساقطة عليها، والتي تتساب خلال المادة على شكل حرارة قليلة جدا غير مقاسة تتولد نتيجة

الاحتكاك بين جزيئات الهواء المتحركة وجدران المسامات[٤، ص١٤٠]. ويعتمد مقدار الامتصاص على مواصفات الجسم المتمثلة بـ: مرونة مادة الجسم، خشونة السطح، المسامية، وفي بعض الحالات خصائصه الرئيسية[٥،ص١٠].

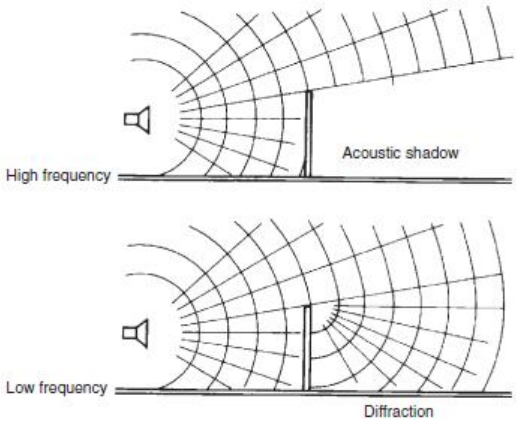
ويتم الحصول على الامتصاص المثالي لتردد معين بتوقيع المواد المسامية على مسافة تعادل مرة وربع مقدار الطول الموجي المنعكس عن سطح صلب صلد، عندما تكون سرعة جزيئات الهواء بالنسبة للامواج القادمة والمنعكسة في اقصاها[٤، ص١٤٠]. وكلما قل التردد زاد سمك المادة المطلوبة لامتصاص هذه الترددات[٣، ص٤٠١].

يعبر عن كفاءة الامتصاص لمادة ما بقيمة رقمية من (٠-١) وتدعى بمعامل الامتصاص (absorption coefficient) والذي يعرف على انه كمية الطاقة الممتصة من قبل الجسم الى كمية الطاقة الكلية الساقطة على ذلك الجسم لوحدة المساحة[٥، ص١٠].

١-٣-٢ انعكاس الصوت:

يعرف الانعكاس بانه ارتداد الموجة الصوتية عن السطوح المواجهة لها. وتختلف طبيعة انعكاس الموجة الصوتية تبعا لشكل السطح العاكس وابعاده بغض النظر عن علاقته بالفضاء. وتعتبر التقوية الصوتية التي توفرها الانعكاسات وظيفة مهمة من وظائف الخصائص الانعكاسية للفضاء، وعادة ما يأخذ المصممين بالاعتبار الانعكاس الصوتي الاول فقط، ذلك ان الانعكاس الثاني والثالث يكون اقل تأثيرا وسماعا[٣، ص٤٠٥].

تختلف اطوال الامواج الصوتية للترددات المسموعة من ١٥م للترددات الواطئة جدا الى اقل من ٢,٥سم للترددات العالية. فعندما يصطدم الصوت بسطح كبير نسبيا مقارنة بطوله الموجي فان جزء من الطاقة الصوتية سوف ينعكس والجزء الاخر يمتص. وكلما زادت صلابة وصلادة السطح كلما زادت الطاقة الصوتية المنعكسة[٤، ص١٤٠].



شكل ١-١٣ ظاهرة الحيود الصوتي

حيث تنعكس الموجات الصوتية عن السطوح التي تساوي ابعادها على الاقل ضعف الطول الموجي للموجة المرتطمة بزاوية انعكاس تساوي في المقدار زاوية السقوط. اما عندما يصطدم الصوت بجسم احد ابعاده اصغر من الطول الموجي للموجة الصوتية المرتطمة تحصل ظاهرة الحيود، والتي تنحني او تحيد فيه الموجات الصوتية حول الجسم، مما يؤدي الى سماع الصوت خلف العائق الصوتي[٣، ص٤٠١] شكل (١-١٣).

وبذلك تعاني الموجات الصوتية من الحيود عندما يكون بعد السطح اقل من الطول الموجي، وتعاني من التشتيت عندما يساوي عمق السطح الطول الموجي تقريبا، وتعاني من الانعكاس عندما يكون بعد السطح اكبر من ضعف الطول الموجي على الاقل، ويعطي الجدول (١-١) تصورا عن الاطوال الموجية المصاحبة للترددات المركزية التي تمثل مدى الترددات لصوت الانسان.

جدول (١-١) الاطوال الموجية للترددات الصوتية المركزية

التردد	١٢٥	٢٥٠	٥٠٠	١٠٠٠	٢٠٠٠	٤٠٠٠	٨٠٠٠
الطول الموجي (م)	٢.٧٢	١.٣٦	٠.٦٨	٠.٣٤	٠.١٧	٠.٠٨	٠.٠٤

وبذلك فالعلاقة بين ابعاد السطوح والاطوال الموجية للصوت تؤثر بصورة مباشرة على الاداء الصوتي للفضاء وعلى زمن وصول الانعكاسات الصوتية ومساراتها مما يؤثر في زمن التأخير الابتدائي للصوت، زمن الترديد الصوتي، وظهور بعض المشاكل الصوتية وكما في الفقرات التالية.

١-٤ زمن التأخير الابتدائي:

بعد وصول الصوت المباشر الى اذن المستمع في الفضاء، تصل الانعكاسات الصوتية الاولية، وتسمى الفترة الزمنية بين وصول الصوت المباشر وكل من هذه الانعكاسات بزمن التأخير الابتدائي [١٠، ص٥٠].

ولما يلعبه زمن التأخير الابتدائي من دور مهم في تحديد الاداء الصوتي للقاعات فقد تم تحديد اقصى زمن تأخير مسموح بالاعتماد على نوع الفعاليات في الفضاء. ففي القاعات الكلامية يصل اقصى زمن تأخير ابتدائي الى ٣٥ ملي ثانية لتحقيق الوضوحية وتجنب الصدى، اما في القاعات الموسيقية فقد يصل الى ٨٠ ملي ثانية لتحقيق وصول جميع المكونات الترددية (اكتمال النغمة)[٨، ص٩٥].

١-٥ زمن الترديد الصوتي:

يعرف الترديد على انه مقاومة الصوت للبقاء (بعد توقف المصدر الصوتي عن البث) نتيجة الانعكاسات الصوتية المتكررة. فعند تشغيل أي مصدر صوتي في فضاء ستبدأ شدة حقل الصوت بالازدياد الى ان يتساوى مستوى الطاقة الممتصة مع المدخلة، ويحصل نوع من الاستقرار والتوازن في الحقل الصوتي. وعند اطفاء المصدر الصوتي سيبقى حقل الصوت المرتد لفترة وجيزة يضمحل خلالها تدريجيا. والوقت المستغرق لينخفض مستوى الصوت بمقدار ٦٠ ديسيبل يعرف بزمن الترديد Reverberation Time (RT). ويعتمد طول هذا الوقت على حجم الفضاء وتغليف سطوحه الداخلية[١، ص ١٧٦-١٧٧].

ان الترديد الصوتي للفضاء يجب ان يتوافق مع استخدام وحجم ذلك الفضاء فبالنسبة للكلام في فضاءات المكاتب والغرف الصغيرة فان زمن الترديد الصوتي الامثل لها يكون بين ٠,٣-٠,٦ ثانية. وقد يصل في القاعات السمعية الكبيرة الى ١,٨ ثانية. ويمكن التحكم بزمن الترديد الصوتي وبالتالي نوعية الصوت من خلال مقدار وتوزيع المواد العاكسة والماصة في الفضاء[٣، ص٣٩٨]. مع الاشارة الى ان زمن الترديد القصير يعتبر الافضل بالنسبة للكلام، اما زمن الترديد الاطول فانه افضل بالنسبة للموسيقى (شكل ١-١١). الا انه يجب مراعاة ان لا يكون زمن الترديد طويلا جدا فيفقد الصوت وضوحيته وتعريفه وان لا يكون قصيرا جدا مما يفقد الاصوات الموسيقية جماليتها[٣، ص٣٩٩].

١-٦ المشاكل الصوتية:

تتولد المشاكل الصوتية في الفضاء لعدة اسباب: اما اسباب تتعلق بتصميم القاعة من شكل، حجم، ونسب ابعاد القاعة او بسبب السطوح الداخلية للقاعة وسوء توزيع المواد الماصة والعاكسة فيها، او بسبب الابعاد غير المناسبة للسطوح العاكسة. ومن هذه المشاكل:

١-٦-١ الصدى (Echo):

ان التأخير في استقبال الصوت الناتج من عدد من الانعكاسات في القاعات الكبيرة ممكن ان يسبب الصدى الذي يحدث نتيجة تكرار الصوت المتولد من انعكاس الموجات الصوتية من سطح ما بحيث تكون هذه الموجات بدرجة كافية من العلو والتأخير الزمني ليتم ادراكها بصورة منفصلة عن صوت المصدر. ويحصل ذلك غالبا عندما يصل الصوت الى السامع بعد ٥٠-٨٠ ملي ثانية بعد سماع الصوت المباشر [٣، ص٣٩٩].

ويحدث الصدى عادة بين الجدران المتوازية والتي تبعد اكثر من ١٨م عن بعضها. ويمكن تجنب حدوثه من خلال التخطيط الجيد لهندسة الفضاء وشكله او من خلال استخدام السطوح الماصة في المناطق البعيدة عن المصدر الصوتي وتوجيه الانعكاسات الصوتية في المناطق الاقرب الى المصدر الصوتي بحيث توفر التقوية الصوتية[٣، ص٣٤٠].

١-٦-٢ الصدى المتكرر (Flutter Echo):

ويحدث عندما تنعكس الامواج الصوتية بسرعة ذهابا وايابا بين سطحين متوازين مستويين او مقعرين. ويعرف الصدى المتكرر على انه تعاقب سريع للصدى بفاصل زمني كافي بين الانعكاسات ليتم ادراكها من قبل المستمع على شكل اشارات منفصلة عن بعضها. ويشبه صوت الصدى المتكرر صوت الطنين (buzzing) او صوت الطقطقة الخفيفة (clicking). ويحصل عادة بين القباب القليلة العمق والارضيات الصلبة المستوية. وللتخلص من هذا التأثير يجب تغيير شكل السطوح العاكسة او تغيير علاقة التوازي بينها، او استخدام المواد الماصة في الفضاء[٣، ص٤٠٠].

١-٦-٣ الامواج الواقفة (Standing Waves):

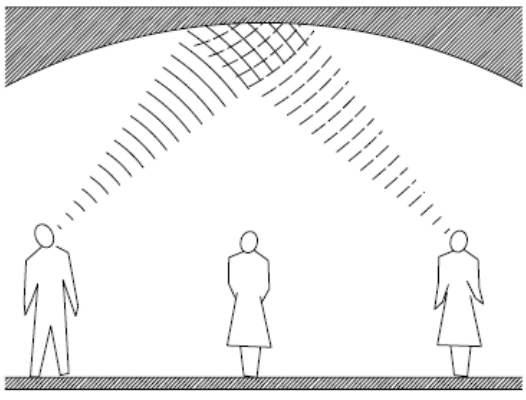
وتعمل الامواج الواقفة بنفس مبادئ الصدى المتكرر ولها نفس مسبباتها، ولكنها تسمع بشكل مختلف. فالامواج الواقفة تدرك او تسمع مثل لحظة السكون تارة ومثل اقصى ما يمكن من الصوت ضمن الفضاء تارة اخرى. اذا كانت المسافة بين الجدارين المتقابلين مرة ونصف بقدر طول الموجة فان الصوت يكون عالي جدا بالقرب من الجدران وواطئ جدا في منتصف المسافة بينهما، حيث ان الموجات في هذه المنطقة تلغي بعضها بعضا[٣، ص٤٠٠].

ويمكن معالجة مشاكل الامواج الواقفة بامالة جدارين في القاعة قليلا، او باستخدام مواد ماصة لاحد الجدران، كما ان السقوف المتموجة ايضا يمكن ان تساعد، كما وتلعب نسب ابعاد القاعة دورا في تقليل هذا التأثير[٣، ص٤٠٠].

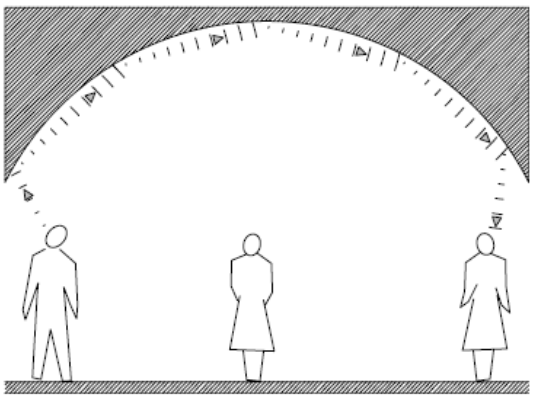
١-٦-٤ التركيز والتسلل (Focusing and Creep):

عندما تنعكس الاصوات عن سطح مقعر فانها يمكن ان تتجمع في نقطة واحدة، وهذا ما يسمى بالتركيز (شكل ١-١٤)، والصوت في هذه النقطة سوف يتضخم بدرجة كبيرة بينما يكون اقل علوا في الاماكن الاخرى [٣، ص٤٠٠].

اما انعكاس الصوت على طول سطح مقوس والصادر من مصدر صوتي قريب منه فانه يعرف بالتسلل (شكل ١-١٥). ويمكن سماع الصوت في هذه الحالة على طول السطح ولكن يكون غير مسموع عند الابتعاد عن السطح[٣، ص٤٠٠].



شكل ١-١٤ ظاهرة التركيز الصوتي



شكل ١-١٥ ظاهرة التسلل

المحور الثاني: التقانة المعلوماتية:

٢-١ التقانة المعلوماتية وعلاقتها بادائية المبنى:

ان مشاكل الادائية المختلفة في المباني والتي غالبا ما يتم اكتشافها بعد الاشغال قد ولدت افكارا وبحوثا جعلت من مسألة تقييم وتقويم ادئية المبنى بما يضمن راحة الشاغلين مسألة هامة يجب اخذها بعين الاعتبار وخاصة في المراحل التصميمية الاولى وقبل ان يصبح المبنى واقعا فيزيائيا.

ونظرا لصعوبة استعمال المعادلات الرياضية الاعتيادية في تضمين جميع جوانب الراحة ومتغيراتها، ادى ذلك الى الاستعانة بالحاسوب للتعامل مع هذه المتغيرات بصورة منفصلة او مجتمعة بشكل اسرع وادق. وفي ظل التطورات الهائلة في التقنية المعلوماتية وصناعة الحواسيب ظهرت تقنية حاسوبية جديدة تسمى بالمحاكاة الحاسوبية (computer simulation) تتيح امكانية تمثيل العالم الحقيقي من قبل برنامج حاسوبي ودراسته واجراء الاختبارات عليه.

وقد حققت هذه التقنية نجاحا كبيرا خاصة بعد ثبوت مصداقية نتائجها من خلال سلسلة الاختبارات التي خضعت لها. اذ استعملت هذه البرامج في تقويم مبان مشيدة فعليا وقورنت نتائجها مع قراءات ميدانية، فوجد انها متقاربة وبشكل كبير واحيانا تكون متطابقة. وللتعرف اكثر على هذه التقنية سيتم تناولها في الفقرة التالية.

٢-٢ تقنية المحاكاة الحاسوبية:

وهي تقنية تعليمية تدخل في مجالات عديدة مثل الصناعة، العلوم، التعليم وغيرها، وتقدم الوقائع الحقيقية والمعالجات في ظروف اختبارية[١١].

وتستعمل المحاكاة الحاسوبية في دراسة السلوك الديناميكي للاشياء او الانظمة استجابة للظروف التي لا يمكن تطبيقها بسهولة وبشكل آمن في الحياة الحقيقية، مما يمكن من القياس والتنبؤ بالوظيفة التشغيلية لنظام باكمله والتي تتأثر بعدة اجزاء منفصلة ضمن النظام. لذلك علينا التفكير بالمحاكاة على انها محرك يقود التكنولوجيا الى تكوين النموذج الافتراضي وتنفيذه واختباره وتحليل نواتجه. ولا يمكن اغفال كون العمارة احد اهم الحقول الهندسية المتأثرة بالحاسوب والمحاكاة الحاسوبية[١٢].

وتعتمد دقة النتائج المستخرجة من هذه البرامج على دقة المدخلات. اذ يتم ادخال جميع المعلومات المتعلقة بالمبنى وحسب احتياجات الاختبار المطلوب. ويقوم البرنامج بتحليل سلوك المبنى (للجوانب المطلوبة) خلال فترة زمنية يحددها مستخدم البرنامج وفي أي وقت من السنة. وبتعبير آخر تحاكي هذه البرامج المبنى كما لو كان موجودا في الحقيقة ولكن بصورة افتراضية داخل الحاسوب.

وقد ظهرت في الاونة الاخيرة عدد كبير من برامج المحاكاة الحاسوبية ومنها Ecotect الذي سيتم الاستعانة به في اداء اختبارات هذا البحث.

٢-٣ برنامج Ecotect:

يعد برنامج Ecotect اداة تصميم بيئية متكاملة والتي تزاوج عمليات الحسابات المختلفة (الشمسية، الحرارية، الاضاءة، السمعية، والكلف) مع واجهة رسم ثلاثية الابعاد. ان واجهة البرنامج المتطورة تجعل عملية ادخال المعلومات نوعا ما اسهل من برامج اخرى. ويحتوي البرنامج على ادوات تحليلية خاصة به، وتعطى النتائج بهيئة صور، مخططات، وجداول يمكن تخزينها في اي لحظة من عمل البرنامج[١٣].

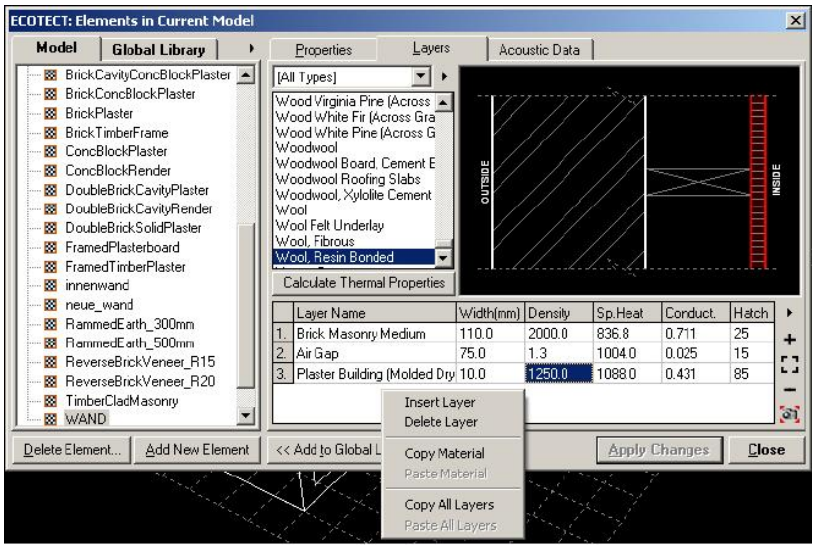
ولغرض استخدام البرنامج في اختبار ادائية المبنى ولمختلف الجوانب فان ذلك يتطلب بعض الاعدادات المسبقة التي على المستخدم القيام بها قبل اجراء الاختبارات. كما يتطلب معرفة الافتراضات الاساسية التي يضعها البرنامج للجانب قيد الاختبار (الصوتي هنا)، وهذا ما سيتم بيانه في الفقرات التالية.

٢-٣-١ الاعدادات المسبقة:

سيتم في هذه الفقرة توضيح الاعدادات التي يتطلبها البرنامج لاتمام اختبارات الكفاءة الصوتية بصورة دقيقة دون الدخول في تفاصيل الاعدادات المطلوبة لانواع الاختبارات الاخرى التي يوفرها البرنامج.

يعد انشاء نموذج افتراضي ثلاثي الابعاد للمبنى قيد الدراسة من اولى الخطوات الاساسية المطلوبة، ورغم ان البرنامج يدعم استيراد النموذج الثلاثي الابعاد من عدد من البرامج الاخرى، الا انه ولضمان صحة الاختبارات ودقتها فانه يفضل ان يتم رسم النموذج الافتراضي في البرنامج نفسه. وذلك لان النموذج ثلاثي الابعاد يمثل، بالنسبة للبرنامج المنشأ ضمنه، طريقة لترميز (encoding) مجموعة من المعلومات بحيث يستطيع البرنامج تفسيرها او تحويلها للاستخدام في الحسابات الرياضية. ولان الحاسبات لا تستطيع فهم الاشياء او معرفة القصد وراء انشائها، خاصة فيما يتعلق بالنماذج الهندسية المعقدة (complex geometry)، وتتعامل بدلا من ذلك مع المدخلات والمعطيات التي يدخلها المستخدم ضمن مجموعة من القواعد التي تحكم البرنامج لتمكنه من تفسير كل عنصر. لذلك فان ادخال المعلومات يجب ان يكون محكوما بهذه القواعد والقوانين الخاصة بالبرنامج بحيث تكون هناك طريقة واحدة فقط لتفسير كل حالة من قبل البرنامج ليعطي النتائج المرجوة منه بصورة ادق[١٤، ص١].

كما يتطلب البرنامج تحديد المواد الانشائية المكونة لكل جزء من اجزاء المبنى. علما ان البرنامج يحتوي على مكتبة للمركبات الانشائية الجاهزة ومكتبة للمواد الانشائية في حال لم تناسب المركبات الجاهزة حاجة المستخدم، حيث يوفر البرنامج امكانية انشاء المركب الانشائي المطلوب من مكتبة المواد شكل (٢-١).



شكل(٢-١) مكتبة المواد وانشاء المركب الانشائي

٢-٣-٢ الافتراضات الاساسية لبرنامج Ecotect :

ان للبرنامج بعض الافتراضات اللازم اخذها بالاعتبار لغرض اجراء الحسابات الصوتية الهندسية (geometric acoustic calculations) وهي كما يلي[١٥].

١-تقليص كل سطوح الفضاء المعقدة الى سلسة من السطوح المضلعة المستوية (بدون سمك).

٢-الموجات المنتشرة تشمل كمية قليلة من الصوت او حزمة الطاقة التي تتحرك بخطوط مستقيمة.

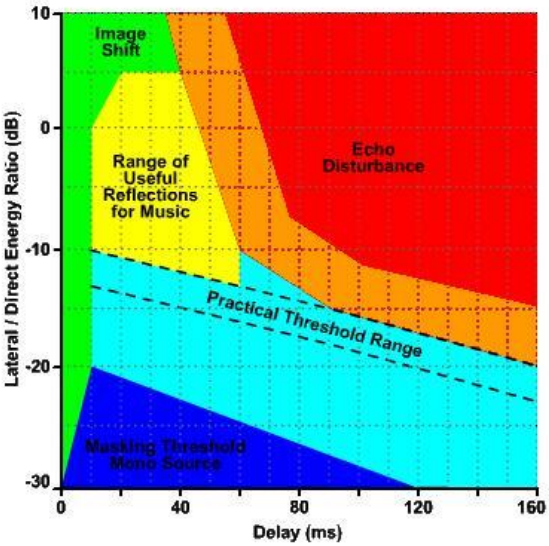
٣-في هذه الحالة تعامل الطاقة الصوتية معاملة اي طاقة اخرى، اي انها ممكن ان تجمع (summed).

٤-وهذا يعني ايضا غياب الظاهرة الموجية مثل التمرحل (phasing) والتشويش (interference).

٥-معامل امتصاص السطح للصوت يكون مستقلا عن زاوية الاصطدام.

٢-٤ تصنيف الانعكاسات الصوتية ضمن البرنامج:

يعتمد البرنامج نظام لوني بالعلاقة مع الصوت المباشر لغرض تصور وادراك تأثير كل شعاع صوتي في لحظة معينة من انتشاره. وكل من هذه الالوان تقوم على مستوى (level) وتأخير (delay) نسبيين للصوت عند مقارنتها مع الصوت المباشر في موقع الشعاع الصوتي المعني. ويبين الشكل (٢-٢) حزم المستويات والتأخير المتمثلة بالالوان المختلفة المستخدمة في البرنامج وكما يلي[١٥]:



شكل (٢-٢) النظام اللوني لحزم المستويات الصوتية والتأخير الزمني المعتمدة في برنامج Ecotect

- المباشر (Direct): ويشمل الصوت المباشر والصوت المنعكس الواصل الى اذن السامع بعد اجزاء قليلة من الثانية وفي مستوى عالي نسبيا (dB 25<) حيث ان ميكانيكية السمع لاتستطيع التمييز بين المصدرين. مما يؤثر في اتجاهية الصوت ويؤدي الى خلق ازاحة جزئية للصورة (partial image shift). ومع ذلك، ولكون الانسان يملك قابلية تكيف عالية لذلك فان هذا التأثير يتطلب عدد كبير من الاشعة الصوتية لكي يستطيع احداث تأثير محسوس.
- المفيد (Useful): وتشمل الانعكاسات التي تصل متأخرة قليلا عن الحالة السابقة، وتقوم الاذن بدمجها مع الصوت المباشر. ومع انها لا تؤثر على اتجاهية الصوت، الا انها تزيد من مستوى الصوت المدرك بشكل مؤثر مما يزيد من سماعيته ووضوحه، مما يجعل منها طاقة صوتية مفيدة.
- الحدود (Border): هناك عتبة (Threshold) يتم بعدها دمج مكونات منفصلة للصوت معا. وهذه العتبة تختلف حسب نوع الصوت. فبالنسبة للكلام، عندما يكون التمييز بين المقاطع الصوتية المتتالية اساسيا لحدوث الفهم، فان التأخير النسبي الذي يحدث بعده هذا التأثير هو (٣٥-٥٠ ملي ثانية). اما الموسيقى عندما يكون من الافضل للنغمات المنفصلة الصادرة من عدد من الالات الموسيقية ان تسير معا، فان التأخير النسبي يكون حوالي (٨٠ ملي ثانية).
- الصدى (Echo): ويحدث عند تأخر وصول انعكاسات الصوت مع بقاءه في مستوى عالي نسبيا بحيث يمكن ان يدرك بشكل منفصل تماما عن الصوت المباشر مما يشكل صدى مزعج. واذا ما وصل عدد من الاصداء العالية المستوى الصوتي معا فان تأثيرها سيزيد من مستوى الترديد (Reverberation Level) بشكل ملحوظ، كما انها تقلل من سماعية الصوت الاصلي.
- الترديد (Reverb): تحت مستوى معين، يصبح الصوت المنعكس جزءا من الترديد المحيطي (ambient reverberation)، وفي هذا المستوى فان الانعكاسات لا يكون لها مساهمة مؤثرة في ادراك الصوت المباشر ولكنها تحدد ادراكنا الحيزي في الفضاء، ومستواها الصوتي يستمر في التناقص مع الزمن.
- المغطى (Masked): في المستويات الصوتية المنخفضة نسبيا ستغطى الانعكاسات كليا من قبل الصوت المباشر والانعكاسات الاخرى. ومثل هذه الانعكاسات لا تشكل أي مشاكل ضمن الفضاء.

٢-٥ الحسابات الصوتية التي يدعمها البرنامج:

٢-٥-١ الحسابات الصوتية الاحصائية:

وتستخدم هذه الحسابات لحساب زمن الترديد الصوتي في الفضاء ولجميع المكونات الترددية. ويوفر برنامج Ecotect طريقتين لحساب زمن الترديد وكما يلي:

- **الطريقة الاولى: زمن الترديد الاحصائي:**

تأخذ الطريقة الاحصائية في الاعتبار حجم الفضاء والمواد المستخدمة فيه فقط لحساب زمن الترديد. ومع ذلك فهي تعتبر من الطرق المهمة التي توفر مؤشر مبكر لزمن الترديد وقد تكون الطريقة الوحيدة المتوفرة في عدد من المشاريع لاعطاء قيمة رقمية يمكن استخدامها.

في عام ١٨٩٥ اجرى Sabine عدد من البحوث المهمة في هذا المجال وتوصل الى العلاقة بين حجم الفضاء وكمية المواد الماصة الموجودة فيه وكمية ما اسماه بزمن الترديد RT، وكما في المعادلة التالية:

$RT= 0.161\ V/A$ حيث V = حجم الفضاء بالمتر المكعب

A= الامتصاص الكلي ضمن الفضاء والتي تحسب من خلال

مجموع مساحة السطح x معامل الامتصاص (a) لكل مادة مستخدمة ضمن الفضاء

ومن ذلك فان قانون Sabine يعطي مؤشر جيد للسلوك المتوقع للصوت في حالة الفضاءات التي تكون فيها المواد الماصة موزعة بصورة متجانسة، حيث انه يفترض ان اضمحلال الصوت يحدث بصورة مستمرة ومتجانسة، مما يتطلب وسط صوتي متجانس. وفي حالة زيادة المواد الماصة في الفضاء فان هذه المعادلة تصبح اقل دقة. ففي الحالات النادرة التي تكون فيها الفضاءات ميتة صوتيا (معامل الامتصاص فيها =١) والتي يجب ان يكون قيمة زمن الترديد فيها =صفر فان هذه المعادلة تعطي قيمة لزمن الترديد. لذلك ظهرت مناهج متعددة للتوصل الى المعادلة التي تعطي افضل ما يمكن من النتائج للفضاءات الاقل ترديدا، ومنها معادلة Norris-Eyring والتي تفترض حدوث اضمحلال متقطع للصوت بالتزامن مع وصول الانعكاسات شيئا فشيئا، مما يعطي المعادلة التالية:

$RT= 0.161\ V/-S*\ln(1-a)$ حيث ان S= المساحة السطحية الكلية

a= معدل معامل الامتصاص

ان هذه المعادلة تعطي القيمة الصحيحة لزمن الترديد للفضاءات الميتة صوتيا الا انها اكثر تعقيدا، كما انها تصلح فقط للفضاءات التي لها نفس قيمة الامتصاص لجميع السطوح. ولما كانت المواد المستخدمة في الفضاءات لها مدى واسع من معاملات الامتصاص فان افضل التنبؤات تم الحصول عليها من خلال معادلة Millington-Sette، والتي تقوم ببساطة على استخدام معامل الامتصاص المؤثر (ae) والذي يساوي (ai)ln(1-)– وكما يلي:

$RT= 0.161\ V/\sum -Si*\ln(1-ai)$ حيث ان Si= مساحة السطح للمادة i^{th}

ai= معامل الامتصاص الفعلي

وبعد توضيح هذه المعادلات الثلاثة فانه تجدر الاشارة الى انها احصائية بحتة، وبذلك فهي تتجاهل جميع المعلومات الهندسية عن الفضاء (شكله، موقع المواد الماصة فيه، استخدام المواد العاكسة ...الخ)، لذلك ومع انها تستطيع تحديد زمن الترديد بصورة قريبة جدا من الواقع، الا انها لا يمكن استخدامها لغرض التنبؤ بحالات الشذوذ الصوتي في الفضاء مثل الصدى الواضح والظلال الصوتية وغيرها والتي يمكن مراقبتها والتوصل الى حلها من خلال التحليل الهندسي[*].

- **الطريقة الثانية: الترديد التخميني (Estimated Reverberation):**

وتقوم هذه الطريقة على توليد الاف الاشعة الصوتية التي تنتشر عشوائيا ضمن الحيز الفضائي وتعقب اضمحلالها، مما يوفر امكانية رسم المنحني الخاص بمعدل اضمحلال كل من المكونات الترددية للصوت والذي يعطي مؤشر جيد لزمن الترديد الصوتي الفعلي ضمن الفضاء.

---

[*] الذي سيتم توضيحه في الفقرة ٢-٥-٢

وعادة ما تكون هذه الطريقة اكثر دقة من الطريقة الاحصائية، لكون الاشعة المطلقة عشوائيا تعمل على تقييم (weight) وتمييز الاسطح الاكثر اهمية من الناحية الاحصائية في كل فضاء. حيث انه اذا كان السطح كبيرا ومكشوفا ستكون فرصة سقوط عدد كبير من الاشعة الصوتية عليه اكثر من الاسطح الصغيرة وغير المكشوفة (obstructed). وهذا ما يمثل محاكاة مباشرة لدرجة تأثر كل سطح بالحقل الصوتي الكلي في الفضاء الحقيقي. وبتسجيل عدد اصطدامات الاشعة الصوتية على كل سطح ومعامل امتصاص ذلك السطح نحصل على طريقة افضل للتنبؤ بمقدار الامتصاص العام الذي يتم على الصوت في الفضاء.

وبالاستناد الى مفهوم طول المسار الحر[*] فان البرنامج يوفر امكانية استخدام هذه البيانات في قوانين الترديد الصوتي للحصول على مخطط ادق للترديد الصوتي للفضاء قيد الاختبار من خلال استخدام معامل الامتصاص المعتمد على مقدار الاشعة الصوتية الساقطة (Ray-Weighted Average Absorption Coefficient). على عكس الطريقة الاحصائية التي تستخدم معامل الامتصاص المعتمد على مساحة السطح.

٢-٥-٢ الحسابات الصوتية الهندسية:

ان الطرق الاحصائية تكون مفيدة جدا في المراحل المبكرة من التصميم، لكنها تكون محدودة القدرة في اكتشاف الاخطاء الصوتية (acoustical faults)، وذلك لكون اغلب هذه الاخطاء تكون ناجمة من الشكل الهندسي للحيز. لذلك تساهم التحليلات الهندسية في تصحيح الكثير من هذه الاخطاء خاصة مع تقدم مراحل التصميم واستخدام المعلومات الهندسية التي تتوفر مع تقدم هذه المراحل، وذلك من خلال استخدام السطوح العاكسة والماصة وتوقيعها بالمكان المناسب.وهذا ما يمكن ان تفيد به دراسة الاشعة الصوتية المنعكسة، حيث انه من خلال تحليل مسارات الاشعة الصوتية يصبح من السهل تحديد اي المناطق تحتاج الى تعزيز الصوت (على شكل عواكس) وايها تحتاج الى اخماده (على شكل ماصات).

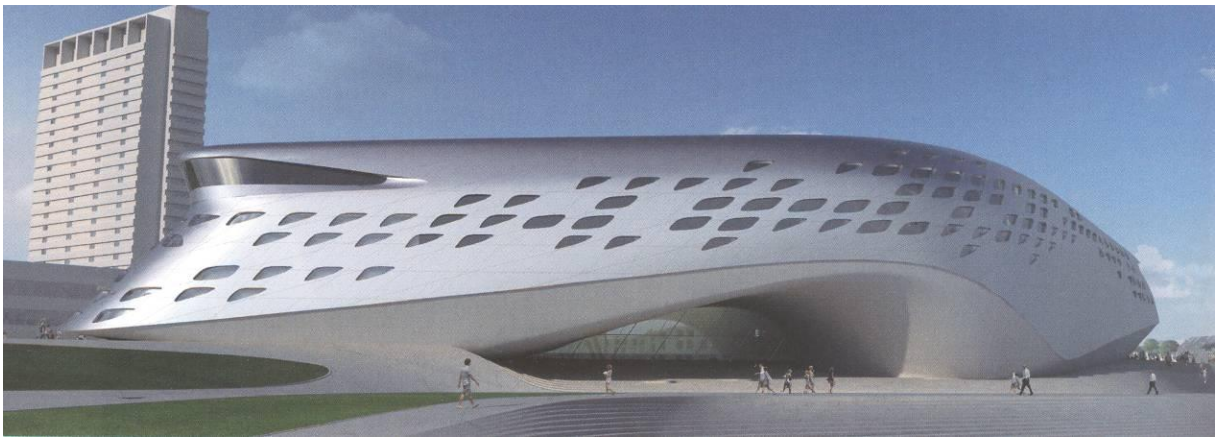
ومما سبق طرحه في المحورين الاول والثاني يمكن استخلاص اهم مؤشرات الاداء الصوتي وكما في الجدول(٢-١).

المحور الثالث: الاجراءات التطبيقية:

وسيتم في هذا المحور اجراء عدد من الاختبارات التطبيقية باستخدام برنامج Ecotect على قاعتين للمعارض الاولى غير منتظمة الشكل في متحف في Vilnius من تصميم المهندسة زهاء حديد (شكل ٣-١)، والثانية منتظمة الشكل في مركز للاطفال في Seoul (شكل ٣-٢) لقياس كفاءة الاداء الصوتي فيهما دون اللجوء الى استخدام انظمة التحكم الصوتية. وسيتم ذلك من خلال التحليل الهندسي والاحصائي، حيث وكما اشرنا سابقا سيتم في التحليل الهندسي تتبع مسارات الصوت المباشر والمنعكس لمعرفة مدى كفاءة توزيع الطاقة الصوتية في الفضاء وفيما اذا كان هناك بعض العيوب الصوتية التي تظهر في مناطق محددة منه. اما التحليل الاحصائي فانه سيعطي مؤشرين مهمين من مؤشرات الاداء الصوتي وهما زمن التأخير الابتدائي وزمن الترديد الصوتي الذي سيتم قياسه للمعادلات الصوتية الثلاث وبالطريقتين الاحصائية والتخمينية مع الاشارة الى ان المصدر الصوتي المستخدم بتردد ٥٠٠ هرتز.

---

[*] وهو معدل مسارات الموجات الصوتية المنعكسة والذي يعرف على انه ذلك المسار الذي لو ضرب بعده بعدد الانعكاسات ينتج عنه مجموع المسافات التي تقطعها الموجات الصوتية في انعكاساتها حتى تتلاشى شدتها



شكل ٣-١ بناية المتحف في Vilnius

شكل ٣-٢ مركز الاطفال في Seoul

وبما ان البرنامج يوفر امكانية استخراج النتائج الاحصائية بهيئة مخططات وجداول لكل حالة مختبرة وللطريقتين الاحصائية والهندسية، ونتيجة لكثرة الحالات المختبرة(حوالي٦٠ حالة كما سنبين لاحقا) لذا سيتم الاكتفاء باعطاء نموذج واحد للمخططات والجداول الخاصة بكل من حالتي حساب زمن الترديد بالطريقة الاحصائية والتخمينية ونموذج واحد لمخطط حساب زمن التأخير الابتدائي على ان يتم ادراج النتائج في جدول موحد لكل قاعة، كما سيتم اعطاء مخطط ثلاثي الابعاد (ايزومترك) يوضح توزيع الطاقة الصوتية في القاعة للحالات قبل استخدام العواكس الصوتية وبعدها.

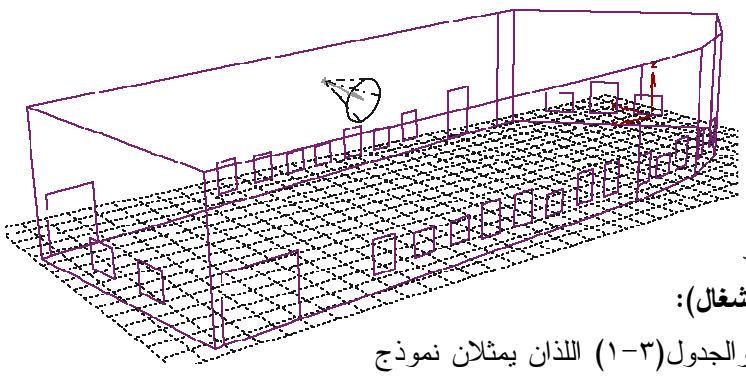
٣-١ الاختبارات التطبيقية: وتشمل:

٣-١-١ القاعة الاولى: قاعة متحف Vilnius (شكل٣-٣).

اولا/ القاعة بدون استخدام القواطع الداخلية:

١- حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني وزمن التأخير الابتدائي للقاعة وهي خالية (بدون معروضات وبدون اشغال):

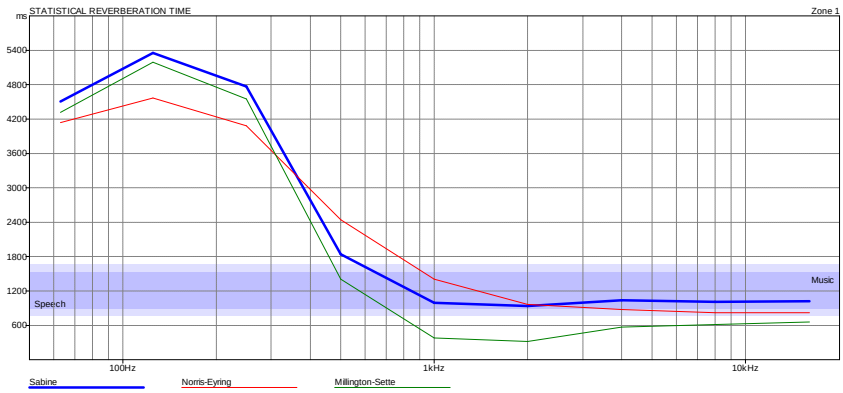
وكانت نتائج هذا الاختبار كما مبين في الشكل(٣-٤) والجدول(٣-١) اللذان يمثلان نموذج لنتائج اختبار حساب زمن الترديد الاحصائي، والشكل(٣-٥) والجدول(٣-٢) اللذان يمثلان نموذج لنتائج اختبار حساب زمن الترديد التخميني، والشكل(٣-٦) الذي يمثل نموذج نتائج اختبار حساب زمن التأخير الابتدائي.



شكل ٣-٣ القاعة بعد اضافة اللوحات المعروضة

جدول ٣-١ نتائج اختبار حساب زمن الترديد الاحصائي للحالة الاولى

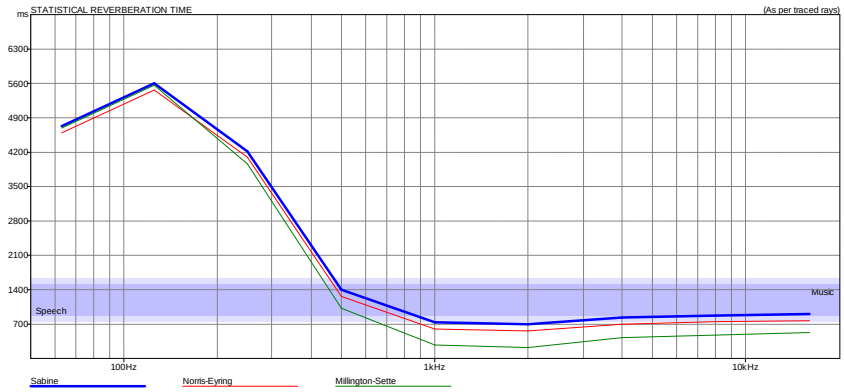
Optimum RT (500Hz - Speech): 0.90 s			
Optimum RT (500Hz - Music): 1.55 s			
Most Suitable: Millington-Sette (Widely varying)			
FREQ.	SABINE RT(60)	NOR-ER RT(60)	MIL-SE RT(60)
63Hz	4.60	2.91	4.41
125Hz	5.48	3.80	5.32
250Hz	4.92	5.41	4.68
500Hz	1.89	4.43	1.43
1kHz	1.01	2.80	0.40
2kHz	0.96	2.66	0.34
4kHz	1.09	2.63	0.60
8kHz	1.04	2.34	0.63
16kHz	1.06	2.25	0.68



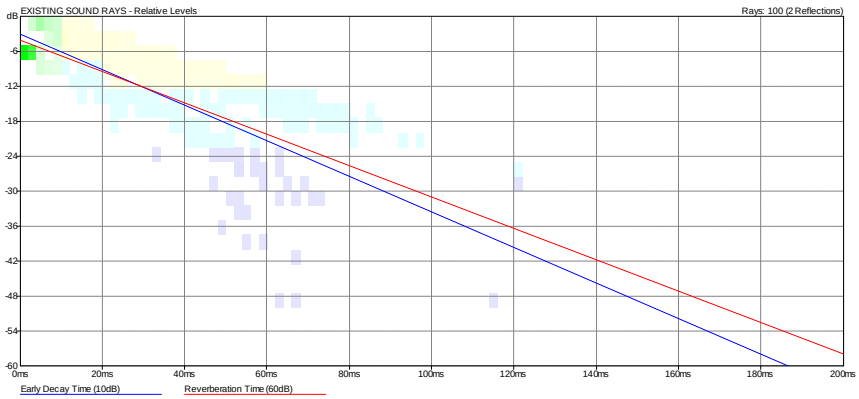
شكل ٣-٤ نتائج اختبار حساب زمن الترديد الاحصائي للحالة الاولى

جدول ٣-٢ نتائج اختبار حساب زمن الترديد التخميني للحالة الاولى

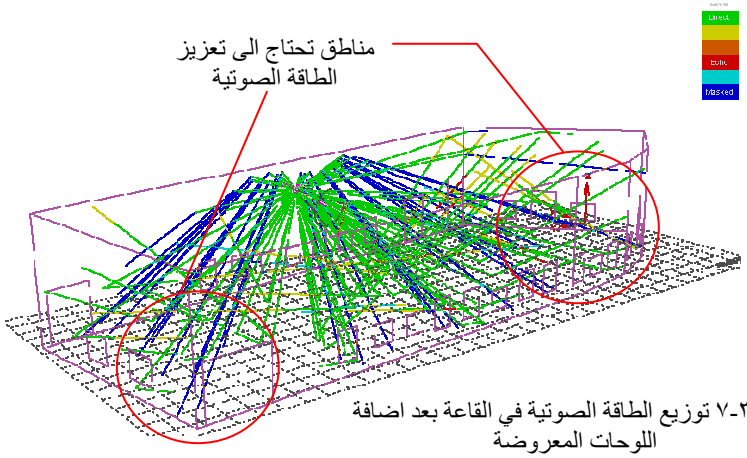
Optimum RT (500Hz - Speech): 0.90 s			
Optimum RT (500Hz - Music): 1.55 s			
Mean Free Path Length: 6.177 m			
FREQ.	SABINE RT(60)	NOR-ER RT(60)	MIL-SE RT(60)
63Hz	4.69	4.57	4.68
125Hz	5.55	5.42	5.52
250Hz	4.16	4.04	3.91
500Hz	1.38	1.25	1.01
1kHz	0.73	0.60	0.27
2kHz	0.70	0.57	0.23
4kHz	0.83	0.70	0.43
8kHz	0.87	0.74	0.48
16kHz	0.90	0.77	0.53



شكل ٣-٥ نتائج اختبار حساب زمن الترديد التخميني للحالة الاولى



شكل ٣-٦ نتائج اختبار حساب زمن التأخير الابتدائي للحالة الاولى



شكل ٣-٧ توزيع الطاقة الصوتية في القاعة بعد اضافة اللوحات المعروضة

٢- حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني وزمن التأخير الابتدائي للقاعة بعد اضافة اللوحات (المعروضات):

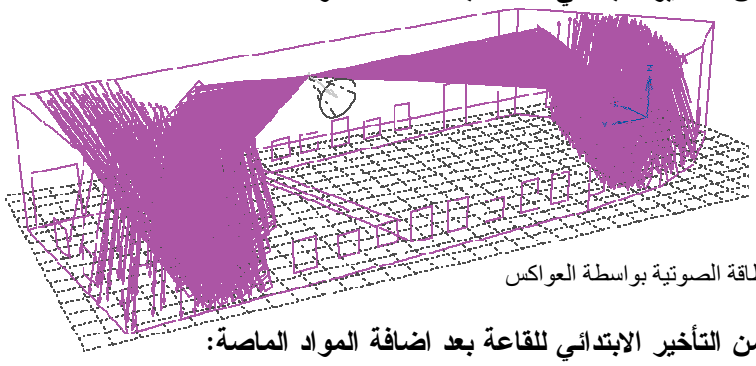
ويبين الشكل(٣-٧) توزيع الطاقة الصوتية في الفضاء بعد اضافة اللوحات.

٣- حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني وزمن التأخير الابتدائي للقاعة بعد الاشغال:

على فرض ان القاعة تتسع لـــ١٠٠ شخص وان نسبة الاشغال عند اجراء الاختبار هي ٥٠%.

٤- حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني وزمن التأخير الابتدائي للقاعة بعد اضافة المواد العاكسة:

وقد تم اضافة لوحين من المواد العاكسة لتعزيز الصوت في المناطق التي تعاني من قلة الطاقة الصوتية الواصلة اليها كما في الشكل(٣-٨).



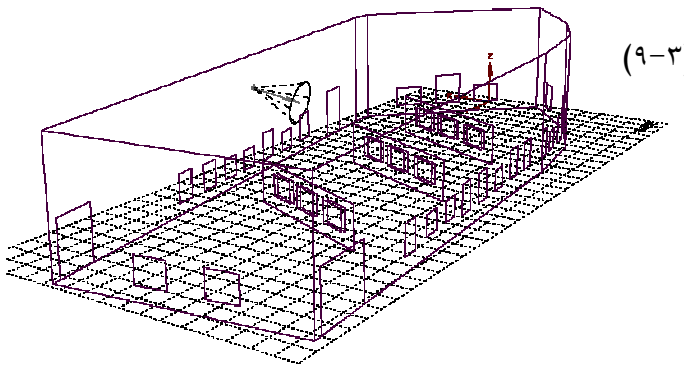
شكل ٣-٨ تعزيز الطاقة الصوتية بواسطة العواكس

٥- حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني وزمن التأخير الابتدائي للقاعة بعد اضافة المواد الماصة:

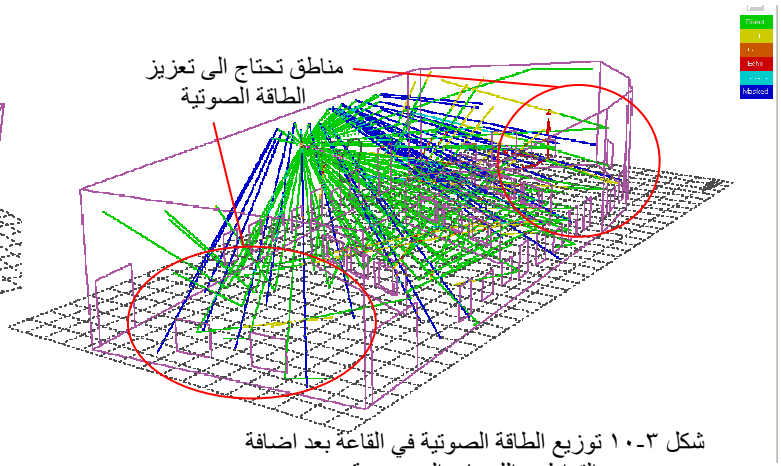
والتي تم اضافتها على جدران القاعة البعيدة عن المصدر الصوتي لتجنب حدوث الصدى نتيجة طول مسارات الصوت المنعكس.

ثانيا/ القاعة باستخدام القواطع الداخلية المستقيمة: شكل(٣-٩)

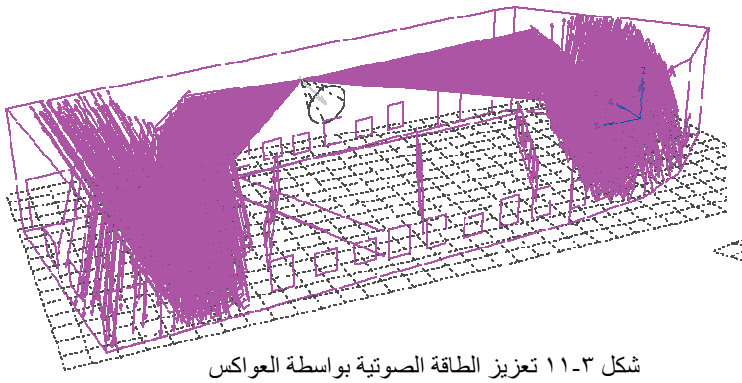
وقد تم اجراء نفس الاختبارات الخمسة التي طبقت على الحالة الاولى وسيتم ادراج النتائج لاحقا في جدول خاص بنتائج الاختبارات. اما فيما يخص توزيع الطاقة الصوتية فيبين الشكلين(٣-١٠) و(٣-١١) المناطق التي تحتاج الى تعزيز الطاقة الصوتية والعواكس المضافة لتحقيق ذلك.



شكل ٣-٩ القاعة بعد اضافة القواطع المستقيمة واللوحات

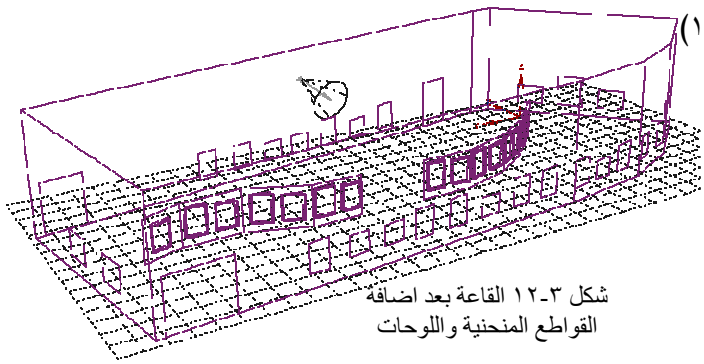


شكل ٣-١٠ توزيع الطاقة الصوتية في القاعة بعد اضافة القواطع واللوحات المعروضة

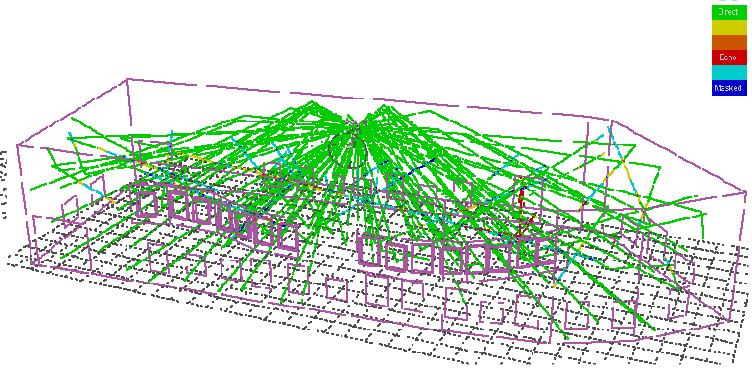


شكل ٣-١١ تعزيز الطاقة الصوتية بواسطة العواكس

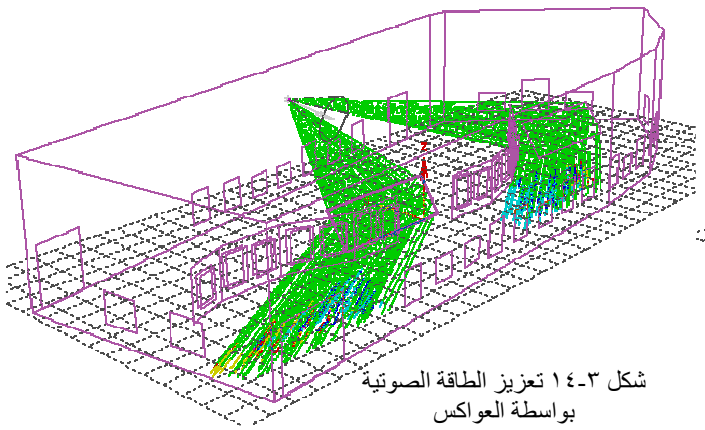
ثالثا/ القاعة باستخدام القواطع الداخلية المنحنية: شكل(٣-١٢)
وقد تم اجراء نفس الاختبارات الخمسة التي طبقت على الحالة الاولى والثانية وسيتم ادراج النتائج لاحقا في جدول خاص بنتائج الاختبارات. اما فيما يخص توزيع الطاقة الصوتية فيبين الشكلين(٣-١٣) و(٣-١٤) المناطق التي تحتاج الى تعزيز الطاقة الصوتية والعواكس المضافة لتحقيق ذلك.



شكل ٣-١٢ القاعة بعد اضافة
القواطع المنحنية واللوحات



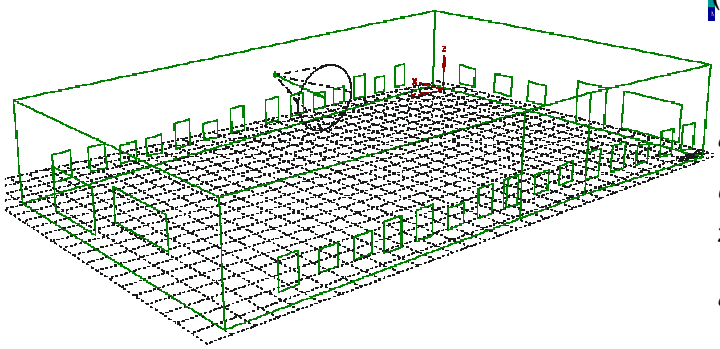
شكل ٣-١٣ توزيع الطاقة الصوتية في القاعة بعد اضافة
القواطع المنحنية واللوحات المعروضة



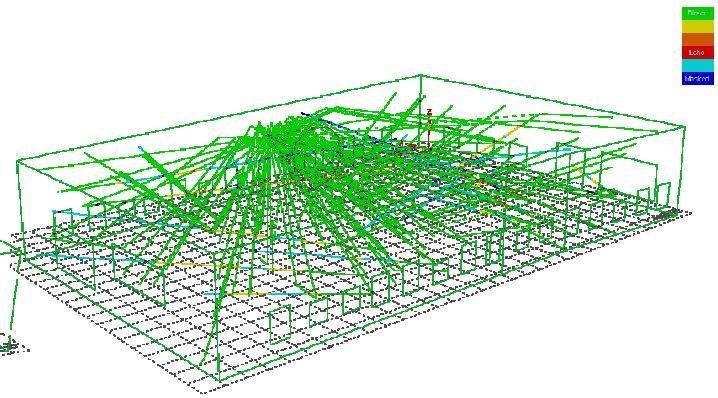
شكل ٣-١٤ تعزيز الطاقة الصوتية
بواسطة العواكس

٣-١-٢ القاعة الثانية: قاعة مركز الاطفال (شكل ٣-١٥)

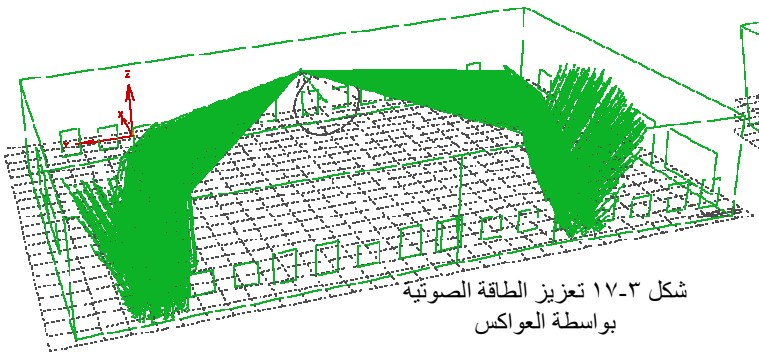
اولا/ القاعة بدون استخدام القواطع الداخلية:
وقد تم اجراء نفس الاختبارات الخمسة التي طبقت على القاعة الاولى وسيتم ادراج النتائج لاحقا في جدول خاص بنتائج الاختبارات. اما فيما يخص توزيع الطاقة الصوتية فيبين الشكلين(٣-١٦) و(٣-١٧) المناطق التي تحتاج الى تعزيز الطاقة الصوتية والعواكس المضافة لتحقيق ذلك.



شكل ٣-١٥ القاعة بعد اضافة اللوحات المعروضة



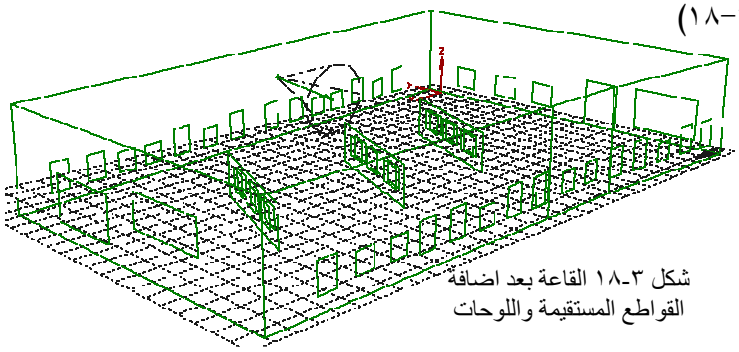
شكل ٣-١٦ توزيع الطاقة الصوتية في القاعة بعد اضافة
اللوحات المعروضة



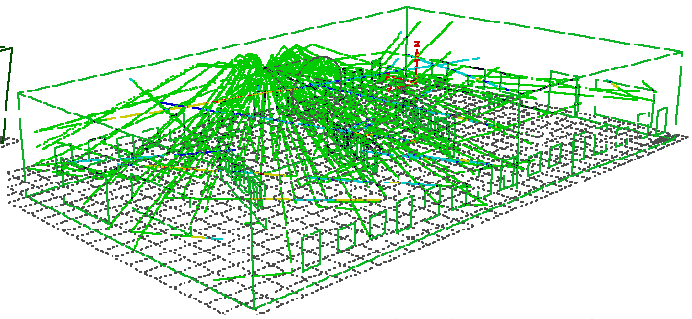
شكل ٣-١٧ تعزيز الطاقة الصوتية
بواسطة العواكس

ثانيا/ القاعة باستخدام القواطع الداخلية المستقيمة: شكل(٣-١٨)

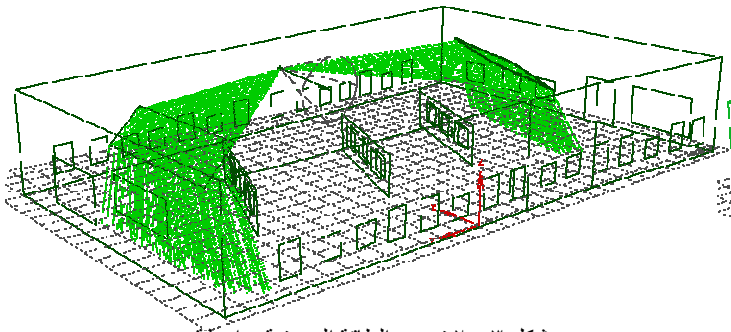
وقد تم اجراء نفس الاختبارات الخمسة التي طبقت على الحالة الاولى وسيتم ادراج النتائج لاحقا في جدول خاص بنتائج الاختبارات. اما فيما يخص توزيع الطاقة الصوتية فيبين الشكلين(٣-١٩) و(٣-٢٠) المناطق التي تحتاج الى تعزيز الطاقة الصوتية والعواكس المضافة لتحقيق ذلك.



شكل ٣-١٨ القاعة بعد اضافة القواطع المستقيمة واللوحات



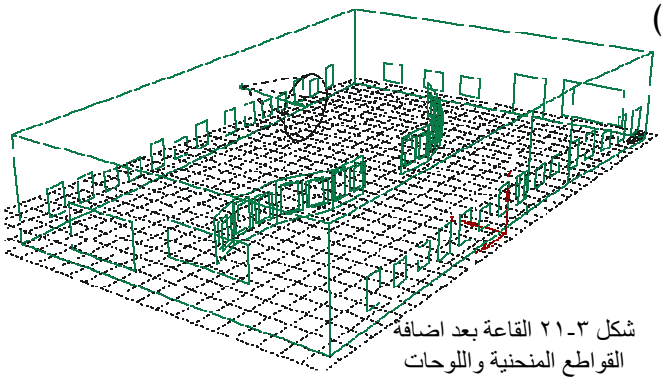
شكل ٣-١٩ توزيع الطاقة الصوتية في القاعة بعد اضافة القواطع واللوحات المعروضة



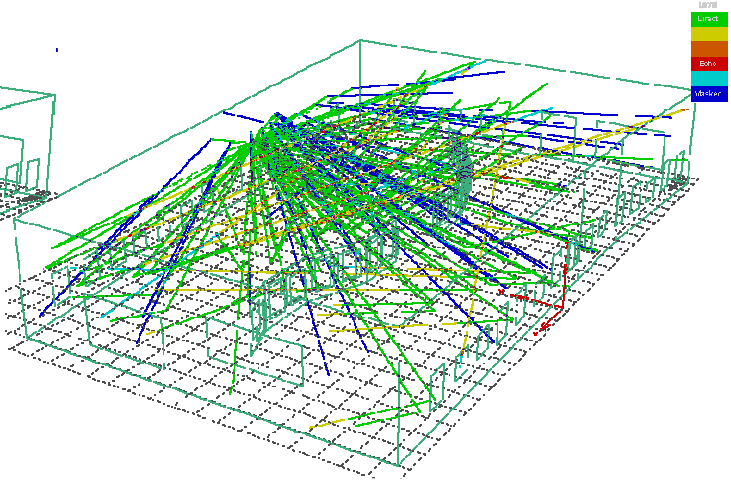
شكل ٣-٢٠ تعزيز الطاقة الصوتية بواسطة العواكس

ثالثا/ القاعة باستخدام القواطع الداخلية المنحنية: شكل(٣-٢١)

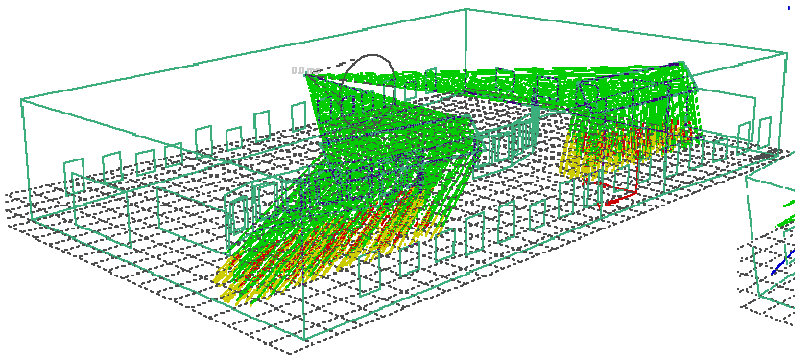
وقد تم اجراء نفس الاختبارات الخمسة التي طبقت على الحالة الاولى والثانية وسيتم ادراج النتائج لاحقا في جدول خاص بنتائج الاختبارات. اما فيما يخص توزيع الطاقة الصوتية فيبين الشكلين(٣-٢٢) و(٣-٢٣) المناطق التي تحتاج الى تعزيز الطاقة الصوتية والعواكس المضافة لتحقيق ذلك.



شكل ٣-٢١ القاعة بعد اضافة القواطع المنحنية واللوحات



شكل ٣-٢٢ توزيع الطاقة الصوتية في القاعة بعد اضافة القواطع المنحنية واللوحات المعروضة



شكل ٣-٢٣ تعزيز الطاقة الصوتية بواسطة العواكس

٣-٢ نتائج الاختبارات:

وتبين الجداول (٣-٣) و(٣-٤) نتائج الاختبارات السابقة فيما يخص زمن الترديد الاحصائي والتخميني. اما فيما يخص زمن التأخير الابتدائي فقد اوضحت المخططات الخاصة بهذا الاختبار ولجميع الحالات المختبرة انه يتراوح بين ٢٣-٢٧ ملي ثانية بالنسبة للقاعة الاولى، ويتراوح بين ١٩-٢٥ ملي ثانية بالنسبة للقاعة الثانية.

٣-٣ تحليل النتائج:

٣-٣-١ التحليل الهندسي للانعكاسات الصوتية:

لقد تمت دراسة مسارات الانعكاسات الصوتية الخاصة بكل حالة من الحالات المختبرة ومنها فقد تم التوصل الى ما يلي:

١- تم اكتشاف المناطق في الفضاء التي يحصل فيها ضعف في توزيع الطاقة الصوتية لكل من الحالات المختبرة وحسب الاشكال (٣-٧، ١٠، ١٣، ١٦، ١٩، ٢٢) ومعالجتها بما يوفره البرنامج من امكانية استخدام المواد العاكسة بصورة تفاعلية للوصول الى افضل حجم وموقع وزاوية ميل لها وتتبع مسار الاشعة المنعكسة منها للوصول الى افضل تغطية لمناطق الضعف الصوتي وكما في الاشكال(٣-٨، ١١، ١٤، ١٧،٢٠،٢٣)على التوالي.

٢- من تتبع مسارات الانعكاسات الصوتية لجميع الحالات المختبرة وجد ان هناك حاجة لاستخدام التقوية الصوتية بواسطة العواكس على بعد ١٠م فأكثر عن مصدر الصوت وذلك لحصول ضعف في الطاقة الصوتية الواصلة.

٣- من تتبع مسارات الانعكاسات الصوتية من خلال النظام اللوني للبرنامج وجد ان القاعة تخلو من مشكلة الصدى. حيث ان البرنامج يظهر الانعكاسات التي تشكل صدى باللون الاحمر. ويؤكد على ذلك ايضا نتائج حساب زمن التأخير الابتدائي التي كانت في جميع الحالات اقل من ٣٥ ملي ثانية وهو الزمن الذي تبدأ بعده مشاكل الصدى وعدم وضوحية الصوت في القاعات التي تستخدم فيها الفعاليات الكلامية.

٤- من تتبع مسارات الانعكاسات الصوتية وجد ان وضع القواطع الداخلية المستقيمة بشكل مائل على مصدر الصوت افضل من الوضع المتعامد من ناحية انتشار الصوت وتوزيع الطاقة الصوتية.

٥- عند استخدام القواطع المنحنية يجب تجنب الانحناءات القوية التي تكون فيها نقطة المركز داخل الفضاء وذلك لتجنب حدوث التركيز الصوتي.

٣-٣-٢ التحليل الاحصائي لزمن التأخير الابتدائي وزمن الترديد الصوتي:

اولا/ زمن التأخير الابتدائي:

ان ازمان التأخير الابتدائي للحالات المختبرة كانت تتراوح بين٢٣-٢٧ ملي ثانية بالنسبة للقاعة الاولى،و١٩-٢٥ ملي ثانية بالنسبة للقاعة الثانية. مما يعطي مؤشر جيد لعدم وجود الصدى كما انه يؤشر ان درجة وضوحية الصوت في هذه القاعات جيدة.

ثانيا/ زمن الترديد الصوتي:

١- يقوم البرنامج بحساب زمن الترديد الامثل بالنسبة للقاعة قيد الاختبار للاستعمالين الكلامي والموسيقي بالاستناد الى معلومات حجم الفضاء التي يقوم البرنامج باستنتاجها من مخطط القاعة المرسوم ضمن البرنامج نفسه مما يشكل الدليل الذي يمكن ان يستند عليه مستخدم البرنامج.

٢- لغرض الوصول الى تحليل منطقي لأزمان الترديد الصوتي المقاسة فانه سيتم الاعتماد على نتائج معادلة Millington-Sette وذلك لاعتمادها على معامل الامتصاص المؤثر وتحييد باقي الحالات للاسباب التالية:
- تحييد نتائج معادلة Sabine لانها تفترض وجود وسط صوتي متجانس.
- تحييد نتائج معادلة Norris-Eyring لانها تصلح للفضاءات التي لها نفس قيمة معامل الامتصاص لجميع السطوح.

٣- من مقارنة النتائج التي تم التوصل اليها بالطريقة الاحصائية مع تلك التي تم التوصل اليها بالطريقة التخمينية نلاحظ ان الاخيرة تعطي قيم اقل من الاولى نتيجة استخدامها معامل الامتصاص المعتمد على مقدار الاشعة الصوتية الساقطة وليس المعتد على مساحة السطح كما في الطريقة الاحصائية مما يعطي قيم ادق لأزمان الترديد.

٤- تعمل اللوحات في قاعات المعارض عمل المواد الماصة كونها غالبا ما تكون من مواد مسامية (قماش، ورق، خشب) مما يؤدي الى حصول تخفيض في قيمة زمن الترديد.

٥- كذلك الاشغال يؤدي الى تخفيض زمن الترديد لذا يفضل ان يكون هناك مرونة في التصميم تسمح بتقليل وزيادة المواد الماصة والعاكسة بالاعتماد على نسبة الاشغال المتحققة.

٦- على الرغم من ان المواد العاكسة تعمل على تجانس توزيع الطاقة الصوتية، الا انها تؤدي الى زيادة زمن الترديد الصوتي في الفضاء مما يتطلب اضافة مواد ماصة لغرض الوصول الى الترديد الامثل على ان تراعى المرونة في ذلك.

٧- ان اضافة القواطع في القاعات يعمل على تقليل زمن الترديد الصوتي وذلك لقطعها مسارات الاشعة الصوتية المنعكسة مما يؤدي الى تجنب بعض المشاكل الصوتية مثل الصدى وغيرها.

٨- الا ان اضافة القواطع الداخلية يؤدي الى زيادة مشاكل الظل الصوتي وسوء توزيع الطاقة الصوتية مما يتطلب استخدام المواد العاكسة لمعالجة هذه المشاكل.

٩- اظهرت النتائج ان القواطع الداخلية المستقيمة تعد الافضل مع القاعة ذات الشكل غير المنتظم والقواطع المنحنية تعد الافضل مع القاعة ذات الشكل المنتظم من ناحية الوصول الى زمن الترديد الامثل.

١٠- اظهرت النتائج امكانية الحصول على الاداء الصوتي المناسب في القاعات متوسطة الحجم بالاعتماد على التصميم فقط ودون اللجوء الى انظمة التقوية الكهروصوتية.

المحور الرابع: الاستنتاجات:

٤-١ استنتاجات تخص الاداء الصوتي في قاعات المعارض:

وقد تم استعراضها من خلال تحليل نتائج الاختبارات التطبيقية.

٤-٢ استنتاجات تخص البرنامج:

١- ثبت من خلال التطبيقات العملية ان للبرنامج القدرة على التعامل مع اي تكوين معماري مهما بلغ تعقيده الشكلي والتفصيلي سواء بالتحليل الصوتي الهندسي او الاحصائي، خاصة في ظل التصاميم غير المنتظمة الشكل للقاعات الحديثة على اختلاف استخداماتها والتي تجعل من الصعب على المعماري التأكد من ادائها الصوتي بالاعتماد على المعادلات الرياضية المعقدة.

٢- يستجيب البرنامج تلقائيا لاي تغير في اي جزء من القاعة قيد الاختبار سواء في الشكل الخارجي او المحتويات الداخلية (قواطع، اشغال، معروضات... الخ)، ولا يحتاج الى تكرار عملية ادخال المعلومات مما يوفر سهولة في الاستخدام.

٣- يوفر البرنامج طريقة تفاعلية بسيطة لحل مشكلة توزيع الطاقة الصوتية بالتساوي من خلال توفيره امكانية بث الاشعة الصوتية باتجاه الالواح العاكسة على حدة ومعرفة المناطق التي تغطيها هذه العواكس والوصول الى افضل حجم وتوقيع وزوايا ميل لها.

٤- يوفر البرنامج امكانية الحصول على نتائج لعدد غير محدد من المتغيرات من خلال عملية محاكاة واحدة، وتتناسب المتغيرات التي يمكن استخدامها مع طبيعة المعلومات المدخلة من قبل المستخدم.

٥- وبذلك يكون البرنامج اداة تحليلية تفاعلية تجعل عملية التحليل الصوتي اسهل بالنسبة للمصممين مما يساهم في تصميم فضاءات افضل من ناحية الاداء الصوتي ويساهم في تقليل المشاكل الصوتية التي لا يتم اكتشافها الا بعد التنفيذ والاشغال.

المصادر:

1- Szokolay, Steven V., "Introduction to Architectural Science", Architectural Press, An imprint of Elsevier Science, 2004.
2- Levy, Sidney, "Construction Building Envelope and Interior Finishes Databook", McGraw-Hill Companies, 2001.
3- Binggeli, Coky, "Building Systems for Interior Designers", John Wiley and Sons, Inc., 2003.
4- Allen, Edward, "How Building Work", Oxford University Press, Inc., 3rd Edition, 2005.

٥- الرواس، باسل عدنان، "تأثير الخصائص التصميمية الخاصة بعمارة المساجد في كفاءة الاداء الصوتي فيها"، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، ١٩٩٤.

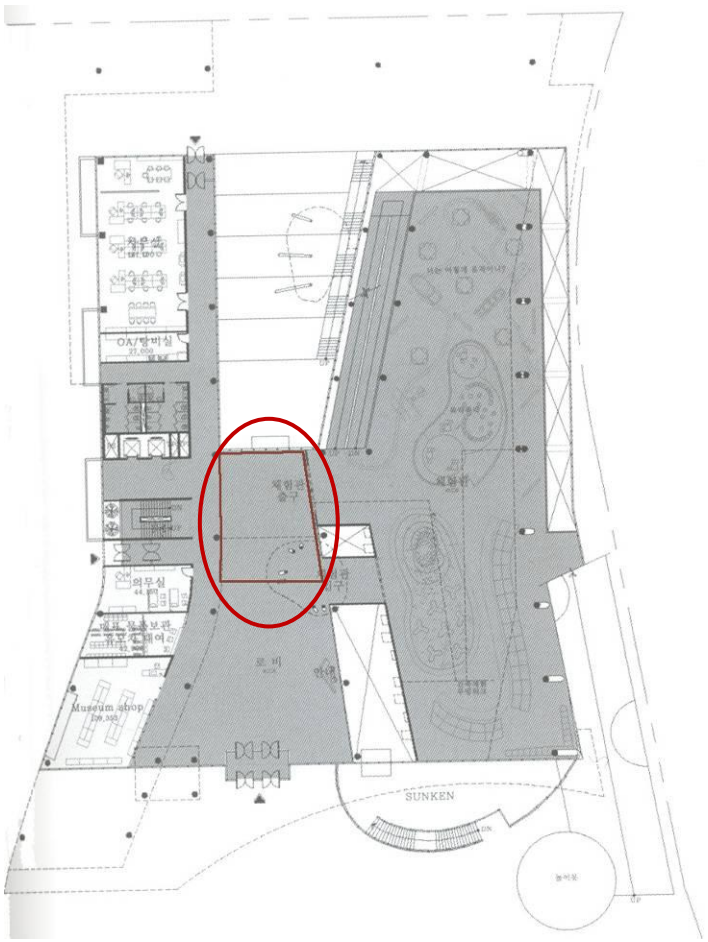
٦- الرواس، د.نزار واحمد، محمد، "دورة في مبادئ الهندسة الصوتية والقاعات السمعية"، جامعة بغداد، ١٩٨٣.

٧- العزي، نداء نعمان، "اثر التبطين الداخلي على كفاءة الاداء الصوتي في القاعات الكلامية"، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، ٢٠٠٢.

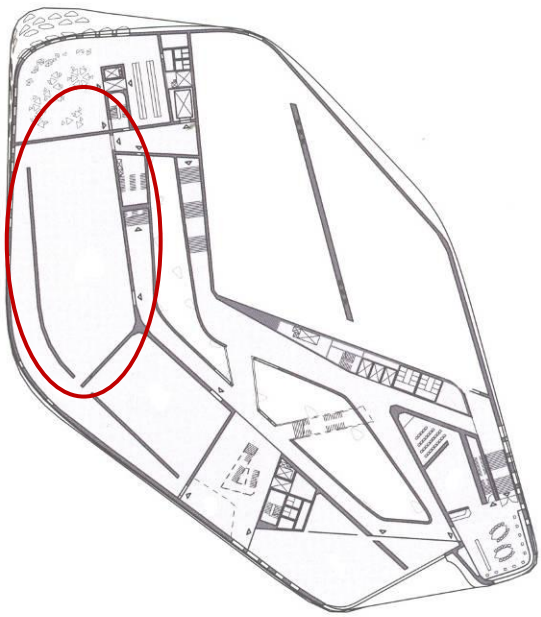
8- Parkin, P.H, "Acoustics-Noise and Buildings", Faber and Faber Ltd., London, 1971.
9- Hall, D.E, "Basic Acoustics", Harper and Row publisher Inc., NY, 1987.

١٠- حسين، وضاح عبد الصاحب، "اثر المتطلبات الصوتية في تصميم القاعات السمعية المتوسطة الحجم"، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، ١٩٨٧.

11- Encyclopedia Britanica, DVD, 2006.
12- Paul, Fishwick, "Computer Simulation: The Art and Science of Digital World Construction", Computer and Information Science and Engineering Department, University of Florida, CSE 301.
13- http://www.squ1.com/ecotect
14- Dr. Marsh, Andrew J., "Thermal Modeling, The Ecotect Way", Issue No. 002, 2006.
15- Ecotect Help

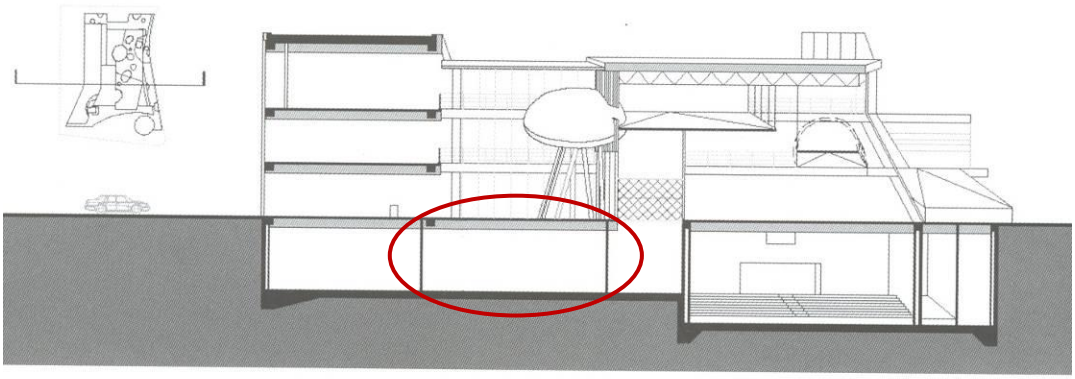


شكل ٣-٢أ مخطط افقي للبناية يبين القاعة المختبرة



Second floor plan

شكل ٣-١أ مخطط افقي للبناية يبين القاعة المختبرة



Cross section

شكل ٣-٢ب مقطع عمودي في البناية يبين القاعة المختبرة

جدول (٢-١) مؤشرات الاداء الصوتي

المفردات الرئيسية	المفردات الثانوية	القيم الممكنة
تقليل الضوضاء	الداخلية	استخدام المكائن ذات الاصوات الواطئة
		توقيع فضاءات الخدمات بعيدا عن الفضاءات المأهولة
		استخدام المواد العازلة
	الخارجية	توقيع المبنى بعيدا عن مصادر الضوضاء
		استخدام الحواجز الطبيعية والصناعية
		موقع الحواجز بالنسبة لمصدر الصوت
كفاءة توزيع الطاقة الصوتية ضمن الفضاء	شكل الفضاء	منتظم
		غير منتظم
	حجم الفضاء	
	السطوح الداخلية	استخدام المواد العاكسة
		استخدام المواد الماصة
	محتويات الفضاء	بدون قواطع
		باستخدام القواطع المستقيمة
		باستخدام القواطع المنحنية
زمن التأخير الابتدائي وزمن الترديد الصوتي	حجم وابعاد الفضاء	
	السطوح الداخلية ومواد الانهاء	استخدام المواد العاكسة
		استخدام المواد الماصة
المشاكل الصوتية	شكل الفضاء	
	حجم الفضاء	
	السطوح الداخلية ومواد الانهاء	
	محتويات الفضاء	

* ملاحظة الاجزاء المظللة من الجدول تمثل المؤشرات التي سيتم اختبارها

جدول ٣-٣ نتائج اختبارات حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني للقاعة الاولى ولحالاتها الثلاث

Optimum RT (500Hz - Speech): 0.90 s													
Optimum RT (500Hz - Music): 1.55 s													
القاعة الاولى بدون استخدام القواطع الداخلية						**القاعة الاولى باستخدام القواطع الداخلية المستقيمة**						**القاعة الاولى باستخدام القواطع الداخلية المنحنية**					
زمن الترديد RT للتردد ٥٠٠ هرتز						**زمن الترديد RT للتردد ٥٠٠ هرتز**						**زمن الترديد RT للتردد ٥٠٠ هرتز**					
Millington-Sette		**Norris-Eyring**		**Sabine**		**Millington-Sette**		**Norris-Eyring**		**Sabine**		**Millington-Sette**		**Norris-Eyring**		**Sabine**	
احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني	احصائي	تخميني
١,٤٣	١,٠١	٤,٤٣	١,٢٥	١,٨٩	١,٣٨	١,٤٠	٠,٩٩	٣,٨٢	١,٢٥	١,٨٥	١,٣٨	١,٤٠	١,٠٠	٣,٢٤	١,٢٧	١,٨٤	١,٤٠
١,٤٠	٠,٩٨	٢,٤٤	١,٢٦	١,٨٥	١,٣٨	١,٣٦	٠,٩٢	٢,١٨	١,٢١	١,٧٨	١,٣٣	١,٣٥	٠,٩٥	٢,١٢	١,٢٥	١,٧٦	١,٣٥
١,٣٦	٠,٩٨	٢,٣٠	١,٢٦	١,٧٧	١,٣٨	١,٣٢	٠,٩٠	٢,٠٧	١,٢٠	١,٧٠	١,٣٢	١,٣١	٠,٩٢	٢,٠١	١,٢١	١,٦٩	١,٣٠
١,٣٦	١,٣١	٢,٣٥	١,٨٥	١,٧٦	١,٧١	١,٣١	١,١٨	٢,٠٨	١,٥١	١,٧٠	١,٦٣	١,٣١	١,١٠	٢,٠٣	١,٣٥	١,٦٨	١,٤٨
٠,٩٤	٠,٩٢	١,٦٦	٠,٩٨	١,٠٣	١,٠١	٠,٩٣	٠,٩٨	١,٦٥	٠,٩٦	١,١٠	١,٠٨	٠,٩٣	٠,٩٨	١,٧١	٠,٩٥	١,١٠	١,٠٥

جدول ٣-٤ نتائج اختبارات حساب زمن الترديد الاحصائي والتخميني للقاعة الثانية ولحالاتها الثلاث

Optimum RT (500Hz - Speech): 0.93 s													
Optimum RT (500Hz - Music): 1.58 s													
	القاعة الثانية بدون استخدام القواطع الداخلية						**القاعة الثانية باستخدام القواطع الداخلية المستقيمة**						**القاعة الثانية باستخدام القواطع الداخلية المنحنية**					
	زمن الترديد RT للتردد ٥٠٠ هرتز						**زمن الترديد RT للتردد ٥٠٠ هرتز**						**زمن الترديد RT للتردد ٥٠٠ هرتز**					
	Millington-Sette		**Norris-Eyring**		**Sabine**		**Millington-Sette**		**Norris-Eyring**		**Sabine**		**Millington-Sette**		**Norris-Eyring**		**Sabine**	
	احصائي	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**	**احصائي**	**تخميني**
القاعة خالية	١,٥٣	١,١٨	٤,٤٦	١,٣٤	١,٩٢	١,٤٨	١,٤٨	٠,٩٨	٣,٩٥	١,٢١	١,٨٦	١,٣٠	١,٤٦	٠,٩٦	٣,٨٠	١,٢٠	١,٨٤	١,٤٥
باضافة اللوحات (للمعرض)	١,٤٩	١,١١	٢,٥٢	١,٢٨	١,٨٨	١,٤١	١,٤٠	٠,٩٤	٢,٥٢	١,١٧	١,٧٩	١,٢٩	١,٣٨	٠,٩٠	٢,٤٧	١,١٢	١,٧٧	١,٢٣
مع الاشغال	١,٤٥	١,٠٢	٢,٤١	١,٢٣	١,٧٦	١,٣٦	١,٣٨	٠,٨٩	٢,١٠	١,١٣	١,٧١	١,٢٥	١,٣٥	٠,٨٧	٢,٠٧	١,٠٧	١,٦٨	١,٢١
باضافة المـــواد العاكسة	١,٤٨	١,٠٧	٢,٥٣	١,٣٢	١,٦٧	١,٤٤	١,٣٦	٠,٩٦	٢,١٣	١,٢٣	١,٧٠	١,٣٥	١,٣٤	١,١٤	٢,٠٩	١,٢٣	١,٦٧	١,٣٢
باضافة المـــواد الماصة	١,١٥	٠,٩٨	١,٤١	٠,٨٦	١,٠٥	٠,٩٩	٠,٩٠	٠,٩٥	١,٤٠	٠,٨٢	١,٠١	٠,٩٢	٠,٩٩	٠,٩٦	١,٤٣	٠,٨٣	١,٠٣	١,٠٠