أثر التشكـــــيل الهندســـــــي للقباب على كفاءة الأداء الصوتي في المساجد

(تصور افتراضي)

بحث مقدم من قبل

أ.د. صبا جبار الخفاجي عامر حبيب عبد الحسن

جامعة بغداد – كلية الهندسة

الخلاصة:

البحث يوضح و بشكل افتراضي تأثير خصائص التشكيل الهندسي للقبة (حجم، شكل، موقع،000) على كفاءة الأداء الصوتي وذلـك لأهمية هذا العنصر من الناحية التصميمية وخصوصا في العمارة الإسلامية ولاسيما عمارة المساجد.

لتحقيق ذلك لجأ البحث الى طريقة مخططات الانعكاسات الصوتية للحصول على هيئات كرافيكية توضح تأثير الخصائص التشكيلية المختلفة على الظاهرة الصوتية وبعد تحليل هذه الهيئات الكرافيكية يتم طرح الاستنتاجات النهائية، بغية أعطاء تصور أولي للمهندس المصمم عن أمكانية هذا العنصر عند التعامل معه، ويشتمل البحث على المفردات التالية التي يمكن الاستفادة منها في شبكة المعلومات .

(المسجد، القبة، التمركز البؤري، ، التشكيل الهندسي، ، الصدى الزاحف، تشويه الصوت، الأشكال البيضوية)

The Effect of Domes Geometry Formation on Acoustic Performance in Mosques

(Hypotheses imagination)

By

Dr. Saba J. N. Al-Khafaji

Amer Habib Abdul Hassan

The research explain The Effect of Domes Geometry Formation (size, shape,..) on Acoustic Performance, that for importance of this element in designing aspect specially in Islamic architecture and in the mosques building.

The research follow sound reflection diagrams to obtain graphic forms that explain the affection of various Geometry Formation on Acoustic Performance , after analyze the graphic forms the final conclusions are introduced to obtain a primary vision about a capability of dome and who deal with it.

مشكلة البحث:

عدم وضوح دور خصائص التشكيل الهندسي للقباب (حجم، شكل، موقع، 000) في التأثير علـــى كفـــاءة الأداء الصوتي في المساجد.

هدف البحث:

تحديد تأثير خصائص التشكيل الهندسي للقباب (حجم، شكل، موقع،...) على كفاءة الأداء الصوتي في المـــساجد من خلال اختبارا فتراضي بالطرق النظرية للعلاقة بين العوامل المؤثرة و العوامل المتأثرة.

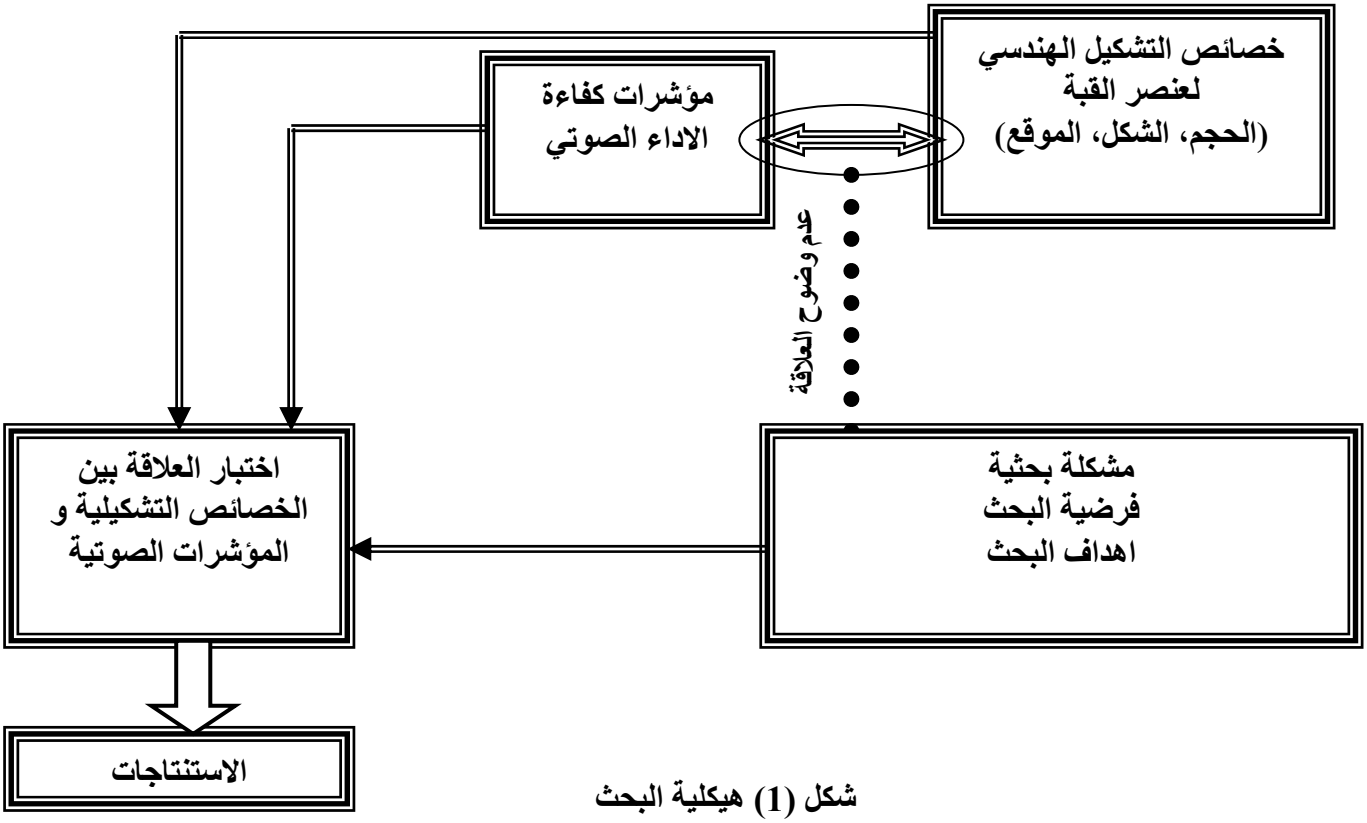
فرضية البحث:

تلعب الخصائص التشكيلية لعنصر القبة دورا فاعلا في التأثير على الأداء الصوتي في الفضاء السمعي المقبـــب وأن هذا الدور يتباين بتباين الخصائص التشكيلية للقباب.

المقـــــــــــدمة

تناولت معظم الأدبيات الصوتية السابقة تأثير الشكل المنحني عموماً والقبة على وجه الخصوص على الظـــاهرة الصوتية في الفضاء السمعي المغلق مشيرة إلى تكون منطقة تمركز بؤري وأحياناً صدى زاحـــف وهمـــا مـــن العيوب الصوتية السلبية على الأداء الصوتي في الفضاء السمعي، وهذه الأدبيات ترى أن وجـــود القبـــة يمثـــل احتمال قائم لمشكلة صوتية، وهذا يتنافى مع الهدف الأساس لعلم هندسة الصوت في الأبنية بتحقيق أفضل حالـــة سمعية في الفضاء. لذلك يصار إلى التوصية المباشرة وغير المباشرة إلى التخلي عن هذا العنصر في الأبنية في مرحلة التصميم أو إلغاء دوره في الأبنية القائمة من خلال معالجات صوتية تشكل في أساسها ســـلبية اقتـــصادية على المبنى، إضافة إلى سلبية على التصميم في بعض الأحيان.

ان عدم وجود فهم لإمكانيات هذا العنصر في التأثير على الأداء الصوتي ضمن الفضاء السمعي يوجـــب إيجـــاد إطار نظري يوضح ذلك من خلال مناقشة تأثير الخصائص التشكيلية للقباب على الموجات الصوتية المارة فيهـــا وبالاعتماد على المعرفة الصوتية المتوفرة من الدراسات المتخصصة صوتياً والتي تبحث العلاقة بين الخصائص التشكيلية والأداء الصوتي، ومن الممكن تفهم العلاقة بين العوامل المؤثرة و المتأثرة مـــن الـــشكل (1) و كمـــا ياتي:-



شكل (1) هيكلية البحث

الظاهرة الصوتية في القباب

استناداً إلى مشابهة ظاهرة الانعكاس الصوتي لظاهرة الانعكاس الضوئي في أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس، فإن الأسطح المقعرة تمتلك خصوصية في أنها تعمل على تمركز معظم الموجات الصوتية المنعكسة عنها وفقاً لهذا القانون في منطقة محددة من الفضاء مولدة ما يعرف بالبقع الحارة (Hotspots)، حيث يرتفع منسوب الضغط الصوتي في منطقة دون أخرى مما يولد تشوهاً في الحالة السمعية وخللاً في توزيع مناسيب الضغط الصوتي. (Lawrance1976 p137) تعرف البقع الحارة بنقاط التمركز البؤري إذ يمكن تحديد موقعها بالنسبة للأشكال الدائرية من المعادلة: (حماد 1987،ص167)

$$V = \frac{Ru}{2u - R}$$

حيث أن: V = مركز تجمع الموجات المنعكسة.

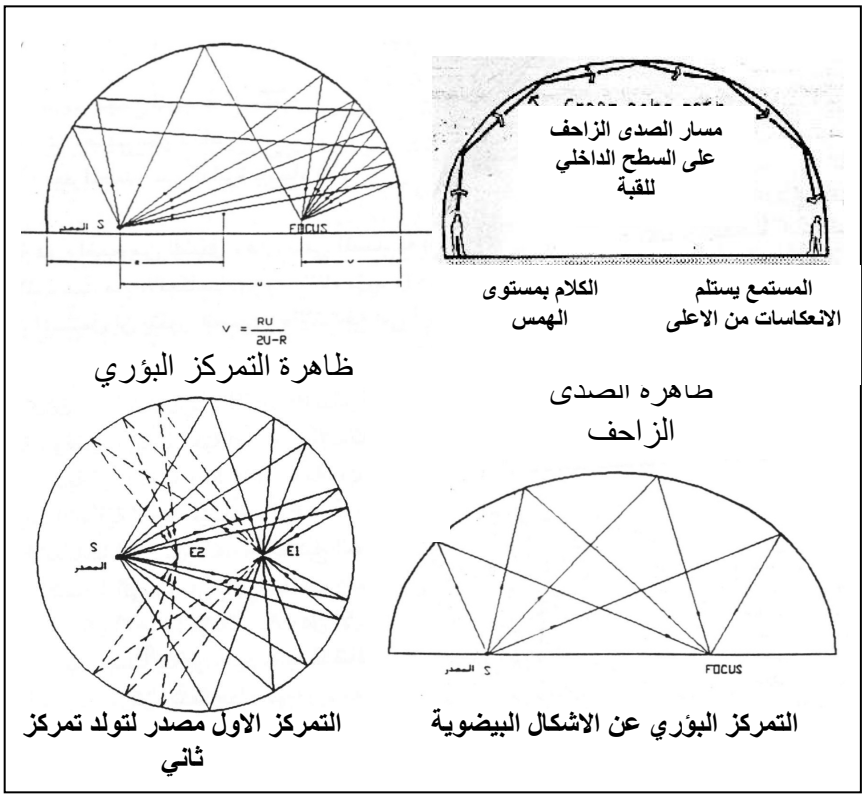
R = نصف قطر الدائرة.

U = بعد المصدر الصوتي عن الدائرة باتجاه مركز التجمع.

كما يمكن تحديد هذه النقطة لبقية الأشكال المقعرة كرافيكياً من خلال الرسم وبالاعتماد على ذات القانون في أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس في مستوي واحد، وأحياناً تتكون أكثر من بؤرة واحدة لأن البؤرة الأولى تصبح مصدر صوت جديد مولدة بؤرة أخرى حول مركز الدائرة. (حماد 1987، ص167)

الأشكال البيضوية متساوية الإنحناء لها خصوصية في أن بؤرة التمركز تبعد عن محيط الشكل البيضوي نفس بعد المصدر عن المحيط. (حماد 1987،ص167).

من الظواهر الأخرى التي تسهم الأشكال المقعرة في توليدها هي ظاهرة الصدى الزاحـــــف (Creep Echo) حيث تنعكس الموجات الصوتية بالتتابع في مستوى قريب من محيط القبة مما يمكن المستمع القريب منه أن يسمع بشكل واضح في حين أن المستمع في الوسط لا يستطيع ذلك، حيث تضر هذه الظاهرة أيضاً في تجانس توزيـــع الطاقة الصوتية للفضاء السمعي. شكل (2).



شكل (2) الظاهرة الصوتية في القباب
(حماد 1987،ص167)

مما ذكر يلاحظ وجود نظرة سلبية تجاه القباب لما يمكن أن تسببه من إشكالات، لذلك طرحت العديد من الحلـــول الصوتية لتجاوز هذه الإشكالات حيث يتم اللجوء أحيانا الى تغيير موقع التمركز البؤري عن طريق تغيير النسبة بين نصف قطر القبة بالارتفاع اذ يجب أن يكون نصف قطر التقوس (R) للقبة ذات الشكل الدائري أو الأشـــكال المقاربة أقل من نصف الارتفاع $R < \frac{H}{2}$ ، إذ يتمثل الارتفاع بالمسافة العمودية بين المصدر الـــصوتي وقمـــة القبة، والهدف من هذه الطريقة أن لا يكون الصوت المنعكس عن سطح القبة ذو شدة أعلى من الـــصوت الـــذي يأتي عن سطح مستوي افتراضي في نفس الارتفاع إذا ما قورن معه حيث تصبح نقطة التمركز الضارة أعلـــى من رؤوس المستمعين. من الشكل (3) نلاحظ أن الانعكاسات عن المستوى الأفقي الافتراضي تكون مركزة في المسافة (d) في حين أن الانعكاسات عن السطح المقبب تغطي المسافة (d') وهي أطول من (d) وبذلك يـــصبح للسطح المقبب فائدة عملية أكبر في تغطية مساحة أكبر بالانعكاسات من المساحة التي يغطيها سطح مستوي بنفس الارتفاع، مع العلم دوماً أن المسافة بين أي نقطتي انعكاس متناظرتين على نفس المستوى الوهمي للسطح الأفقي

تساوي نصف المسافة $\left(\frac{d}{2}\right)$ التي يغطيها الشعاعان المنعكسان عن أي نقطتين متناظرتين واقعتين في نفس المستوي على السطح الأفقي الوهمي وصولاً من نقطة الانعكاس إلى مستوى المستمع، (Internet: 9). يمكن توظيف العلاقة بين نصف القطر والارتفاع بشكل معاكس بأن يكون نصف القطر أكبر من ضعف الارتفاع $\{R > 2H\}$ وهذا يجعل نقطة التمركز الضارة تحت مستوى سطح الأرض (الخفاجي ،1995 ص76). إلا أن مساوئ الاحتمال الثاني أن القبة ستكون كبيرة جداً مما يولد مشاكل أخرى مثل ضياع الطاقة الصوتية وتولد ظاهرة الصدى . ومما تقدم يلاحظ محدودية الطرق المتبعة لمعالجة الحالات السلبية الناتجة عن وجود القباب ومن دون فهم لإمكانيات هذا العنصر في التأثير على الظاهرة الصوتية في الفضاء السمعي . وأما بالنسبة لأهم مؤشرات التشكيل الهندسي للقباب المؤثرة في الأداء الصوتي فهي (شكل القبة، حجم القبة، موقع القبة، عدد القباب،...) و غيرها من المؤشرات سيتم تفصيلها و اختبارها لاحقا.

مؤشرات كفاءة الأداء الصوتي

كفاءة الأداء الصوتي مفهوم يرتبط بتحقيق أعلى درجة لوضوحية وفهم الكلام في ظروف مناسبة لا تتطلب من المستمع بذل مجهود في محاولة الاستماع ويكون ذلك من خلال توفير عاملين أساسين هما: (الخفاجي 1996 ص85)

1. الطاقة الصوتية Sound Energy 2. نقاء الصوت ودقة المعلومة Clarity and Information

وأهم مؤشرات كفاءة الأداء الصوتي هي:

أ- زمن الترديد Reverberation Time

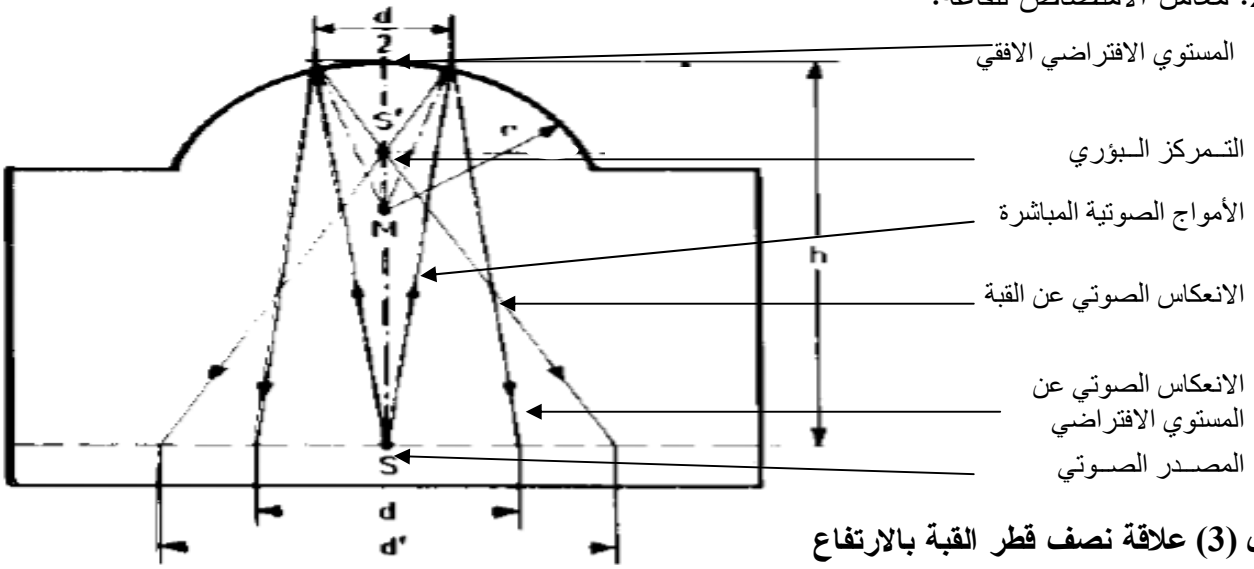
هو الزمن اللازم لانخفاض الصوت بمقدار60 ديسبيل من منسوبه الاصلي بعد توقف المصدر الصوتي ، ويمكن احتسابه من المعادلة: (Furrer 1964 p52)

$$RT = \frac{0.161V}{\sum A}$$

حيث:RT: زمن الترديد (ثانية).

V: حجم الفضاء (م3).

A Σ: معامل الامتصاص للقاعة.



شكل (3) علاقة نصف قطر القبة بالارتفاع (Internet: 9)

من هذه المعادلة يتبين أن العوامل المؤثرة في زمن الترديد حجم الفضاء ونوعية ومساحة الأسطح الداخلية حيث أن وفرة الأسطح العاكسة تعمل على زيادة زمن الترديد نتيجة تعدد الانعكاسات مما يسبب تضخم الصوت والذي يؤثر في انخفاض درجة الفهم والوضوحية، كما أن انخفاض قيمة زمن الترديد عن الحد المناسب يؤثر على وضوحية الكلام وخصوصاً بالنسبة إلى المستمع البعيد عن المصدر بسبب خفوت الصوت.

ب – توزيع الطاقة الصوتية Sound Distribution

التباين في توزيع منسوب الضغط الصوتي في نقاط مختلفة من الفضاء يشير إلى التباين في توزيع الطاقة الصوتية فيه، يعتبر تساوي توزيع الطاقة الصوتية بكافة مكوناتها الترددية إلى المستمعين أحد أهم متطلبات التصميم الصوتي الناجح للفضاء السمعي ، ويرتبط توزيع الطاقة الصوتية بالخصائص الشكلية للفضاء وطبيعة الانهاءات الداخلية له . (Dolle 1972)

ج–الجهارة Loudness

تحسس الإذن البشرية لتغير منسوب الضغط الصوتي (SPL) مع تغير تردد الصوت و هي تختلف كثيرا عما تتحسسه أجهزة القياس الصوتي بسبب حساسية الإذن البشرية ، (Furrer 1964 p22)

د–العيوب الصوتية Sound Defect:

العيوب الصوتية تؤثر بشكل مباشر وكبير في الكلام وأهم هذه العيوب هي:

- **الصدى Echo:**

هو التكرار الواضح للصوت الأصلي لمرتين بعد توقف المصدر الصوتي ويعتمد حدوثه على الفجوة الزمنية بين وصول الصوت المباشر والصوت المنعكس وتشير معظم الدراسات الصوتية إلى أن هذه الفترة تصل إلى(50 ملي ثانية) و بفرق مسار يصل إلى(17) متر بين الصوت المباشر و الصوت المنعكس.(حماد 1987)

- **تشويه الصوت Sound Distortion:**

المسبب الأساسي لحدوث تشويه الصوت المسموع هو حدوث ظاهرة التداخل بين الصوت المباشر أو انعكاساته القوية مع الانعكاسات الأخرى لنفس الصوت مما يولد أحساسا بسماع نبرة مهيمنة لا وجود لها في المدى الصوتي الأصلي وهو ما يسمى بالتلوين الصوتي المعاد Repetition coloration of sound. أو يؤدي إلى تقوية رنينيه لمجال ترددي ضيق مما يجعل إحدى النبرات أكثر هيمنة على الصوت الأصلي وتسمى بالتلوين ألرنيني الصوتي (Resonance Coloration of Sound) وإذا ما تطابقت الموجات الصوتية مع الموجات المنعكسة في الطور فإنها تتداخل مكونة الموجات الواقفة (standing wave)

ومولدة ظاهرة الرنين, ومما تجدر ملاحظته إن أسوأ رنين يحصل بالاتجاهات الثلاثة عندما تكون الجدران الأربعة متوازية وكذلك سطح القاعة مع أرضيتها ،(Parkin 1969 p47).

➢ **التمركز البؤري:**

أن ظاهرة التمركز البؤري الناتجة عن الأشكال المقعرة تعتبر من العيوب الصوتية المؤثرة بسبب تركيز الطاقة في منطقة معينة مما يؤدي إلى علو الصوت بشكل غير مقبول في منطقة معينة في حين تعاني مناطق أخرى من خفوت الصوت (Parkin, 1969 p45).

طرق قياس كفاءة الأداء الصوتي: وتشمل على:

أولا: القياسات العملية:

وهي المعتمدة على تقنيات القياس في حساب مؤشرات الكفاءة الصوتية وتقترب نتائجها من الواقع بشكل كبير كونها تتعامل مع القيم الحقيقية وحسب مواصفات الفضاء السمعي والميكانيكية الصوتية لحظة القياس .

ثانيا: المجسمات الصوتية: Acoustic Models:

وتتصف هذه الطريقة بتمثيل الفضاء السمعي بمجسم مقياس مصغر مساوٍ للنسبة بين الأبعاد الحقيقية مع مراعاة عدد من الضوابط الأساسية خصوصا من الناحية البيئية في محاولة للاقتراب من الحالة الأصلية.

ثالثا: برامج الحاسوب Computer Software :

نتيجة التطور الكبير في التقنيات وبرامج الحاسوب ثم تطوير برامج خاصة لتقييم كفاءة الأداء الصوتي و تم برمجتها لتراعي قدر الإمكان الحقائق الفيزياوية للواقع الميداني وقد أثبتت بعض هذه البرامج جدارتها في تقيم كفاءة الأداء الصوتي ومن أهم هذه البرامج ,Ulysses, Direc, Odeon, (Internet: 10) .

رابعا:طريقة الصورة التخيلية للمصدر الصوتي (طريقة الانعكاسات الصوتية):

هي طريقة رسومية (كرافيكية) أساس عملها هو القانون الفيزياوي زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس وذلك باقامة خط وهمي عمودي على مستوي الانعكاس يمر بنقطة الانعكاس وذلك لتحديد مقدار هذه الزاوية، وهذه الطريقة هي المعتمدة في البحث الحالي.

خصائص التشكيل الهندسي للقباب والأداء الصوتي

للقبة باعتبارها عنصرا معماريا متميزا عدد كبير من الخصائص التشكيلية التي تطورت عبر التاريخ و التي تتباين فيما بينها لتكسب القبة ذلك التنوع و الخصوصية ، ويرى البحث ان اهم الخصائص التشكيلية المميزة لعنصر القبة و المؤثرة على الظاهرة الصوتية هي:-

1. حجم القبة.2-ألابعاد وألنسب.3-شكل المقطع الجانبي للقبة.4-عدد القباب.5-موقع القباب.6-علاقة المصدر الصوتي مع القبة.

ولأهمية هذه الفقرات أجرى البحث اختبارات على نماذج افتراضية تباينت فيما بينها بتباين الخصائص التشكيلية للقباب حيث بلغ عدد النماذج (34) نموذجا و السبب في هذا التباين هو توضيح تاثير الخصائص المختلفة للقباب على الظاهرة الصوتية باستخدام المخططات الرسومية (الكرافيكية) التي تم اعدادها بواسطة الحاسوب لبيان

التأثير العام لهذه الخصائص على الأداء الصوتي, و من بعد ذلك يتم تحليل هذه المخططات و اســتخلاص أهــم الاستنتاجات التي يتم تقديمها بشكل جداول توضح العلاقة بين المؤشرات الصوتية و الخصائص التشكيلية بحيــث تعطي تصورا واضحا عن الظاهرة الصوتية في الفضاء المقبب.

1-حجم القبة

لإنشاء تصور حول تأثير حجم القبة على الأداء الصوتي قام البحث بافتراض أربعة حجوم مختلفة تم استخلاصها من خلال دراسة (30) مسجد من مساجد مدينة بغداد, إذ يزداد تأثير القبة على الظاهرة الصوتية بزيادة حجمهــا كما يتضح من الشكل رقم (4) بسبب ازدياد كمية الطاقة الصوتية الداخلة إلــى القبــة وبالتــالي زيــادة كميــة الانعكاسات الصادرة عنها باتجاه محدد مما يحدث تكثيف في الطاقة الصوتية في منطقة معينة من الحضور دون الأخرى والذي يؤدي بدوره إلى تفاوت في توزيع الطاقة الصوتية ضمن فضاء المصلى. كما أن زيــادة الحجــم تؤدي إلى زيادة الضياع في الطاقة الصوتية بسبب طول المسارات التي تقطعها الأمــواج الــصوتية ، (حمــاد 1987ص 126).

وهذا الضياع يؤثر سلباً في درجة العلو الصوتي (Loudness) وهو أحد المؤثرات الأساســية فــي وضــوح الكلام، إذ أن درجة العلو الصوتي تتناسب عكسياً مع الحجم ، (الخفاجي 1996 ص59).

إن زيادة حجم القبة يرافقه زيادة في المساحة السطحية وهذا ن هما المتغيران الرئيسيان في معادلة زمن الترديــد وهو أحد أهم مؤشرات كفاء الأداء الصوتي:

$$RT = 0.161\frac{V}{\sum Sa}$$

حيث يتناسب زمن الترديد طردياً مع الحجم وعكسياً مع المساحة السطحية الداخلية للفضاء.

زيادة الحجم تؤدي إلى زيادة شدة الطاقة الصوتية لنقطة التمركز البؤري نتيجة لزيادة الأمواج المارة بهــا، كمــا يساهم في تغيير موقعها إذ يلاحظ من حالات الشكل (4) أن زيادة الحجم جعلت نقطة التمركز أقرب إلى مستوى المستمعين.

زيادة الحجم تؤدي إلى زيادة مساحة الجزء الذي يتعرض إلى الموجات الصوتية المباشرة من القبة وهذا يعطــي احتمالية لتولد ظاهرة الصدى الزاحف عند سقوط الأمواج الصوتية على مناطق محددة من سطح القبة وبزاويــة محددة وخصوصاً بالنسبة للأشكال نصف الكروية.

زيادة الحجم تؤدي إلى زيادة طول مسارات الصوت الساقط والمنعكس، مما يؤثر في الفجوة الزمنيــة الحرجــة لوصول الصوت المنعكس بعد الصوت المباشر بمدة لا تتجاوز (50 ملي ثانية) ممــا يولــد احتماليــة حــدوث الصدى، وهو من العيوب الأساسية المؤثرة في الأداء الصوتي للفضاء السمعي, (عبد الحسن,2005,ص101)

2-أبعاد ونسب القبة

للأبعاد والنسب تأثير على الأداء الصوتي، وفيما يتعلق بالقباب فإن أهم الأبعاد والنسب المؤثرة هي:

أولاً- ارتفاع سقف المصلى: إن تغيير ارتفاع سقف المصلى يؤدي إلى تغيير موقع القبة على المقطع العمودي و بالتالي يؤثر في الأداء الصوتي الناتج من القبة، حيث أن زيادة ارتفاع السقف يؤثر في توزيع الطاقة الصوتية ضمن المصلى من خلال زيادة كمية الطاقة الصوتية الداخلة إلى القبة، وبالتالي زيادة كمية الطاقة المنعكسة منها مما يؤدي إلى تكثيف الطاقة الصوتية ضمن منطقة محددة أكثر من المناطق الأخرى، كما في الشكل (5) , (عبد الحسن,2005,ص103).

زيادة ارتفاع السقف يؤثر في شدة الطاقة الصوتية (Sound Intensity) والتي لها تأثير مباشر على درجة علو الصوت (Loudness) حيث تقل شدة الصوت بزيادة المسافة التي تقطعها الموجات بسبب الاحتكاك مع جزيئات الهواء.

السبب في زيادة شدة نقطة التمركز البؤري يمكن ملاحظتها في الحالتين (و،ج) تعود إلى زيادة الطاقة الصوتية الداخلة إلى القبة بسبب زيادة الارتفاع وبالتالي زيادة الانعكاسات المارة بهذه النقطة، كما يمكن ملاحظة تغير في موقع التمركز البؤري وخصوصاً على المستوى العمودي حيث يلاحظ ارتفاع النقطة بزيادة ارتفاع السقف.

زيادة ارتفاع السقف تؤدي إلى زيادة المساحة الداخلية للقبة المعرضة للأمواج الصوتية المباشرة مما يولد احتمالية تولد أكثر من نقطة تمركز بؤري واحدة.

إن زيادة ارتفاع السقف يولد احتمالية تولد الصدى بسبب طول المسارات التي يقطعها الصوت.، كما أن زيادة الارتفاع يؤدي إلى توزيع الانعكاسات الصادرة عن القبة إلى قطاع أوسع من منطقة الحضور ضمن المصلى، وهذا ما يؤثر في توزيع الطاقة الصوتية ضمنه. كما في الحالات (د، هـ، و).

ثانياً- النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها: ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها من أهم الأبعاد المؤثرة على الأداء الصوتي الناتج عنها، حيث أن تغير النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطرها يؤدي إلى تغير توزيع الانعكاسات والمنطقة التي تغطيها تلك الانعكاسات، شكل (6)، وبالتالي التأثير في توزيع الطاقة الصوتية لعموم الفضاء.

إن تناقص ارتفاع فضاء القبة بثبوت قطر الفتحة يؤدي إلى تغير انتشار الموجات المنعكسة عن القبة، إذ يلاحظ في الحالة (أ) أن الانعكاسات الصادرة عن القبة تغطي الجزء الخلفي من المصلى في حين أن الحالتين (ب، ج) توضح أن تغير الارتفاع بثبات قطر الفتحة أدى إلى ان تغطي الانعكاسات الصادرة عن القبة المنطقة الوسطية والأمامية من فضاء المصلى على التوالي.

ويرى البحث أن هذه حالة ثابتة بغض النظر عن نوع القوس المكون لبدن القبة، حيث يلاحظ في الحالات (د، هـ، و) من ذات الشكل أنه تم استبدال الأسطح المقوسة للقبة بأسطح غير مقوسة وأعطت نتائج مشابهة تقريباً لما أعطته الأسطح المقوسة، ويمكن ملاحظة أن تأثير الشكل المقوس عمل على توزيع الانعكاسات على منطقة أوسع ضمن فضاء المصلى من المنطقة التي تغطيها الانعكاسات الناتجة عن السطوح غير المقوسة, (عبد الحسن,2005,ص104).

يلاحظ من الحالات (أ، ب، ج) للشكل (6) تغير في شكل التمركز البؤري وموقعه، حيث كلما قل ارتفاع فضاء القبة بثبات قطرها ازداد انتشار التمركز البؤري، حتى يصبح خطاً متصلاً بدلاً من نقطة محددة و يرافـق هـذا التغير انخفاض في الطاقة الصوتية الصادرة عن القبة و ذلك لعدم تجمعها في نقطة محددة

تناقص ارتفاع فضاء القبة بثبوت قطر الفتحة يزيد من المساحة الداخلية للقبة المعرضة للأمواج الصوتية المباشرة مما يولد احتمالية لتولد ظاهرة الصدى الزاحف **Creep Echo** داخل القبة.

بثبوت قطر فتحة القبة فإن كمية الطاقة الصوتية الداخلة إلى القبة ثابتة، إلا أن كمية الطاقة المنعكسة عنها تتغير بتغير الارتفاع، وبالتالي التأثير على توزيع الطاقة الصوتية داخل المصلى كما في الحالات (أ، ب، ج).

تناقص ارتفاع فضاء القبة مع ثبات قطر الفتحة يقلل من طول المسارات التي يقطعها الصوت المنعكس ويقلل بالتالي من احتمالية حدوث الصدى **Echo** بسبب الفرق في الفترة الزمنية الحرجة، كما يؤدي إلى تقليل كل من حجم الفضاء والمساحة السطحية الداخلية اللذان يؤثران بشكل مباشر في زمن الترديد.

وبصورة عامة، فإن تناقص الارتفاع مع ثبوت نصف القطر يؤدي إلى توليد قباب ذات أشكال مضغوطة والتي يمكن ان تكون ذات افضلية صوتية عن غيرها من القباب بسبب وصول الانعكاسات ضمن فترة مناسبة لإحداث التقوية الصوتية المطلوبة وعدم تبديد الطاقة الصوتية بسبب طول المسارات .

3-شكل المقطع الجانبي للقبة

يرى البحث أن شكل المقطع الجانبي للقبة يؤثر على الأداء الصوتي من خلال متغيرين أساسيين هما:

أولاً- نوع القوس المكون لبدن القبة: هناك العديد من أنواع الأقواس المكونة لبدن القبة و بصورة عامة يعمل الشكل المقعر على تركيز الطاقة الصوتية، حيث يؤثر على اتجاه انعكاس الموجات الصوتية مما يؤدي إلى مرور معظم الانعكاسات في منطقة محددة تعرف بنقطة التمركز البؤري، حيث يكون منسوب الصوت عالياً بسبب ارتفاع كثافة الطاقة الصوتية في تلك المنطقة.

عدد نقاط التمركز ومواقعها يعتمد على عدد مراكز القوس المكون لبدن القبة ومساحة الجزء الفعال من القبة الذي يتلقى الأمواج الصوتية، إذ يلاحظ في الشكل (7) أن الحالة (هـ) تعكس تكون نقطة تمركز بؤري واحدة في قبة ذات قوس ثنائي المركز في حين كل من (د، و) يعكس تكون نقطتين تمركز في القبتين ذات القوس الرباعي والثلاثي المركز على التوالي، ومن الحالة (ب) في نفس الشكل يلاحظ تكون نقطة واحدة على الرغم من أن القوس المكون لبدن القبة رباعي المركز، وهنا يظهر تأثير مساحة الجزء الفعال الذي يتعرض للأمواج الصوتية، حيث كلما ازدادت المساحة الفعالة ازداد احتمال تكون أكثر من نقطة تمركز بؤري مع إمكانية تولد ظاهرة الصدى الزاحف داخل القبة.

و بثبات النسبة بي ارتفاع فضاء القبة إلى قطر فتحتها فإن التغير في موقع التمركز البؤري على المستوى العمودي (الارتفاع) يكون محدودا، وهذا ما يمكن ملاحظته في الحالات (د، هـ، و) وكذلك ليس له تأثير هام على طول مسارات الصوت المنعكس في حين إن لنوع القوس المكون لبدن القبة تأثير في توزيع الطاقة الصوتية، وهذا ما يمكن ملاحظته في كل من (د، هـ، و)، حيث يبين كل من (هـ، و) توزيع الانعكاسات بشكل منتظم تقريباً ضمن المنطقة التي تغطيها الانعكاسات، في حين أن (د) يظهر عدم تجانس في توزيع الانعكاسات

عن القبة ضمن المنطقة التي تغطيها انعكاسات القبة، حيث يلاحظ كثافة الانعكاسات في جزء معين وانخفاضها الواضح في الأجزاء الأخرى, (عبد الحسن,2005,ص107).

ثانياً- أجزاء مقطع القبة: يتكون مقطع القبة من عدة أجزاء، أهمها: القاعدة، العنق والبدن، حيث أن إضافة أو حذف أي من هذه الأجزاء يغير في شكل مقطع القبة كما يغير في تأثيرها على الأداء الصوتي اذ من الشكل (7) يلاحظ في الحالة (ب) إضافة عنق عمودي أدى إلى تقليل الطاقة الواصلة إلى بدن القبة ووجه الموجات الساقطة عليها باتجاه فضائها ، وبذلك حدد تسرب أي من الانعكاسات الأولية المؤثرة.

أما في الحالة (ج) فقد تم تغيير شكل مقطع الجزء المضاف مما أحدث تغييراً كبيراً في تأثير القبة على الأداء الصوتي في فضاء المصلى، إذ أن تغيير شكل المقطع العمودي لكل من (القاعدة والعنق) يعمل دوماً على وجود فرق بين قطر فتحة القبة وقطر فتحة بدن القبة.

في الحالة (ج) بثبات قطر فتحة بدن القبة تم تغيير شكل المقطع العمودي للجزء القاعدي مما عمل على زيادة قطر فتح القبة وبالتالي زيادة كمية الطاقة الصوتية الداخلة إلى القبة والانعكاسات الصادرة عنها، إضافة إلى أن جزء القاعدة لعب دوراً في توفير الانعكاسات لمنطقة فضاء المصلى.

أي أن التغير في أجزاء القبة يؤثر على توزيع الطاقة الصوتية ضمن فضاء المصلى، كما يلاحظ تغير في موقع التمركز البؤري الحاصل وشدته كما في (أ، ب، ج) بسبب اختلاف كميات الموجات الصوتية المارة في نقطة التمركز. و يلاحظ أيضاً تغير في موقع وعدد نقاط التمركز البؤري اعتماداً على الجزء الفعال المتعرض للأمواج الصوتية المباشرة.

يمكن للتغيير في أجزاء القبة التأثير على طول مسارات الصوت مما يولد احتمالية حدوث الصدى، وبذلك يمكن اعتبار أن ارتفاع أجزاء القبة وشكل المقطع العمودي من أهم المتغيرات المؤثرة على الأداء الصوتي في القباب ذات الأجزاء المختلفة مع ثبات قطر فتحة بدن القبة, (عبد الحسن,2005,ص108).

4-تعدد القباب

تعدد القباب يؤدي إلى زيادة في حجم الفضاء مما يؤدي إلى فقدان في الطاقة الصوتية، كما أن زيادة الحجم يرافقها زيادة في المساحة السطحية، وهما المتغيران الأساسيان في التأثير على زمن الترديد و تعدد القباب يولد احتمالية حدوث الصدى بسبب تعدد الانعكاسات الواصلة الى نفس النقطة و بفروقات زمنية قد تتجاوز (50 ملي ثانية) عن وصول الصوت المباشر، كما أن تعدد القباب يرافقه تعدد في نقاط التمركز البؤري حيث يمكن ملاحظة ذلك في الشكل (8). يلاحظ من الشكل ذاته أن مناطق محددة من المصلى تتسلم انعكاسات من أكثر من قبة، في حين ان مناطق أخرى لا تتسلم أي من الانعكاسات الصادرة عن القبة، وهذا يؤثر في توزيع الطاقة الصوتية في فضاء المصلى. تأثير هذا المؤشر يعتمد بشكل أساسي على عدد القباب وتوزيعها، و علاقتها مع المصدر الصوتي, (عبد الحسن,2005,ص108).

5-موقع القبة

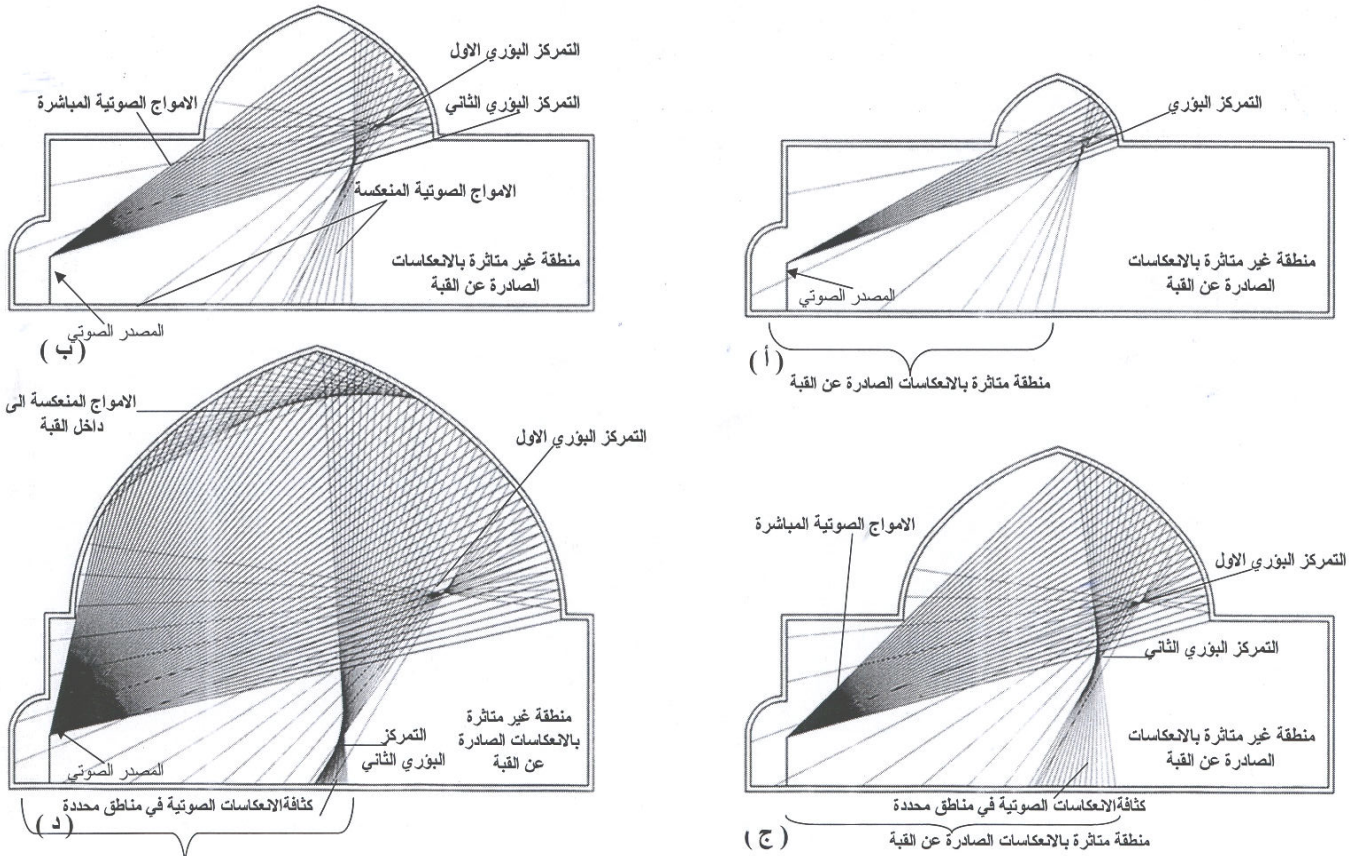
إن تغير موقع القبة يؤدي على تغير طول مسارات الأمواج الصوتية الساقطة والمنعكسة عن القبـــة ممـــا يولـــد احتمالية حدوث الصدى، الشكل (9). أن تغير موقع القبة يؤدي إلى تغير في توزيع الانعكاسات الصادرة عنهـــا، وأن المنطقة التي تغطيها الانعكاسات عند ثبات موقع القبة تعتمد على علاقة ارتفاع فضاء القبة بقطر فتحتهـــا إذ تؤثر هذه العلاقة في شكل القبة أيضا، من مقارنة الحالات (أ، ب، ج) بالحالات (د، هـــ، و) فـــي الـــشكل (9) يلاحظ اختلاف في القطاعات التي تغطيها الانعكاسات بالرغم من تشابه موقع القباب.

أن القبة القريبة من المصدر الصوتي تتسلم طاقة صوتية أكبر من القبة الأبعد، وبالتالي فإن الانعكاسات الصادرة منها تزداد بزيادة الطاقة الداخلة إليها مما يولد كثافة في الطاقة الصوتية في منطقة معينة من المصلى مؤثرة بذلك على توزيع الطاقة الصوتية فيه. و يؤدي تغير موقع القبة إلى تغير في موقع التمركز البؤري وشدته و إمكانيـــة تكون أكثر من نقطة واحدة مع احتمالية تولد الصدى الزاحف داخل القبة, (عبد الحسن,2005,ص110).

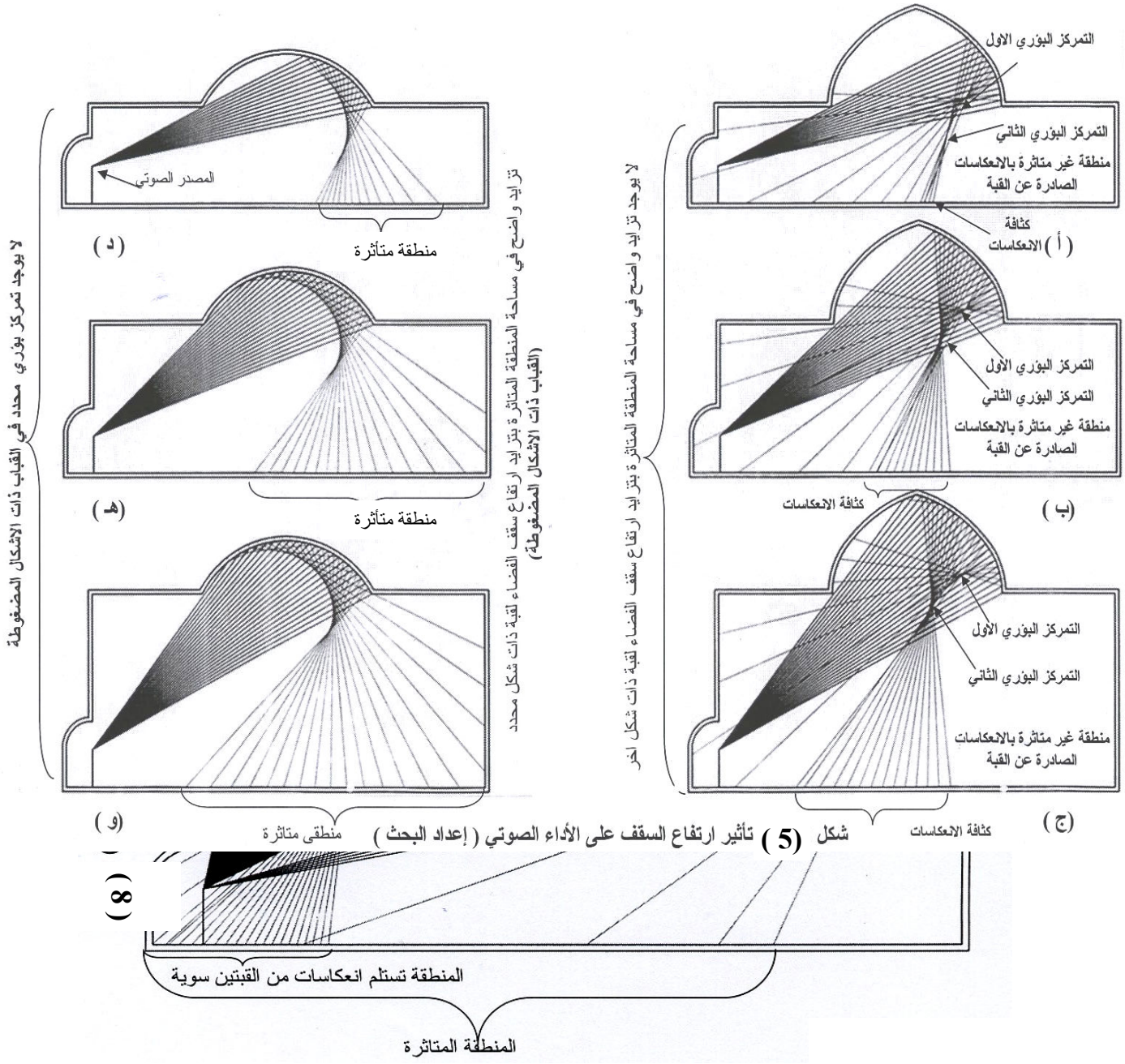
6-علاقة المصدر الصوتي مع القبة

من الشكل (10) يمكن ملاحظة أن تغير الموقع الصوتي يؤثر في توزيع الطاقة الصوتية والمنطقة التي تغطيها الانعكاسات الصادرة من القبة بسبب تغير في مساحة الجزء الفعال من السطح الداخلي للقبة، ويرافق هذا التغيـــر حدوث تغير في مواقع التمركز البؤري وشدته واحتمالية تولد الصدى الزاحف داخل القبة.

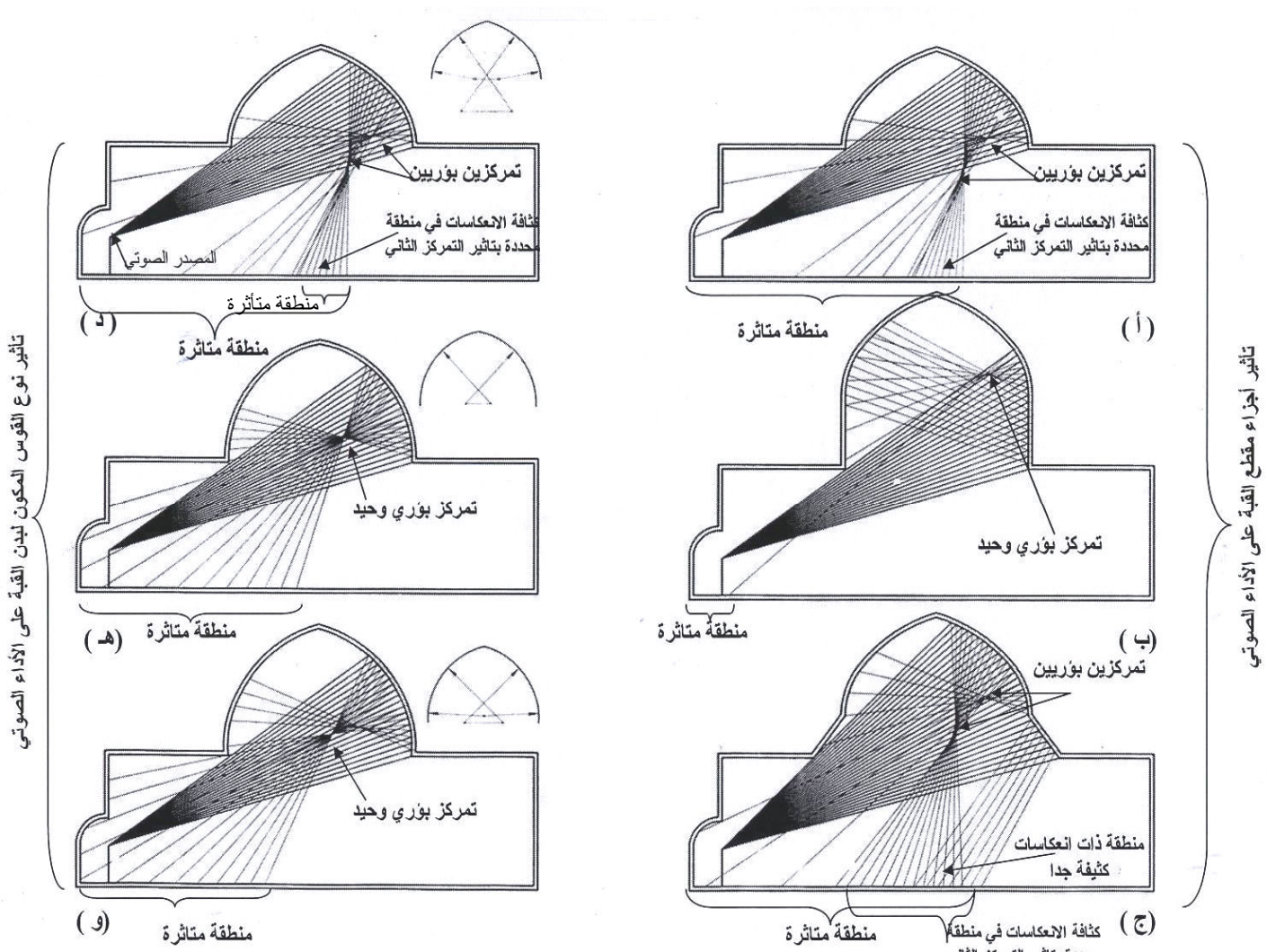
إن تغير الموقع الصوتي يؤثر في الفترة الزمنية الحرجة اعتماداً على فرق المسار للأمواج المنعكسة عن الأمواج المباشرة ضمن مدى لا تتجاوز (50 ملي ثانية) مما يولد احتمالية لحدوث الصدى, (عبد الحسن,2005,ص112).



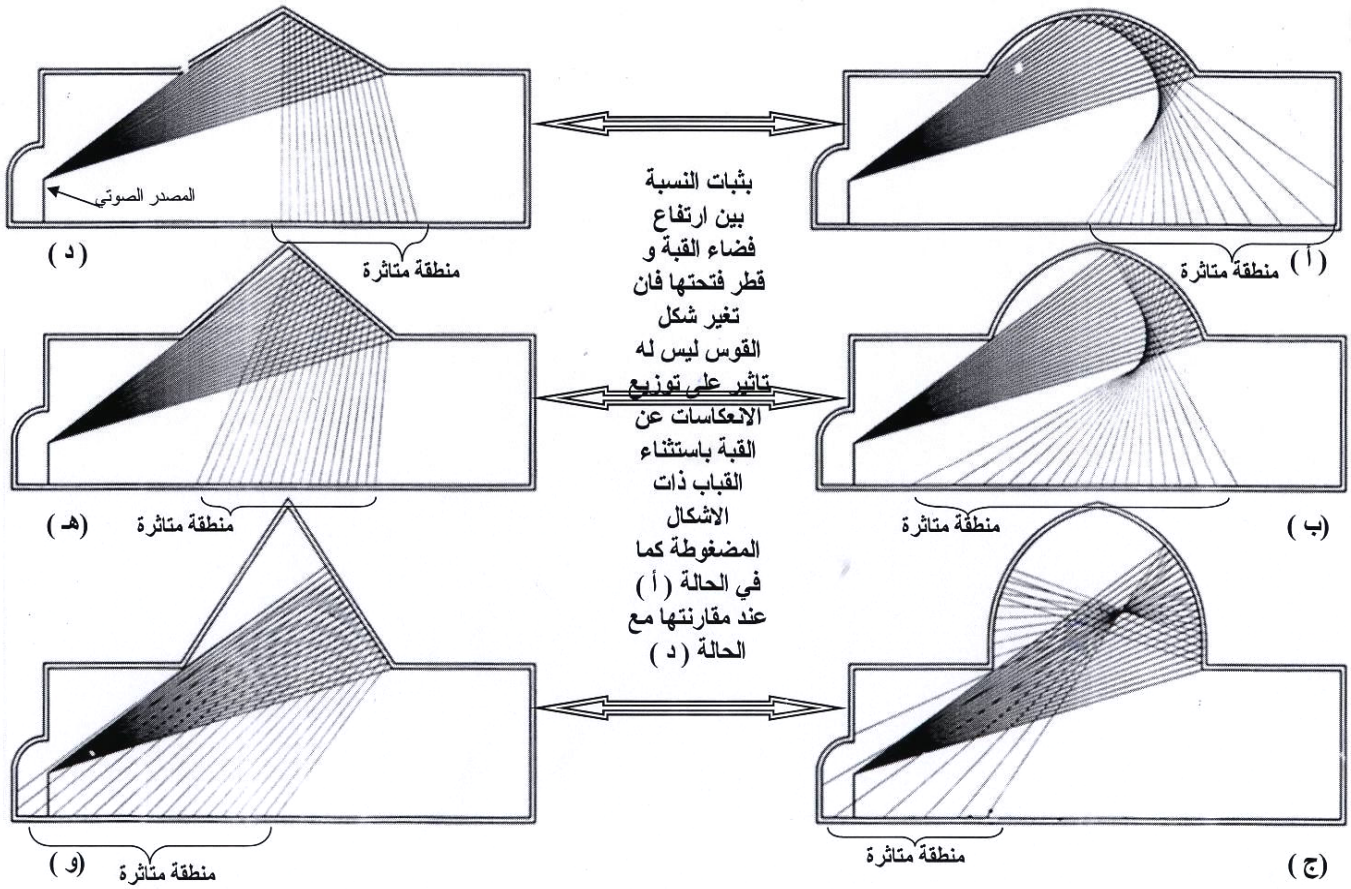
شكل 4 تأثير حجم القبة على الأداء الصوتي (إعداد البحث)



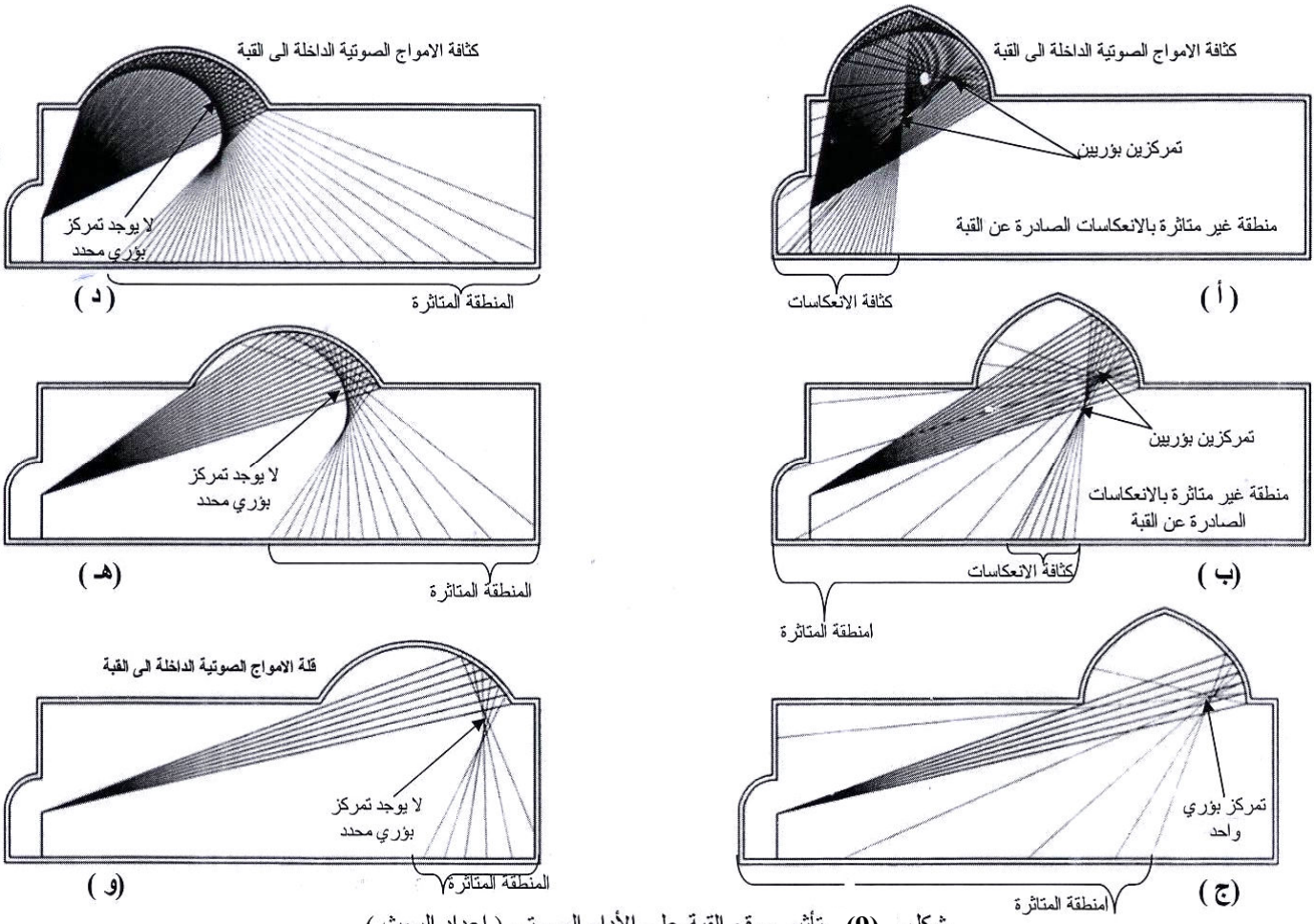
شكل (5) تأثير ارتفاع السقف على الأداء الصوتي (إعداد البحث)



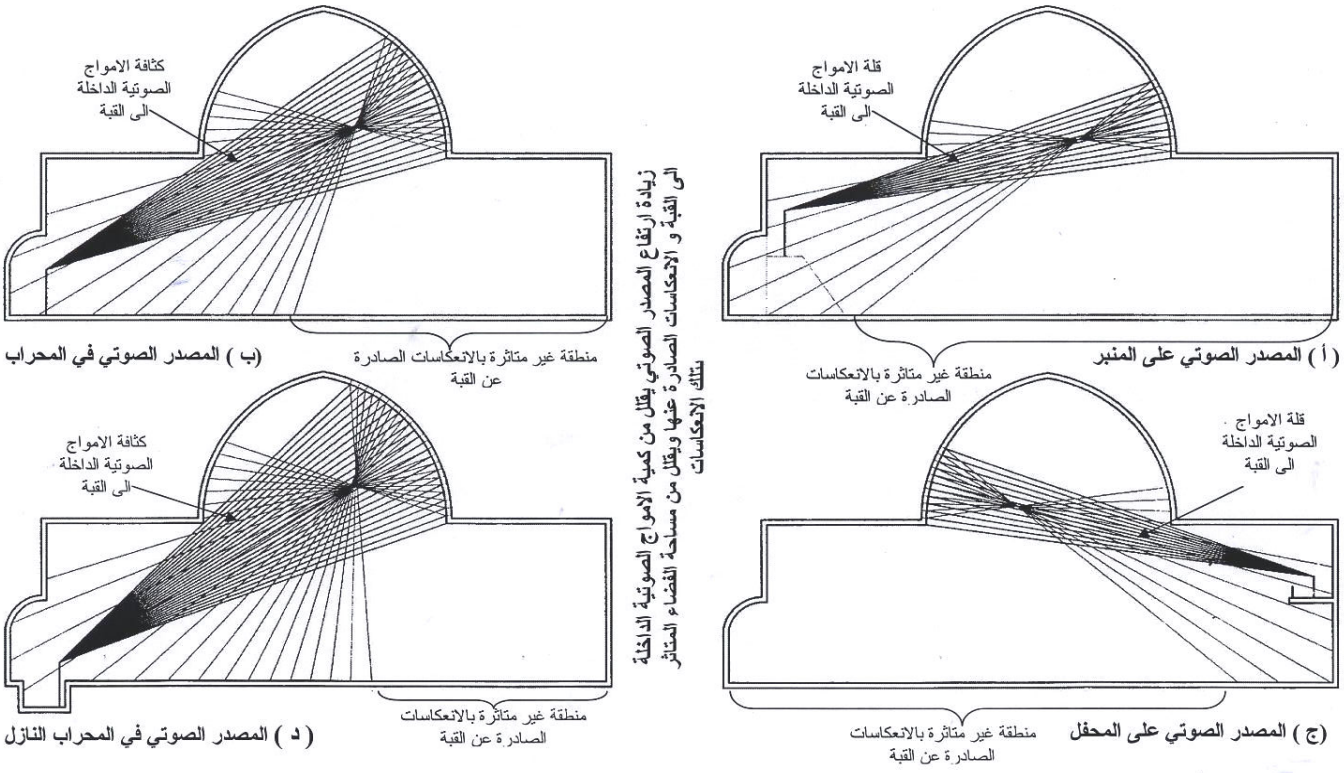
شكل (2-32) تأثير شكل المقطع الجانبي للقبة على الأداء الصوتي (إعداد البحث)



شكل (6) تأثير النسبة بين ارتفاع فضاء القبة إلى قطر فتحتها على الأداء الصوتي (إعداد البحث)



شكل **(9)** تأثير موقع القبة على الأداء الصوتي (إعداد البحث)



شكل **(10)** تأثير علاقة المصدر الصوتي مع القبة على الأداء الصوتي (إعداد البحث)

الإستنتاجات

1. من خلال الدراسة الافتراضية لعدد من الخصائص التشكيلية للقباب والتي أجراها البحث تبين أن تأثير القبة على الأداء الصوتي يكون من خلال ثلاث حالات رئيسية تؤثر بدورها في المؤشرات الأساسية في تقييم الحالة السمعية للفضاء، وهذه الحالات هي:

- التمركز البؤري: يمثل مصدر صوتي ثاني في الفضاء السمعي، وأهم متغيراته التي تتأثر بالخصائص التشكيلية هي شدة وموقع وعدد نقاط التمركز.
- طول مسارات الانعكاس: تؤثر الخصائص التشكيلية للقباب على طول مسارات الانعكاس بما يؤثر على حالة تولد الصدى وفقدان الطاقة الصوتية.
- توزيع الانعكاسات الصوتية: خصائص التشكيل الهندسي للقباب تؤثر على شكل الانعكاسات والمنطقة التي تغطيها هذه الانعكاسات وكثافتها.

ويمكن من خلال الجداول الآتية تبيان علاقة الخصائص التشكيلية للقباب مع هذه الحالات الأساسية:

جدول (1) علاقة خصائص التشكيل الهندسي للقباب مع التمركز البؤري

			التمركز البؤري			الملاحظات
			شدة التمركز	موقع التمركز	عدد نقاط التمركز	
خصائص التشكيل الهندسي للقباب	حجم القبة		•	•	•	زيادة حجم القبة يؤدي إلى زيادة شدة التمركز البؤري وتغيير موقعه مع احتمالية لتكون أكثر من نقطة تمركز واحد بسبب زيادة مساحة الجزء الفعال من القبة.
	الأبعاد والنسب	ارتفاع سقف المصلى	•	•	•	زيادة ارتفاع سقف المصلى يؤدي إلى زيادة كمية الطاقة الداخلة والمنعكسة عن القبة مما يزيد من شدة التمركز، كما أن ذلك يؤثر في موقع التمركز مع إمكانية لتولد أكثر من نقطة تمركز بؤري واحدة بسبب زيادة مساحة الجزء الفعال من القبة والذي يستلم الأمواج الصوتية المباشرة ثم يعكسها.
		النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها	•	•	•	تغير النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها يؤثر في شدة التمركز وموقعه، احتمالية لتكون أكثر من نقطة تمركز بؤري بسبب زيادة مساحة الجزء الفعال.
	شكل المقطع الجانبي للقبة	نوع القوس المكون لبدن القبة	•	•	•	شكل القوس يؤثر على عدد نقاط التمركز البؤري، وبالتالي يؤثر على شدة التمركز التي تتناقص بزيادة عدد النقاط بسبب التناقص في كمية الانعكاسات المارة خلال التمركز الواحد لمرورها في نقاط أخرى، شكل القوس يؤثر كذلك في موقع التمركز البؤري ولكن بثبات النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر الفتحة يصبح شكل القوس ليس له تأثير مهم على موقع التمركز.
		أجزاء مقطع القبة	•	•	•	التغير في شكل وأبعاد أجزاء القبة يؤثر في شدة التمركز، كما يؤثر في موقع التمركز ويولد احتمالية لتكون أكثر من نقطة تمركز بسبب زيادة مساحة الجزء الفعال من القبة الذي يستلم الأمواج الصوتية المباشرة.
	تعدد القباب		×	×	•	تغير عدد القباب يؤثر في عدد نقاط التمركز البؤري.

		التمركز البؤري			الملاحظات
		شدة التمركز	موقع التمركز	عدد نقاط التمركز	
	موقع القبة	•	•	•	تغير موقع القبة يؤثر في شدة التمركز وموقعه ونقاط التمركز.
	علاقة المصدر الصوتي مع القبة	•	•	•	تغير موقع المصدر الصوتي يؤثر في شدة التمركز وموقعه وعدد نقاط التمركز.
	الإنهاءات الداخلية للقبة	•	×	×	تؤثر في شدة التمركز اعتماداً على معامل انعكاس المادة ومظهرها، حيث المظهر الخشن يعمل على تشتيت الطاقة مما يضعف من شدة التمركز.

جدول (2) علاقة خصائص التشكيل الهندسي للقباب مع طول مسارات الانعكاس

			طول مسار الصوت المنعكس		الملاحظات
			حدوث الصدى	فقدان الطاقة الصوتية	
خصائص التشكيل الهندسي للقباب	حجم القبة		•	•	زيادة حجم القبة تؤدي إلى زيادة طول مسارات الصوت المنعكس مما يزيد من احتمالية حدوث الصدى وزيادة الفقدان في الطاقة الصوتية.
	الأبعاد والنسب	ارتفاع سقف المصلى	•	•	زيادة ارتفاع سقف المصلى يولد احتمالية حدوث الصدى بالنسبة للانعكاسات الصادرة عن القبة كما يؤثر سلباً على الطاقة الصوتية حيث تتناقص مع زيادة طول مسار الانعكاس.
		النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها	•	•	تناقص ارتفاع فضاء القبة مع ثبوت قطر الفتحة يقلل من طول المسارات للصوت المنعكس وبالتالي التقليل من احتمالية حدوث الصدى.
	شكل المقطع الجانبي للقبة	نوع القوس المكون لبدن القبة	•	•	ثبات النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها وتقارب الأبعاد أو تساويها فإن شكل القوس ليس له تأثير على طول مسارات الصوت المنعكس وبخلاف ذلك يكون له تأثيرمما يولد الصدى وفقدان الطاقة الصوتية.
		أجزاء مقطع القبة	•	•	التغير في شكل وأبعاد أجزاء مقطع القبة يؤثر على طول مسارات الصوت فيولد احتمالية لحدوث الصدى وفقدان الطاقة الصوتية.
	تعدد القباب		•	•	تعدد القباب يولد احتمالية لحدوث الصدى بسبب فرق مسار الانعكاس عن القبتين، كما أنه يمثل زيادة في حجم الفضاء مما يزيد من فقدان الطاقة الصوتية وكذلك يؤثر في زمن الترديد ووضوحية الصوت.
	موقع القبة		•	•	تغير موقع القبة يؤثر على طول مسارات الانعكاس مما يؤثر على احتمالية تولد الصدى وفقدان الطاقة الصوتية.
	علاقة المصدر الصوتي مع القبة		•	•	تغير موقع المصدر الصوتي يؤثر في طول مسارات الانعكاس.

		طول مسار الصوت المنعكس		الملاحظات
		حدوث الصدى	فقدان الطاقة الصوتية	
	الإنهاءات الداخلية للقبة	×	×	ليس لها تأثير مباشر على طول مسارات الانعكاس لكن يمكن أن تكون بسبب مباشر في حدوث الصدى وخاصة عند استخدام المواد العاكسة أو فقدان الطاقة الصوتية باستخدام المواد الماصة أو تشتيتها باستخدام عدة أسطح وتفاصيل كثيرة.

جدول (3) علاقة خصائص التشكيل الهندسي للقباب مع توزيع الانعكاسات الصوتية

			توزيع الانعكاسات الصوتية		الملاحظات
			كثافة الانعكاسات	المنطقة التي تغطيها الانعكاسات	
خصائص التشكيل الهندسي للقباب	حجم القبة		•	•	زيادة الحجم مع ثبات النسبة بين قطر الفتحة وارتفاع فضاء القبة إضافة إلى ثبات بقية الخصائص التشكيلية للقباب يؤثر بشكل محدود على المنطقة التي تغطيها الانعكاسات بينما يؤثر بشكل ملحوظ على كثافة الانعكاسات حيث تتزايد مع تزايد الحجم وتناقص شدة هذه الانعكاسات بسبب طول مسار الانعكاس.
	الأبعاد والنسب	ارتفاع سقف المصلى	•	•	تغير ارتفاع السقف يؤثر في المنطقة التي تغطيها الانعكاسات، وكثافة هذه الانعكاسات حيث أن زيادة ارتفاع القبة يؤدي إلى زيادة كثافة الانعكاسات الصادرة عنها مع تناقص شدتها بسبب طول مسار الانعكاسات.
		النسبة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر فتحتها	•	•	تغير هذه النسبة تؤثر في شكل الانعكاس والمنطقة التي تغطيها، وبثبات قطر الفتحة مع تناقص ارتفاع فضاء القبة تزداد كثافة الانعكاسات الصادرة عنها بسبب زيادة مساحة الجزء الفعال العاكس للأمواج الصوتية مع زيادة شدة الانعكاسات سبب التناقص في طول مسار الانعكاس.
	شكل المقطع الجانبي للقبة	نوع القوس المكون لبدن القبة	•	•	بثبات العلاقة بين ارتفاع فضاء القبة وقطر الفتحة فإن تغير شكل القوس يؤثر بشكل محدود في شكل الانعكاسات والمنطقة التي تغطيها ويؤثر بشكل واضح في كثافة الانعكاسات من منطقة إلى أخرى وشدتها حيث نقطة الانعكاس الواحدة عن السطح الفعال أعلى من شدتها من نقطتي الانعكاس المتولدة عن السطح الفعال ذاته مع تغير شكل القوس لأن النقطة الواحدة تمر خلالها معظم الانعكاسات عن السطح الفعال في حين أنها تتوزع على أكثر من نقطة في الحالات الأخرى.
		أجزاء مقطع القبة	•	•	إن تغير شكل وأبعاد أجزاء المقطع يعمل على تغير الانعكاسات والمنطقة التي تغطيها وكثافة هذه الانعكاسات وشدتها.
	تعدد القباب		•	•	تعدد القباب يؤثر في كثافة الانعكاسات المستلمة في موقع محدد من الفضاء كما انه يزيد المساحة المتعرضة لتاثير الانعكاسات الصادرة عن القبة.
	موقع القبة		•	•	تغير موقع القباب يؤثر في شكل الانعكاسات الصادرة عنها والمنطقة التي تغطيها وكثافة الانعكاسات وشدتها حيث كلما ابتعدت القبة عن المصدر الصوتي قلت كثافة الانعكاسات وشدتها.
	علاقة المصدر الصوتي مع القبة		•	•	تؤثر في شكل الانعكاسات والمنطقة التي تغطيها الانعكاسات وكثافتها وشدتها.

		توزيع الانعكاسات الصوتية		الملاحظات
		كثافة الانعكاسات	المنطقة التي تغطيها الانعكاسات	
	الإنهاءات الداخلية للقبة	•	•	مواد الإنهاء من حيث طبيعتها ومظهرها وطريقة توظيفها تؤثر في شكل الانعكاسات والمنطقة التي تغطيها الانعكاسات وكثافتها وشدتها.

•	**مؤثر**
×	**غير مؤثر**

2. هنالك تباين في تأثير القباب على الحالة السمعية و يعتمد ذلك التباين بشكل أساسي على الخصائص التشكيلية للقباب.
3. ظاهرة الصدى الزاحف من العيوب الصوتية المهمة الناتجة عن الأشكال الدائرية، إلا أنه فيما يتعلق بالقباب أعلى سقف المصلى كما أوضحت الدراسة غالباً ما ينحصر الصدى الزاحف في فضاء القبة ويعتمد تكونـــه في القباب على زيادة مساحة الجزء الفعال من القبة المعرضة للأمواج الصوتية المباشرة.
4. أظهرت الدراسة الافتراضية التي قام بها البحث أن القباب المضغوطة والتي يمكن الحصول عليها من خلال تناقص ارتفاع فضاء القبة مع ثبات قطر الفتحة حققت أفضلية على القباب الأخرى من حيث التقليل من شدة التمركز البؤري وتوزيع الانعكاسات بشكل متجانس والتقليل من طول مسارات الانعكاس الذي يؤثر علـــى شدة الطاقة المفقودة من خلال تقليل الحجم الذي يؤثر كذلك زمن الترديد.

مصادر البحث:-

أولاً: الدراسات غير المنشورة

1. الخفاجي، د. صبا جبار، "تأثير المواصفات الشكلية للفضاءات السمعية على كفاءة أدائها الصوتي"، أطروحة دكتوراه/ جامعة بغداد/ كلية الهندسة/ قسم الهندسة المعمارية ، 1996.
2. عبد الحسن, عامر حبيب " اثر التشكيل الهندسي للقباب على كفاءة الأداء الصوتي فـــي المـــساجد" , رســـالة ماجستير/ جامعة بغداد/ كلية الهندسة/ قسم الهندسة المعمارية ، 2005.

ثانياً: الدراسات المنشورة

أ- المطبوعات

3. الخفاجي، صبا جبار، "تأثير العناصر المعمارية علـــى الأداء الـــصوتي فـــي الجوامـــع"، مجلـــة الهندســـة والتكنولوجيا، المجلد (14)، العدد (8)، 1995.
4. حماد، د. رزق شعبان، الهندسة الصوتية في العمارة"، جامعة الإمارات العربيـــة المتحـــدة، قـــسم الهندســـة المعمارية.(كتاب,1987)
5. Furrer, Willi : " Room and Building Acoustics and Noise Abatement", Butter Worths Ltd., London, 1964.

6. Parkin, P.H.: Acoustics, Noise and building, Faber and Faber Ltd., London, 1969.

7. Dolle, Leslie L., "Environmental Acoustics", McGraw Hill Book Company, 1972.
8. Lawrance, A., "Architectural Acoustics", Elsever Publishers Ltd., Amsterdam, 1976.

ب- مصادر الشبكة الدولية للمعلومات Internet

9. Mike Wilson," Acoustical Design for Architects", University of North London, 2003, www.unl.ae.uk/learn/student/notes/acoustics/acoustic-notice.htm
10. Odeon software ,2003 (www.odeon.com)