الباب الثانى عشر

صوتيات المبانى

Acoustics of Buildings

١٢ - ١ الخواص الصوتية للمبانى والعوامل التى تحكمها :

من المعلوم أن قاعات المحاضرات والموسيقى يجب أن تصمم بحيث يمكن سماع الكلام والموسيقى بكل وضوح وبأعلى كفاءة ويدخل فى عملية التصميم حساب الانعكاسات والتداخل وامتصاص الموجات الصوتية بحيث تكون القاعة نفسها امتداداً للالات الموسيقية تحسن من كيف الموسيقى الصادرة من هذه الآلات .

ويتوقف هذا على حجم القاعة وعلى المواد التى تبنى بها . ومن الاعتبارات الهامة التى تدخل فى عملية التصميم :

(١) أن يسمع الصوت بكل وضوح لكل مستمع فى القاعة .

(٢) ألا تتغير درجة النغمة .

(٣) ألا تتداخل الكلمات المتتابعة فى بعضها وأن تسمع بوضوح .

ولذا يجب دراسة الانعكاسات للموجات الصوتية من الحوائط والأسقف وشدة الصوت وتركيزه ورنين القاعة وصدى الصوت .

١٢ - ٢ الانعكاسات المتكررة (Reverberation)

عندما يصدر الصوت من مصدر صوتى فى القاعة فان موجة مباشرة تصل إلى

المستمع فى خط مستقيم وتصله تباعا موجات عديدة أخرى لنفس الصوت عن طريق انعكاسات متكررة من الحوائط والأسقف. ويصل عدد هذه الانعكاسات فى بعض الأحوال إلى حوالى مائتين قبل أن تصل إلى المستمع . ومن الطبيعى أن تتناقص شدة الصوت تبعاً لذلك . وتكون النتيجة أنه إذا انقطع صوت المصدر فان المستمع يستمر فى استقبال الموجات التى تأتيه عن طريق الانعكاسات حتى تضعف شدتها وينعدم سماعها ، والزمن الذى ينقص فيه شدة الصوت من قيمته المتوسطة إلى لحظة انعدامه يسمى بزمن الانعكاسات المتكررة .
(Reverberation time)

وقد لاحظ سابين (Sabine) أن الصوت الصادر من أنبوبة أرغونية ذات تردد ١٢٥ سيكل/ثانية يصبح غير مسموع إذا انقطعت شدة الصوت الصادر منها إلى واحد على مليون من شدتها قبل قطع الصوت عنها مباشرة . وعلى ذلك عرف سابين زمن الانعكاسات المتكررة بأنه الزمن الذى تنقص خلاله شدة الصوت إلى واحد على مليون من شدته قبل قطع مصدر الصوت مباشرة. أى الزمن الذى ينقص خلاله شدة الصوت بمقدار ٦٠ ديسى بل .

١٢ - ٣ العوامل التى تحكم زمن الانعكاسات المتكررة :

تتوقف الانعكاسات المتكررة على عدة عوامل هى :

(١) الخواص الانعكاسية لجدران وأرضية وسقف القاعة فكلما زادت جودة الانعكاس كلما زاد الزمن الذى يأخذه الصوت حتى يتلاشى تماما ، أى كلما زادت الانعكاسات المتكررة .

(٢) معامل امتصاص السطوح الموجودة فى القاعة مثل السجاد والمفروشات

والستائر وغيرها فكلما كانت قوة الامتصاص كبيرة كلما قل زمن الانعكاسات المتكررة .

(٣) شدة الصوت قبل توقفه مباشرة . فاذا كانت الشدة كبيرة فان الانعكاسات المتكررة تأخذ زمنا أطول .

(٤) تردد الصوت . إذ أن معامل إمتصاص المواد الموجـــودة فى القاعة يزداد بازدياد تردد الموجات الصوتية الساقطة عليها .

(٥) أبعاد القاعة وبالتالى سعتها .

وقد وجد سابين أن زمن الانعكاسات المتكررة لحجرة يتوقف على سعتها تبعا للعادلة الآتية :

$$T = \frac{0.05\ V}{A} \quad \text{seconds}$$

حيث V حجم الحجرة بالقدم المكعب ،

$$A = \Sigma\ aS$$

حيث :

S = مساحة السطوح التى تمتص الصوت بالقدم المربع

a = معامل الامتصاص .

وإذا كانت (V) بالمتر المكعب ، (S) بالمتر المربع فان :

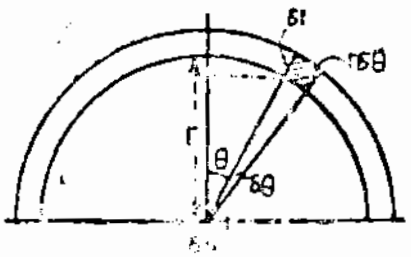
$$T = \frac{0.16\ V}{A}$$

وأحسن قيمة لهذا الزمن حتى يمكن سماع الصوت نقيا وبوضوح هو

٥ر٠ ثانية فى قاعة المحاضرات ، بين ١ ، ٢ ثانية فى قاعات الموسيقى وفى المسارح الصغيرة يتراوح هذا الزمن بين ١ر١ ، ٥ر١ ثانية وفى المسارح الكبيرة لايزيد هذا الزمن عن ٣ر٢ ثانية ، وتصمم قاعات الموسيقى والمسارح بحيث لايتغير زمن الانعكاسات المتكررة سواء كانت القاعة أو المسرح ملىء بالمستمعين أوخالية منهم ويمكن تنفيذ ذلك بتنجيد المقاعد بقماش مثل القطيفة له معامل إمتصاص مشابه لمعامل إمتصاص المستمعين .

١٢ - ٤ استنتاج معادلة سابين

نفرض عنصرا (δS) من سطح يسقط عليه الطاقة الصوتية (شكل٨٣) . نرسم نصف دائرتين مركزهما (δS) نصف قطر الأولى (r) والثانية ($r+\delta r$) نأخذ عنصرا بين الدائرتين يصنع زاوية قدرها ($\delta\theta$) ويميل عن العمود على (δS) بمقدار (θ) .



شكل (٨٣)

$\therefore$ مساحة العنصر (المظلل) $= r\,\delta\theta .\, \delta r$

فاذا تصورنا الشكل يدور حول العمودى على (δS) بزاوية قدرها ($\delta\phi$) فان العنصر المظلل يتحرك مسافة قدرها :

$$r \sin\theta\, \delta\phi$$

وينتج عن ذلك عنصرا حجميا قدره

$$r\,\delta\theta.\,\delta r \times r\sin\theta\,\delta\phi$$

$$= r^2\sin\theta.\,\delta\theta\,\delta r\,\delta\phi$$

وإذا كانت (E) هى كثافة الطاقة فإن :

طاقة الصوت على هذا العنصر الحجمى :

$$= Er^2\sin\theta\,\delta\theta\,\delta r\,\delta\phi$$

هذه الطاقة تخرج فى جميع الاتجاهات بالتساوى .

∴ الطاقة التى تخرج فى وحدة الزوايا المجسمة من هذا العنصر هى :

$$\frac{E\,r^2\sin\theta\,\delta\theta\,\delta r\,\delta\phi}{4\pi}$$

وحيث أن العنصر يصنع زاوية مجسمة قدرها

$$\frac{\delta S\cos\theta}{r^2}$$

مع العنصر (δS)

∴ الطاقة الصوتية التى يستقبلها العنصر (δ S) من العنصر الحجمى المذكور هى :

$$\frac{E\,r^2\sin\theta\,\delta\theta\,\delta r\,\delta\phi}{4\pi} \times \frac{\delta S\cos\theta}{r^2}$$

$$= \frac{E\delta S}{4\pi}\,\delta r\cos\theta\sin\theta\,\delta\theta\,.\,\delta\phi$$

وبتكامل هذا المقدار بالنسبة لجميع قيم (φ)

∴ الطاقة الصوتية التى يستقبلها العنصر (δS)

$$= \frac{E\delta S}{4\pi} \delta r \cos\theta \sin\theta \delta\theta \int_0^{2\pi} d\phi$$

$$= \frac{E\delta S}{2} \delta r \cos\theta \sin\theta \delta\theta$$

وبالتكامل مرة أخرى بالنسبة لجميع قيم (θ) يصبح المقدار :

$$\frac{E\delta S}{2} \delta r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta \, d\theta$$

$$= \frac{E\delta S}{4} \delta r$$

وبالتكامل مرة ثالثة بالنسبة إلى (r) من صفـــر إلى (C) حيث (C) هى سرعة الصوت أى المسافة التى ينتقل فيها الصوت فى الثانية الواحدة :

∴ الطاقة التى يستقبلها العنصر (δS) فى الثانية الواحدة من جميع الاتجاهات هى :

$$\frac{E\delta S}{4} \int_0^{C} dr$$

$$= \frac{1}{4} EC \, \delta S$$

وإذا كانت (a) هى معامل الإمتصاص

∴ الطاقة التى يمتصها العنصر (δS) فى الثانية الواحدة .

$$= \frac{1}{4} EC \, a \, \delta S$$

∴ معدل امتصاص الطاقة الصوتية لجميع السطوح التى يسقط عليها الصوت هى :

$$\frac{1}{4} EC \sum a\, \delta S$$

$$= \frac{1}{4} ECA$$

حيث :

$$A = \sum a\, \delta S$$

وإذا كانت (P) هى قدرة الصوت المنبعث من المصدر ، (E_{max}) هى الكثافه العظمى للطاقة .

$$\therefore \quad P = \frac{1}{4} E_{max} CA$$

$$\therefore \quad E_{max} = \frac{4P}{CA} \quad \cdots\cdots\cdots (66)$$

فى أى لحظة من بداية الصوت تنمو (E) بمعدل يتناسب مع مقدار زيادة (P) عن معدل الامتصاص عند هذه اللحظة .

فاذا كانت (V) هى حجم القاعة

∴ الطاقة الكلية داخل القاعة فى أى لحظة .

$$= EV$$

ومعدل نمو هذه الطاقة :

$$= \frac{d}{dt} (EV) = V \frac{dE}{dt}$$

ولكن معدل امتصاص الطاقة عند هذه اللحظة

$$= \frac{1}{4} \text{ ECA}$$

وحيث أن:

معدل نمو الطاقة فى الفاعة + معدل امتصاص الطاقة = معدل انبعاث الطاقة من المصدر :

$$\therefore V \frac{dE}{dt} + \frac{1}{4} ECA = P$$

$$\therefore \frac{dE}{dt} + \frac{CA}{4V} E = \frac{P}{V}$$

بوضع :

$$\frac{CA}{4V} = a$$

$$\therefore \frac{dE}{dt} + a E = \frac{4P}{CA} a$$

وبضرب المعادلة فى (e^{at})

$$\therefore \left(\frac{dE}{dt} + aE \right) e^{at} = \frac{AP}{CA} a e^{at}$$

$$\therefore \frac{d}{dt} \left(Ee^{at} \right) = \frac{4P}{CA} e^{at}$$

وبالتكامل

$$\therefore Ee^{at} = \frac{4P}{CA} e^{at} + K \quad .. \quad ... \quad (67)$$

حيث (K) ثابت التكامل .

(١) إذا كانت .

$$E = 0 \text{ when } t = 0$$

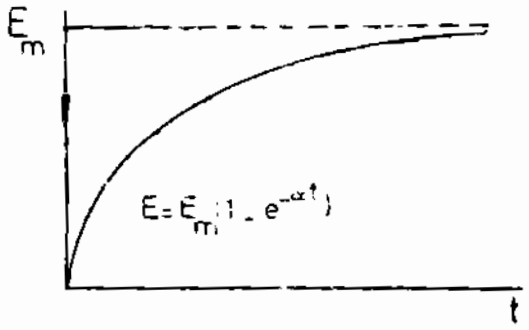
$$\therefore K = -\frac{4P}{CA}$$

$$\therefore E = \frac{4P}{CA}\left(1 - e^{-at}\right)$$

أى :

$$E = E_{max.}\left(1 - e^{-at}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (68)$$

ويوضح شكل(٨٥)المنحنى البيانى لهذه المعادلة وهو يبين كيف تنمو(E) مع الزمن ($E_{max.} = E_m$).



شكل (٨٥)

(٢) إذا حدث إمتناع للصوت عندما تصل (E) إلى ($E_{max.}$)

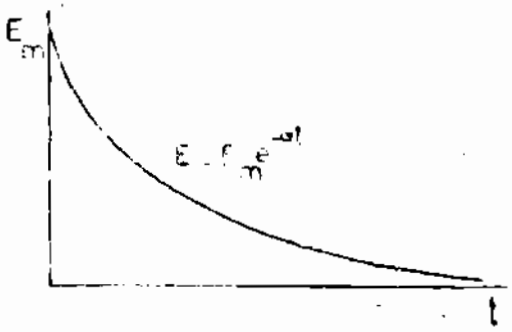
$$\therefore P = 0 \text{ at } t = 0$$

$$\text{when } E = E_{max.} = \frac{4P}{CA}$$

$$\therefore K = E_{max.}$$

$$\therefore E = E_{max.}\ e^{-at} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (71)$$

ويوضح شكل (٨٥) المنحنى البيانى لهذه المعادلة وهو يبين كيف تخامد (E) مع الزمن .



شكل (٨٥)

وحيث أن الزمن العيارى للانعكاسات المتكررة حسب تعريف سابين هو الزمن الذى تنقص خلاله شدة الصوت (أو طاقته) إلى واحد على مليون من شدته (أو طاقته) قبل قطع الصوت مباشرة .

$$\therefore \frac{E}{E_{max.}} = 10^{-6} \text{ when } t = T$$

وبالتعويض بذلك فى المعادلة (٦٨) :

$$\therefore E_{max.} \times 10^{-6} = E_{max.} \times e^{-aT}$$

$$\therefore e^{-aT} = 10^{-6}$$

$$\therefore aT = \log_e 10^6 = 2.3 \times 6$$

وحيث أن :

$$a = \frac{CA}{4V}$$

$$\therefore C = 340 \text{ metres/sec.}$$

$$\therefore T = \frac{4 \times 2.3 \times 6}{340} \times \frac{V}{A}$$

$$= \frac{0.16\ V}{A} \text{ seconds}$$

وتستخدم هذه المعادلة فى تصميم قاعات المحاضرات أو الموسيقى وذلك بحساب كل من ($A = \Sigma\ a\ S$) بحيث تعطى القيمة المطلوبة لزمن الانعكاسات المتكررة للمحاضرة أو الموسيقى . و بمعنى آخر اختيار الأثاث ومواد البناء وطلاء الجدران والأسقف بمواد لها معامل امتصاص مناسب .

فاذا كانت (T) كبيرة يمكن تقليلها بزيادة الامتصاص وإذا كانت (T) صغيرة يمكن زيادتها بتغير الأثاث أو طلاء الجدران بمواد أخرى لها معامل إمتصاص أقل .

١٢ - ٥ قياس معامل الامتصاص :

يمكن قياس معامل امتصاص الصوت بمعلومية زمن الانعكاسات المتكررة بقاس هذا الزمن أولا عند خلو القاعة من المواد المراد إيجاد معامل امتصاص الصوت لها . نفرض أن هذا الزمن هو (T_1) . يقاس زمن الانعكاسات المتكررة ثانية بعد وضع هذه المواد فى القاعة وليكن هذا الزمن هو (T_2) .

$$\therefore \frac{1}{T_1} = \frac{A}{0.16\ V} = \frac{\Sigma\ a\ S}{0.16\ V}$$

$$\text{، } \frac{1}{T_2} = \frac{\Sigma a\, S + {}_2 S_2}{0.16\ V}$$

حيث (a_2) هو معامل إمتصاص المواد ، (S_2) مساحة هذه المواد .
وبطرح المعادلتين :

$$\therefore \frac{a_2 S_2}{0.16V} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

ومنها يمكن معرفة (a_2).

كما يمكن قياس معامل امتصاص المواد باستخدام مصدرين صوتيين . فاذا كانت (P) هى قدرة المصدر الأول ، (P') قدرة المصدر الثانى .

فمن المعادلة (٦٦) :

$$E_{max.} = \frac{4P}{CA}$$

$$\text{، } E'_{max.} = \frac{4P'}{CA}$$

وإذا وصلت كثافة الطاقه لكل منهما إلى (E_0) خلال التخامد عندما ينعدم السمع للمصدر الأول بعد زمن قدره (T) وللمصدر الثانى بعد (T'):

$$\therefore E_0 = \frac{4P}{CA}\ e^{-aT}$$

$$\text{، } E_0 = \frac{4P'}{CA}\ e^{-aT'}$$

$$\therefore \frac{P'}{P} = e^{a(T-T')}$$

$$\therefore \quad a = \frac{\log_e p' - \log_e P}{T' - T}$$

ولـكن :

$$a = \frac{CA}{4V}$$

$$\therefore \quad A = \frac{4V \log_e \frac{P'}{P}}{C(T' - T)}$$

$$\text{or} \quad a S = \frac{4V \log_e \frac{P'}{P}}{C(T' - T)}$$

حيث (a) هو متوسط معامل الامتصاص .

$$\therefore \quad a = \frac{4V \log_e \frac{P'}{P}}{CS(T' - T)}$$

فاذا علمت النسبة (P'/P) وأمكن قياس (C , S , V) فان (a) يمكن قياسها حيث يمكن قياس (T' , T) باستخدام راسم الذبذبات (oscillograph)

ويعطى جدول (٤) معامل إمتصاص بعض مواد البناء والأثاث للترددات المختلفة .

جدول رقم (٤)

المادة	التردد (سيكل/ ثانية)		
	٢٥٠	٥٠٠	١٠٠٠ — ٢٠٠٠
الطلاء الجيرى	٠ر٠٢ — ٠ر٠٣	٠ر٠٣ - ٠ر٠٤	٠ر٠٣
طلاء المصيص	٠ر٠١ - ٠ر٠٢	٠ر٠١ — ٠ر٠٢	٠ر٠٢ — ٠ر٠٢
طوب غير مطلى	٠ر٠٣	٠ر٠٣	٠ر٠٥
الستائر الكثيفة	—	١ر٠ — ١ر٠	—
السجـــاد	٠ر١٥	٠ر٤٠	٩ر٦٥
كتل الخشب	٠ر٠٣	٠ر٠٦	٠ر١٠
الزجاج	—	٠ر٠٣	—

١٢ - ٦ شدة الصوت (Loudness)

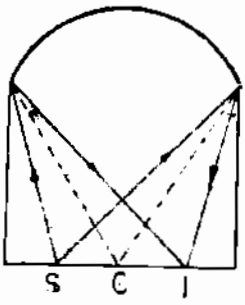
من العوامل التى تزيد من شدة الصوت عند المستمع ما يلى :

(١) الخواص الانعكاسية للجدران والأسقف والأرضية وكل العواكس التى يمكن أن تساعد على توزيع الصوت توزيعا منتظما بقدر الإمكان .

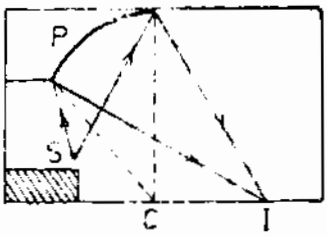
(٢) استخدام مكبرات الصوت

فالعواكس المستوية تساعد على زيادة شدة الصوت بينما العواكس المنحنية تسبب بعض المتاعب . ومن المستحسن تواجد عواكس مستوية خلف المتحدث لكى تساعد على إنعكاس الصوت صوب المستمعين . ومن العوامل التى تساعد أيضاً على زيادة شدة الصوت عند المستمعين ، الأسقف المنخفضة بشرط تعرج سطوحها حتى يمكن توزيع الصوت توزيعا منتظما فى القاعة .

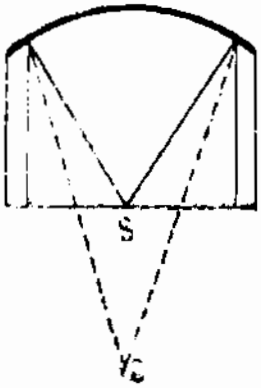
١٢ - ٧ تجمع الصوت بعد انعكاسه من الجدران والاسقف (Focusing)



شكل (٨٨)



شكل (٨٧)



شكل (٨٦)

يوضح شكلى (٨٧ ، ٨٨) مصدراً للصوت (S) يخرج منه الصـــوت وينعكس من سقف منحنى ويتجمع عند(I)، (C) هو مركز إنحناء السقف. فى هاتين الحالتين لايكون توزيع الصوت منتظما فى القاعة أما فى شكل (٨٩) فان الصوت يكون منتظم التوزيع بقدر الإمكان . ويمكن القول بأن التوزيع يكون أحسن ما يمكن إذا كان بعد مركز انحنـــاء السقف مساويا لضعف إرتفاع القاعة.

تمرين

أحسب زمن الإنعكاسات المتكررة داخل قاعة حجمها ٧٥٠٠٠ قدم٣ وبها ٦٠٠ مقعد (أ) إذا كانت القاعة خالية (ب) إذا كانت القاعة مليئة بالمستمعين، علما بأن :

السطح	المساحة أو العدد	معامل الإمتصاص
سقف مطلى بالمصيص	٥٠٠٠ قدم٢	٠ر٠٢
جدران مطلية بالمصيص	٦٠٠٠ قدم٢	٠ر٠٣
أرضية خشب	٥٠٠٠ قدم٢	٠ر٠٦
أبواب خشب	٢٠٠ قدم٢	٠ر٠٦
مقاعد منجدة	٤٠٠	الإمتصاص لكل مقعد = ١
مقاعد غير منجدة	٢٠٠	» » » = ١ر٠

اعتبر الإمتصاص لكل مستمع = ٥ر٤

(أ) إذا كانت القاعة خالية من المستمعين فان الامتصاص :

$$= \Sigma a S = (5000 \times 0.02) + (6000 \times 0.03) + (5000 \times 0.06)$$

$$+ (200 \times 0.06) + (400 \times 1) + (200 \times 0.1)$$

$$= 1012$$

$$\therefore T = \frac{0.05\ V}{\Sigma a S}$$

$$= \frac{0.05 \times 75000}{1012} = 3.7 \text{ sec.}$$

(ب) عند ملء القاعة فان الامتصاص يزداد بمقدار :

$$= 400\ (4.5 - 1) + 200\ (4.5 - 0.1)$$

$$= 2280$$

∴ الإمتصاص :

$$= 1012 + 2280 = 3292$$

$$\therefore\ T = \frac{0.05 \times 75000}{3292} = 1.14 \text{ sec.}$$