



الكهرباء





منشورات جامعة دمشق  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

# الكهرباء صوتيات

## Electroacoustics

الدكتور

رند القوطي

مدرس في قسم الشبكات ونظم  
المعلومات  
كلية الهندسة المعلوماتية

الدكتور

عصام عبود

أستاذ في قسم هندسة الالكترونيات  
والاتصالات  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

١٤٣٤-١٤٣٣  
م٢٠١٢-٢٠١١

جامعة دمشق:



# الفهرس

١٥	المقدمة
١٧	١- الفصل الأول: الخصائص الفيزيائية الأساسية للصوت
١٨	١-١ الكميات الصوتية
٢٣	٢-١ المعادلة الموجية للموجة الصوتية المستوية
٣١	٣-١ الموجات الكروية، الإشعاع الصوتي
٣٧	٢-الفصل الثاني: خصائص السمع والإدراك الحسي للصوت
٣٨	١-٢ السمع
٣٩	١-١-٢ جهارة الصوت
٤٣	٢-١-٢ طبقة الصوت
٤٤	٣-١-٢ الأوكاف
٤٥	٤-١-٢ ظاهرة التقبيع
٤٦	٥-١-٢ ظاهرة الصدى
٤٧	٦-١-٢ الصوت الجسم
٤٧	٢-٢ الإدراك الحسي السمعي
٥١	٣-الفصل الثالث: الممانعة الميكانيكية ومحولات الطاقة الكهرومغناطيسية
٥١	١-٣ مقدمة
٥٢	٢-٣ المماطلة الكهروميكانيكية

٥٢	١-٢-٣ الممانعة الميكانيكية
٥٧	٢-٢-٣ الممانعة الصوتية
٥٨	٣-٢-٣ الممانعة الصوتية النوعية
٥٩	٤-٢-٣ العناصر الصوتية
	١-٤-٢-٣ ممانعة الدخل الميكانيكية لأنبوب ينتهي
٥٩	بمانعة مسدودة
	٢-٤-٢-٣ ممانعة الدخل الميكانيكية لأنبوب ينتهي
٦٣	بسادة صلدة
٦٨	٣-٤-٢-٣ ممانعة الدخل الميكانيكية لأنبوب مفتوح النهاية
٧١	٥-٢-٣ تحويل الممانعة الصوتية نتيجة لتغير سطح المقطع
٧٤	٦-٢-٣ رنانة هيلموليتس
٧٧	٣-٣ الأسس النظرية لمولات الطاقة
٧٨	١-٣-٣ مولات الطاقة ذات الناقل المتحرك
٨١	٢-٣-٣ مولات الطاقة ذات الصفيحة الحديدية المتحركة
٨٣	٣-٣-٣ مولات الطاقة المكثفية
٨٥	٤-٣-٣ مولات الطاقة البيزو كهربائية
٨٧	٤-الفصل الرابع: الميكروفونات (المسماعات)
٨٨	٤-١ تأثيرات الانبعاث على الميكروفون
٩٠	٤-٢ خصائص الميكروفونات

٩٠	٤-٢-١ حساسية الميكروفون
٩٢	٤-٢-٢ الاستجابة الترددية
٩٣	٤-٢-٣ الخصائص الاتجاهية
٩٤	٤-٢-٤ الضجيج الذائي للميكروفون
٩٤	٤-٢-٥ المدى الديناميكي
٩٥	٤-٢-٦ الممانعة الداخلية للميكروفون
٩٥	٤-٣-١ تصنیف الميكروفونات
٩٥	٤-٣-٢ الميكروفونات المستجيبة للضغط
٩٧	٤-٣-٣ الميكروفونات الترکیبیة المستجيبة للضغط ودرج
٩٩	الضغط
١٠٦	٤-٤-١ أنواع الميكروفونات
١٠٦	٤-٤-٢ الميكروفون الكهروديناميكي ذو الملف المتحرك
١٠٩	٤-٤-٣ الميكروفون الشريطي
١١١	٤-٤-٤ الميكروفون الكهروستاتيكي
١١٦	٤-٤-٥ الميكروفون البيزو كهربائي أو الكريستالي
١١٦	٤-٤-٦ الميكروفون الكربوني
١١٨	٤-٥-١ أنواع خاصة من الميكروفونات
١١٨	٤-٥-٢ الميكروفون ذو الملقظ والميكروفون الرقبي

١١٩	٤-٥-٤ الميكروفون الحَلْقِي
	٤-٥-٣ الميكروفونات المخصصة للآلات الموسيقية ذات
١٢٠	الاستطاعة الصوتية الضعيفة
١٢٠	٤-٥-٤ الميكروفون الحدودي
١٢٢	٦-٤ توصيل الميكروفونات
١٢٣	٥- الفصل الخامس: المجاهير
١٢٤	١-٥ المواصفات الفنية للمجاهير
١٢٤	١-١-٥ الممانعة الكهربائية للمجهاز
١٢٤	٢-١-٥ الاستطاعة القصوى
١٢٥	٣-١-٥ مردود المجهاز
١٢٦	٤-١-٥ حساسية المجهاز
١٢٦	٥-١-٥ الاستجابة الترددية
١٢٧	٦-١-٥ الاستجابة الاتجاهية
١٢٨	٢-٥-٥ المجهاز الكهربوديناميكي ذو الملف المتحرك
١٣٧	٣-٥ أنواع المجاهير
١٣٧	١-٣-٥ خصائص تركيب المجاهير الأحادية في بافلات
١٤١	٢-٣-٥ خصائص الاستجابة الترددية للمجهاز الأحادي
١٤٤	٣-٣-٥ خصائص البافلات متعددة المجاهير
١٤٦	٤-٣-٥ مصفوفات المجاهير

١٤٨	٥-٣-٥ الأبواق
١٥٣	٦- الفصل السادس: نظم تقوية الصوت
١٥٤	٦- المطلبات الأساسية لنظم تقوية الصوت
١٥٥	٦- القيم المميزة لنظام تقوية الصوت
١٥٦	٦-٢-٦ الكسب الصوتي المطلوب
١٥٧	٦-٢-٦ التغذية الخلفية الصوتية
١٦٠	٦-٢-٦ الكسب الصوتي الأقصى أو الكامن
١٦٢	٦- خصائص النظم الداخلية لتقوية الصوت
١٦٣	٦-٣-٦ معاملات الانعكاس و الامتصاص
١٦٥	٦-٣-٦ خصائص الانعكاس والأمplitود الرنينية في القاعات
١٦٨	٦-٣-٦ ظاهرة التردد
١٧١	٦-٣-٦ المسافة الحرجية
١٧٣	٦- اختيار أماكن تركيب المجاهير في المناطق المغلقة
١٧٥	٦-٤-٦ قاعات الاستماع
١٧٧	٦-٤-٦ الغرف المستطحه
١٧٩	٦-٤-٦ الغرف عالية الضجيج
١٨٠	٦- بعض خصائص النظم الخارجية لتقوية الصوت
١٨١	٦- اختيار أماكن تركيب المجاهير في المناطق المفتوحة
١٨٥	٧- الفصل السابع: النموذج الرقمي لتمويل الإشارة الكلامية

١٨٥	١-٧ مصادر الصوت الطبيعية
١٨٦	٢-٧ جهاز توليد الكلام
١٩٠	٣-٧ خصائص انتشار الموجة الصوتية في جهاز توليد الكلام
١٩٤	٤-٧ إشارة الاستشارة
١٩٥	٥-٧ تثيل إشارة الكلام
١٩٥	٦-٥-٧ الشكل الموجي للضغط
١٩٦	٧-٥-٧ طيف الاستطاعة
١٩٩	٣-٥-٧ التمثيل المختلط السبيكتروغرام
٢٠٠	٦-٧ غوذج توليد الكلام
٢٠٥	٨- الفصل الثامن: مرّمات الكلام
٢٠٦	١-٨ التبئر الخطّي
٢٠٩	٢-٨ طريقة الترابط الذاتي
٢١٣	١-٢-٨ طريقة التغایر المشترک
٢١٦	٣-٨ خصائص مرّمات الكلام
٢٢٠	٤-٨ أنواع مرّمات الكلام
٢٢١	١-٤-٨ مرّمات الموجة
٢٢٢	١-٤-٨ مرّمز التعديل النبضي الترميزی
٢٢٤	٢-٤-٨ مرّمات التعديل النبضي الترميزی اللوغاريتمي

### ٣-٤-١ مرمز التعديل النبضي الترميزى التفاضلى

٢٢٨	التكيف
٢٣٥	٤-٤-٢ مرمزات التبؤ الخطى
٢٣٨	٤-٣-٣ مرمزات التحليل والتركيب
٢٤٠	٤-٣-١ مرمز البتات المستشاره المنتظمه
٢٤٢	٤-٣-٢ مرمز التبؤ الخطى ذي الإشارة الترميزية
٢٤٣	المستشاره
٢٥١	٥-٨ المرمزات المعيارية
٢٥١	٩ - الفصل التاسع: الضغط الرقمي للإشارة السمعية
٢٥١	١-٩ الإشارة السمعية الرقمية
٢٥٤	٢-٩ مرمز التعديل النبضي الترميزى الموجاريتمي السمعي
٢٥٥	٣-٩ مرمز التعديل النبضي الترميزى التفاضلى التكيف السمعي
٢٥٥	٤-٩ المرمز السمعي الرقمي وفق معيار <b>MPEG</b>
٢٥٦	٤-١-١ التقنيات اللازمه لرمزات الإشارة السمعية
٢٥٧	٤-١-١-١ ظاهره التقبي السمعي
٢٥٩	٤-١-٢-١ مرمزات الإدراك الحسي
٢٦١	٤-١-٣-١ المرمزات التردديه
٢٦٧	٤-١-٤-٤ ظاهره الصدى المسبق
٢٦٨	٤-٢-٤-٢ المرمز السمعي الرقمي <b>MPEG-1</b>

## ١- الكميات الصوتية

إن أبسط الموجات الصوتية هي الموجات الصوتية الجيبية التي يتحدد الإحساس السمعي بها بترددتها و مطامها. وعندما يهتز منبع الصوت حبيباً، تنشر عملية الاهتزاز خلال مدة الدور period مسافة تساوي طول الموجة wavelength وفق العلاقة:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

حيث  $c$  سرعة انتشار الصوت sound speed،  $T$  مدة الدور،  $f$  التردد Frequency room المادي وحالته الفيزيائية، وسيبلغ في الهواء عند درجة حرارة الغرفة standard temperature  $(\theta = 20^{\circ}\text{C})$  و تحت الضغط الجوي المعياري atmospheric pressure  $(P_{st} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa})$  القيمة  $344 \text{ m/s}$  أو تقريرياً  $340 \text{ m/s}$ .

سوف نعد أن أدنى تردد سمعي  $f_{min} = 20 \text{ Hz}$  ، و تكون  $\lambda$  عنده عظمى وتساوي:

$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} \approx \frac{340}{20} = 17 \text{ m}$$

بالمقابل، سوف نفترض أن أعلى تردد سمعي  $f_{max} = 20 \text{ kHz}$  ، و تكون  $\lambda$  عنده صغرى وتساوي:

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \approx \frac{340}{20000} = 0.017 \text{ m} = 1.7 \text{ cm}$$

على هذا النحو، يكون مدى أطول الموجات الصوتية المسماومة بين  $17\text{m}$  و  $1.7\text{cm}$ .

ينجم عن انتشار الموجة الصوتية في الهواء اهتزاز جسيماته particles وضع التوازن، مما يؤدي إلى ظهور طبقات تضاغط compressions وطبقات تخلخل rarefactions، و من ثم يتغير ضغط الهواء وكثافته تبعاً للمسافة (بعد عن منبع الاهتزاز) و تبعاً للزمن.

يقصد بالجسيمات particles في الصوتيات العناصر الحجمية volume elements، والتي يمكن أن نفترض كل منها بشكل مكعب مثلاً، و نفترض أبعاده كبيرة لدرجة كافية بحيث يحتوي على ملايين الجزيئات molecules (وبحيث تكون أصغر كثيراً جداً من طول الموجة) على أن تكون أيضاً صغيرة لدرجة كافية بحيث يمكن اعتبار كل المتغيرات الصوتية (كالضغط والسرعة الاهتزازية) ثابتة تقريباً ضمنه.

سوف نعبر عن الضغط اللحظي للهواء بوجود الاضطراب الناجم عن الموجة الصوتية على النحو:

$$P_{tot} = P_0 + p \quad (1-2)$$

نرمز بـ  $P_0$  للضغط الجوي الساكن أو الاستاتيكي static atmospheric pressure، بينما نرمز بـ  $p$  للفرق بين الضغط اللحظي  $p_{tot}$  (الضغط الكلي total) والضغط الاستاتيكي  $P_0$ . ويسمى  $p$  ببساطة الضغط الصوتي sound pressure، وهو يمثل المركبة المتناثرة للضغط اللحظي.

نعبر بالمثل عن الكثافة اللحظية للهواء في منطقة انتشار الموجة الصوتية على النحو:

$$\rho_{tot} = \rho_0 + \rho \quad (1-3)$$

نرمز بـ  $\rho_0$  للكثافة الاستاتيكية أو التوازنية equilibrium density، فيما نرمز بـ  $\rho$  للفرق بين الكثافة اللحظية أو الكلية  $\rho_{tot}$  والكثافة الاستاتيكية، بحيث تمثل  $\rho$  المركبة المتغيرة أو المتساوية للكثافة اللحظية.

تناسب  $\rho_{tot}$  طرداً مع النسبة  $\frac{P_{tot}}{T_k}$ ، حيث  $T_k$  درجة الحرارة المطلقة بوحدة كلفن. ويتبين أنه في الهواء:

$$\rho_{tot} = 1.29 \times \frac{273}{T_k} \times \frac{P_{tot}}{P_{st}} \quad (1-4)$$

على أن نعبر عن الضغط بواحدة الباسكال وعن الكثافة بواحدة  $\text{kg/m}^3$  نكتب بالمثل:

$$\rho_0 = 1.29 \times \frac{273}{T_k} \times \frac{P_0}{P_{st}} \quad (1-5)$$

نجد أن قيمة  $\rho_0$  عند درجة حرارة الغرفة  $\theta = 20^\circ\text{C}$  (أي  $T_k = 293^\circ\text{K}$ ) وتحت الضغط الجوي المعياري  $P_{st} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  هي:

$$\rho_0 = 1.29 \times \frac{273}{293} = 1.20 \text{ kg/m}^3 \quad (1.6)$$

تعطى سرعة انتشار الصوت بالعلاقة:

$$c = \sqrt{\frac{B_a}{\rho_0}} \quad (1-7)$$

حيث  $B_a$  معامل المرونة الحجمي الأديبatic Adiabatic bulk modulus ويعطى للغازات بالعلاقة:

$$B_a = \gamma P \quad (1-8)$$

ترمز  $\gamma$  للثابت الأدياباتي المعياري عن نسبة الحرارتين النوعيتين ratio of heat capacities (نسبة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية عند حجم ثابت). و في حالة الهواء و الغازات ثنائية الذرات diatomic gases عموماً تكون  $\gamma = 1.40$ . و من ثم تكون قيمة  $B_a$  للهواء تحت الضغط المعياري:

$$B_a = 1.40(1.013)(10^5) = 1.42 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (1-9)$$

تعطى سرعة انتشار الصوت عند  $T = 20^\circ\text{C}$  و  $P = P_0$  وفق المعادلات (1-6)، (1-7) و (1-8) تساوي:

$$c = \sqrt{\frac{B_a}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{1.42(10^5)}{1.20}} \approx 344 \text{ m/s} \quad (1-10)$$

يؤدي تغير  $\rho_0$  تبعاً لدرجة الحرارة وفق (1-4) إلى تغير سرعة الصوت وفق العلاقة:

$$c = 331.4 \sqrt{\frac{T_k}{273}} \approx 331.4 + 0.607\theta \quad (1-11)$$

بتطبيق هذه العلاقة عند درجة حرارة الغرفة  $T = 20^\circ\text{C}$  نجد أيضاً أن  $c \approx 344 \text{ m/s}$ .

نختتم بغير سرعة الصوت تبعاً لدرجة الحرارة في بعض تطبيقات النظم الصوتية الخارجية Outdoor Sound Systems، لأن ذلك التغير يمكن أن يؤثر على كيفية انتشار الموجة الصوتية في المناطق المكشوفة (مناطق الهواء الطلق Open air areas).

يتبيّن أنه في حالة الموجة الصوتية المستوية ترتبط القيمة اللحظية للضغط الصوتي  $p(t)$  مع القيمة اللحظية لسرعة جسيمات الوسط المهتر particle speed أو السرعة الاهتزازية  $u(t)$  بالعلاقة البسيطة التالية:

$$u(t) = \frac{p(t)}{\rho_0 c} \quad (1-12)$$

يسمى الجداء  $\rho_0 c$  في العلاقة السابقة الممانعة المميزة characteristic impedance أو الممانعة الصوتية النوعية Specific acoustic impedance. وفي حالة الهواء نجد أن:

$$\rho_0 c \approx 1.2(340) \approx 410 \text{ kg/m}^2 \text{s} \quad (1-13)$$

من الكميات الفيزيائية الأخرى التي تهمنا في الصوتيات شدة الصوت Sound intensity، ويرمز لها  $I$ . وهي تعرف بأنها عبارة عن معدل انتقال الطاقة الصوتية (أو الاستطاعة الصوتية) من خلال واحدة السطح العمودي على خط انتشار الموجة الصوتية . ويعبر عن  $I$  بوحدة الواط على المتر المربع ( $\text{W/m}^2$ ). ويتبين أنه في حالة الموجة الصوتية المستوية أو الكروية تعطى  $I$  العلاقة:

$$I = \frac{p_e^2}{\rho_0 c} \quad (1-14)$$

حيث  $p_e$  القيمة الفعالة effective value أو قيمة rms للضغط الصوتي. يمكن أن نكتم أيضاً بكثافة الطاقة Energy Density للموجة الصوتية، ويقصد بها الطاقة الصوتية في واحدة الحجم (بوحدة الواط على المتر المكعب  $\text{W/m}^3$ ). وتعطى كثافة الطاقة بالعلاقة:

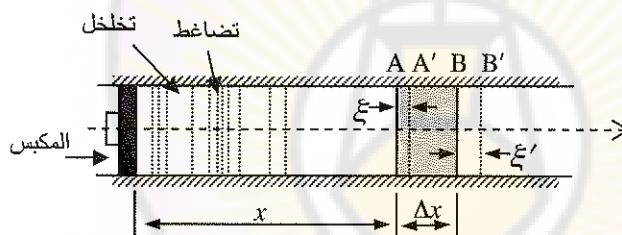
$$w = \frac{I}{c} \quad (1-15)$$

نكتب وفق هذه العلاقة و العلاقة (1-13) لحالة الموجة الصوتية المستوية أو الكروية:

$$w = \frac{I}{c} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c^2} \quad (1-16)$$

## ٢-١ المعادلة الموجية للموجة الصوتية المستوية Plane Wave

يبين الشكل (1-1) إحدى طرق إصدار الموجات الصوتية المستوية. وتمثل الخطوط الشاقولية الأوضاع اللاحظية لجسيمات الهواء في الوسط المهتز، بحيث تمثل تلك الخطوط سطوحًا شاقولية تتساوى بتباعدتها spacings في حالة السكون وتتقارب في حالة التضاغط بينما تبتعد في حال التخلخل. ونفترض في الشكل (1-1) أن الموجة الصوتية تنتج عن حركة مكبس يزاح عن وضع توازنه يمينًا ويسارًا بحركة اهتزازية في بداية أنبوب ذي مقطع ثابت وذي جدران ثابتة لا تهتز بتأثير الموجة الصوتية، كما نفترض أن الأنابيب غير متنه الطول نظرياً (أي طويل لدرجة كافية عملياً). وإذا كانت أبعاد المكبس أصغر كثيراً من طول الموجة المنتشرة في الأنابيب، تعدّ هذه الموجة مستوية.



الشكل (1-1): تمثيل إصدار موجات صوتية مستوية داخل أنبوب غير متنه الطول

لندرس طبقة هوائية  $AB$  يبعد وجهها الأيسر  $A$  عن سطح المكبس في وضع التوازن مسافة  $x$  ويبعد وجهها الأيمن  $B$  عن سطح المكبس في وضع التوازن أيضاً مسافة  $(x + \Delta x)$ . وإذا رمنا لسطح مقطع الأنابيب  $S$ ، فإن حجم الطبقة يساوي:

$$\Delta V = S \cdot \Delta x \quad (1-17)$$

تكون كتلة الطبقة المفترضة AB

$$\Delta m = \rho_0 \cdot \Delta V = \rho_0 \cdot S \cdot \Delta x \quad (1-18)$$

حيث  $\rho_0$  كثافة الهواء في وضع التوازن. وسنفترض أنه بعد حدوث الاضطراب الناتج عن الحركة الاهتزازية للمكبس أصبح الوجه الأيسر للطبقة المذكورة في الوضع 'A' وأن الوجه الأيمن أصبح في الوضع 'B'. وسوف نرمز للانزياح بين الوضعين 'A' و 'B' بـ  $\xi$ . ومن ثم نعبر عن الانزياح بين الوضعين 'B' و 'B' +  $\xi$  =  $\xi'$ ، حيث  $\xi'$  الفرق بين الانزياحين  $\xi'$ . ويتغير حجم الطبقة نتيجة حدوث الاضطراب بمقدار:

$$\delta(\Delta V) = S \cdot [\xi' - \xi] = S \cdot \Delta \xi = S \cdot \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \cdot \Delta x \quad (1-19)$$

بحسب (1-19) و (1-17) أن:

$$\frac{\delta(\Delta V)}{\Delta V} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (1-20)$$

سوف نطبق قانون المرونة (قانون هوك) لحالة حفظ غاز ضمن وعاء حجمه  $\Delta V$ ، بحيث إذا كان الضغط الأصلي المؤثر على الغاز هو  $P_0$ ، وإذا أضيف له فيما بعد ضغط إضافي  $\delta p_{tot}$ ، فإن هذا يؤدي إلى نقصان الحجم بمقدار  $\delta(\Delta V)$  وفق العلاقة:

$$\delta p_{tot} = -B \frac{\delta(\Delta V)}{\Delta V} \quad (1-21)$$

حيث  $B$  معامل المرونة الحجمي .Bulk Modulus

يُعد الانضغاط الحجمي عند دراسة انتشار الموجات الصوتية عملية أдиاباتية adiabatic (أي عملية لا يحدث فيها اكتساب أو فقدان للطاقة الحرارية)، ولذلك سوف نطبق العلاقة (1-20) أدناه باستخدام المعامل الحجمي الأدياباني  $B_a$ ، وهو

يعطى للغازات بالعلاقة (1-8)، وقيمه للهواء  $1.42 \times 10^5 \text{ Pa}$ . واعتماداً على العلاقاتين (1-20) و (1-21) نستنتج أن الضغط الصوتي المطبق على الطبقة الهوائية يساوي:

$$p = -B_a \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (1-22)$$

يتغير الانزياح اللحظي  $\xi$  وكذلك  $(\xi' + \Delta\xi + \xi'' = \xi')$  بعد حدوث الاضطراب بتأثير الموجة الصوتية تغيراً مستمراً، فيكون بحسبات الهواء في الوجه  $A'$  سرعة تساوي  $\frac{\partial \xi}{\partial t}$  وتسارع يساوي  $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$ ، بينما تكون لها في الوجه  $B'$  سرعة تساوي  $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$  وتسارع يساوي  $\frac{\partial^2 \xi'}{\partial t^2}$ . وتحصر قيمتا السرعة المتوسطة  $u_{av}$  والتسارع المتوسط  $a_{av}$  بين سرعتي وتسارعي الوجهين  $A'$  و  $B'$ . وإذا جعلنا  $\Delta x \rightarrow 0$ ، فإن  $u_{av}$  تؤول إلى السرعة اللحظية:

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (1-23)$$

يؤول  $a_{av}$  أيضاً إلى التسارع اللحظي:

$$a = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (1-24)$$

نشتق المعادلة (1-22) بالنسبة للزمن فنجد أن:  $\frac{\partial p}{\partial t} = -B_a \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t}$  ومن ثم:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -B_a \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1-25)$$

يصبح الضغط في المستوى  $A'$  بعد حدوث الاضطراب  $P_0 + p$  (حيث  $P_0$  الضغط الجوي الاستاتيكي) و  $p$  الضغط الإضافي الناتج عن الاضطراب، أي الضغط الصوتي)

بينما يصبح الضغط في المستوى  $B'$  بعد حدوث الاضطراب  $P_0 + p + \Delta p$  ، ومن ثم تصبح الطبقة الهوائية المختارة تحت تأثير قوة تساوي:

$$\Delta F = (P_0 + p) \cdot S - (P_0 + p + \Delta p) \cdot S = -S\Delta p \quad (1-26)$$

تكتسب الطبقة الهوائية ذات الكتلة  $\Delta m$  بتأثير القوة  $\Delta F$  تسارعاً متوسطاً يساوي وفق قانون نيوتن الثاني:

$$a_{av} = \frac{\Delta F}{\Delta m} \quad (1-27)$$

بتعميض العلاقات (1-26) و (1-27) في العلاقة السابقة، نجد أن:

$$a_{av} = \frac{\Delta F}{\Delta m} = \frac{-S \cdot \Delta p}{\rho_0 \cdot S \cdot \Delta x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (1-28)$$

عندما يجعل  $\Delta x \rightarrow 0$  يؤول  $a_{av}$  إلى التسارع اللحظي  $a$ ، فنكتب:

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-29)$$

نعرض هنا العلاقة (1-22)، فنحصل على المعادلة التفاضلية:

يمكن أن نكتب بعد تعميض (1-7):

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (1-30)$$

تسمى هذه العلاقة المعادلة الموجية wave equation للانزياح  $\xi$ ، وتمثل فيها  $c$  سرعة انتشار الموجة (سرعة الصوت).

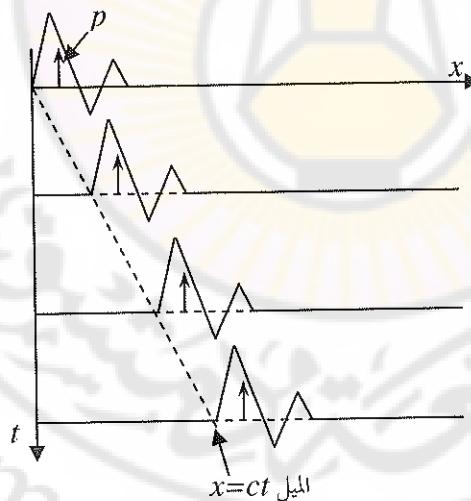
تتيح العلاقات السابقة التوصل إلى معادلة موجية مماثلة بدلالة الضغط الصوتي  $p$  أو سرعة الجسيمات  $u$  بدلاً من  $\psi$ . ونكتب بدلالة  $p$ :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1-31)$$

يمكن كتابة الحل العام للمعادلة الموجية (1-30) على النحو التالي:

$$p(x, t) = F_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + F_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (1-32)$$

حيث  $F_1$  و  $F_2$  رمزان عامان لتابعين يمكن التعبير عنهم انتلاقاً من معرفة التابع الذي توصف به حركة منبع الاهتزاز (المكبس في الحالة المفترضة). ويمثل  $F_1$  الموجة المسافرة travelling wave باتجاه يوافق حركة منبع الاهتزاز وبسرعة انتشار تساوي سرعة الصوت  $c$ ، بينما يمثل  $F_2$  الموجة المسافرة بالاتجاه المعاكس بالسرعة نفسها. ويبين الشكل (1-2) رسمًا توضيحيًا لحركة الموجة المسافرة بسرعة  $c$ .



الشكل (1-2): رسمًا توضيحيًا لحركة الموجة المسافرة بسرعة  $c$ .

يمكن أن تطبق المعادلة (1-32) من أجل أي منبع اهتزاز. و سنفرض أن المنبع يهتز جيّساً و سنعتبر عن اهتزازه بتابع أسي عقدي وفق المعادلة:

$$p(0,t) = \hat{p}(0) \exp(j\omega t) \quad (1-33)$$

حيث  $\omega$  التردد الزاوي و  $\hat{p}(0)$  المطال العقدي للضغط الصوتي الناتج عن المنبع (أي الناتج عند  $x = 0$ ).

يفهم ضمناً أنه ينبغيأخذ الجزء الحقيقي للتتابع الأسي العقدي عند كتابة الصيغة النهائية للضغط الصوتي الفعلي. ويتبيّن أنه وفق العبارة (1-33) يمكن كتابة حل المعادلة الموجية (1-31) وفق الحل العام (1-32) كما يلي:

$$p(x,t) = \hat{A} \exp j\omega(t - \frac{x}{c}) + \hat{B} \exp j\omega(t + \frac{x}{c}) \quad (1-34)$$

يمثل الحد الأول في هذه العبارة موجة مسافرة بالاتجاه الموجب Positive travelling wave (من اليسار إلى اليمين في الشكل (1-1)), بينما يمثل الحد الثاني موجة مسافرة بالاتجاه السالب negative travelling wave (وهي يمكن أن تنتج في الأنابيب المحدودة الطول عند حدوث انعكاس عن نهاية الأنبوب). ومن ثم يوافق تأويلنا للعبارة (1-34) تأويلنا للحل العام (1-32).

يمكن إعادة كتابة المعادلة (1-34) كما يلي:

$$p(x,t) = \hat{A} \exp j(\omega t - kx) + \hat{B} \exp j(\omega t + kx) \quad (1-35)$$

نرمز هنا بـ  $k$  للعدد الموجي wave number

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-36)$$

حيث  $\lambda$  طول الموجة (و هو يمثل المسافة التي تجتازها الموجة خلال دورة الاهتزاز  $T = \frac{1}{f}$ ).

يفيد إعادة كتابة المعادلة (1-35) على النحو:

$$p(x,t) = \hat{A} \exp j2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \hat{B} \exp j2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) \quad (1-37)$$

توضح هذه العبارة أن  $p(x,t)$  تابع دوري للزمن بدور  $T$ ، كما أنه تابع دوري للمسافة، و «مسافته الدورية» تساوي طول الموجة  $\lambda$ .

يبين أنه إذا كان الأنوب غير متناء الطول، تنتشر فيه فقط موجة مستوية متقدمة progressive plane wave، أي موجة مسافرة بالاتجاه الموجب، بحيث يعتبر  $\hat{B} = 0$  في المعادلات السابقة (1-37) و (1-34). ولذا يمكن إعادة كتابة المعادلة (1-35) مثلاً على النحو:

$$p(x,t) = \hat{A} \exp j(\omega t - kx) \quad (1-38)$$

يفيد أن نستخدم بدلاً من هذه المعادلة في بعض الحالات المعادلة التالية:

$$p(x,t) = \hat{p}(x) \exp(j\omega t) \quad (1-39)$$

حيث:

$$\hat{p}(x) = \hat{A} \exp(-j k x) \quad (1-40)$$

من الواضح أن المعادلة (1-33) تتوافق مع المعادلة (1-39) من أجل  $x = 0$  (أي عند سطح المكبس) بحيث يكون وفق المعادلة (1-40):

$$\hat{p}(0) = \hat{A} \quad (1-41)$$

يمكن أن نحصل من المعادلة (1-38) على العبارة التالية للسرعة الاهتزازية أو سرعة الجسيمات  $u(x,t)$ ، بتطبيق المعادلة (1-24) :

$$u(x,t) = \frac{\hat{A}}{\rho_0 c} \exp j(\omega t - kx) \quad (1-42)$$

نستنتج من المعادلتين (1-38) و (1-42) أن الضغط وسرعة الجسيمات متافقان بالطور، ونسبتهما ثابتة:

$$\frac{p(x,t)}{u(x,t)} = \rho_0 c \quad (1-43)$$

على هذا النحو ، تكون قد أثبتنا العلاقة (12-1). ويسمى الجداء  $\rho_0 c$  كما سبق أن ذكرنا الممانعة المميزة أو الممانعة الصوتية النوعية، وقيمتها للهواء هي تقريرياً . (1-13) وفق المعادلة  $410 \text{ kg/m}^2\text{s}$

بما أن  $\xi_u = \frac{\partial \xi}{\partial t}$  ، لذلك نستنتج بكمالة المعادلة (1-42) أن:

$$\xi(x,t) = \frac{u(x,t)}{j\omega} = \frac{\hat{A}}{j\omega\rho_0 c} \exp j(\omega t - kx) \quad (1-44)$$

مقارنة هذه المعادلة مع كل من المعادلتين (1-38) و (1-42) نستنتج أن كلاً من الضغط و سرعة الجسيمات يتقدم  $-90^\circ$  عن الانزياح اللحظي  $(x,t)\xi$  .

يمكن أن نعبر عن  $(x,t)u$  بالعلاقة التالية على غرار (1-39) بالنسبة لـ

$$u(x,t) = \hat{u}(x) \exp(j\omega t) \quad : p(x,t) \quad (1-45)$$

حيث

$$\hat{u}(x) = \frac{\hat{p}(x)}{\rho_0 c} = \frac{\hat{A}}{\rho_0 c} \exp(-jkx) \quad (1-46)$$

$$\hat{u}(0) = \frac{\hat{p}(0)}{\rho_0 c} = \frac{\hat{A}}{\rho_0 c} \quad (1-47)$$

يمكن أن نعبر عن شدة الصوت للموجة المستوية بالعلاقة التالية التي تقابل (1-14):

$$I = \frac{p_e^2}{\rho_0 c} = \rho_0 c u_e^2 = \rho_0 c p_e u_e \quad (1-48)$$

حيث  $u_e$  القيمة الفعالة أو قيمة rms لسرعة الجسيمات.

يمكن أن نعبر أيضاً عن كثافة الطاقة للموجة المستوية بالعلاقة التالية التي تقابل (1-16):

$$w = \frac{I}{c} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c^2} = \rho_0 u_e^2 \quad (1-49)$$

### ٣-١ الموجات الكروية، الإشعاع الصوتي Radiation

يمكن أن نمثل النبع النظري للموجات الكروية بكرة تتبع و تتكشم باستمرار ، بحيث يتغير نصف قطرها  $a$  بمقدار صغير قدره  $\Delta a$ . وبافتراض أن النبع الكروي يهتر جيبياً، يمكن أن نعبر عن تغير نصف القطر كتابع أسي عقدي:

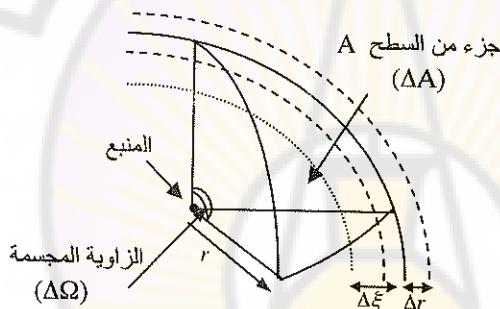
$$a = a_0 + \Delta a \exp(j\omega t) \quad (1-50)$$

يتم الحصول على معادلة الموجة الصوتية الكروية بالطريقة نفسها التي استخدمناها أعلى حالة الموجة المستوية المنتشرة في أنبوب يتحرك داخله مكبس، وذلك بتطبيق قانون نيوتن الثاني وقانون المرونة على طبقة هوائية رقيقة محصورة بين سطحين كرويين

نرمـز لنصف قطر أحدهما بـ  $r$ ، ولنصف قطر الآخر بـ  $r + \Delta r$  كما في الشكل (3-1).

سنقوم باستنتاج المعادلة الموجية التي تصف انتشار الموجة الصوتية الناتجة عن المنبع الكروي كما في الشكل (3-1) بافتراض أن الخصائص الصوتية جميعها  $(\xi, p, u)$  تابعة لتحول واحد و هو المسافة  $r$ . وفي هذه الحالة تكتب المعادلة الموجية للضغط على النحو الآتي:

$$\frac{\partial^2(pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2(pr)}{\partial t^2} \quad (1-51)$$



الشكل (3-3): تمثيل إصدار الموجات الصوتية الكروية في الفضاء.

نلاحظ أن هذه المعادلة تشبه المعادلة الموجية (1-16) للموجة الصوتية المستوية بعد تبديل  $p$  بـ  $pr$  ومن ثم يمكن كتابة الحل العام للمعادلة الموجية في حالة الموجة الكروية على النحو:

$$r p(r,t) = F_1(ct - r) + F_2(ct + r) \quad (1-52)$$

أي أن:

$$p(r,t) = \frac{1}{r} [F_1(ct - r) + F_2(ct + r)] \quad (1-53)$$

يمثل التابع  $F_1(ct - r)$  الموجة المسافرة التي يصدرها المنبع الصوتي ويمثل  $F_2(ct + r)$  الموجة المسافرة المنتشرة بالاتجاه المعاكس وقد تنتهي عن ظواهر انعكاسية.

يمكن أن نكتب حالة منبع كروي جيبي في وسط غير محدود (حيث لا تحدث

أي انعكاسات للموجة):

$$p(r,t) = \frac{\hat{A}}{r} \exp[j(\omega t - kr)] \quad (1-54)$$

إذا افترضنا أن الموجة الكروية تنتهي عن منبع نقطي، فكل سطح كروي يبعد مسافة  $r$  عن المنبع النقطي يمثل جبهة موجة wave front ونلاحظ أن مطال الموجة وفق (1-54) يتاسب عكساً مع البعد عن المنبع  $r$ . ويفسر هذا بأن الاستطاعة الصوتية  $W$  الصادرة عن المنبع الكروي تتوزع على السطح الكروي  $S = 4\pi r^2$ ، ولذلك تكون شدة الصوت الناتجة عنه:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1-55)$$

باستخدام هذه العلاقة و العلاقة التي تربط شدة الصوت مع القيمة الفعالة للضغط الصوتي وفق (1-14)، نكتب:

$$\frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c}$$

أي أن:

$$p_e = \sqrt{\frac{\rho_0 c W}{4\pi r^2}} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\rho_0 c W}{4\pi}} \quad (1-56)$$

ومن ثم يكون مطال الضغط الصوتي:

$$p_m = \sqrt{2} \cdot P = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\rho_0 c W}{2\pi}} \quad (1-57)$$

تفسر هذه العلاقة تناسب مطال الضغط في المعادلة (1-54) عكساً مع البعد.

يرتبط الضغط وسرعة الجسيمات في حال الموجة الكروية بالعلاقة التالية التي

نكتبها على غرار (1-25) بعد استبدال  $x$  بـ  $r$ :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -B_a \frac{\partial u}{\partial r} \quad (1-58)$$

باستخدام هذه العلاقة و المعادلة (1-54) يمكن التوصل إلى العبارة التالية لسرعة الجسيمات في حالة الموجة الكروية:

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{\rho_0 c} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) \quad (1-59)$$

يتبيّن من العلاقة (1-59) أن الضغط وسرعة الجسيمات في حالة الموجة الكروية غير متقيّدين بالطور، كما يستدلّ من هذه العلاقة أنه عندما  $1 \gg kr$  (أي بعيداً عن المنبع الصوتي) يمكن أن نهمل في العلاقة المذكورة القسم التخييلي، بحيث نكتب:

$$\hat{u} \approx \frac{\hat{p}}{\rho_0 c} \quad (1-60)$$

تقارب هذه العلاقة ما يقابلها في حالة الموجة المستوية، وهي تدلّ على أن الضغط وسرعة الجسيمات يتفقان بالطور تقريرياً في الحالة المعنية. و من ثم نستنتج أنه عندما

يكون  $1 \ll kr$  أي بعيداً عن المنشع الصوتي، يمكن اعتبار الموجة الكروية كموجة مستوية تقريرياً.

يتبع من العلاقة (1-59) أيضاً أنه عندما  $1 \ll kr$ ، أي بقرب المنشع الصوتي، يكون:

$$\hat{u} \approx \frac{\hat{P}}{\rho_0 c} \quad (1-61)$$

أي تكون سرعة الجسيمات مزاحة بالطور عن الضغط الصوتي بمقدار  $(90^\circ)$  تقريرياً.

نستنتج من العلاقة (1-59) أيضاً أنه عندما  $1 = kr$ ، تكون سرعة الجسيمات مزاحة بالطور عن الضغط الصوتي بمقدار  $(45^\circ)$ .

يمكن أن نعبر عن المانعة الصوتية النوعية لحالة الموجة الكروية اعتماداً على العلاقة (1-59) بالعبارة الآتية (التي تقابل (1-43) في حالة الموجة المستوية):

$$Z_s = \frac{\hat{P}}{\hat{u}} = \rho_0 c \cdot \frac{jkr}{1 + jkr} \quad (1-62)$$

تدل هذه العلاقة على أن  $Z_s$  عقدية في الحالة العامة. وعندما  $1 \ll kr$  تكون  $Z_s \approx \rho_0 c$ ، مما يؤكد أن الموجة الكروية تقارب الموجة المستوية بعيداً عن المنشع الصوتي. وبالمقابل عندما  $1 \ll kr$ ، يستنتج من (1-62) أن  $Z_s \approx \rho_0 c(jkr) = j\omega\rho_0 r$ .

تنتفق هذه العلاقة مع (1-61) و تدل على أنه بقرب المنشع تكون  $Z_s$  تخيلية تقريرياً، مما يؤكد وجود انزياح بالطور بمقدار  $90^\circ$  بين الضغط و سرعة الجسيمات في الحالة المذكورة.



## الفصل الثاني

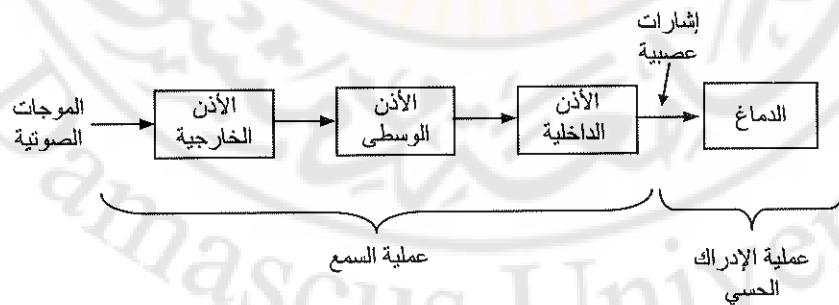
### خصائص السمع والإدراك الحسي للصوت

### Hearing and Perception

نعتمد على خصائص السمع والإدراك الحسي للصوت من أجل تقييم جودة أداء التجهيزات الصوتية ومكوناتها المختلفة.

يتحدد المدى الترددية للإشارات السمعية بمدى الترددات التي يتم إدراكتها سمعياً. ويقع هذا المدى بين حوالي 15 Hz و 20 kHz، وينخفض أعلى تردد مسموع مع زيادة العمر بحيث يمكن أن يصل في عمر الشيخوخة إلى حوالي 10 kHz. وسوف نعد لاحقاً أن المدى الترددية المسموع هو من حوالي 20 Hz حتى 20 kHz.

يجب التمييز هنا بين عملية السمع والإدراك الحسي للصوت، فالسمع هو تحويل الإشارة الصوتية إلى إشارات عصبية، بينما الإدراك الحسي للصوت هو العملية التي تلي السمع وتجري في الدماغ لإعطاء معنى لما نسمعه. وبين الشكل (1-2) العلاقة بين السمع والإدراك الحسي للصوت.

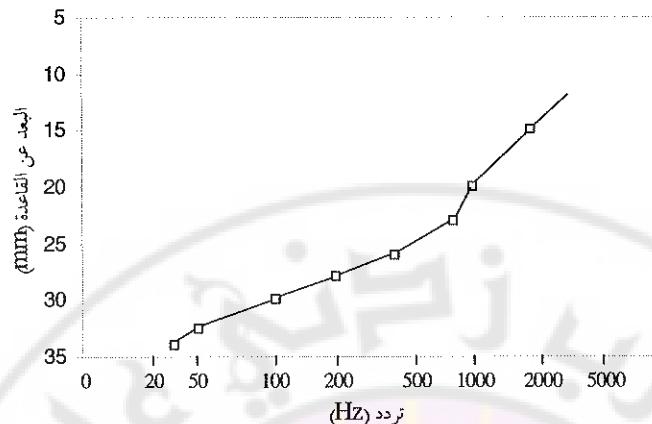


الشكل (1-2): السمع والإدراك الحسي للصوت.

## ١-٢ السمع Hearing

تتألف الأذن البشرية من ثلاثة أقسام هي الأذن الخارجية والوسطى والداخلية. وتتألف الأذن الخارجية من الصوآن والقناة الصوتية الخارجية وغشاء الطبيل. وغشاء الطبيل عبارة عن غشاء قاسٍ مخروطي الشكل يتوضع في نهاية القناة الصوتية ويهدئ تحت تأثير الموجات الصوتية وهو يمثل الجزء الأول من سلسلة تحويل الإشارة الصوتية إلى إشارة عصبية. والأذن الوسطى عبارة عن حجيرة خالية من الهواء تتصل بالأذن الخارجية بغضائط الطبيل كما تتصل بالأذن الداخلية بنافدة دائيرية ويضمونها، وتتلخص وظائفها بنقل الاهتزازات الصوتية المؤثرة على غشاء الطبيل إلى الأذن الداخلية بالإضافة إلى حماية الأذن الداخلية من الضغط العالي. والأذن الداخلية عبارة عن قوقة متصلة بالأذن الوسطى، وتتلخص وظائفها بتحويل الاهتزازات الميكانيكية إلى تدفق عصبي (سيالة عصبية) ينقل إلى الدماغ عن طريق عدد كبير من الشعيرات الموجودة على طول القوقة من الداخل.

يبين الشكل (2-3) العلاقة بين الموقع الذي يحدث فيه الاهتزاز الأعظمي على طول مسار القوقة وترددات الاهتزاز. وتوضح أهمية هذه العلاقة عند دراسة بعض النظم الرقمية.



الشكل (3-2): العلاقة بين الموضع الذي يحدث فيه الاهتزاز الأعظمي على طول مسار القوقة وبين ترددات الاهتزاز.

### ٢-١-١ جهارة الصوت Loudness

يقصد بجهارة الصوت التقييم الحسي لشدة الصوت، وهي تغير لوعاريتمناً تقريباً مع تغير شدة الصوت. يتبيّن أنه عند الاستماع لنغمة معينة، بتردد 1000 Hz على سبيل المثال، تنخفض جهارتها مع إنفاس شدتها، حتى نصل إلى قيمة معينة لشدة الصوت تسمى عتبة السمع Threshold of Hearing، وهي التي نكاد نسمع عندها النغمة المعنية. وتبلغ عتبة السمع عند التردد 1000 Hz القيمة  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . وعند زيادة شدة الصوت إلى حوالي  $1 \text{ W/m}^2$  يبدأ الإحساس بالألم وتسمى هذه القيمة عتبة الألم Threshold of Pain.

يعبر عن جهارة الصوت عادة بمستوى شدة الصوت أو باختصار SIL وفق العلاقة:

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \text{ dB} \quad (2-1)$$

حيث  $I_{ref}$  شدة الصوت المرجعية وتحخذ مساوية لعتبة السمع عند التردد 1000 Hz أي  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . ومن ثم فإن عتبة السمع عند التردد 1000 Hz تقابل المستوى dB 0، بينما عتبة الألم عند التردد 1000 Hz تقابل المستوى dB 120.

ترتبط شدة الصوت  $I$  بالقيمة الفعالة للضغط الصوتي  $p$  بالعلاقة:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (2-2)$$

حيث  $\rho_0 c = 410 \text{ Kg/m}^2 \text{s}$  عند درجة الحرارة النظامية.

نستنتج أن:

$$p = \sqrt{\rho_0 c I} \quad (3-2)$$

تكون القيمة الفعالة للضغط الصوتي المقابلة لـ  $I_{ref}$ :

$$P_{(ref)} = \sqrt{\rho_0 c I_{ref}} = \sqrt{410 \times 10^{-12}} = 2.02 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

نكتب وفق (2-2) و (3-2) :

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{(ref)}} \text{ dB} \quad (4-2)$$

تطبق لحساب مستوى الضغط الصوتي Sound Pressure Level أو باختصار

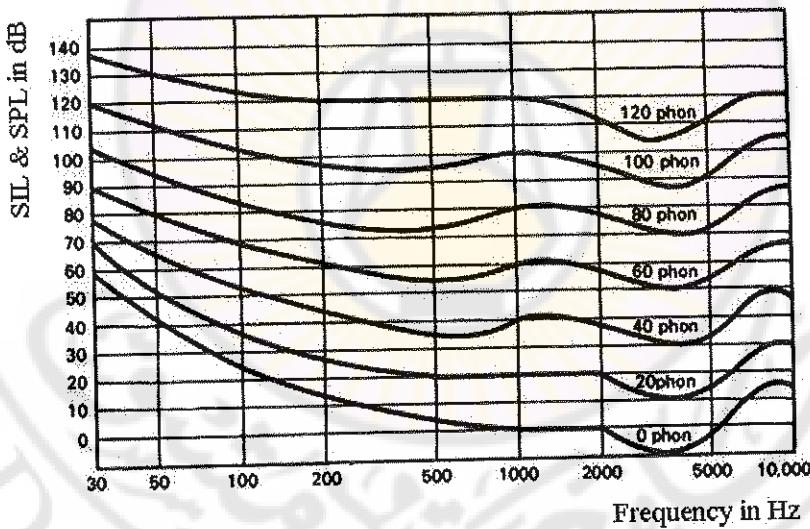
العلاقة SPL:

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad (5-2)$$

حيث نعتمد القيمة  $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  عند حساب  $L_p$  بدلاً من القيمة الواردة  $p_{ref}$  وهي  $2.02 \times 10^{-5}$ . ويؤدي الاختلاف البسيط بين  $p$  و  $p_{ref}$  إلى ارتفاع في المستوى dB.

إلى اختلاف  $L_p$  قليلاً عن  $L_1$  (محوالي 0.1 dB). ويمكن إهمال هذا الاختلاف في معظم الحسابات الصوتية.

يختلف الإحساس بجهاز الصوت حسب التردد، فمثلاً تبدو النغمة التي مستوىها 120 dB قوية جداً (حتى حد الألم) عند تردد 1000 Hz ولكنها لا تسمع أبداً عند التردد 30 kHz. أي أن الإحساس بقوة النغمات وبالتالي بشدة الصوت لا تتعلق فقط بجهازها وإنما بتردداتها أيضاً. ويوضح ذلك من المنحنيات المبينة في الشكل (4-2)، وهي تسمى منحنيات تساوي الجهازارة Equal-Loudness Curves ويمثل أخفض منحني في الشكل (4-2) عتبات السمع عند كل الترددات السمعية.



الشكل (4-2): منحنيات تساوي الجهازارة، ويبين تغيرات الضغط الصوتي بالنسبة للجهاز، حيث أن لكل منحني رقم يدل على الضغط الصوتي بالديسيبل.

نستنتج من المنحني المذكور أن عتبة السمع عند التردد 60 Hz أكبر بمقدار 40 dB من عتبة السمع عند التردد 1000 Hz، أي أن النغمة 60 Hz لا تسمع إلا إذا كانت شدتها الصوتية يفوق 10000 مرة الضغط الصوتي المقابل لعتبة السمع عند 1000 Hz (لأن  $\log 10000 = 40$  dB). ويدل هذا على أن حساسية الأذن للنغمة 60 Hz أقل بكثير جداً من حساسيتها للنغمة 1000 Hz. ويتصفح من المنحني السفلي في الشكل (4-2) أيضاً أن عتبة السمع تكون صغرى عند التردد 3000 Hz تقريباً، وهي أخفض بحوالي 6 dB من عتبة السمع القياسية عند التردد 1000 Hz، وتكون حساسية الأذن عظمى عند التردد 3000 Hz. ويفسر ذلك بأن التردد 3000 Hz يساوي تقريباً تردد رنين القناة في الأذن الخارجية.

نلاحظ أيضاً أن عتبة السمع في الترددات التي تقل عن 1000 Hz ترداد بحدة مع انخفاض التردد، مما يدل على أن الأذن البشرية تميز بحساسية نسبية ضعيفة جداً للتترددات المنخفضة. ويتم تقييم جهارة الصوت لمختلف النغمات عادة مقارنتها سعياً مع النغمة 1000 Hz المعادلة لها من حيث الجهارة.

مثال: ليكن لدينا مصدر صوتي يولد نغمة ترددتها 30 Hz ومستوى جهارتها 80 dB. ولتكن لدينا مصدر صوتي آخر يولد نغمة ترددتها 1000 Hz. والمطلوب تحديد مستوى جهارة الصوت للنغمة 1000 Hz بحيث يشعر المستمع أن جهاريتي النغمتين متعادلتان.

الحل: بالعودة إلى منحنيات تساوي الجهارة المبينة في الشكل (4-2) يتبيّن أن النقطة المقابلة للنغمة ذات التردد 50 Hz ومستوى شدة الصوت لها تساوي 80 dB تقع على منحني تساوي الجهارة المار بالنقطة المقابلة لـ 60 dB عند التردد 1000 Hz.

ويعبر عن ذلك بالقول أن النغمة التي ترددتها 50 Hz ومستوى صوتها 80 dB ذات جهارة بقيمة .40 phons

يمثل المنحني العلوي في الشكل (4-2) عتبات الألم لمختلف الترددات المسموعة ، وهو يمر بنقطة تقابل 120dB عند 1000 Hz، ولذلك يكون مستوى جهارة عتبات الألم عند كل من الترددات المسموعة 120 phons.

تعدّ جهارة صوت الإنسان في الأحاديث العادية على بعد متر واحد تقريرياً مماثلة بالمنحني 60 phons في الشكل (4-2).

لو أنقصنا شدة الصوت عند الترددات المختلفة بنسبة متساوية بحيث يقل مستوىها من 60 dB إلى 40 dB مثلاً، لوجدنا أن الترددات التي تقل عن 90 Hz تصبح غير مسموعة. وذلك يفسر أن ضبط جهارة الصوت في بعض التجهيزات الصوتية يتم بضوابط جهارة Volume Controls من نوع خاص، تغير مستوى الصوت عند الترددات المختلفة بدرجات مختلفة مع مراعاة منحنيات الشكل (4-2) حتى لا يتغير إحساسنا بالتركيب التردددي للأصوات التي نسمعها عند تغيير المستوى. وتسمى مثل هذه الضوابط بضوابط الجهارة الموضعية النغمات Tone Compensated. وهي عبارة عن مقاومات متغيرة يضاف إليها مكثفات ذات سعات معينة تعطيها تبعية مناسبة للتردد، بحيث تعيش تعارض اختلاف حساسية الأذن للتترددات المختلفة وفق منحنيات تساوي الجهارة.

## ٢-١-٢ طبقة الصوت Pitch

تعبر طبقة الصوت أو "ارتفاع الصوت" pitch عن التردد الأساسي للإشارات الصوتية عندما تكون هذه الإشارات دورية أو شيء دوري، وهي التي يجعلنا نميز

الصوت الحاد عن الصوت الغليظ أو الجهير (مثلاً بين نغمة "دو القرار" و "دو الجواب" في السلم الموسيقي).

تحتختلف قيم الترددات المحددة لطبقة الصوت بين الرجل والمرأة حيث تكون أعلى دائمًا عند المرأة. وتتراوح قيم تردداتها عند الرجل بين حوالي 80 Hz و 160 Hz، وعند المرأة بين حوالي 160 Hz و 400 Hz. ومن خصائص الإحساس بطبقة الصوت أنه عند تحليل أي إشارة صوتية شبه دورية وفق سلسلة فورييه إلى مجموعة توافقيات أو نغمات صافية pure tones، تتحدد طبقة الصوت بالتردد التوايفي الأساسي حتى إذا لم يكن موجوداً ضمن الطيف. وعلى سبيل المثال إذا تضمن الطيف التوايفيات (120 Hz, 240 Hz, 360 Hz, 480 Hz)، نقول: إن طبقة الصوت هي 120 Hz. وإذا اقتصر الطيف على التوايفيات (360 Hz, 480 Hz)، تبقى طبقة الصوت هي 120 Hz أيضاً رغم أنها لم تظهر في الطيف.

### ٣-١-٢ الأوكتاف Octave

يلاحظ أنه إذا أصدرنا نغمتين Tones متتاليتين تردداتها مثلاً 260 Hz و 440 Hz ثم أصدرنا على التوالي أيضاً نغمتين 520 Hz و 880 Hz، نشعر أن الفاصل الترددي Frequency Interval هو نفسه في الحالتين. ويدل ذلك على أن الإحساس السمعي الذي يولد توالى النغمات يتوقف على نسب تردداتها ولا يتوقف على قيمها بحد ذاتها. ويسمى الفاصل الترددي بين أي نغمتين تردد إحداهما ضعف تردد الأخرى الأوكتاف Octave أو "الجواب الموسيقي".

يعني ذلك أنه إذا كنا نسمع نغمة بتردد  $f_0$  وتم رفع التردد بمقدار أوكتاف واحد، تتضاعف قيمته مرتين، أي يصبح مساوياً إلى  $f_1 = 2f_0$ . وإذا زدنا التردد

عمردار أو كتاف أيضاً نحصل على التردد  $f_2 = 2f_1$ . ونستنتج أن عدد الأوكتافات المقابل لارتفاع تردد أي نغمة من  $f_0$  إلى  $f_n$  يساوي:

$$n = \log_2 \frac{f_n}{f_0} = 3.34 \log_{10} \frac{f_n}{f_0} \quad (6-2)$$

بما أن مدى الترددات المسموعة يمتد بين 20 Hz و 20 kHz فهو يقابل بالأوكتافات:

$$n = \log_2 \frac{20000}{20} = 3.34 \log_{10} \frac{20000}{20} = 3.34 \times 3 \approx 10 \text{ Octaves}$$

ينبغي التنوية إلى أن ما ذكر أعلاه عن كون الأذن تميز بين درجات النغمات أو ارتفاع الأصوات ببعض تردداتها (أو لوغاريتمات هذه النسبة) لا يصح بدقة إلا ضمن حدود معينة. وكما تبين التجارب تبلغ أقل قيمة للتغير النسبي في التردد ( $\Delta f/f_{\min}$ ) يمكن أن تلاحظه الأذن حوالي 1% من أجل الترددات التي تقل عن 500 Hz. وتتحفظ هذه النسبة إلى حوالي 0.3-0.2% عند الترددات الصوتية المتوسطة (4000 Hz-500 Hz) ثم تزيد إلى حوالي 0.4-0.5% عند الترددات المرتفعة (أعلى من 4000 Hz).

#### ٤-١-٤ ظاهرة التقليع Masking Effect

يقصد بالتقليع أو "التحجيم" السمعي أن سمع الأذن لصوت قوي يؤدي إلى انخفاض حساسيتها للأصوات أخرى أضعف. ويتجلّى ذلك في أن تعرّض الأذن لضجيج ذي مستوى مرتفع يؤدي إلى عدم سمعها للأصوات المقيدة أو المرغوبة. فتقول: إن الضجيج يقوم بتنزيح الصوت المرغوب أو يطغى عليه. ويمكن أن يحدث العكس، فعندما نرفع مستوى الصوت المقيد بحيث يصبح أعلى كثيراً من مستوى الضجيج (مثلاً بـ 20dB)، يطغى الصوت المرغوب على الضجيج ، بحيث يمكن ألا نشعر به.

يمكن أن يتجلّى التقنيع أيضًا في حالة الاستماع لنغمتين ، نرمز لتردديهما بـ  $f_1$ ،  $f_2$ . وبافتراض أن مستوى النغمة ذات التردد  $f_1$  أعلى بكثير من مستوى النغمة الأخرى ذات التردد  $f_2$ ، فعندها نسمع جيداً النغمة  $f_1$  ونكافد لا نسمع النغمة  $f_2$ . ويعني هذا ضمناً انخفاض حساسية الأذن للنغمة  $f_2$ ، بمعنى أن عتبة السمع عند التردد  $f_2$  تصبح أكبر بكثير مما هي في حالة عدم وجود النغمة الأخرى. وتسمى مثل تلك الحالة تقنيع نغمة لنغمة (Tone-to-tone masking). ويحدث التقنيع أيضاً عند الاستماع إلى صوت معقد واسع الطيف بحيث يؤدي ارتفاع بعض مركباته التردديّة إلى انخفاض الإحساس بالمركبات التردديّة الأخرى (نتيجة ارتفاع عتبات السمع عند تردداتها).

### ٥-١-٢ ظاهرة الصدى Echo Effect

تتميز الأذن أيضاً بخاصية أخرى تؤلف شكلاً من أشكال العطالة الزمنية. وتلاحظ هذه الخاصية عند سماع نغمة متقطعة تظهر، وتحتفظ دورياً على شكل رشقات Tone- Bursts، فإذا كانت الأوقات الفاصلة بين رشقات النغمة، أي أوقات اختفائها أقل من الثابت الزمني للأذن الذي يتراوح بين 25 msec و 10 msec، فإن الأذن لا تشعر بقطع النغمة، وإنما تشعر بها كما لو كانت نغمة مستمرة. ويفسر ذلك بأن تأثر الأذن بالنغمة لا يختفي باختفائها، بل يستمر مدة قصيرة تتحدد بالثابت الزمني المذكور.

تنجلي العطالة الزمنية للأذن عملياً في عدم ملاحظة ظاهرة الصدى Echo إذا كان الفاصل الزمني بين الصوت المنعكس الذي يعطي الإحساس بالصدى والصوت الأساسي لا يزيد على 40 msec (أو عموماً لا يزيد عن مدة تتراوح بين 40 و 100 ملي ثانية تبعاً لمستوى الصوت المنعكس). ويستفاد من ذلك في تحديد حجم قاعات

الاستماع والاستوديوهات التي تصمم بحيث تكون الأزمنة الفاصلة بين الانعكاسات المتكررة صغيرة لدرجة كافية حتى تندمج سمعياً دون أن تؤدي إلى الإحساس بالصدى. ويسمى تأثير الانعكاسات المتكررة في الحالة المعنية بالتردد Reverberation. وتحدد هذه الظاهرة المهمة إلى رفع مستوى الصوت في القاعات وتأثير على نوعيته تأثيراً كبيراً (حيث تؤدي إلى زيادة شدة الصوت الناتج عن الحاضر ، و تؤدي عادة إلى تحسين مفهومية هذا الصوت). ولذلك يجب أن تؤخذ ظاهرة التردد في الاعتبار خصوصاً عند تصميم الاستوديوهات وقاعات الاستماع.

## ٦-١-٢ الصوت المحسّم Stereo Sound

يعد الصوت المحسّم أو ستيريو خاصية مهمة من خواص السمع، وهي تستخدم في تجهيزات الصوت المحسّم (الستيريو).

يعتمد الإحساس بالصوت المحسّم على خصائص اختلاف السمع بالأذنين. ويتتيح السمع بالأذنين إمكانية تحديد اتجاه مصدر الصوت، حيث إن الصوت يصل إلى الأذن الأقرب إلى مصدر الصوت قبل أن يصل إلى الأخرى. ولذلك تؤثر الموجة الصوتية على الأذنين بمطالين وطورين مختلفين. وتلاحظ الاختلافات في المطال خاصة عند الترددات الصوتية المرتفعة (الترددات التي تزيد عن 5000 Hz - 3000 Hz). أما الاختلافات في الطور فتكون ملحوظة عند الترددات المنخفضة نسبياً (الأقل من 1500 - 2000 Hz).

## ٢- الإدراك الحسي السمعي Audio Perception

السؤال الأول الذي يبادر إلى الذهن حول الإدراك الحسي للأصوات هو كيف أن الموجات الصوتية الدخيلة إلى الأذن تترجم في الدماغ إلى كلام. وبالرغم من أن عدد

كبير من التجارب أجريت لتحديد كيفية الإدراك الحسي إلا أن الجواب الكامل لم يُعرف بعد. سنجاول أن نستعرض أكثر النظريات المتفق عليها.

لقد تبين من التجارب أن الدماغ يقوم بالتمييز بين الإشارات الكلامية والإشارات غير الكلامية، وقد وجد أنه في حال الاستماع لإشارة صوتية شبيهة بالإشارة الكلامية يقوم الدماغ بتحويلها تدريجياً لتصبح أقرب إلى الكلام، فيمكن رغم ذلك أن يميز المستمع أن الإشارة الكلامية أم غير الكلامية. ويفسر ذلك بأن الدماغ يقوم بمعالجة الإشارة الكلامية بطريقة مختلفة عن الإشارة غير الكلامية، حيث يعتقد أن معالجة الكلام تتم في الجزء الأيسر من الدماغ. والدليل على ذلك أن الأذن اليمنى تبدي أداءً أفضل عند سماع الإشارة الكلامية من الأذن اليسرى. بالإضافة إلى ذلك أن تلف الجزء الأيسر من الدماغ يفسد فهم الكلام. وتعتبر نظرية Cole and Jakimik السمعي، حيث اعتمدت على كثير من التجارب، وتتألف من:

- معرفة اللغة تؤثر تأثيراً مهماً في فهم اللغة نفسها، فلا يمكن الإدراك الحسي السمعي للغة أن يعتمد على تحليل الإشارة الصوتية فقط، حيث يقوم المستمع بتحليل الجملة على حسب طرق اللفظ، قواعد اللغة ومعرفة الموضوع المتحدث به.
- يتم التعرف على اللغة كلمة بكلمة على حسب ترتيب سماعها. وعند التعرف على الكلمة يتم استخدامها للتعرف على الكلمات التالية، وذلك لزيادة سرعة البحث عن معنى الكلمات. فعند التعرف على الكلمة يتم مباشرةً محاولة توقع الكلمة الممكن أن تأتي بعدها، حيث

تساعد طريقة اللفظ والمعرفة بقواعد اللغة - إضافة إلى معنى الكلمة - على توقع الكلمات التالية.

• ولإدراك معنى الكلمة فإن الكلمة عادة تقسم إلى مجموعة مقاطع صوتية Syllabics. وعند التعرف على المقطع الصوتي الأول يتم توقع ما هو المقطع الذي يليه وهكذا وذلك بناءً على المعرفة بقواعد اللغة والموضوع المتحدث عنه. وتسهم المقاطع الصوتية الأولى في الكلمة إسهاماً مهماً في معرفة الكلمة بكاملها حيث تلقى الاهتمام الأكبر من المستمع. ويمكن للمستمع أن يستنتج بقية مقاطع الكلمة حيث لا يغير لبقية الكلمة اهتماماً كبيراً.

استنجدت هذه النظرية من تجارب أجريت على عدد كبير من المستمعين، حيث تم تحديد قدرة المستمعين على قياس عدد كلمات الخطأ بالإضافة إلى إمكانية تحديد الخطأ وتصحيحه، حيث إن أداء المستمعين يعتمد على مدى انتباه المستمع، بالإضافة إلى مكان توضع الخطأ هل هو في بداية الكلمة أم في نهايتها. وهذه النظرية هي الأساس النظري الذي اعتمدت عليه نظم التعرف على الكلام Speech Recognition Systems.



### الفصل الثالث

## الممانعة الميكانيكية ومحولات الطاقة الكهروصوتية

### Mechanical Impedance & Electroacoustic Transducers

#### ١-٣ مقدمة

يقصد بمحول أو مبدل الطاقة Transducer الوسيلة التي تقوم بتحويل الطاقة من شكل إلى شكل آخر. فمثلاً يقوم الميكروفون (السماع) Microphone بتحويل الطاقة الصوتية إلى طاقة ميكانيكية، ومنها إلى طاقة كهربائية. وتعمل السمعاء أو الجهاز Loudspeaker عملاً معاكساً، إذ تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية ومنها إلى صوتية. وهناك أنواع كثيرة لمحولات أشكال أخرى من الطاقة تشمل وسائل تحويل الطاقة الكهربائية إلى ضوء (المصابيح) و (الخلايا الكهروضوئية) وغيرها. ولكن ما يهمنا في الكهروصوتيات هو محولات الطاقة الكهروميكانيكية وبشكل خاص محولات الطاقة الكهروصوتية.

تتضمن محولات الطاقة الكهروصوتية أجزاءً تقوم بتحويل الاهتزازات الصوتية إلى اهتزازات ميكانيكية و تضمن أيضاً دارات كهربائية لتقوم بتحويل الاهتزازات الميكانيكية إلى إشارات كهربائية. ولكي تتم عملية تحويل الصوت من إشارة صوتية إلى إشارة كهربائية أو عملية التحويل المعاكسة بأدنى حد من التشوهات، ضمن المتطلبات التي تحددها خواص الإدراك السمعي، ينبغي التوفيق بين سلوك شتى العناصر الصوتية والميكانيكية لمحولات الطاقة الكهروصوتية على الترددات الصوتية المختلفة

والعناصر الكهربائية لحوارات الطاقة المذكورة. ويدخل ضمن تصميم حولات الطاقة الكهروصوتية عادة أغشية قابلة للاهتزاز وتحويفات (فراغات محصورة) ذات خواص رئينية وعناصر ميكانيكية صوتية أخرى. ويمكن تبسيط دراسة سلوك هذه العناصر الميكانيكية الصوتية عند الترددات المختلفة بالاعتماد على المماثلة أو المشابهة الكهروميكانيكية.

### ٢-٣ المماثلة الكهروميكانيكية Electro-Mechanical Analogy

يهتم موضوع التماثل أو التشابه بين النظم أو المجموعات الميكانيكية و الدارات الكهربائية أو باختصار "المماثلة الكهروميكانيكية" بتطبيق نظريات وطرق حل الدارات الكهربائية على النظم الميكانيكية والصوتية. فبدلاً من حل هذه النظم باستخدام معادلات تفاضلية جزئية أو كليلة تلجأ إلى طرق حل تعتمد على مماثلة عناصرها كهربائياً. و هذه المماثلة تجعل من السهل فهم عمل تلك النظم دون اللجوء إلى حلول مطولة ومعقدة.

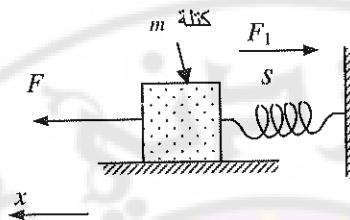
إن نسبة أبعاد النظام إلى طول الموجة الصوتية المنتشرة فيه تحدد إمكانية اعتبار النظام مؤلفاً من عناصر مرکزة أو متكتلة Lumped أو اعتباره مؤلفاً من عناصر موزعة Distributed. و نظراً لإمكانية افتراض طول الموجة كبيراً نسبياً في كثير من التطبيقات الصوتية يمكن اعتبار النظم الصوتية مؤلفة من عناصر مرکزة، ومن ثم يمكن أن يطبق عليها المماثلة الكهروميكانيكية للاستفادة من نظريات الدارات الكهربائية.

### ١-٢ المانعة الميكانيكية Mechanical Impedance

يمكن توضيح التشابه بين النظم الميكانيكية و الدارات الكهربائية باستخدام الشكل (1-3) لنظام ميكانيكي بسيط. ويتألف هذا النظام الميكانيكي من نابض ثبت أحد

طرفيه على جدار ، بينما علق بطرفه الآخر جسم كتلته  $m$  قابل للانزلاق على سطح أفقى تحت تأثير قوة متغيرة جيبياً، ونعبر عنها كتابع أسي عقدي:

$$F = \hat{F} \exp(j\omega t) \quad (3-1)$$



الشكل (1-3): نظام ميكانيكي بسيط.

يؤدي تأثير القوة  $F$  إلى انزياح الجسم  $m$  عن وضع توازنه بمقدار نرمز له  $x$ ، فيؤثر ذلك الجسم على النابض بحيث يؤدي إلى تشويفه تشوهاً مناً وفق قانون هوك  $F_1=sx$ ، حيث  $s$  القساوة stiffness أو عامل مرنة النابض. ويؤثر النابض على الجسم  $m$  بقوة  $-F_1$  (أي قوة تساوي وتعاكس  $F_1$ ). ويتعرض الجسم  $m$  في أثناء انزلاقه على السطح الأفقي لقوة احتكاك  $F_2 = -R_M u$  ، حيث  $u$  السرعة ( $u = dx/dt$ ) وعامل الاحتكاك المسمى "المقاومة الميكانيكية". وتكون محصلة القوى المؤثرة على الجسم  $m$ :

$$F_{tot} = F - F_1 - F_2 = F - sx - R_M \frac{dx}{dt} \quad (3-2)$$

يكتسب الجسم  $m$  بتأثير  $F_{tot}$  تسارعاً يعطى بقانون نيوتن الثاني:

$$F_{tot} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3-3)$$

نستنتج من (3-1)، (3-2) و (3-3) المعادلة التفاضلية:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + R_M \frac{dx}{dt} + s x = \hat{F} \exp(j\omega t) \quad (3-4)$$

بحد أن هذه المعادلة التفاضلية مشابهة للمعادلة التفاضلية التالية لدارة الرنين الكهربائية التسلسلية المبينة في الشكل (2-3):

$$\hat{E} \exp(j\omega t) = L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} \quad (3-5)$$

حيث  $q$  شحنة المكثف،  $L$  تحريرية الملف،  $R$  المقاومة. ونفترض أنه يطبق على الدارة  $RLC$  الجهد  $E = \hat{E} \exp(j\omega t)$ . يعطى التيار الكهربائي المار في الدارة العلاقة:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3-6)$$

من الواضح أن المعادلة (3-4) التي تصف الانزياح في المجموعة الميكانيكية تمثل رياضياً المعادلة (3-5) إذا اعتبرنا أن الانزياح  $x$  يقابل الشحنة  $q$  والقوة الميكانيكية  $\hat{F} \exp(j\omega t)$  تقابل الجهد  $E \exp(j\omega t)$ ، و المقاومة الميكانيكية  $R_M$  تقابل المقاومة الكهربائية  $R$ ، والكتلة  $m$  تقابل التحريرية  $L$ ، و القساوة  $s$  تقابل مقلوب السعة الكهربائية  $C$ . ويسمى مقلوب القساوة  $1/s$  "المطابعة Compliance" أو السعة الميكانيكية ويرمز لها  $C_M$  أي:

$$C_M = \frac{1}{s} \quad (3-7)$$

بما أن  $x$  تقابل  $q$  فإن السرعة الاهتزازية  $u = dx/dt$  تقابل التيار  $i = dq/dt$ .

يمكن حل المعادلة التفاضلية (4-3) بالأسلوب نفسه الذي يطبق حل المعادلة التفاضلية (3-5) ويستنتج من حل المعادلة التفاضلية (3-3) أن التيار العقدي يعطى بالعلاقة  $Z = \hat{E} / \hat{i}$  ، حيث  $Z$  الممانعة الكهربائية لدارة:

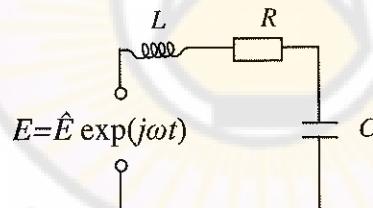
$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (3-8)$$

يمكن حل المعادلة التفاضلية (4-3) بالمثل. ولذلك تعرف الممانعة الميكانيكية كنسبة المطال العقدي للقوة إلى المطال العقدي للسرعة:

$$Z_M = \frac{\hat{F}}{\hat{u}} \quad (3-9)$$

على هذا النحو، يقول حل المعادلة التفاضلية (4-3) إلى إيجاد السرعة العقدية بالعلاقة  $\hat{u} = \hat{u}$  ، وبحيث نعبر عن  $Z_M$  بالعلاقة التالية المقابلة لـ (3-8):

$$Z_M = R_M + j(\omega m - \frac{1}{\omega C_M}) \quad (3-10)$$



الشكل(2-3): دارة رنين كهربائية سلسلية.

تعطى القيمة الفعلية للسرعة الاهتزازية بالعلاقة:

$$u_e = \frac{F_e}{|Z_M|} = \frac{F_e}{\sqrt{R_M^2 + (\omega m - \frac{1}{\omega C_M})^2}} \quad (3-11)$$

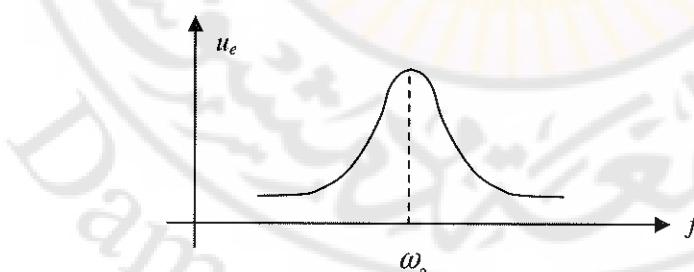
يمكن استنتاج وحدات قياس كلٍ من  $C_M$  و  $R_M$  و  $Z_M$  من تعاريفها الواردة أعلاه، حيث تفاصس  $m$  بواحدة kg، وتتفاصس  $C_M$  بواحدة المتر على النيوتن (m/N)، بينما تفاصس  $R_M$  بواحدة kg/sec. وتسمى هذه الواحدة أيضاً الأوم الميكانيكي.

يسنترج من العلاقة (3-11) أن  $u_e$  تتعلق بالتردد وتكون عظمى عند تردد

$$\text{الرنين الذي يكون من أجله } \omega_m = \frac{1}{\omega C_M}, \text{ ونجده بالعلاقة:}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m C_M}} \quad (3-12)$$

يبين الشكل (3-3) منحنى تبعية السرعة الاهتزازية للتردد، وهو يشابه الاستجابة التردديّة لدارة الرنين الكهربائية المناظرة. ومن المهم أن نلاحظ أنه عند الترددات المنخفضة أي عندما  $\omega << \omega_0$ ، يكون  $\omega_m << \omega$ ، ومن ثم  $Z_M \approx R_M + 1/j\omega C$ . ويقال في هذه الحالة أن المجموعة الميكانيكية تحكم بالمطابقة compliance controlled  $C_M$ . وعند الترددات العالية أي عندما  $\omega > \omega_0$ ، يكون  $\omega_m > \omega_0$ ، ومن ثم  $Z_M \approx R_M + 1/j\omega C$ . فيقال إن المجموعة الميكانيكية تحكم بالكتلة Mass controlled.



الشكل (3-3): الاستجابة التردديّة لدارة الميكانيكية.

بحذر الإشارة إلى أن بعض المجموعات الميكانيكية لا يمكن أن تمثل بدارة الرنين التسلسلية بل تمثل بدارة الرنين التفرعية. ويتوقف استخدام المماثلة مع دارات الرنين التفرعية أو التسلسلية تبعاً لكون عناصر المجموعة الميكانيكية تهتز بسرعة واحدة فتشابه دارة الرنين التسلسلية التي يسري في عناصرها تيار واحد، أو كونها تتعرض لتأثير قوة واحدة على غرار تأثير جهد واحد على فرعى دارة الرنين التفرعية المناظرة.

### ٣-٢-٣ الممانعة الصوتية Acoustic Impedance

يمكن استخدام المماثلة الكهرصوتية Electroacoustic Analogy في حالة المكونات الصوتية التي تمثل عادة بالهواء المخصوص ضمن أنابيب أو فجوات. ولذلك تعتمد المماثلة الكهرصوتية على التعامل مع الضغط الصوتي في الهواء كمتضاد analogous للجهد في الدارات الكهربائية (بدلاً من المقاومة في المماثلة الكهرميكانية)، كما تعتمد المماثلة الكهرصوتية على التعامل مع ما يسمى السرعة الحجمية Volume velocity، كمتضاد للتيار في الدارات الكهربائية (بدلاً من السرعة في المماثلة الكهرميكانية). ويقصد بالسرعة الحجمية حجم الهواء المزاح في الثانية، ونرمز لها بـ  $U$  ونكتب بالنسبة لأنبوب سطح مقطعيه  $S$ :

$$U = S u = S \frac{d\xi}{dt} \quad (3-13)$$

حيث  $\xi$  هي انزياح جسيمات الهواء. يستخدم في المماثلة الكهرصوتية مفهوم الممانعة الصوتية Acoustic Impedance (أو الممانعة الصوتية المماثلة Acoustic Analogous Impedance) وهي تعرف بالعلاقة:

$$Z_A = \frac{\hat{p}}{\hat{U}} \quad (3-14)$$

حيث  $\hat{p}$  المطال العقدي للضغط و  $\hat{U}$  المطال العقدي للسرعة الحجمية. بما أن  $\hat{U} = \hat{p}/S$  نستنتج أن:

$$Z_A = \frac{Z_M}{S^2} \quad (3-15)$$

عندما نمثل بجموعة مكونات صوتية بدارة رنين كهربائية تسلسلية ، نعبر عن الممانعة الصوتية المكافئة بالعبارة التالية التي نكتبها على غرار العبارة (3-8):

$$Z_A = R_A + j\omega M_A + \frac{1}{j\omega C_A} \quad (3-16)$$

حيث  $R_A, M_A, C_A$  العناصر الصوتية التي تقابل في المعادلة (3-8) المقاومة الميكانيكية  $R_M$  والكتلة  $m$  والمطاوعة الميكانيكية  $C_M$ . ونكتب اطلاقاً من العلاقة (3-15):

$$R_A = \frac{R_M}{S^2}, \quad M_A = \frac{m}{S^2}, \quad C_A = S^2 C_M \quad (3-17)$$

تسمى  $M_A, R_A, C_A$  على الترتيب المقاومة الصوتية، المطاوعة الصوتية، و الكتلة الصوتية أو المعاطلة Inertness.

### ٣-٢-٣ الممانعة الصوتية النوعية Specific Acoustic Impedance

يقصد بالممانعة الصوتية النوعية نسبة المطال العقدي للضغط الصوري  $\hat{p}$  إلى المطال العقدي للسرعة  $\hat{u}$ :

$$Z_s = \frac{\hat{p}}{\hat{u}} \quad (3-18)$$

تعطى  $Z_s$  للموجة الكروية مثلاً بالعلاقة (1-62)، بينما هي للموجة المستوية  $Z_s = \rho_0 c$  وفق العلاقة (1-43). ومقارنة تعريف  $Z_s$  مع تعريف كل من  $Z_A$  أو  $Z_M$  نستنتج أن:

$$Z_s = \frac{Z_M}{S} = S \cdot Z_A \quad (3-19)$$

نستنتج أن  $Z_s$  تمثل  $Z_M$  أو  $Z_A$  على واحدة المساحة. ويمكن أن نكتب أيضاً:

$$Z_s = \frac{Z_M}{S} = S \cdot Z_A \quad (3-20)$$

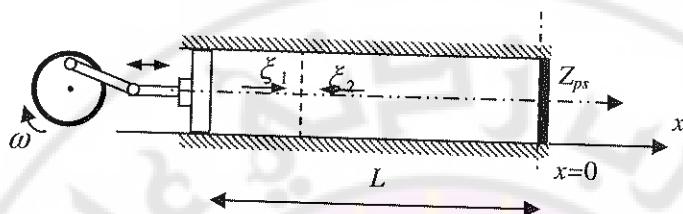
#### ٤-٢-٣ العناصر الصوتية Acoustic Elements

تستخدم في مبدلات الطاقة الكهربائية أشكال عديدة من العناصر الميكانيكية الصوتية، وتصمم هذه العناصر بحيث يتم الحصول على مانعات ميكانيكية ذات تبعيةترددية معينة. وثمة أنواع معينة من العناصر الميكانيكية تسمح بالحصول على الخواص الميكانيكية المطلوبة باختيار شكلها وأبعادها وكثافتها ومرورتها أو قساوتها. ومن هذه العناصر الأغشية Diaphragms. والأغشية ذات الأطراف المثنية أو الأطراف ذات التجاعيد، والأغشية المشدودة Membranes التي تتحدد قساوتها بخواصها الذاتية.

#### ٤-٢-٤-١ مانعة الدخل الميكانيكية لأنبوب ينتهي بمانعة مشدودة

لنفترض أن موجة صوتية مستوية تنتشر داخل أنبوب طوله  $L$  و سطح مقطعي ثابت  $S$ ، بحيث تتولد الموجة نتيجة لتحرك مكبس حركة جيبيه منتظم كاما هو مبين في الشكل (3-4). وسنفترض أن الأنابيب ينتهي بسطح إلقاء Termination، نرمز لمانعته الصوتية النوعية بـ  $Z_{S0}$  و لمانعته الميكانيكية بـ  $Z_{M0}$ ، نظراً لأننا نفترض في الشكل (3-4) أن  $x=0$  عند سطح الإلقاء. وتؤثر جسيمات الوسط المهتر على سطح الإلقاء بقوة متغيرة، فيؤثر سطح الإلقاء على الوسط المهتر بقوة معاكسه تسبب اضطراباً إضافياً يؤدي إلى توليد موجة منعكسة تنتشر بعكس اتجاه الموجة الواردة، أي بعكس اتجاه المور  $x$ . يتبيّن أن حالة أنبوب محدود الطول و مسدود بنهائه صلدة rigidly terminated أو مغلق إغلاقاً صلداً closed تقابل افتراض  $Z_{S0}=\infty$ ، كما يتبيّن أن حالة أنبوب محدود الطول و مفتوح النهاية open ended تقابل افتراض  $Z_{S0}=0$ . و في الحالين يحدث انعكاس كلي للموجة الساقطة على سطح

إلا أنه، بينما لا يحدث انعكاس مطلقاً (أي يحدث امتصاص كامل لاستطاعة الموجة الساقطة) عندما  $Z_{S0} = \rho_0 C$ ، كما أنه يحدث انعكاس جزئي عندما تكون قيمة  $Z_{S0}$  محدودة و مختلفة عن  $\rho_0 C$ .



الشكل(3-4): أنبوب قصير الطول ينتهي بمانعة صوتية نوعية  $Z_S$

و تقارن خصائص الانعكاس عن سطح إباء الأنابيب بخصائص الانعكاس في خطوط النقل إذا افترضنا أن  $Z_{S0}$  تقابل مانعة إباء Termination Impedance  $\rho_0 C$  لخط نقل وأن قيمة  $\rho_0 C$  تقابل المانعة المميزة لخط النقل. سنفترض أنه في الحالة العامة تكون  $Z_{S0}$  ذات قيمة محدودة و مختلفة عن  $\rho_0 C$ ، بحيث يحدث انعكاس جزئي عن سطح إباء الأنابيب. ويختلف مطال الموجة المنعكسة في الحالة العامة عن مطال الموجة الواردة. ونكتب:

$$\xi_2|_{x=0} = -\alpha_r \xi_1|_{x=0} \quad (3-21)$$

حيث  $\xi_1$  هي الإزاحة الناتجة عن الموجة الواردة و  $\xi_2$  هي الإزاحة الناتجة عن الموجة المنعكسة و  $\alpha_r$  معامل الانعكاس، أي نسبة مطال اهتزاز الموجة المنعكسة إلى مطال اهتزاز الموجة الواردة. وسنفترض أن المربع الصوتي يهتر جيبياً، بحيث يمكن أن نكتب:

$$\xi(x,t) = \tilde{A} \exp[(j(\omega t + kx)] \quad (3-22)$$

حيث  $k$  العدد الموجي:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3-23)$$

نكتب من أجل  $x=0$ , أي على مستوى الجدار الذي تتعكس عنه الموجة:

$$\xi_1|_{x=0} = \tilde{A} \exp(j\omega t) \quad (3-24)$$

$$\xi_2|_{x=0} = -\alpha_r \tilde{A} \exp(j\omega t) \quad (3-25)$$

تجه الموجة المنعكسة عن الجدار في اتجاه المحور  $x$ , بعكس اتجاه الموجة الواردة.

أ- في نهاية الأنابيب:

يمكن كتابة معادلة الاهتزاز الناتج عن الموجة في نقطة تبعد مسافة  $x$  عن نهاية الأنابيب بتطبيق المعادلة الموجية:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3-26)$$

حيث  $c$  سرعة الصوت في الهواء. وتعطى قيمة الإزاحة في نقطة تبعد  $x$  عن نهاية الأنابيب بمجموع الإزاحتين الناتجين عن الموجة المسافرة والموجة المنعكسة أي:

$$\xi(x, t) = \tilde{A} \exp[(jk)(ct - x)] - \alpha_r \tilde{A} \exp[(jk)(ct + x)] \quad (3-27)$$

أخذنا بعين الاعتبار هنا تعاكس اتجاه المحور  $x$  مع اتجاه الموجة الواردة. وبالمقارنة مع الحل العام للمعادلة الموجية، نجد الحد الأول يعبر عن الموجة المسافرة ويغير الحد الثاني عن الموجة المنعكسة. وباعتبار أن:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3-28)$$

اعتماداً على المعادلين (3-27) و (3-28), يمكن أن نبين أن المطالعين العقديرين للضغط والسرعة الاهتزازية يعطيان بالعلاقتين:

$$\hat{P} = \rho_0 c \omega \tilde{A} (1 + \alpha_r) \quad (3-29)$$

$$\hat{u} = \omega \tilde{A} (1 - \alpha_r) \quad (3-30)$$

تتحدد النسبة بين المطالين العقديين للضغط والسرعة الاهتزازية  $\hat{u}/\hat{P}$  في نهاية الأنابيب بالمانعة الصوتية النوعية للسدادة  $Z_s$ ، ومن المعادلين السابقتين نستنتج قيمة هذه

المانعة:

$$Z_{s0} = \rho_0 c \frac{1 + \alpha_r}{1 - \alpha_r} \quad (3-31)$$

من هنا نجد أن معامل الانعكاس  $\alpha_r$  يتوقف على قيمة الممانعة الصوتية النوعية في نهاية الأنابيب، ويساوي:

$$\alpha_r = \frac{Z_{s0} - \rho_0 c}{Z_{s0} + \rho_0 c} \quad (3-32)$$

بـ - في بداية الأنابيب:

يمكن تحديد الممانعة الصوتية النوعية في بداية الأنابيب أي عند  $x = L$ ، وذلك بإيجاد نسبة المطالين العقديين للضغط وللسرعة الاهتزازية. ونجد بالنتيجة أن:

$$Z_s = \rho_0 c \frac{Z_{s0} + j\rho_0 c \tan kL}{\rho_0 c + jZ_{s0} \tan kL} \quad (3-33)$$

ومن ثم تكون الممانعة الميكانيكية (التي يتعرض لها المكبس المولد للاهتزاز في بداية الأنابيب):

$$Z_M = S Z_s = S \rho_0 c \frac{Z_{s0} + j\rho_0 c \tan kL}{\rho_0 c + jZ_{s0} \tan kL} \quad (3-34)$$

حيث  $S$  سطح مقطع الأنابيب. ومن المعادلة السابقة نلاحظ أن الممانعة  $Z_M$  لمصدر الاهتزاز قد تكون عظيمًا أو صغرى حسب قيمة  $kL$  على غرار حالة دارة الرنين التفرعية أو دارة الرنين التسلسنية في الدارات الكهربائية.

### ٢-٤-٣ ممانعة الدخل الميكانيكية لأنبوب ينتهي بسدادة صلدة

لنفترض أن موجة صوتية مستوية تنتشر في أنبوب طوله  $L$  وذي سطح مقطع ثابت  $S$ ، بحيث تولد الموجة نتيجة لتحرك مكبس حركة حいية منتظم كما هو مبين في الشكل (3-5). وباعتبار أن الموجة المنتشرة في الأنابيب تسقط على جدار صلد أو سدادة صلدة في نهاية الأنابيب، فعندئذ تتعرض واحدة سطح الجدار المذكور لقوة متساوية للضغط الصوتي الناجم عن الموجة الساقطة. ومن ثم يؤثر الجدار على الوسط المهتز بقوة معاكسة تسبب اضطراباً إضافياً يؤدي إلى توليد موجة منعكسة بحيث تكون:

$$\xi_2|_{x=0} = -\xi_1|_{x=0} \quad (3-35)$$

حيث  $\xi_1$  يمثل الإزاحة الناتجة عن الموجة الساقطة و  $\xi_2$  يمثل الإزاحة الناتجة عن الموجة المنعكسة. وسنفترض أن المنبع الصوتي يهتز حيّاً، ونكتب عبارة الموجة الساقطة:

$$\xi_1|_{x=0} = -\xi_2|_{x=0} \quad (3-35)$$

$$\xi_1(x,t) = \tilde{A} \exp[(j(\omega t + kx))] \quad (3-36)$$

وبالتالي نجد من أجل  $x=0$ , أي على مستوى الجدار الذي تعكس عنه الموجة:

$$\xi_1|_{x=0} = \tilde{A} \exp(j\omega t) \quad (3-37)$$

ومن ثم:

$$\xi_2|_{x=0} = -\tilde{A} \exp(j\omega t) \quad (3-38)$$

تنتج الموجة المنعكسة عن الجدار في اتجاه المخور  $x$  بعكس اتجاه الموجة الساقطة. ويتبين أن المطالين العقديين للضغط والسرعة الاهتزازية على بعد  $x$  من نهاية الأنابيب يعطيان بالعلاقتين:

$$\hat{P} = \rho_0 c \omega \tilde{A} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (3-39)$$

$$\hat{u} = \omega \tilde{A} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (3-40)$$

من المعادلة (40-3) يمكن أن نلاحظ مايلي:

1. عندما  $x = 0$ ، أي عند نهاية الأنابيب (في مستوى الجدار العاكس) نجد أن  $\hat{u} = 0$ ، فلا يكون هنا حركة اهتزازية لجسيمات الوسط طالما أن الجدار صلب.

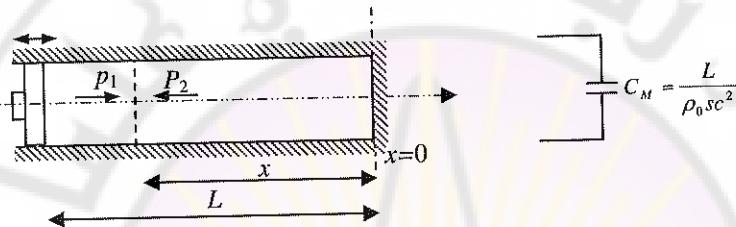
2. عندما  $x = \frac{\lambda}{2}$ ، أو  $x = n \frac{\lambda}{2}$  حيث  $n$  عدد زوجي نجد أيضاً أن  $\hat{u} = 0$ ، أي ليس هناك حركة اهتزازية لجسيمات الوسط طالما أن الجدار صلب. وتسمى النقاط التي يتحقق فيها هذا الشرط (أي نقاط لا حركة) بالعقد أو Nodes نقاط النهايات الدنيا للسرعة.

3. عندما  $x = m \frac{\lambda}{4}$ ، أو  $x = \frac{\lambda}{4}$  حيث  $m$  عدد فردي نجد أن  $\hat{u} = \omega \tilde{A}$ ، أي مطال السرعة الاهتزازية يكون أعظمياً. وتسمى النقاط التي يتحقق فيها هذا الشرط (أي شرط كون مطال السرعة أعظمياً) ببطون السرعة أو نقاط النهايات العظمى Antinodes للسرعة.

يدل وجود العقد بحد ذاته على أن هناك نقاطاً في الأنابيب (في مستويات العقد) لا تتلقى طاقة، ومن ثم نلاحظ أنه في الحالة المفروضة لا يحدث أي انتقال للطاقة الموجية،

فتحافظ دقائق الهواء الموجودة في كل مستوى عمودي على محور الأنابيب (خط انتشار الموجة الساقطة والموجة المتعكسة) على طاقتها ويؤول اهتزازها فقط إلى تبادل الطاقة الحركية والكامنة في كل نقطة باستثناء النقاط الواقعة في مستويات العقد).

مقارنة المعادلة (3-39) مع (3-40)، نستنتج أن عقد السرعة تقابل بطوناً أو نهايات عظمى للضغط وأن بطون السرعة تقابل عقداً أو نهايات صغرى للضغط. وبين الشكل (3-6) تبعية  $\hat{u}$  و  $\hat{p}$  للبعد عن الجدار العاكس  $x$ .



الشكل (3-5): أنبوب قصير الطول مسدود النهاية.

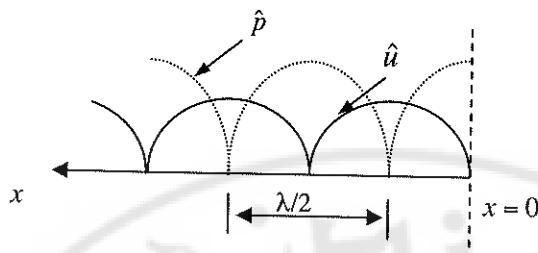
#### أ- في نهاية الأنابيب:

مقارنة العلاقة (3-21) المقابلة لحالة نهاية أنبوب يتّهي بمانعة صوتية نوعية معلومة مع العلاقة (3-40) المقابلة لحالة أنبوب مسدود النهاية، نجد أن معامل الانعكاس في نهاية الأنابيب مسدود النهاية يساوي:

$$\alpha_r = 1 \quad (3-41)$$

بالت遇وض في المعادلة (3-31) نجد أن المانعة الصوتية النوعية لأنبوب مسدود النهاية عند نهايته (مانعة السداد الصلدة) تساوي:

$$Z_{s0} \rightarrow \infty \quad (3-42)$$



الشكل(6-3): تبعية  $\hat{u}$  و  $\hat{p}$  للبعد عن الجدار العاكس  $x$

### ب- في بداية الأنابيب:

يمكن أن نحصل على الممانعة الصوتية النوعية في بداية الأنابيب أي عند  $x = L$ ، وذلك بتعويض المعادلة (3-42) في المعادلة (3-33). ونجد أن:

$$Z_s = \frac{\rho_0 c}{j \tan kL} \quad (3-43)$$

حيث:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3-44)$$

ومن ثم تكون الممانعة الميكانيكية (التي يتعرض لها المكبس المولد للاهتزاز في بداية الأنابيب):

$$Z_M = S Z_s = \frac{\rho_0 c S}{j \tan kL} \quad (3-45)$$

حيث  $S$  سطح مقطع الأنابيب. ومن المعادلة السابقة نلاحظ أن الممانعة  $Z_M$  لمصدر الاهتزاز قد تكون عظمى (لأنهاية) أو صغرى (صفرًا) حسب قيمة  $kL$  على غرار

دارة الرنين التفرعية أو دارة الرنين التسلسلية في الدارات الكهربائية، وذلك في حال إهمال ضياع الاستطاعة (أي في حال إهمال المقاومات).

ففي حال  $kL = m\pi$ , يظهر في بداية الأنوب بطن للسرعة وعقدة للضغط، أي تكون  $Z_M = 0$  فيحدث رنين ميكانيكي يشابه الرنين في دارة كهربائية تسلسلية مؤلفة من ملف ومكثف. وفي حالة  $kL = m\pi/2$ , يظهر في بداية الأنوب بطن للضغط وعقدة للسرعة ، أي  $Z_M \rightarrow \infty$  فيحدث رنين ميكانيكي عكسي يشابه الرنين في دارة كهربائية مؤلفة من ملف ومكثف على التفرع. وفي حال اختلاف طول الموجة عن القيم التي تقابل الرنين، تكون  $Z_M$  ذات طابع تخيلي ويمكن اعتبارها مكافئة لكتلة فقط أو مطاوعة فقط حسب الإشارة الجبرية للحد  $\cot kL$ .

كما ذكرنا سابقاً تتراوح قيمة  $\lambda$  بين 1.7cm و 17m وفي حالات كثيرة نصادف أنابيب قصيرة يكون من أجلها (على الترددات غير المرتفعة جداً، أي للموجات غير القصيرة جداً):

$$kL = \frac{2\pi L}{\lambda} << \frac{\pi}{2} \quad (3-46)$$

يتبيّن من هذه الحالة تقدم السرعة الاهتزازية بالطور على الضغط بمقدار  $90^\circ$ ، على غرار تقدم التيار من خلال مكثف عن الجهد الموجود عليه. وهذا يدل على أن الأنوب المسدود النهاية يكافيء في حال تحقق الشرط السابق مطاوعة  $C_M$  تتحدد ممانعتها التخيلية من العلاقة (3-46). وهكذا يمكن أن نجد المطاوعة المكافئة  $C_M$  من العلاقة:

$$\frac{1}{\omega C_M} \approx \frac{\rho_0 c S}{\tan kL} \quad (3-47)$$

عندما نفترض قيمة  $kL \approx kL$  صغيرة جداً ( $kL \ll \frac{\pi}{2}$ )، فإن  $\tan kL \approx kL$  ، وبالتالي:

$$\frac{1}{\omega C_M} \approx \frac{\rho_0 c S}{kL} \quad (3-48)$$

بแทน  $k$  بقيمتها بدالة التردد الزاوي المبينة في العلاقة (3-23) نجد:

$$C_M \approx \frac{L}{S \rho_0 c^2} \quad (3-49)$$

نلاحظ أن العلاقة السابقة للمطابقة معاكسة لعلاقة السعة الكهربائية من وجهاً نظر التناسب مع  $L$  و  $S$ ، ونلاحظ أيضاً أن  $C_M$  تتناسب عكساً مع  $\rho_0 c^2$  أو معامل المرونة للانضغاط الحجمي  $B$  وذلك يتفق مع المفهوم الفيزيائي للمطابقة.

### ٣ - ٢ - ٤ - ٣ ممانعة الدخل الميكانيكية لأنبوب مفتوح النهاية

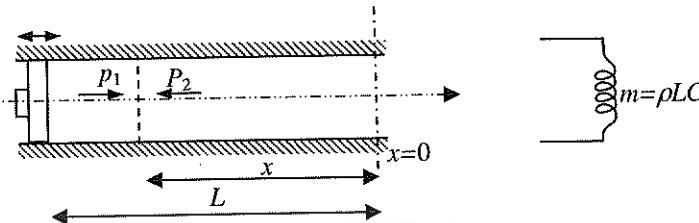
لنفترض أن موجة صوتية مستوية تنتشر داخل أنبوب طوله  $L$  مفتوح النهاية وذي سطح مقطع ثابت  $S$ ، بحيث تتولد الموجة نتيجة لتحرك مكبس بحركة جيبية منتظمة كما هو مبين في الشكل (3-7). وتحدد معادلة الاهتزاز الناتج عن الموجة في نقطة تبعد  $x$  عن نهاية الأنابيب، تبعاً لمعادلة الحركة الموجية ويتبين أن حل المعادلة يكون على النحو:

$$\xi(x, t) = \tilde{A} \exp[(jk)(ct + x)] + \tilde{A} \exp[(jk)(ct - x)] \quad (3-50)$$

أي:

$$\xi_1|_{x=0} = \xi_2|_{x=0} \quad (3-51)$$

حيث  $\xi_1$  يمثل الإزاحة الناتجة عن الموجة الساقطة و  $\xi_2$  يمثل الإزاحة الناتجة عن الموجة المنشورة.



الشكل (7-3): أنبوب قصير الطول مفتوح النهاية.

### أ- في نهاية الأنابيب:

نقارنة العلاقة (3-21) المقابلة لحالة نهاية أنبوب ينتهي بمانعة صوتية نوعية معلومة مع العلاقة (3-51) المقابلة لحالة أنبوب مفتوح النهاية، نجد أن معامل الانعكاس لحالة أنبوب مفتوح النهاية:

$$\alpha_r = -1 \quad (3-52)$$

بالتعويض في المعادلة (3-31) نجد أن المانعة الصوتية لأنبوب مفتوح النهاية في نهايةه تساوي:

$$Z_{s0} = 0 \quad (3-53)$$

### ب- في بداية الأنابيب:

يمكن أن نحصل على المانعة الصوتية في بداية الأنابيب أي عند  $x = L$ ، وذلك بتعويض المعادلة (3-52) في المعادلة (3-32)، فنجد أن:

$$Z_s = j\rho_0 c \tan kL \quad (3-54)$$

من ثم تكون المانعة الميكانيكية (التي يتعرض لها المكبس المولد للإهتزاز في بداية الأنابيب):

$$Z_M = S Z_s = j\rho_0 c s \tan kL \quad (3-55)$$

حيث  $S$  سطح مقطع الأنوب. ومن المعادلة السابقة نلاحظ أن الممانعة  $Z_M$  لمصدر الاهتزاز قد تكون عظمى (لأنهاية) أو صغرى (صفرًا) حسب قيمة  $kL$  على غرار دارة الرنين التفرعية أو دارة الرنين التسلسلية في الدارات الكهربائية، وذلك في حال إهمال ضياع الاستطاعة (أي في حال إهمال المقاومات).

كما ذكرنا سابقاً تتراوح قيمة  $\lambda$  بين  $1.7\text{cm}$  و  $21\text{m}$  وفي حالات كثيرة نصادف أنابيب قصيرة يكون من أجلها (على الترددات غير المرتفعة جداً، أي للووجات غير القصيرة جداً):

$$kL = \frac{2\pi L}{\lambda} \ll \frac{\pi}{2} \quad (3-56)$$

يتبيّن في هذه الحالة تقدّم الضغط بالطور على السرعة الاهتزازية بمقدار  $90^\circ$  على غرار تقدّم الجهد من خلال ملف على التيار المار فيه. وهذا يدل على أن الأنوب المفتوح النهاية يكفي في حال تحقّق الشرط السابق كتلة  $m$  تتحدد قيمتها من العلاقة:

$$\omega m = \rho_0 c S \tan kL \quad (3-57)$$

عندما تكون قيمة  $kL$  صغيرة جداً ( $kL \ll \frac{\pi}{2}$ )، أي  $L \ll \lambda$  فإن وبالناتي:

$$\omega m \approx \rho_0 c S kL \quad (3-58)$$

بتبديل  $k$  بقيمتها بدلالة التردد الزاوي المبينة وفق العلاقة (3-23) نجد:

$$m \approx \rho_0 L S \quad (3-59)$$

نلاحظ أن هذه الكتلة المكافئة تساوي تقريباً الكتلة الفعلية للهواء الموجود داخل الأنوب.

من المفيد التوكيد أن الأنابيب القصيرة المسود النهاية يكفي مطاوعة تتحدد تقريرياً بالمطاوعة (مقلوب القساوة) الفعلية للهواء الحصور ضمنه، أي يتحدد بقابلية الهواء فيه للانضغاط (قابلية لاكتساب الطاقة الكامنة)، بينما نجد أن الأنابيب القصيرة المفتوحة النهاية يكفي كتلة تساوي تقريرياً الكتلة الفعلية للهواء الموجود فيه (قابلية لاكتساب الطاقة الحرارية).

تجدر الإشارة إلى التشابه بين دراسة الموجات الصوتية في الأنابيب ودراسة التيارات والجهود في خطوط النقل في هندسة الاتصالات.

### ٥-٢-٣ تحويل المانعة الصوتية نتيجة لتغير سطح المقطع

لنفترض أن موجة صوتية مستوية تنتشر في أنابيب قصير طوله  $L_1$  وذي سطح مقطع ثابت  $S_1$ ، يتصل بأنابيب ذي سطح مقطع ثابت  $S_2$  كما هو مبين في الشكل (8-3)، بحيث تتولد الموجة نتيجة لتحرك مكبس حركة حبيبة.

في مستوى الانتقال بين الأنابيبين يكون مطال السرعة الاهتزازية صفرأً في المنطقة التي تنتهي بمدار ولا يساوي الصفر في المنطقة المفتوحة. وحسب قانون باسكال يتحقق شرط تساوي قيمي الضغط على جانبي مستوى الانتقال، أي يكون:

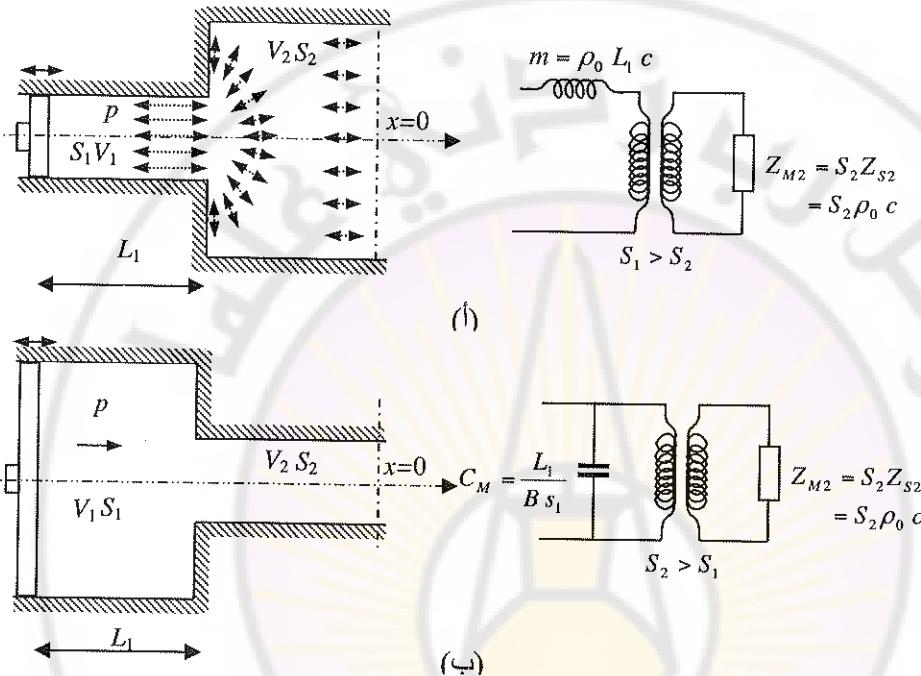
$$p_1 = p_2 \quad (3-60)$$

حيث  $p_1$  يمثل الضغط الصوتي للموجة في الأنابيب الأول و  $p_2$  يمثل الضغط الصوتي للموجة في الأنابيب الثاني.

بالإضافة إلى ذلك نجد أن إزاحة حجم الهواء في الأنابيب الأول في واحدة الزمن  $u_1 S_1$  تساوي إزاحة حجم الهواء في الأنابيب الثاني في واحدة الزمن أيضاً  $u_2 S_2$ ، حيث  $S_1$  و  $S_2$  سطح مقطع الأنابيب الأول والثاني، أي:

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 \quad (3-61)$$

بدلالة القوة  $F_1$  التي تؤثر بها الموجة الصوتية على طبقة الهواء الموجودة في الأنابيب الأول بجوار سطح التلاقي والقوة  $F_2$  التي تؤثر بها الموجة على طبقة الهواء الموجودة في الأنابيب الثاني بجوار ذلك السطح، وذلك على النحو التالي:



الشكل (8-3): الانتشار نتيجة لتغير سطح المقطع.

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \quad (3-62)$$

نلاحظ من المعادلين (3-61) و (3-62) أن:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (3-61)$$

بما أن القوة والسرعة تقابلان وفق التماثل الكهروميكانيكي الجهد والتيار، فإن العلاقة (3-63) تدل على أن الاتصال من أنابيب ذي مقطع  $S_1$  إلى أنابيب

ذى مقطع  $S_2$  يمكن أن يمثل بمحول عدد لفات ملفه الابتدائي يتنااسب مع  $S_1$  وعدد لفات ملفه الثانوي يتنااسب مع  $S_2$ ، وتمثل النسبة  $S_2/S_1$  نسبة التحويل. ويقوم المحول الصوتي Acoustic Transformer أيضاً بتحويل الممانعة أيضاً على غرار المحول الكهربائي إذ إن الممانعة الميكانيكية في الأنابيب الأول بمحوار مستوى تلاقي الأنبوين:

$$Z_{M1} = \frac{F_1}{u_1} = \frac{F_2 \left( \frac{S_1}{S_2} \right)}{u_2 \left( \frac{S_2}{S_1} \right)} = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \frac{F_2}{u_2} \quad (3-64)$$

أي:

$$Z_{M1} = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 Z_{M2} \quad (3-65)$$

حيث  $Z_{M2}$  ممانعة الدخل الميكانيكية للأنبوب الثاني. نجد أن الممانعة الميكانيكية للدخل الأنابيب الثاني كما يراها الأنبوب الأول تحول بنسبة تساوي مربع نسبة سطحي المقطعين (مربع نسبة تحويل الضغط أو السرعة). وإذا افترضنا أن الأنبوب الثاني غير متنه الطول فإن الممانعة الصوتية النوعية داخله تساوي  $c_0$ ، أي تكون الممانعة الميكانيكية:

$$Z_{M2} = S_2 Z_{S2} = \rho_0 c S_2 \quad (3-66)$$

عندئذ نكتب وفق العلاقة (3-66-3):

$$Z_{M1} = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 Z_{M2} = \rho_0 c S_2 \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \quad (3-67)$$

هذا يكافئ انتهاء الأنبوب الأول بسداة مانعتها الصوتية النوعية تساوي:

$$Z_{S_1} = \frac{Z_{M1}}{S_1} = \rho_0 c \frac{S_2}{S_1} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 = \rho_0 c \left( \frac{S_1}{S_2} \right) \quad (3-68)$$

حيث نلاحظ أن الممانعة الصوتية النوعية للأنبوب الثاني  $c$  تقلل للأنبوب الأول بنسبة  $S_1/S_2$ ، بينما نجد من العلاقة (3-65) أن الممانعة الميكانيكية تحول بنسبة  $(S_1/S_2)^2$ .

إذا كان  $S_2 < S_1$  كما في الشكل (8-3)(أ)، فإن الممانعة المكافئة التي ينتهي بها الأنبوب الأول تكون حسب (3-68) تساوي:

$$Z_{S_1} > \rho_0 c \quad (3-69)$$

في هذه الحال يحدث انعكاس جزئي للموجة في الأنبوب الأول عند سطح التلاقي بالأنبوب الثاني ويكون عامل الانعكاس حسب (3-31) أي:  $\alpha_r > 0$ . وتمثل الممانعة في بداية الأنبوب الأول في الحال  $S_2 < S_1$ ، أي في حالة  $Z_{S_1} > \rho_0 c$ ، بداراة مبينة في الشكل (8-3)(أ) حال أنبوب قصير أي ( $L_1 < \lambda$ ) أي أن الأنبوب مكافئ لمطاوعة الهواء المخصوص فيه.

تمثل الممانعة في بداية الأنبوب الأول في الحال  $S_1 < S_2$ ، أي في حالة  $\rho_0 c > Z_{S_1}$ ، بداراة مبينة في الشكل (8-3)(ب) حال أنبوب قصير أي ( $L_1 > \lambda$ ). أي أن الأنبوب مكافئ لكتلة الهواء المخصوص فيه.

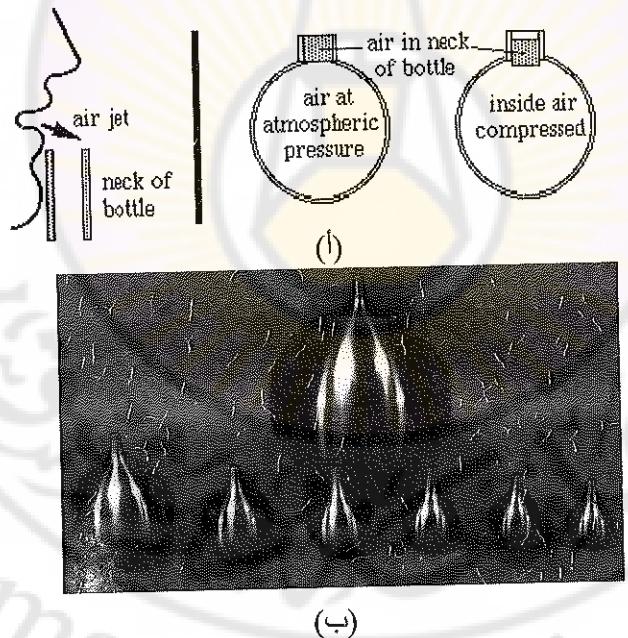
### ٦-٢-٣ رنانة هيلمھولتس Helmholtz Resonance

تعد رنانة هيلمھولتس أحد التطبيقات المهمة لانتشار الأمواج الصوتية في أنابيب. واقتصرت فكرة هذه الرنانة من قبل العالم الألماني Helmholtz وقد طور هذا العالم مجموعة من رنانات لها ترددات مختلفة تسع المجال الترددی السمعي وذلك لدراسة النظام السمعي عند الإنسان. وتتألف الرنانة من تجويف ينتهي بعنق أو أنبوب صغير.

يبين الشكل (9-3)(أ) رسمًا توضيحيًا لمبدأ عمل الرنانة، ويبيّن الشكل (9-3)(ب) عدداً من رنانات هيلمتهولتس مصنوعة من المعدن.

يعتمد مبدأ عمل رنانة هيلمتهولتس على إمكانية الحصول على خواص رئيسيّة بوصول مطاوِعة ميكانيكية  $C_M$  على شكل أنبوب مسدود النهاية وقصير الطول مع كتلة على شكل أنبوب مفتوح النهاية (عنق) وقصير الطول على النحو المبين في الشكل (9-3). وتحدد مطاوِعة الأنبوب المسدود أو التجويف بالعلاقة (3-49) بعد تحويل الممانعة بنسبيّة  $(S_1/S_2)^2$ ، أي تحويل المطاوِعة بنسبيّة  $(S_2/S_1)^2$ :

$$C_M = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \frac{V_2}{BS_2^2} = \frac{V_2}{BS_1^2} \quad (3-70)$$



الشكل (9-3): رنانة هيلمتهولتس. (أ) رسم توضيحي لمبدأ عمل الرنانة، (ب) عدداً من رنانات هيلمتهولتس مصنوعة من المعدن.

حيث  $V_2$  حجم الأنابيب المسدود النهاية (التجويف). ويمكن أن نعد عنق رنانة هيلمھولتس كأنبوب قصير مفتوح النهاية تقريباً ومانعه عبارة عن ممانعة كتلة قيمتها:

$$m = \rho_0 L_1 S_1 \quad (3-71)$$

ولكنه في الواقع غير مفتوح تماماً وإنما محمل على  $1/\omega C_M$ . وبافتراض أن قيمة  $1/\omega C_M$  صغيرة نسبياً، يمكن تشكيل الدارة المكافئة كما هو مبين في الشكل (3-10)، حيث أخذنا في الاعتبار المقاومة  $R_M$  المكافئة لاحتكاك الهواء بجدار العنق خاصة (نظراً لضيقه). . ويعطي تردد الرنين للرانانة وفق العلاقة التالية:

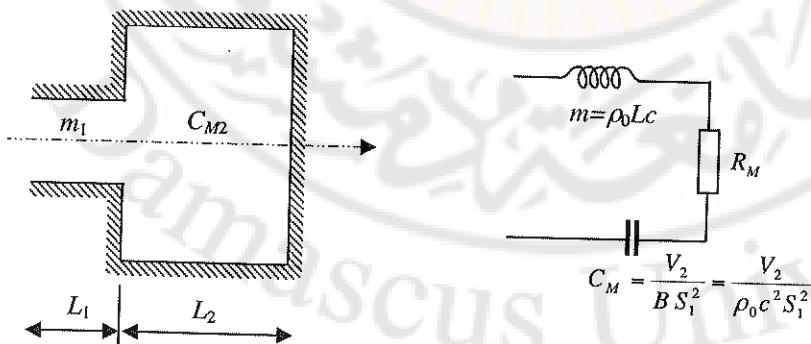
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m C_M}} \quad (3-72)$$

بتعميض العلاقات (3-70) و (3-71) نجد أن:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S_1}{L_1 V_2}} \quad (3-73)$$

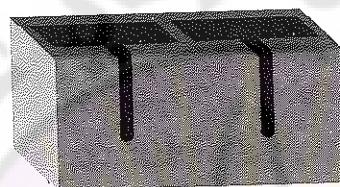
ومن أجل  $\omega_0 < \omega$ ، تكون رنانة هيلمھولتس مكافئة لممانعة مطابقة:

$$Z_M \approx \frac{1}{j\omega C_M} \quad (3-74)$$



الشكل (3-10): رنانة هيلمھولتس.

و تستخدم رنانات هيلمھولتس لزيادة امتصاص الجدران للموجات الصوتية ذات الترددات المنخفضة في القاعات الكبيرة ذات الضجيج العالى، مثل الصالات الرياضية الكبيرة المغلقة، حيث يمكن أن تزود الجدران بفتحات خاصة تشبه الرناة كما هو مبين في الشكل (11-3).



الشكل (11-3): رناة هيلمھولتس خاصة بالجدر المستخدمة في القاعات.

### ٣-٣ الأسس النظرية لحوارات الطاقة

تشير معظم حولات الطاقة بالعكسية Reversibility، فمثلاً يمكن أن يقوم المجهار بدور الميكروفون فيولد إشارة كهربائية إذا أثرت على سطحه المهرّب موجة صوتية. ولكن خصائص تصميم المحاهير يجعلها ذات ميزات جيدة كمحاهير ذات خواص أسوأ كميكرفونات. وتصنف حولات الطاقة الكهربائية إلى فئتين:

- أ- حولات الطاقة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Transducers، وهي تصنف إلى حولات الطاقة الكهربائية Electrodynamics Transducers المسماة أيضاً بـ حولات الطاقة ذات الناقل المتحرك Moving Conductor Transducer الجديدة المتحركة Moving-Iron Transducer.

بـ- محولات الطاقة الكهروستاتيكية Electrostatic Transducers، والتي تصنف بدورها إلى محولات الطاقة المكثفية Condenser Transducers ومحولات الطاقة البيزو كهربائية أو الاجهادية الكهربائية Piezo-Electric Transducer.

وتنتمي إلى محولات الكهربصوتية أيضاً كالميكروفونات الكربونية التي يعتمد مبدأ عملها على تغيير مقاومة طبقة كربونية (غرافيت) عند تغير درجة انضغاطها، واستخدمت في أجهزة الهاتف القديمة، منذ بداية عهد الهاتف.

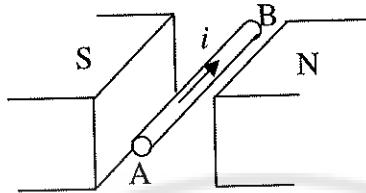
### ١.٣.٣ محولات الطاقة ذات الناقل المتحرك Transducer

لفترض أن تياراً متغيراً  $i$  يسري في ناقل AB في الشكل (12-3)، وأن هذا الناقل موجود في الفرجة الهوائية للقطعتين القطبيتين لمنطيس دائم NS ويمكنه أن يتحرك بسهولة في المستوى العمودي على خطوط الحقل المغناطيسي للفرجة الهوائية. وإذا رمزنا للتحرير المغناطيسي (كثافة التدفق المغناطيسي) في الفرجة الهوائية B ولطول الناقل  $l$ ، فإن القوة المتناوبة المؤثرة على الناقل تساوي:

$$F = Bli \quad (3-75)$$

هذه القوة المتناوبة تجعل الناقل يتحرك حركة اهتزازية، ويعمل بهذا المبدأ المحوار الكهروديناميكي ذو الملف المتحرك. وإذا جعلنا الناقل AB يتحرك حركة اهتزازية بسرعة  $u$ ، يتعرض فيه جهد كهربائي:

$$E = Blu \quad (3-76)$$



الشكل (3-12): مبدأ محول الطاقة الكهروдинاميكية.

أي يقوم محول الطاقة عندئذ بمهام مولد، وتعمل لهذا المبدأ الميكروفونات الكهروдинاميكية. ويمكن إعادة كتابة العلاقاتين علاقتين (3-75) و (3-76) بدلاًلة المطارات:

$$F_m = B l i_m \quad (3-75a)$$

$$E_m = B l u_m \quad (3-76a)$$

ومن العلاقاتين السابقتين نجد أن النسبة بين القوة المتناوبة المؤثرة على الناقل و الجهد الكهربائي المترسخ في الناقل تساوي:

$$\frac{F_m}{i_m} = \frac{E_m}{u_m} = K_T \quad (3-77)$$

حيث

$$K_T = B l \quad (3-78)$$

يسمى الثابت  $K_T$  بعامل التحويل Transducer Factor. ويتميز هذا العامل بأهمية خاصة عند دراسة تأثير المجموعة الميكانيكية على الدارة الكهربائية والعكس بالعكس.

يبين الشكل (3-12)(أ) الدارة المكافحة لمحول الطاقة الكهروديناميكي عندما يعمل مجهاراً. وتمثل  $Z_0$  ممانعة الدارة الكهربائية بحد ذاتها (الممانعة الداخلية للمنبع  $E_M$  وممانعة الناقل) بينما تمثل  $Z'$  تأثير المجموعة الميكانيكية على الدارة الكهربائية. ويقابل

هبوط الجهد على  $Z'$  الجهد المترافق العكسي الذي يتعرض في الناقل المتحرك نتيجة حركته بتأثير الجهد الكهربائي المطبق عليه. ويمكن الاستنتاج أن تأثير المجموعة الميكانيكية على الدارة الكهربائية يكافئ إضافة الممانعة:

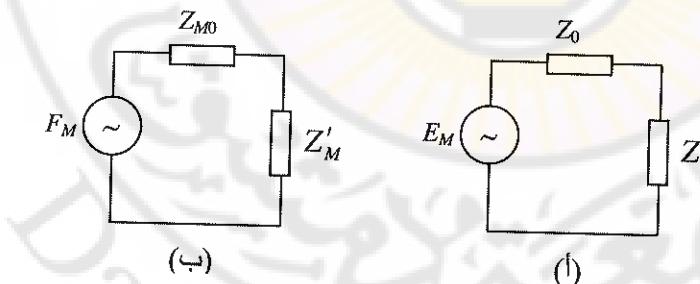
$$Z' = \frac{K_T^2}{Z_M} \quad (3-79)$$

أي أن الممانعة  $Z'$  المنقولة من المجموعة الميكانيكية إلى الدارة الكهربائية تتوقف على عامل التحويل  $K$  والممانعة الميكانيكية  $Z_M$ .

يبين الشكل (3-13)(ب) الدارة المكافئة لمحول الطاقة الكهربوديناميكي عندما يعمل كميكرفون. وتمثل  $Z_{M0}$  ممانعة الدارة الميكانيكية، بينما تمثل  $Z'_M$  الممانعة الميكانيكية المكافئة لتأثير الدارة الكهربائية على المجموعة الميكانيكية على الدارة الكهربائية، وتتساوي:

$$Z'_M = \frac{K_T^2}{Z} \quad (3-80)$$

حيث  $Z$  ممانعة الدرة الكهربائية للميكروفون.



الشكل (3-13): الدارة المكافئة لمحولات الطاقة الكهربوديناميكية.

## ٢-٣-٣ محولات الطاقة ذات الصفيحة الحديدية المتحركة Moving-Iron Transducer

تتألف الدارة المغناطيسية لمحول الطاقة ذي الصفيحة الحديدية المتحركة (الشكل (14-3)) من مغناطيس دائم NS ذي قطعتين قطبيتين Pole Pieces وصفيحة مرنة حديدية. وتسمى هذه الصفيحة عادة الحافظة أو الدراع Armature، وتشتت إحدى نهايتيها على إحدى القطعتين القطبيتين بينما تترك النهاية الأخرى حرية الحركة. ويقف على القطبية الأخرى ملف يمرر من خلاله تيار متغير (تيار الإشارة)، فينتج عنه حقل مغناطيسي متغير يؤدي إلى جذب الصفيحة المرنة إلى القطعة القطبية المقابلة بمقدار متغير، فتتحرك حركة اهتزازية، ويعمل محول الطاقة عندئذ سماعة أو مجهاً.

ويتحدد التدفق المغناطيسي  $\phi_0$  الذي يحدثه المغناطيس الدائم بالعلاقة:

$$\phi_0 = \frac{M_0}{R_{mag}} \quad (3-81)$$

حيث  $M_0$  (القوة الحركية المغناطيسية) للمغناطيس الدائم، و  $R_{mag}$  المقاومة المغناطيسية للدارة المغناطيسية وهي تتحدد أساساً بـ المقاومة المغناطيسية للفرجة الهوائية:

$$R_{mag} = \frac{\delta}{\mu_0 S} \quad (3-82)$$

ترمز  $\delta$  لعرض الفرجة الهوائية بينما يرمز  $S$  لسطح القطعة القطبية المواجهة للفرجة. أما  $\mu_0$  فهي النفاذية المغناطيسية للفراغ وتساوي:

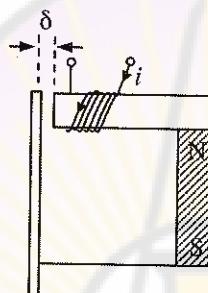
$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Henry/m} \quad (3-83)$$

يمكن الاستنتاج أن محول الطاقة ذات الصفيحة المتحركة (يحقق على غرار محول الطاقة ذي الناقل المتحرك) العلاقة:

$$\frac{F_m}{i_m} = \frac{E_m}{u_m} = K_T \quad (3-84)$$

ويمثل  $K_T$  عامل التحويل ويحدد بالعلاقة:

$$K_T = \frac{\mu_0 S M_0 N}{\delta^2} \quad (3-85)$$



الشكل (14-3): مبدأ محول الطاقة الصفيحة الحديدية المتحركة.

حيث  $S$  سطح القطعة القطبية المواجهة للفرجة، و  $N$  عدد لفات الملف الكهربائي. وبما أن  $\delta$  تتغير عند اهتزاز الصفيحة المرننة فتزيد وتنقص عن قيمة معينة  $\delta_0$  بمقدار موجب أو سالب  $x$ :

$$\delta = \delta_0 + x \quad (3-86)$$

لذلك تتغير قيمة  $K_T$  مع الزمن. ومن جهة أخرى لكي يعمد محول الطاقة خطياً يجب أن يكون عامل التحويل  $K_T$  في العلاقة (3-85) ثابتاً. ويمكن اعتباره ثابتاً تقريرياً إذا كان  $\delta_0 > x$  ومن ثم:

$$K_T = \frac{\mu_0 S M_0 N}{\delta_0^2} \quad (3-87)$$

### ٣-٣-٣ محولات الطاقة المكثفية Condenser Transducer

تمثل محولات الطاقة المكثفية ببساطة أشكالها بمكثف كهربائي يمكن أن تتحرك إحدى صفيحتيه (لبوسيه) حرارة اهتزازية كالمكبس، بينما تكون الصفيحة الأخرى مثبتة بلا حراك (انظر الشكل (3-15)). ويستخدم محول الطاقة المكثفية كميكرفون، كما أنه يمكن أن يستخدم كمجهار. وعندما يعمل مجهاً يطبق على مكثفه مجموع جهد مستمر  $V_0$  وجهد الإشارة المتناوب  $V_a$ ، ويؤدي تغير فرق الجهد بين صفيحي المكثف أي:

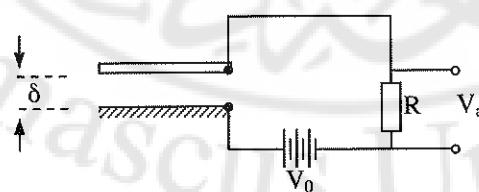
$$V = V_0 + V_a \quad (3-87)$$

إلى تغير قوة تجاذبها فيتحرك اللوح المرن (الحر الحرارة) حرارة اهتزازية متناسبة مع تغير جهد الإشارة المتناوبة، وذلك نتيجة لتغير قيمة سعة المكثف:

$$C_E = \epsilon_0 \frac{S}{\delta} \quad (3-88)$$

حيث  $S$  مساحة كل من لوحي المكثف، و  $\delta$  المسافة بينهما، و  $\epsilon_0$  ثابت العزل في الفراغ ويساوي:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ Farad/m} \quad (3-89)$$



الشكل (3-15): مبدأ محول الطاقة المكثفية.

من ثم فان القوة التي يؤثر بها اللوح الثابت على اللوح المتحرك تساوي:

$$F = \frac{\epsilon_0}{2} \frac{S}{\delta^2} V^2 \quad (3-90)$$

وعندما يعمل محول الطاقة المكثفي كميكروفون يتعرض اللوح المرن إلى موجة صوتية متغيرة مع الزمن مما يؤدي إلى تغير البعد بين لوحيه بمقدار:

$$\delta = \delta_0 + x \quad (3-91)$$

يمكن استنتاج أن الميكروفون المكثفي يمثل منبع جهد مطال جهد ثفين له (انظر الشكل (16-3)):

$$E_m = V_0 \frac{x}{\delta_0} \quad (3-92)$$

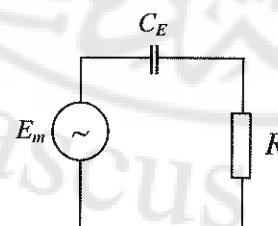
ومانعنه الداخلية (مانعة ثفين) تساوي  $j\omega C_E / 1$ , حيث  $\omega$  التردد الزاوي للإشارة. ويمكن أن نبرهن أيضا على عكسية محول الطاقة المكثفي وفق العلاقة:

$$\frac{E_m}{u_m} = \frac{F_m}{i_m} = K_T \quad (3-93)$$

حيث  $K_T$  عامل التحويل يساوي:

$$K_T \approx \frac{V_0}{\omega \delta_0} \quad (3-94)$$

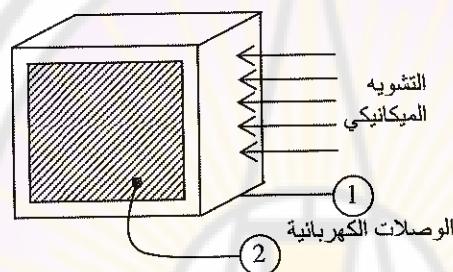
وذلك بافتراض أن  $\delta_0 \ll x \ll V_a$  وأن  $V_0 \ll V_a$ .



الشكل (16-3): الدارة المكافئة لمحوّلات الطاقة المكثفي.

### ٣-٤ محولات الطاقة البيزو كهربائية Piezoelectric Transducer

يعتمد عملها على ظاهرة تلاحظ في بعض المواد ذات التركيب البلوري وتتلخص في انه إذا عرضنا شريحة (الشكل 3-17) من مثل تلك المواد إلى التشويف الميكانيكي تظهر على وجهيها شحنات كهربائية متعاكسة الإشارة، أي يظهر بين وجهيها فرق جهد كهربائي. وتسمى هذه الظاهرة بالتأثير البيزو كهربائي أو التأثير الإجهادي الكهربائي. وتنمّي خواص المواد البيزو كهربائية بالعكوسية، أي إذا وضعنا شريحة منها في حقل كهربائي نلاحظ أن أبعادها الخطية تتغيّر.



الشكل (3-17): محول الطاقة البيزو كهربائي.

يمكن أن يستخدم في محولات الطاقة البيزو كهربائية مادة "بيزو كهربائية" تسمى ملح روتشيل Rochelle Salt، وهو عبارة عن طرطرات الصوديوم والبوتاسيوم، ولكن هذه المادة تفقد خواصها البيزو كهربائية عند ارتفاع درجة الحرارة عن  $55^{\circ}$ . ويمكن أن يستخدم لدرجات حرارة أكثر ارتفاعاً (حتى حوالي  $120^{\circ}$ ) مركب خزفي يسمى تيتانات الباريوم الخزفي (السيراميك)، رغم أن التأثير البيزو كهربائي فيه أقل مما هو في ملح روتشيل.

تتميز محولات الطاقة البيزو كهربائية بالصغر النسبي لمقاساتها، ولكنها تتصرف بعدة عيوب من أهمها عدم الانتظام الكبير لاستجابتها الترددية وتأثيرها الكبير بتغيرات درجة الحرارة، ولذلك لا تستخدم في النظم الكهربائية إلا في حالات نادرة.

## الفصل الرابع

# الميكروفونات (المسماعات)

## The Microphones

الميكروفونات هي محولات طاقة كهربائية تحول الطاقة الصوتية إلى طاقة كهربائية و بذلك تقوم بتحويل الصوت أو الموسيقى إلى إشارات كهربائية ترسل أو تعالج أو تخزن بطريقة ما. ويمكن أن تستخدم الميكروفونات أيضاً كأداة قياس يتم بها تحويل الإشارات الصوتية إلى إشارات كهربائية للتحكم في ريلية (حاكمة) يعتمد عملها على وجود أو غياب إشارة صوتية ذات مستوى محدد مسبقاً. ويمكن تصنيف الميكروفونات من حيث استخدامها إلى:

- ميكروفونات قياس.
- ميكروفونات تسليمة.
- ميكروفونات تقوية صوت.
- ميكروفونات للاستخدامات الإذاعية.

لكل من هذه الأنواع خصائص تجعلها مناسبة لتطبيق دون آخر. تختلف خصائص الميكروفونات وفق العمل المطلوب منها. وعلى سبيل المثال في حالة الميكروفونات المستخدمة في الهواتف يكون من المهم أن يتميز الميكروفون بخرج عالي و برخص الثمن، بينما الأمانة العالية غير مطلوبة. وفي بعض التطبيقات الأخرى قد يكون من المهم انتقاء ميكروفون ذي أبعاد صغيرة وذي أمانة عالية. وقد يحتاج التطبيق إلى قياس الضغط الصوتي وأحياناً أخرى يكون المطلوب قياس مطال اهتزاز جزيئات الوسط. وفي حالة الميكروفونات المستخدمة للتقطاط الكلام قد يكون مهماً أن يكون

الميكروفون موجه كي يلتقط الصوت من المتكلم فقط وربما يكون غير موجه فيلتقط الصوت من كل الاتجاهات. ومن ثم فإن التطبيقات المختلفة تحدد مواصفات وخصائص الميكروفون المطلوب. ولذلك لاختيار الميكروفون المناسب لتطبيق ما، يجب معرفة خصائص هذا الميكروفون بدقة، ورغم اختلاف الميكروفونات في تصميمها، يوصف أداؤها بالخصائص الأساسية التالية:

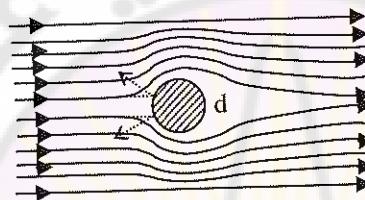
- ١ - الحساسية .Sensitivity
- ٢ - الخصائص الاتجاهية .Directivity
- ٣ - الاستجابة الترددية . Frequency Response
- ٤ - المجال الديناميكي . Dynamic Range
- ٥ - الضجيج الذاتي للميكروفون Internal Noise
- ٦ - الممانعة .Impendence

هناك خصائص أخرى تؤثر على اختبار الميكروفون مثل ظهره الخارجي و مقاومته للظروف الخارجية وغيرها. ونوضح في البند التالي تأثيرات الانعراج على خصائص الميكروفون تمهدًا لدراسة هذه الخصائص.

#### ٤ - ١ - تأثيرات الانعراج على الميكروفون

يطلب من الميكروفون أن يعطي إشارة كهربائية متناسبة مع الاهتزازات الصوتية التي تجري في نقطة ما، بدون أن تؤثر على وجوده تأثيراً ملحوظاً على تلك الاهتزازات. ومن جهة أخرى نعلم أن أي عقبة أو سطح تمثل تغيراً في وسط انتشار الموجة الصوتية يسبب انعكاساً للموجة، بحيث يتوقف عامل الانعكاس على النسبة بين الممانعة الصوتية النوعية للعقبة أو السطح والممانعة الصوتية النوعية للهواء. ويمكن أن تتعكس الموجة عن العقبة أو السطح الذي تواجهه في اتجاه معين، كما يمكن أن تتعكس في

اتجاهات مختلفة مشتتة. ويتوقف تأثير العقبات التي تواجهها الموجة أيضاً على نسبة أبعادها إلى طول الموجة. فمن المعروف أن الموجات عموماً تستطيع الانحراف أو الانزاج Diffraction حول العقبات إذا كان الطول الموجي أكبر من أبعاد العقبة. وقد درست تأثيرات الانزاج بتفصيل في حالة كون العقبة ذات سطح كروي. ويبين الشكل (1-4) كيفية انعطاف الأشعة الصوتية حول كرة قطرها من مرتبة طول الموجة. وذلك مع انعكاس جزء من الطاقة الصوتية عن العقبة في اتجاهات شتى.

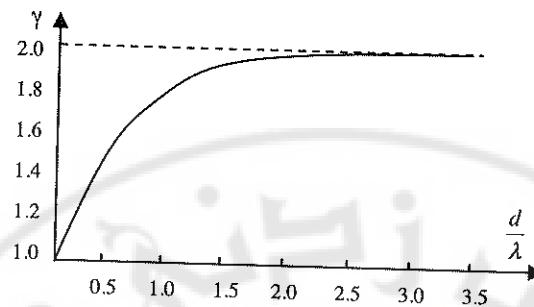


الشكل (1-4): تأثير حاجز أو عقبة على شكل الموجة

يبين الشكل (2-4) تبعية العامل  $\frac{d}{\lambda}$  المعيير عن "تشويه الحقل الصوتي" لنسبة قطر الكرة  $d$  إلى طول الموجة  $\lambda$ , ويمثل العامل  $\frac{d}{\lambda}$  نسبة الضغط الصوتي بعد وضع العقبة  $P$  إلى الضغط الصوتي قبل وضعها  $P$ . ويمكن أن نفترض أن الكرة لا تشوه الحقل الصوتي من حيث الضغط عندما  $1.1 \leq \frac{d}{\lambda} \leq 1$ , أي إذا كانت:

$$\frac{d}{\lambda} < 0.1 \quad (4-1)$$

أي أن العقبة التي لا تزيد أبعادها على عشر طول الموجة لا تشوه تقريباً الحقل الصوتي. وعندما تكون العقبات غير كروية، يكون توزيع الحال الصوتي على سطوحها معقداً جداً. ويدل هذا على أهمية إعطاء الميكروفون شكلًا مناسباً إذا أختناء أملس بأقل أبعاد ممكنة.



الشكل (2-4): العلاقة بين نسبة  $\gamma/p$  ونسبة قطر الكرة إلى طول الموجة.

## ٤ - ٢ خصائص الميكروفونات

### ٤ - ٢ - ١ حساسية الميكروفون

يقصد بحساسية الميكروفون نسبة جهد الخرج المقاس بين طرفي الميكروفون  $V_{out}$  ومقاساً بالفولت إلى الضغط الصوتي المطبق  $p$  مقاساً بالباسكال Pa:

$$\eta_M = \frac{V_{out}}{p} \quad \text{Pa} \quad (4-2)$$

يفترض عادة أن جهد الخرج  $V_{out}$  في العلاقة السابقة هو جهد الدارة المفتوحة Open-Circuit Voltage وذلك لأن الميكروفون يحمل غالباً على ممانعة أكبر بكثير من ممانعته الداخلية. ويمكن أن نعبر عن حساسية الميكروفون أيضاً بالديسيبل وفق

العلاقة:

$$G_M(\text{dB}) = 20 \log \frac{\eta_M}{\eta_0} \quad (4-3)$$

حيث  $\eta_0$  الحساسية المرجعية وتساوي  $1 \text{ Volt/Pa}$ . وعندما يقال مثلاً أن قيمة حساسية الميكروفون هي  $54 \text{ dB}$  - فهذا يعني أن حساسية الميكروفون تساوي:

$$\eta_M \approx 0.5 \frac{\text{V}}{\text{Pa}} \quad (4-4)$$

إذا كان الضغط الصوتي يساوي مثلاً  $10^{-5} \text{ بار}$  فإن قيمة جهد خرج الميكروفون في الحالة المفترضة تساوي  $0.005 \text{ mV}$ .

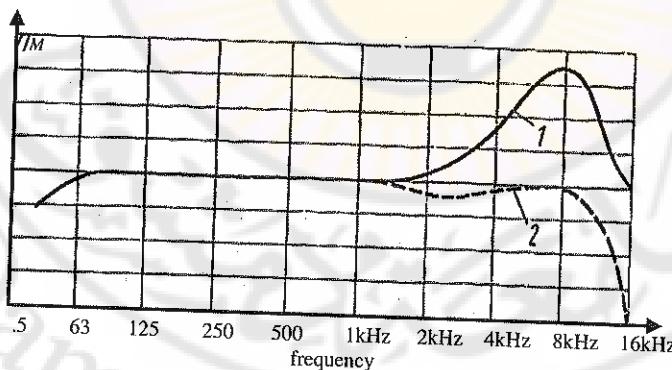
يقصد بالضغط الصوتي  $p$  في العلاقة (4-2) غالباً الضغط الصوتي في المكان الذي وضع فيه الميكروفون والمقاس قبل وضع الميكروفون (أي يقاس الضغط الصوتي  $p$  قبل وضع الميكروفون المعنى بـميكروفون صغير جداً خاص بالقياس). وتسمى الحساسية في هذه الحالة حساسية الميكروفون في حالة الدارة المفتوحة لضغط ثابت Constant pressure open-circuit sensitivity الصوتي بعد وضع الميكروفون يسبب الشكل الخارجي للميكروفون تشوهاً في حقل الموجة الصوتية ومن ثم تحصل على قيمة أخرى للضغط الصوتي  $'p'$ . وتسمى الحساسية المنسوبة إلى هذه القيمة حساسية الميكروفون في حال الدارة المفتوحة للحقل الحر field open-circuit sensitivity free.

بدلاً من قياس الجهد في الحالين السابقتين، في حال عدم التحميل، تقيس بعض الشركات الصناعية في حال تحميل الميكروفون على مقاومة متساوية لمقاومة الداخلية (الكهربائية). ومن المفهوم أن حساسية الميكروفون عند تحميله على هذه المقاومة تكون أقل مما في حال عدم التحميل بمرتين. وينبغي دوماً عند ذكر قيمة الحساسية  $\eta_M$  ذكر ظروف قياسها.

## ٤ - ٢ - الاستجابة التردية Frequency Response

يقصد بالاستجابة التردية للميكروفون تغير جهد خرج الميكروفون تبعاً لتردد الإشارة الصوتية مع ثبات قيمة ضغط الإشارة الصوتية وزاوية ورود الصوت، أي يقصد بالاستجابة التردية للميكروفون تبعية حساسيته لتردد الاهتزازات الصوتية. وبما أن الاستجابة التردية المستوية تعبر عن أمانة أداء الميكروفون بالنسبة للمركبات التردية المختلفة للصوت بدون تشويه مطالي تردد، فمن أهم المتطلبات عند اختيار الميكروفونات أن تكون استجابتها التردية منتظمة (شبه مستوية) بقدر الإمكان لدى تردد واسع (ضمن المجال السمعي).

يبين المنحني رقم (1) في الشكل (3-4) الاستجابة التردية لأحد الميكروفونات المستجيبة للضغط، ونلاحظ أنها تتزايد مع التردد عند الترددات العالية. ويمكن أن يتضح هذا التزايد عن الخصائص التصميمية وتأثيرات الانعكاس والانزراج. ويزود الميكروفون بدارة تسوية Equalizer لتعويض تزايد الاستجابة عند الترددات العالية لتصبح وفق المنحني رقم (2) في الشكل (3-4).



الشكل (3-4): أثر تغير حساسية الميكروفون في الميكروفونات المستجيبة للضغط، المنحني (1) دون استخدام مسوّي، المنحني (2) بعد استخدام مسوّي.

### ٤-٢-٣ الخصائص الاتجاهية Directivity Characteristics

الاتجاهية Directivity هي تغير جهد خرج الميكروفون أو حساسية الميكروفون بعًا لتغير زاوية ورود الصوت عليه بالنسبة إلى المحور الرئيسي Principal axis للميكروفون وهو عادة يكون المحور العمودي على الغشاء. وإذا لم تغير حساسية الميكروفون عند تغيير زاوية سقوط الموجة الصوتية بالنسبة للمحور الأساسي (الصوتي) للميكروفون، فإن الميكروفون يسمى بالميكروفون عدم الاتجاهية non-directional أو الشامل لكل الاتجاهات Omni-directional Microphone، ويمكن أن يستقبل الصوت من جميع الاتجاهات. وإذا رمنا إلى زاوية السقوط  $\theta_i$  فإن حساسية الميكروفون الغير اتجاهي تكون:

$$\eta_M(\theta_i) = \text{Const for all values of } \theta_i \quad (4-5)$$

أما إذا كان الميكروفون يتميز بحساسية أفضل باتجاهات معينة بالمقارنة مع اتجاهات أخرى، فهو يسمى ميكروفوناً اتجاهياً Directional Microphone، وتتوقف حساسيته على الزاوية المخصوصة بين اتجاه سقوط الموجة الصوتية والمحور الرئيسي. وتقيم اتجاهية الميكروفون بالنسبة بين  $(\theta_i)$   $\eta_M$  حساسية الميكروفون عند زاوية سقوط  $\theta_i$  إلى حساسية الميكروفون المحورية (باتجاه المحور)  $(0)$   $\eta_M(0)$  أي عند سقوط الموجة الصوتية عمودياً على غشائه (أي تكون زاوية سقوطه مساوية للصفر). وتسمى هذه النسبة بالاستجابة القطبية للميكروفون Polar Response وتعبر عنها بالعلاقة:

$$\Gamma(\theta_i) = \frac{\eta_M(\theta_i)}{\eta_M(0)} \quad (4-6)$$

يمكن أن يعبر عن الاستجابة القطبية بالديسيبل وفق العلاقة:

$$D_r(\text{dB}) = 20 \log(\Gamma(\theta_i)) \quad (4-7)$$

نُهِّم بِخَصَائِصِ الْاسْتِجَابَةِ الْقَطْبِيَّةِ لِلْمِيكَارُوفُونَ لَاخْتِيَارَ الْمِيكَارُوفُونَ الْمُنْسَبِ وَفِقْهَ الْمُجَالَاتِ اسْتِخْدَامَهُ. وَمِنَ الْمُتَطَلِّبَاتِ الْمُهَمَّةِ الَّتِي يَجِبُ أَنْ تَوَافُرَ فِي الْمِيكَارُوفُونَ دُعْمٌ تَغْيِيرِ اسْتِجَابَتِهِ الْقَطْبِيَّةِ كَثِيرًا عِنْدَ تَغْيِيرِ تَرْدُدِ الْمَوْجَةِ الصَّوْتِيَّةِ.

#### ٤-٢-٤ الضجيج الذاتي للميكروفون Self Noise

يَتَولَّدُ فِي الْمُقاوِمَةِ الدَّاخِلِيَّةِ لِلْمِيكَارُوفُونَ ضَجَيجٌ حَرَارِيٌّ شَانِهِ فِي ذَلِكَ شَأنُ الْمُقاوِمَاتِ، أَيْ يَتَوَاجِدُ عَلَى خَرْجِ الْمِيكَارُوفُونَ جَهْدٌ صَغِيرٌ حَتَّى فِي حَالِ دُعْمٍ وَجُودِ مَوْجَةٍ صَوْتِيَّةٍ مُؤَثِّرَةٍ عَلَيْهِ. وَيُقَصَّدُ بِمَسْتَوِيِّ الضَّجَيجِ الذَّاتِيِّ لِلْمِيكَارُوفُونِ القيمةُ الْمُقَدَّرَةُ بِالْدِيَسِيلِ لِنَسْبَةِ الْجَهْدِ الْفَعَالِ لِلضَّجَيجِ  $V_n$  النَّاتِجُ عَنِ التَّغْيِيرَاتِ الْعَشَوَائِيَّةِ لِلضَّغْطِ فِي الْوَسْطِ الْحَيْطِ وَالضَّجَيجِ الْحَرَارِيِّ لِلْمُقاوِمَاتِ الْمُخْتَلِفَةِ فِي الْجَزْءِ الْكَهْرَبَائِيِّ فِي دَارَةِ الْمِيكَارُوفُونَ إِلَى الْجَهْدِ الْفَعَالِ لِلضَّجَيجِ  $V_{out}$  النَّاتِجُ عَنِ تَأْثِيرِ الْمَوْجَةِ الْمُفِيدَةِ عَلَى دُعْمِ تَطْبِيقِ ضَغْطٍ صَوْتِيٍّ قَدْرِهِ  $0.1\text{Pa}$ :

$$N_n(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_n}{V_{out}}\right) \quad (4-8)$$

مِنَ الْمُهُومِ اخْتِيَارُ حَسَاسِيَّةِ الْمِيكَارُوفُونِ بِحِيثُ نَصْمَنُ نَسْبَةً مُقْبُولَةً بَيْنَ الإِشَارَةِ وَالضَّجَيجِ.

#### ٤-٢-٥ المدى الديناميكي Dynamic Range

المدى الديناميكي للميكروفون هو الفرق بين مستوىً أكبر قيمة للضغط الصوتي لا تنتج تشويهاً لاحظياً في الإشارة الكهربائية، ولا تؤدي إلى عطب الميكروفون ومستوىً أصغر قيمة للضغط الصوتي يمكن أن "يتحسس" لها الميكروفون. ويعطى المدى الديناميكي للميكروفون بالديسيبل، وتبلغ قيمة المدى الديناميكي في الميكروفونات الجيدة التي تستخدم في القياسات الصوتية 120dB.

## ٤-٢-٤ المانعة الداخلية للميكروفون Internal impedance

يقصد بالمانعة الداخلية للميكروفون أو ببساطة مانعة الميكروفون المانعة الداخلية لمكافحة ثفين له. ويفضل غالباً استخدام الميكروفونات منخفضة المانعة لنقل إشارة الميكروفون لمسافات كبيرة نسبياً قد تبلغ 50m.

## ٤-٣-١ ترتيب الميكروفونات

يمكن ترتيب الميكروفونات تبعاً لطرق تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية فهناك الميكروفونات الكهروдинاميكية والميكروفونات الكهرستاتيكية وغيرها وذلك تبعاً للطريق التي سبق شرحها عند دراسة محولات الطاقة الكهروصوتية. ويمكن أن تصنف الميكروفونات تبعاً لخصائص استقبال الموجات الصوتية المؤثرة على الاستجابة القطبية الناتجة، فهناك:

- الميكروفونات المستجيبة للضغط Pressure Microphones
- الميكروفونات المستجيبة لتدرج الضغط Pressure Gradient Microphones
- ميكروفونات تعتمد على الجمع بين خصائص النوعين السابقين معاً.

سنستعرض في هذه الفقرة دراسة لأنواع الميكروفونات انتلاقاً من هذا الترتيب وفق الخصائص الاتجاهية. ويمكن أن تكون الميكروفونات الكهروдинاميكية مستجيبة للضغط أو تدرج الضغط أو كلاهما معاً.

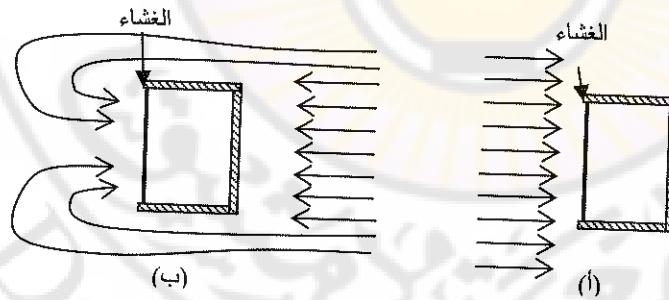
## ٤-٣-٢ الميكروفونات المستجيبة للضغط Pressure Microphones

الميكروفون المستجيب للضغط أو ميكروفون الضغط هو الميكروفون الذي يستجيب للضغط الصوتي الساقط عليه بحيث تكون جهود خرجه متناسبة مع الضغط. ويكون

الميكروفون المستجيب للضغط ذا غشاء رقيق خفيف الوزن وقابلً للاهتزاز، أطرافه مثبتة إلى حجيرة مغلقة (انظر الشكل (4-4)).

سوف نفترض أن الميكروفون ذو غلاف صلاد غير نفوذ للصوت من جميع الجهات ما عدا الجهة الأمامية. ويتبين أن جهد خرج الميكروفون يتعلق في هذه الحالة بالضغط الصوتي المطبق عليه، أي أن الميكروفون يتأثر فقط بقيمة الضغط الصوتي المطبق عليه، ولذا تسمى هذه الميكروفونات بالميكروفونات المستجيبة للضغط.

لنفترض الآن أن أبعاد الميكروفون صغيرة بالمقارنة بالطول الموجي (وهذا يقابل حالة الترددات المتخفضة نسبياً). ومن ثم فإن انعراج الموجة يظهر على نحو كامل نوعاً ما. ويمكن عندئذ اعتبار أن  $p=\text{const}$  لجميع زوايا ورود الموجة المطبقة على الميكروفون. ومن ثم تكون حساسية الميكروفون متساوية لجميع الاتجاهات بالشكل (5-4). ويمكن القول بأن الميكروفون عديم الاتجاهية non-directional أو الشامل لكل الاتجاهات .Omni-directional Microphone



الشكل (4-4): الميكروفون المستجيب للضغط (أ) موجة قادمة من الأمام، (ب) موجة قادمة من

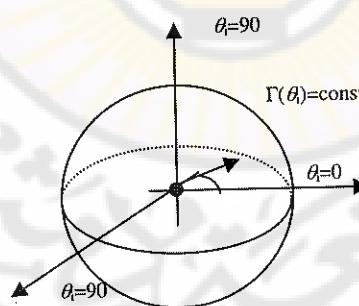
أما إذا كان الطول الموجي أقصر من أبعاد الميكروفون (أي عند الترددات العالية) فإن انعراج الموجة لا يكون كاملاً و تكون الحساسية للجهة الخلفية سيئة، وبالتالي تصبح

الاستجابة للميكروفون القطبية غير ثابتة لجميع الاتجاهات ويصبح الميكروفون اتجاهياً  
Directional Microphone

#### ٤-٣-٢- الميكروفونات المستجيبة لتدرج الضغط Pressure Gradient Microphones

الميكروفون المستجيب لتدرج الضغط أو ببساطة ميكروفون تدرج الضغط هو الميكروفون الذي يستجيب لفرق الضغط المؤثر على الغشاء المهتز من الجهتين الأمامية والخلفية. ويكون الميكروفون المستجيب لتدرج الضغط على نحو مبسط ذا غشاء رقيق يتعرض جانبياً لموجة صوتية كما في الشكل (4-6). وي تعرض هذا الميكروفون في الوقت نفسه إلى موجة تسقط على غشاء المهتز من اليسار فتؤثر عليه بضغط صوتي قدره  $p_1$  كما يتعرض إلى موجة تسقط على غشاء المهتز من اليمين فتؤثر عليه بضغط صوتي قدره  $p_2$  يختلف عن  $p_1$  مدة تساوي  $\Delta L/c$  حيث  $\Delta L$  فرق المسير بين الموجة الساقطة على الغشاء من اليمين والساقطة عليه من اليسار. ويتبين من الشكل (4-6) أن فرق المسير  $\Delta L$  يساوي تقريرياً:

$$\Delta L = L \cos \theta_i \quad (4-9)$$



الشكل (4-5): الميكروفون عديم الاتجاهية.

حيث  $\theta_i$  زاوية سقوط الموجة الصوتية على سطح الغشاء و  $L$  طول الميكروفون.  
ويمكن أن نبين أن القوة المؤثرة على الغشاء تتعلق بتدرج الضغط المطبق أو الفرق بين  
الضغطين المؤثرين على جانبي الغشاء.

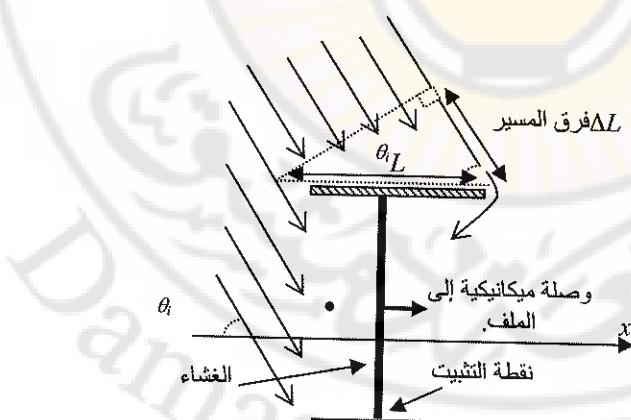
$$F = -S \frac{\partial p}{\partial x} \Delta L \quad (4-10)$$

حيث  $S$  سطح الغشاء المهتز، بينما تمثل  $\frac{\partial p}{\partial x}$  مركبة تدرج الضغط العمودية على  
السطح وباتجاه المحور  $x$ . ولذلك يسمى الميكروفون المعنوي. بميكروفون تدرج الضغط.  
وإذا افترضنا أن الموجة الساقطة موجة مستوية هتزت جيّساً يمكن أن نبين أن مطال القوة  
المؤثرة على الغشاء تساوي:

$$F_m \approx S \cdot p_m \cdot k \cdot L \cdot \cos \theta_i \quad (4-11)$$

حيث إن  $p_m$  مطال الضغط للموجة الصوتية الساقطة على الغشاء. وبالتعويض في  
العلاقة (4-3) يمكن أن نستنتج أن:

$$n_M(\theta_i) \propto S \cdot k \cdot L \cdot \cos \theta_i \quad (4-12)$$

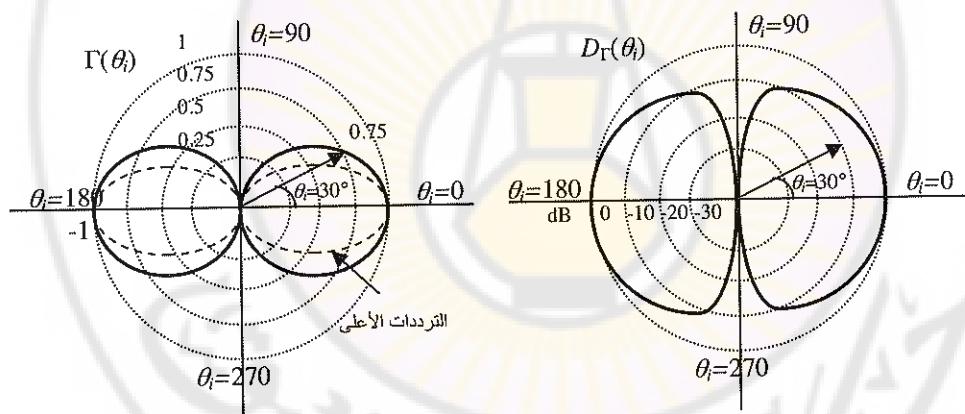


الشكل (4-4): الميكروفون المستجيب لتدرج الضغط.

من أجل تردد معين للموجة الصوتية نجد أن حساسية الميكروفون تتناسب طرداً مع  $\cos \theta_i$ . وبالتالي في العلاقة (4-5) تكون أن الاستجابة القطبية Polar للالميكروفون المستجيب لتدرج الضغط Response:

$$\Gamma(\theta_i) = \frac{\eta_M(\theta_i)}{\eta_M(0)} = \cos \theta_i \quad (4-13)$$

حيث  $\eta_M(0)$  الحساسية المخورية لميكروفون أي عند  $\theta_i = 0^\circ$  ويبين الشكل (7-4) الاستجابة القطبية لميكروفون تدرج الضغط وهي على شكل الرقم 8، وبعد الميكروفون ثانوي الاتجاه. ويتبين من الشكل (7-4) أنه عند ورود موجة صوتية بزاوية  $0^\circ$  أو  $180^\circ$  تكون القوة المؤثرة على العشاء أعظمية أي تكون حساسية الميكروفون أعظمية، أما عند زوايا ورود  $90^\circ$  أو  $270^\circ$  فإن القوة المؤثرة تنتهي أي تكون حساسية الميكروفون معدومة.



الشكل (7-4): الاستجابة القطبية للميكروفون المستجيب لتدرج الضغط.

#### ٤-٣-٣- الميكروفونات التركيبية المستجيبة للضغط وتدرج الضغط

يبيّن الشكل (4-8) نموذجاً لميكروفون تركيبي Combination Microphone يجمع بين خصائص ميكروفون ضغط وميكروفون تدرج الضغط. وهو يتألف من

حجيرة تغلق من الأمام بالغشاء المتأثر بالضغط ومن الخلف تفتح على المحيط الخارجي عن طريق مقاومة صوتية أو فتحة هوائية صغيرة، ولهذا السبب يستجيب جزئياً للضغط كما يستجيب جزئياً لندرج الضغط.

يتعرض هذا الميكروفون في نفس الوقت إلى موجة تسقط على غشاء المهتز من اليسار، فتؤثر عليه بضغط صوتي قدره  $p_1$  كما يتعرض إلى موجة أخرى تسقط على غشاء المهتز من اليمين فتؤثر عليه بضغط صوتي قدره  $p_2$  مختلف عن  $p_1$  مدة تساوي  $\Delta L/c$  حيث  $\Delta L$  فرق المسير بين الموجة الساقطة على الغشاء من اليمين والساقطة عليه من اليسار. ويوضح من الشكل (4-8) أن فرق المسير  $\Delta L$  يعطي بالعلاقة التقريبية:

$$\Delta L = L \cos \theta_i + L \quad (4-14)$$

حيث  $\theta_i$  زاوية سقوط الموجة الصوتية على سطح الغشاء و  $L$  طول الميكروفون. وبالمقارنة مع حالة ميكروفون تدرج الضغط تعبر عن حساسية الميكروفون بالعلاقة:

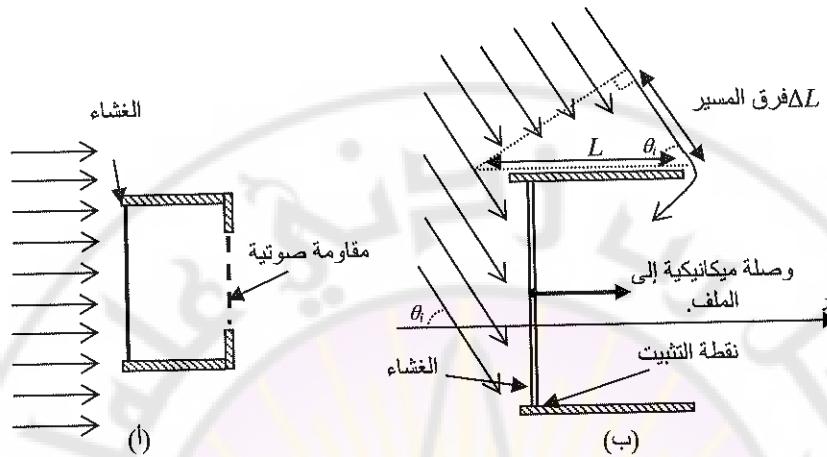
$$\eta_M(\theta_i) \propto S.k.(L \cos \theta_i + L) \quad (4-15)$$

من أجل تردد معين لموجة الصوتية نجد أن حساسية الميكروفون تتناسب طرداً مع  $(1+\cos\theta_i)$ . وبالتعويض في العلاقة (4-6) نجد أن القطبية للميكروفون الترکيبي تساوي:

$$\Gamma(\theta) = \frac{\eta_M(\theta)}{\eta_M(0)} = \frac{1+\cos\theta}{2} \quad (4-16)$$

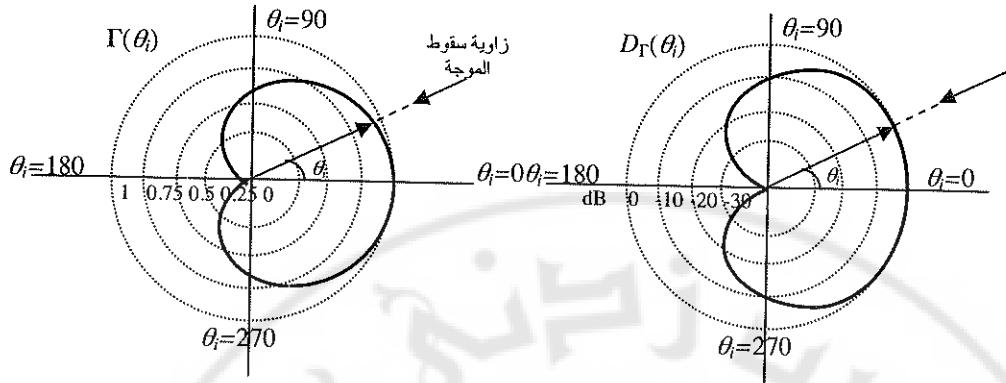
يبين الشكل (4-9) الاستجابة القطبية الناتجة، ونجد أنها بشكل منحني كارديود أي على شكل قلب. وتكون الحساسية عظمى من أجل  $\theta = 0$  وتنقص Cardiod

متناسبة مع التابع  $(1+\cos\theta_i)/2$  من أجل  $\theta_i \neq 0$  وتنعدم عند  $\theta_i = 180^\circ$  ويعني ذلك استجابة الكارديود وحيدة الاتجاه Unidirectional.



الشكل (4-8): الميكروفون التركيبى للضغط وتدرج الضغط (أ) تركيب الميكروفون بشكل عام. (ب) مخطط توضيحي.

يمكن أن نحصل أيضاً على استجابة قطبية بشكل منحني الكارديود، باستخدام ميكروفون يعرض جزء من غشايه للموجة الصوتية من جهة واحدة على غرار الميكروفون المستجيب للضغط، بينما يعرض الجزء الآخر للموجة الصوتية من الجهة الأمامية والخلفية على نحو متماثل تماماً على غرار الميكروفون المستجيب لتدرج الضغط، وباختيار نسبة سطحي الجزئين يمكن أن نحصل على استجابة قطبية أقرب أو أبعد للاستجابة القطبية لميكروفونات الضغط أو للاستجابة القطبية لميكروفونات تدرج الضغط أو حالة وسطى تعطي على استجابة كارديود.



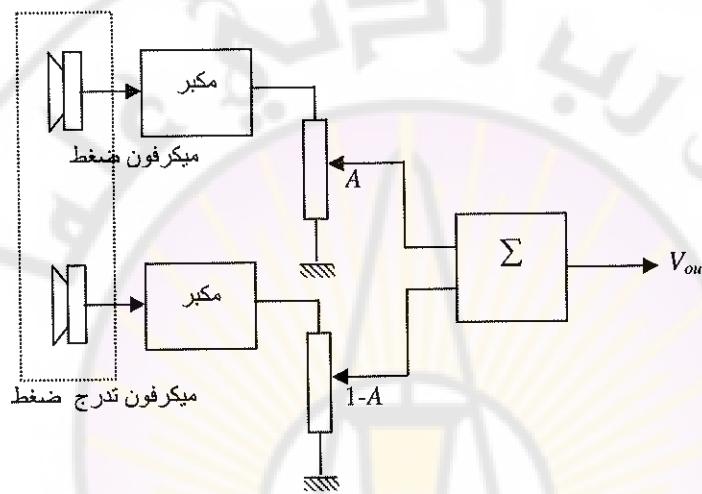
الشكل (9-4): الاستجابة القطبية لميكروفون الكارديود.

يمكن استخدام طريقة أخرى للحصول على استجابة قطبية بشكل كارديود أو أقرب للاستجابة القطبية الدائرية (أي عديمة الاتجاهية) أو الاستجابة القطبية على شكل الرقم 8 بوصول ميكروفونين أحدهما مستجيب للضغط والآخر مستجيب لتدرج الضغط كما هو مبين في الشكل (4-10)، حيث يؤخذ خرج كل من الميكروفونين إما بشكل مستقل أو يجمعان بنسبة قابلة للضبط. ويستعمل عادة بمفتاح متبدل الأوضاع في مؤخرة الميكروفون للحصول على الاستجابات القطبية المختلفة. وإذا كان جهد الدارة المفتوحة لميكروفون الضغط  $V_p$  وجهد الدارة المفتوحة للميكروفون المستجيب لتدرج الضغط  $V_g$  فإن جهد الخرج الناتج يساوي:

$$V_{out} = (1-A)V_p + AV_g \cos(\theta_i) \quad (4-17)$$

حيث  $A$  ثابت يحدد الاستجابة القطبية الناتجة. وعندما  $A=0$  يعطي الميكروفون استجابة قطبية لا اتجاهية كما هو مبين في الشكل (4-4)، وعندما يكون  $A=1$  يصبح الميكروفون مستجيباً لتدرج الضغط وله استجابة مشابه لشكل الرقم 8 كما هو مبين في الشكل (4-7)، وعندما  $A=0.5$  تصبح الاستجابة القطبية للميكروفون بشكل كارديود

كما هو مبين في الشكل (9-4)، وعندما  $A=0.65$  نحصل على استجابة قطبية تسمى هايبر كارديود Hyper-cardiod المبينة في الشكل (11-4)(أ)، وعندما  $A=0.75$  نحصل على استجابة قطبية تسمى سوبر كارديود Super- cardiod المبينة في الشكل (11-4) (ب).

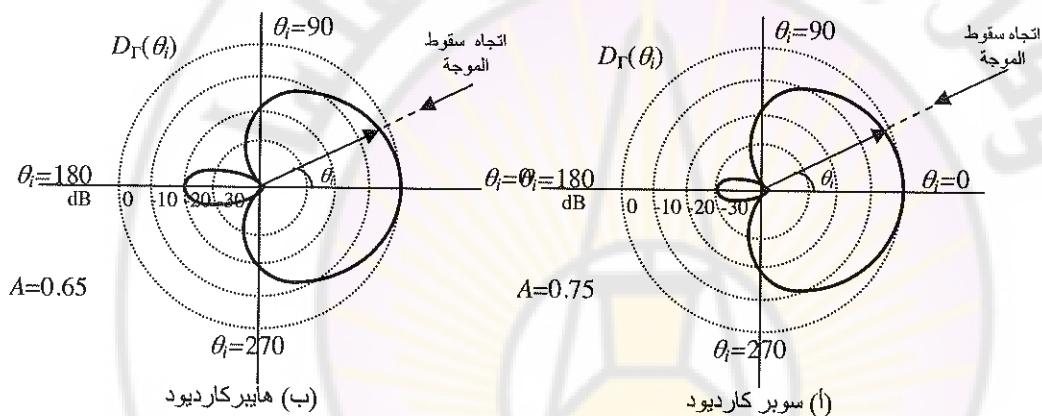


الشكل (10-4): الميكروفون التركيبي المستجيب للضغط وتدرج الضغط (الميكروفون المركب كهربائياً).

عند استخدام الاختلاف الكهربائي لميكروفون الضغط وتدرج الضغط يحيط الميكروفونان بغلاف واحد بحيث يؤلفان وحدة مستقلة تعتبر كميكروفون واحد يشبه باستجابته القطبية الميكروفونات المؤلفة صوتياً، ويسمى الميكروفون الناتج بالميكروفون المركب كهربائياً Electrical Combination Microphone.

تستخدم الميكروفونات ذات استجابة الكارديود على نطاق واسع في المسارح فتوجه نحو الممثلين لتكون حساسيتها عظمى بالنسبة لهم بينما تكون شبه معدومة بالنسبة للمتفرجين الذين يقابلون عندئذ الجهة الخلفية للميكروفون.

إن السبيكة الأساسية لميكروفونات تدرج الضغط والميكروفونات التركيبية المستجيبة للضغط ودرج الضغط هي حساسيتها العالية للتغيرات الهوائية سواء التغيرات الناتجة من تأثير الرياح في حال استخدام الميكروفون في المناطق المفتوحة أو من حركة الهواء الناتجة عن المتكلم نفسه. ويبيّن الشكل (12-4) تأثير التغيرات الهوائية على ميكروفونات تدرج الضغط حيث يتضح أن تأثير الرياح يظهر بشكل أكبر عند الترددات المنخفضة ويكون هذا التأثير أكبر كلما اقترب الميكروفون من المتكلم.

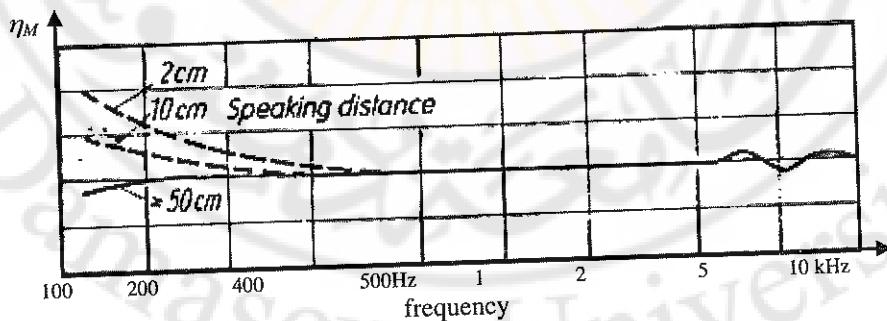


الشكل (11-4): الاستجابة القطبية للميكروفون التركيبية المستجيب للضغط وتدرج الضغط. (أ) سوبر كارديود. (ب) هايريد كارديود.

تؤلف الرياح في المناطق المكشوفة مشكلة كبيرة على جميع أنواع الميكروفونات، ويزداد تأثير الرياح على الميكروفون تبعاً لسرعة الريح والشكل الخارجي للميكروفون. ونخلص إلى القول أن الميكروفونات تتأثر بالريح على نحو مختلف اعتماداً على نوع هذه الميكروفونات. وأهم الاختلافات التي تحدد سلوك الميكروفونات مع الريح هو كون الميكروفون ميكروفون ضغط أو تدرج الضغط. فميكروفونات تدرج الضغط تتحسس لفرق الضغط بين الضغط المطبق على الوجه الأمامي للغشاء والضغط المطبق على

الوجه الخلفي له، وعند الترددات المنخفضة يكون هذا الفرق صغيراً جداً نتيجة الانزراع باعتبار أن الطول الموجي أكبر بكثير من فرق المسير بين دخلي الموجة الصوتية. ومن ثم فإن فرق الضغط الناتج عن الريح المؤثرة يكون أكبر من فرق الضغط الناتج عن الصوت نفسه، ومن ثم يكون من الصعب بالطرق العادلة استخلاص الموجة المفيدة. أما ميكروفونات الضغط فإنها تتأثر بالموجة الصوتية من طرف واحد فقط، وبما أن مطال الموجة الناتجة عن تأثير الريح صغيرة بالمقارنة مع مطال الموجة الصوتية فإن ميكروفونات الضغط تكون أقل تأثراً بالريح من ميكروفونات تدرج الضغط. وحل هذه المشكلة تستخدم حاجبات الريح لتخميد تأثير الريح الساقطة على أغشية الميكروفونات. وأهم ما يميز حاجبات الريح حجمها وشكلها والمواد التي استخدمت في تركيبها ومن ثم درجة تخميدتها للريح بالنسبة للموجة الصوتية المرغوبة.

يتكون حاجب الريح على نحو أساسى من هيكل مفتوح على هيئة شبكة معدنية مغطاة أو مبطنة بطبقة أو أكثر من القطن أو الإسفنج أو من قماش دقيق التسيج. وبالإضافة إلى ذلك يجب على حاجب الريح أن يكون بشكل كروي وذلك لضمان التقليل من تشويه الموجة الصوتية. ويجب الملاحظة أن زيادة فعالية حاجب الريح يؤدي إلى زيادة تخميد الموجة الواردة إلى الميكروفون.



الشكل (4-12): الاستجابة الترددية للميكروفون التركيبى المستجيب للضغط ودرج الضغط تحت تأثير التيارات الهوائية وبعد الميكروفون عن المتكلم.

## ٤-٤ أنواع الميكروفونات

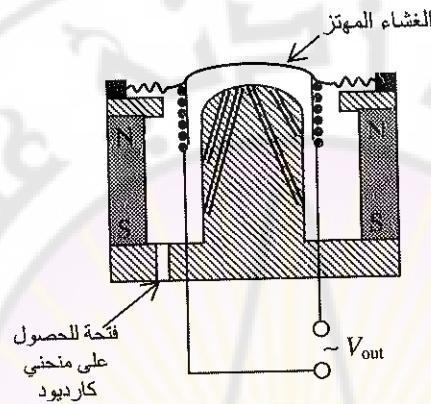
بالإضافة إلى تصنيف الميكروفونات كما ورد أعلاه، يمكن تصنيف الميكروفونات تبعاً لطرق تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. وفي هذه الفقرة سوف نستعرض شرعاً مفصلاً عن الأنواع المستخدمة حالياً.

### ٤-٤-١ الميكروفون الكهروديناميكي ذو الملف المتحرك Moving Coil Microphone

يسمى هذا الميكروفون أيضاً بـ ميكروفون الديناميكي Dynamic Microphone ويكون هذا الميكروفون ذا غشاء رقيق جداً من البلاستيك أو الورق الخفيف جداً لا تزيد كتلته عن  $100\text{ mg}$ ، ويثبت به ملف خفيف جداً قطر سلكه حوالي  $0.05-0.02\text{ mm}$ . ويتحرك الملف في حقل مغناطيسي قوي ينتج عن مغناطيس دائم حلقي الشكل. وعندما تصطدم الموجة الصوتية بالغشاء فإنها تحركه ويتحرك معه الملف الكهربائي فيتحرّك فيه جهد كهربائي يتاسب مع سرعة اهتزاز الغشاء. وبين الشكل (13-4) مقطعاً عرضاً للميكروفون الكهروديناميكي ذي الملف المتحرك.

يصمم الميكروفون ذو الملف المتحرك غالباً كميكروفون مستجيب للضغط، أي يتعرض فيه الغشاء المهتز للموجة الصوتية من جهة واحدة. ولكنه يمكن أن يصمم كميكروفون تركيبي مستجيب للضغط وتدرج الضغط بحيث يعطي استجابة قطبية بشكل كارديود، وذلك بإحداث فتحة خلفية في القسم المغناطيسي كما هو مبين في الشكل (13-4). ويمكن أن يوجد داخل غلاف الميكروفون محول كهربائي لرفع جهد الخرج بنسبة قد تبلغ 100 مرة.

إذا كان الميكروفون ذو الملف المتحرك جيد التصميم، فيمكن أن يكون ذا استجابة تردديّة شبه مستوية في مجال ترددي واسع يمتد مثلاً بين حوالي 40Hz وحوالي 15kHz. ويمكن أن نبين أن الحساسية المخوريّة للميكروفون الديناميكي المستجيب للضغط تعطى بالعلاقة التالية:

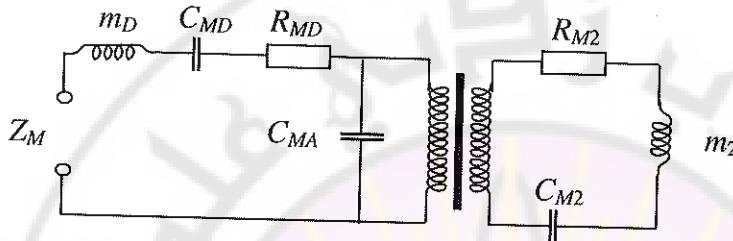


الشكل (4-13): مقطع عرضي للميكروفون الكهربيناميكي ذي الملف المتحرك.

$$\eta_M(0) = \frac{BIS}{Z_M} \quad (4-18)$$

حيث  $B$  التحرير المغناطيسي أو كثافة التدفق في المنطقة التي يهتز فيها الملف الكهربائي،  $I$  طول سلك الملف الكهربائي،  $S$  سطح الغشاء، و  $Z_M$  المانعة الميكانيكية الكلية للمجموعة الميكانيكية. ونستنتج من العلاقة (4-18) أن  $Z_M$  يجب ألا تتغير كثيراً مع التردد حتى نحصل على استجابة تردديّة شبه منتظمة. ويبيّن الشكل (4-14) دارة الماثلة للمجموعة الميكانيكية، وتمثل فيها  $R_{MD}$ ،  $C_{MD}$ ،  $m_D$  كتلة الغشاء المهتز ومطاعنته ومقاومة الميكانيكية المحددة لضياع العلامة، بينما تمثل  $C_{MA}$  مطاوعة الطبقة الهوائية المحصوره تحت الغشاء. ويمثل المحوّل تغيير سطح المقطع نتيجة الانتقال من تلك الطبقة إلى رنانة هيلمهولتس المؤلفة من العنزو والتحويف.

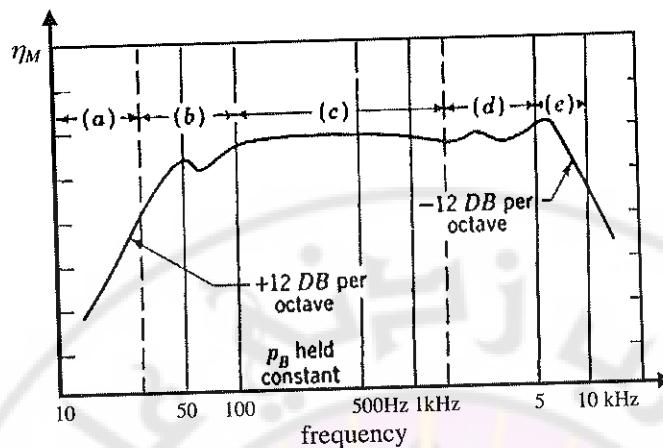
الداخلي. وتمثل الممانعة الميكانيكية لرنانة هيلمھولتس في الشكل (14-4) بالعناصر  $R_{M2}$ ,  $C_{M2}$ ,  $m_2$ . ويستنتج من الدارة المكافئة أن الممانعة الميكانيكية تكون كبيرة عند الترددات المنخفضة، وتتناقص مع زيادة التردد حتى تتعذر عدم حدوث الرنين الميكانيكي التسلسلي ثم تصبح كبيرة عند حدوث الرنين الميكانيكي التفرعي.



الشكل (14-4): التمثيل الديناميكي للممانعة الميكانيكية الكلية للميكروفون الديناميكي.

تستخدم عدة طرق لإضعاف تغير  $Z_M$  مع التردد، ومنها طريقة تركيب غشاء حريري بقرب فتحة عنق رنانة هيلمھولتس لإنقاص عامل جودتها. ويمكن أن تستخدم طريقة إحداث فتحات إضافية ضيقة في القسم المغناطيسي الأوسط، كما في الشكل (13-4)، حيث يكافي وجود تلك الفتحات إضافة عدة دارات رنين بعوامل جودة منخفضة في الدارة الثانوية في الشكل (14-4). ويبيّن الشكل (15-4) الاستجابة التردديّة لأحد الميكروفونات الديناميكية.

تتميز الميكروفونات الديناميكية ببنائها وهي متوافرة بأسعار متفاوتة جداً تبعاً لمواصفاتها. ومن أهم مساوئ هذه الميكروفونات عدم الانتظام الكبير نسبياً لاستجابتها التردديّة (بالمقارنة مع الميكروفونات الكهروستاتيكية المقاربة بالسعر)، بالإضافة إلى تأثيرها بالحقول المغناطيسية المحيطة.



الشكل (4-15): الاستجابة التردية للميكروفون الديناميكي.

#### ٤-٤-٢ الميكروفون الشريطي Ribbon Microphone

يعتبر الميكروفون الشريطي من الميكروفونات المستجيبة لتدريج الضغط وهو يبدأ عمله من محولات الطاقة الكهربائية. ويتألف الشريط من مغناطيس نصف حلقي وناقل مغناطيسي (كما في الشكل (4-19)) وعشاء شريطي متعدد رقيق جداً طوله حوالي 25mm، وعرضه حوالي 2mm، وسماكته حوالي  $2.5\mu\text{m}$  ومصنوع من الألミニوم. وبالعودة إلى العلاقات (4-17) و (4-18) يمكن أن نستنتج أن حساسية الميكروفون الشريطي:

$$\eta_M = \frac{V_{out}}{p} = \frac{Blu}{p} = \frac{Bl(Spk\Delta L)}{pZ_M} \quad (4-19)$$

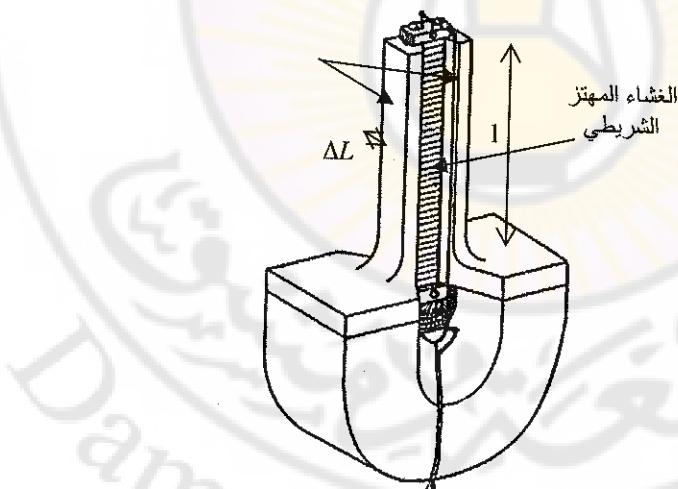
بالاختصار نجد:

$$\eta_M = \frac{Bl S k \Delta L}{Z_M} \quad (4-20)$$

حيث  $B$  التحرير المغناطيسي (كثافة التدفق المغناطيسي) في الفرجة الهوائية و  $l$  طول النافل والذي يساوي هنا طول الشريط [انظر الشكل (4-4)],  $u$  السرعة الاهتزازية للشريط، و  $S$  سطح الغشاء، و  $\Delta L$  فرق المسير بين الموجة الساقطة من أمام الغشاء والموجة الساقطة من خلفه، وهي تساوي:

$$\Delta L = l \cos \theta \quad (4-21)$$

حيث  $l$  سمك الميكروفون المحددة لفرق المسير بين الموجتين الأمامية والخلفية في حالة السقوط الحوري و  $\theta$  زاوية سقوط الموجة الصوتية. ولكي تكون الاستجابة الترددية للميكروفون مستوية تقريباً، أي لكي تكون حساسية الميكروفون مستقلة عن التردد لابد أن تكون الممانعة الميكانيكية  $Z_M$  متناسبة مع التردد أي محاكمة بالكتلة، ولذلك نختار قيمة المطابقة كبيرة جداً حتى يكون تردد الرنين الميكانيكي أقل من أدنى من المجال السمعي المطلوب.



الشكل (4-16): الميكروفون الكهربيناميكي الشريطي.

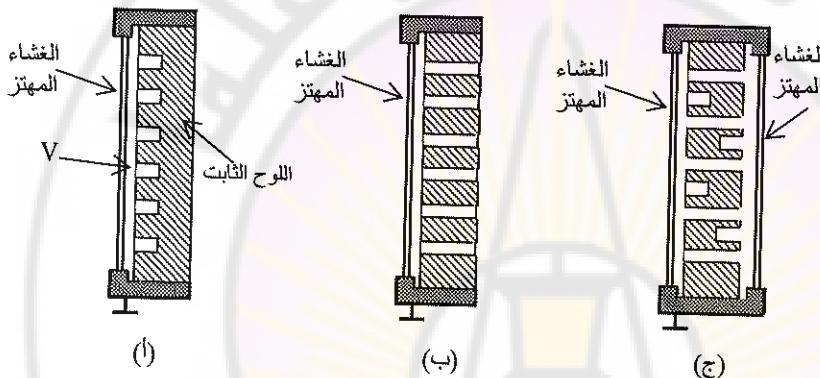
يمتاز الميكروفون باستجابة تردديّة واسعة المجال تتراوح بين حوالي 40-50Hz و حوالي 12-15kHz. وبسبب ضعف حساسية هذا الميكروفون (في حدود 0.06-0.1 mV/Pa)، وحجمه الكبير نسبياً، وتعرضه السريع للعطب وخصوصاً عند تعرضه لصيمة ميكانيكية. ولقد قل استخدام هذا النوع من الميكروفونات حالياً.

#### ٤-٣- الميكروفون الكهروستاتيكي Electrostatic Microphone

يتألف الميكروفون الكهروستاتيكي أو الميكروفون المكثفي Condenser Microphone من مكثف صغير له صفيحتان إحداهما عبارة عن غشاء رقيق مشدود من الألミニوم، وهو قابل للاهتزاز تحت تأثير الموجات الصوتية عند سقوطها عليه، بينما تكون الصفيحة الأخرى عادةً ثابتة وعزلة عن الغشاء الأمامي وتبعد عنه مسافة صغيرة جداً (مثلاً  $25\mu\text{m}$ ). ويصل على التسلسل مع الميكروفون مصدر جهد استقطاب Polarizing Voltage مستمر ومقاومة حمل. وعندما يتعرض الميكروفون لتأثير موجة ساقطة عليه يهتز الغشاء الأمامي بشكل يتناسب مع القيمة اللحظية للضغط الصوتي، ونتيجة لذلك تغير المسافة الفاصلة بين لبوسي المكثف. وهذا بدوره يغير قيمة سعة المكثف. ويؤدي تغير السعة إلى تغير التيار المار في الدارة وحيث يمر تيار الشحن عند تزايد السعة وتيار التفريغ عند نقصانها وبذلك يمر في الدارة تيار متغير. ومن ثم يظهر على مقاومة الحمل جهد متغير يتناسب مع الضغط الصوتي المؤثر على الغشاء المهتز. وبين الشكل (17-4) مقطعاً عرضياً للميكروفون الكهروستاتيكي أو المكثفي Condenser Microphone.

تكون السعة الكهربائية للميكروفون المكثفي وسطياً بين 40 و 50 بيکوفاراد، وقد تصل في بعض الميكروفونات عالية الأداء إلى حوالي 5 بيکوفاراد. وحتى لا تؤدي هذه السعة المنخفضة نسبياً إلى انخفاض حساسية الميكروفون عند انخفاض الترددات

الصوتية، يجب أن تكون ممانعة الحمل من رتبة عشرات الميلاً أوم. ولذلك لا يمكنأخذ الإشارة من الميكروفون المكثفي بخط نقل مباشرهً مهما يكن هذا الخط قصيراً، حيث يمكن لسعته أن تكون أكبر من سعة الميكروفون نفسه. لذلك يتم وصل الميكروفون مع دارة مكبر أولي ذات ممانعة دخل عالية توضع عادةً داخل نفس غلاف الميكروفون، ويستخدم فيها غالباً ترانزistor التأثير الحقلـي FET. ويـبين الشـكل (4-18) دارـة مبـسطـة لـتوـصـيلـ مـيكـروفـونـ مـكـثـفـيـ إـلـىـ دـارـةـ تـرـانـزـىـسـتـورـ مـنـ نوعـ FET.

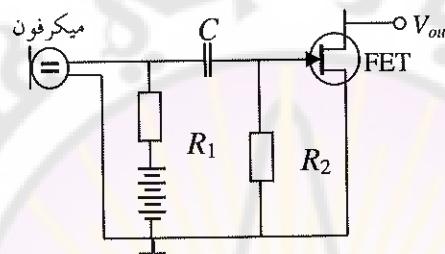


الشكل (4-17): مقطعـا عـرـضـيا لـمـيكـروفـونـ المـكـثـفـيـ.  
 (أ) مـيكـروفـونـ ضـغـطـ.  
 (ب) مـيكـروفـونـ تـرـدـيـجـ ضـغـطـ.  
 (ج) مـيكـروفـونـ تـرـدـيـجـ ثـانـيـ الغـشاءـ.

يعد الميكروفون المكثفي عادةً أفضل الميكروفونات من حيث انتظام الاستجابة التردـديةـ فيـ جـمـالـ وـاسـعـ يـمـكـنـ أنـ يـمـتدـ منـ أـجـزـاءـ الـمـيـلـيـ هـرـتزـ إـلـىـ أـكـثـرـ مـنـ مـئـةـ كـيـلوـ هـرـتزـ. وتـكونـ حـسـاسـيـةـ المـيكـروفـونـ المـكـثـفـيـ (ـعـمـلـيـ)ـ مـنـ مـرـتـبةـ 10mV/Paـ عندـ استـخدـامـ جـهـدـ اـسـقـطـاطـ مـنـ مـرـتـبةـ 60Vـ.

يـصمـمـ المـيكـروفـونـ المـكـثـفـيـ غالـباًـ بـحيـثـ يـتـعرـضـ الغـشاءـ المـهـترـ فـيـهـ لـلـمـوجـةـ الصـوـتـيـةـ مـنـ جـهـةـ وـاحـدةـ،ـ كـماـ مـيـنـ فيـ الشـكـلـ (4-17)(أ)،ـ لـكـيـ يـعـملـ كـمـيكـروفـونـ مـسـتـحـيـبـ للـضـغـطـ.ـ وـيمـكـنـ أنـ يـصـمـمـ المـيكـروفـونـ المـكـثـفـيـ أـيـضاًـ،ـ بـحيـثـ يـكـونـ مـسـتـحـيـباًـ

لتدرج الضغط وذلك بإحداث فتحات في الصفيحة الخلفية للميكروفون كما هو مبين في الشكل (17-4)(ب)، ويمكن أن يصمم أيضاً بحيث تكون استجابته القطبية بشكل كارديود وتكون بعض طرازات الميكروفونات المكثفية ذات غشائين مهترئين يثبتان أمام وخلف اللوح الثابت، كما هو مبين في الشكل (17-4)(ج)، وبحيث يمكن تغيير استجابته القطبية لتكون على نحو دائرة او على هيئة رقم 8 أو بشكل كارديود.



الشكل (18-4): دارة مكبر أولي لميكروفون مكثفي باستخدام ترانزستور من نوع FET.

يبين الشكل (19-4) دارة المماطلة للميكروفون المكثفي، حيث تمثل  $m_D$  كتلة الغشاء المهترئ ومطاوئته والمقاومة الميكانيكية المحددة لضياع الطاقة، بينما تمثل  $C_{MA}$  مطاوئعة الطبقة الهوائية المحصورة تحت الغشاء. ويمكن تحديد جهد خرج الميكروفون من العلاقة:

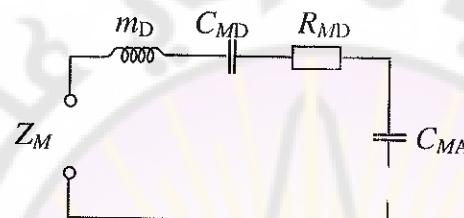
$$\frac{E}{u} = \frac{F}{i} = K_T \quad (4-22)$$

حيث  $K_T$  عامل التحويل الكهروميكانيكي ويساوي:

$$K_T \approx \frac{V_0}{\omega \cdot \delta_0} \quad (4-23)$$

حيث  $V_0$  الجهد المستمر المطبق، و  $\delta_0$  البعد الوسطي بين لوحى المكثف، و  $u$  سرعة اهتزاز الغشاء المهتز، و  $E$  جهد ثقنين المكافئ. وإذا عوضنا السرعة الاهتزازية بالقيمة  $F/Z_M$  وافتراضنا أن جهد الخرج  $V_{out}=E$  فعندئذ:

$$V_{out} = \frac{V_0}{\omega \cdot \delta_0} \frac{F_m}{Z_M} = \frac{V_0}{\omega \cdot \delta_0} \frac{S \cdot p}{Z_M} \quad (4-24)$$



الشكل (4-19): التمثيل الديناميكي للممانعة الميكانيكية الكلية للميكروفون المكثفي.

حيث  $S$  سطح الغشاء المهتز. وتعطى حساسية الميكروفون المكثفي بالعلاقة:

$$\eta_M = \frac{V_{out}}{p} = \frac{V_0}{\omega \cdot \delta_0} \frac{S}{Z_M} \quad (4-25)$$

لكي تكون حساسية الميكروفون مستقلة عن التردد تقريباً أي لكي تكون الاستجابة الترددية مستوية تقريباً، يجب أن تغير  $Z_M$  عكسياً مع التردد، ولذا يجعل  $Z_M$  ممحونة بالمطاوعة  $C_M$ ، ونكتب:

$$Z_M = \frac{1}{\omega C_M} \quad (4-26)$$

حيث  $C_M$  هي المطاوعة الكلية للدارة أي:

$$C_M = \frac{C_{MD} C_{MA}}{C_{MD} + C_{MA}} \quad (4-27)$$

لكي تكون  $Z_M$  ممحونة بالمطاوعة يجعل تردد الرنين الميكانيكي أعلى من الحد العلوي لل المجال الترددية السمعي المطلوب، علمًاً أن تردد الرنين يتحدد بالمطاوعة  $C_M$  وبكتلة الغشاء المهتز، أي يجب أن يكون كل من مطاوعة الغشاء وكتله أصغر ما يمكن. وبنفس الوقت لزيادة حساسية الميكروفون وفق العلاقة (4-24) يجب إنقاص المانعة الميكانيكية  $Z_M$  أي زيادة المطاوعة  $C_M$  بما في ذلك  $C_{MA}$ ، بشرط أن لا تؤدي زيادتها إلى خفض كبير لتردد الرنين الميكانيكي، لأنه يجب أن يبقى فوق أعلى تردد سمعي كما نوهنا. وباعتبار أن قيمة مطاوعة الطبقة الهوائية تتعدد بالعلاقة:

$$C_{MA} = \frac{V}{BS^2} \quad (4-28)$$

فهذا يعني أن زيادة المطاوعة تتطلب زيادة حجم الطبقة الهوائية خلف الغشاء  $V$  بنسبة أكبر من مساحة سطح الغشاء  $S$ ، ولذلك يمكن أن تختار صفيحة ثابتة ذات تجاويف كما هو موضح في الشكل (4-17). ويمكن أن نلخص مزايا الميكروفون المكثفي بما يلي:

- إمكانية الحصول على استجابة ترددية منتظمة خلال مجال تردد عريض.
- إمكانية الحصول على حساسية عالية جداً.
- حجم صغير جداً مما يجعل دون حدوث اضطراب للموجة الصوتية.
- عدم تأثر الميكروفون بالحقول المغناطيسية المحيطة.

بالإضافة إلى أنه يمكن التحكم باستقطاب الميكروفون بدارات تحكم خاصة. وبنفس الوقت للميكروفون المكثفي عدد من المساوى أهمها:

- يحتاج الميكروفون إلى جهد استقطاب، وجهد لتغذية المكثف الأولي.

#### • يتأثر الميكروفون بالكهرباء الساكنة.

يستخدم على نطاق واسع نوع من الميكروفونات الكهربائية يسمى الميكروفون الالكتروني Electret Microphone، وهو ذو غشاء مهتر مصنوع من غشاء بلاستيكي مستقطب Polarized، بحيث تتم تغطية سطحه الخارجي بطبيعة من الألミニوم. وبفضل جهد الاستقطاب الذاتي للغشاء البلاستيكي لا يحتاج الميكروفون إلى مصدر جهد استقطاب خارجي.

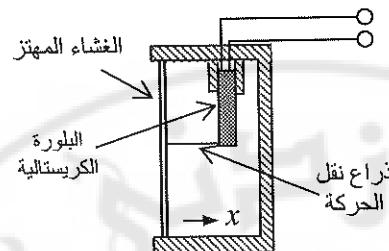
### ٤-٤-٤ الميكروفون البيزو كهربائي أو الكريستالي Microphone

سبق أن بينا مبدأ عمل هذا الميكروفون عند دراسة محولات الطاقة البيزو كهربائية. ويتميز هذا الميكروفون بحساسية مرتفعة نسبياً من مرتبة  $5-10 \text{ mv/Pa}$  أو أعلى، إلا أن استجابته الترددية ذات عدم انتظام كبير، وخصوصاً عند الترددات الواقعة بين  $1 \text{ kHz}$  و  $5 \text{ kHz}$ . ويضاف إلى ذلك أن العنصر البيزو كهربائي المستخدم سهل العطب ويعتمد عمله كثيراً على درجة الحرارة والرطوبة ولذلك لا يستخدم هذا النوع في الكهربصويات على نطاق واسع. وبين الشكل (4-20) مقطعاً عرضياً للميكروفون البيزو كهربائي.

### ٤-٤-٥ الميكروفون الكربوني The Carbon Microphone

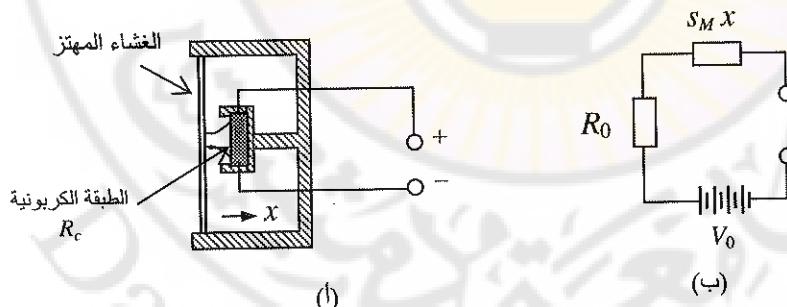
يعتمد مبدأ الميكروفون الكربوني على تغير مقاومة طبقة من مسحوق الكربون نتيجة لتضاغطها تبعاً لقيمة الضغط الصوتي. فعندما تسقط الموجة الصوتية على الغشاء المهتر تنتقل هذه الحركة إلى الطبقة الكربونية التي تغير مقاومتها النوعية على نحو خططي تقريباً مع الضغط الصوتي المطبق. ويوصل على التسلسل مع الميكروفون الكربوني مصدر جهد

مستمر  $V_0$  ومقاومة حمل. وعند تغير مقاومة الطبقة الكربونية يتغير التيار المار في الدارة، وبذلك ينبع على مقاومة الحمل جهد متناسب مع الضغط الصوتي.



الشكل (4-20): مقطعاً عرضاً للميكروفون البيزوكهربائي (الكريستالي).

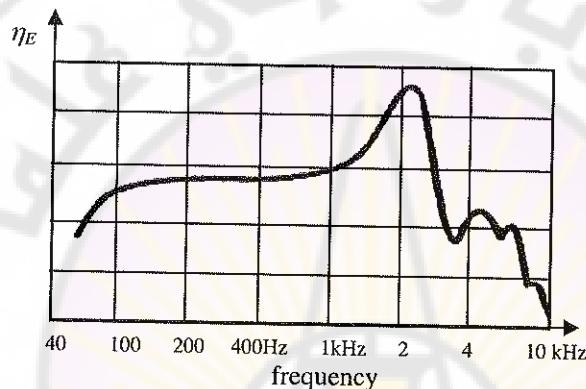
يتميز الميكروفون الكربوني بحساسية مرتفعة، يمكن أن تبلغ حوالي  $1 \text{ Pa/V}$  من أجل جهد تغذية من مرتبة  $V$ . 50. ولكن استجابته الترددية غير منتظمة، ولا تكون مقبولة إلا في مجال ضيق. ولذلك لا يستخدم الميكروفون الكربوني غالباً إلا في أجهزة الهاتف. ويبين الشكل (22-4) الاستجابة الترددية لأحد الميكروفونات الكربونية.



الشكل (21-4): الميكروفون الكربوني (أ) مقطعاً عرضاً للميكروفون. (ب) الدارة الكهربائية المكافئة.

## ٤-٥ أنواع خاصة من الميكروفونات Special Microphones

بالإضافة إلى الأنواع القياسية من الميكروفونات التي بیناها سابقاً، توجد أنواع أخرى من الميكروفونات واسعة الاستخدام صممت خصيصاً لاستخدامات خاصة مثل نظم تقوية الصوت. وفي هذه الفقرة سوف نستعرض شرحاً مقتضاياً لأكثر هذه الأنواع انتشاراً.



الشكل (22-4): الاستجابة التردية لميكروفون كربوني.

## ٤-٥-١ الميكروفون ذو الملقط والميكروفون الرقي Microphone

لتفادى التغذية الخلفية الموجبة (والتي ستحدث عنها لاحقاً بالتفصيل) ولالتقاط أصوات الأشخاص في أثناء تحركهم، فمن الأفضل وضع الميكروفون في مكان قريب جداً لنبع الصوت. وللسماح بحرية الحركة للشخص المتكلم، يمكن أن نستخدم ميكروفون ذو ملقط Clip-on Microphone (وهو مزود بملقط مخصص للتشبيط على ثياب المتكلم)، كما يمكن أن يستخدم ميكروفون رقي أو ميكروفون لافالير (وهو ذو حلب مخصص للتعليق حول الرقبة).

يكون الميكروفون ذو الملقط في معظم الأحيان من الميكروفونات الكهروستاتيكية المستجيبة للضغط أي عديمة الاتجاهية، وذلك لأن الميكروفونات الكهروستاتيكية تتميز بالحساسية العالية، والاستجابة الترددية المنتظمة بالإضافة إلى مقاساتها الصغيرة.

نظراً لأن الميكروفون الرقبي يوضع على صدر المتكلم فإن مجالاً ترددياً ضيقاً من صوت الكلام ينتقل إلى الميكروفون عن طريق اهتزازات عظام صدر المتكلم في أثناء الكلام. ولذلك يزود هذا الميكروفون بدارات تسوية Equalizer لتخفيض تلك الاهتزازات. ويكون الميكروفون الرقبي عبارة عن ميكروفون ديناميكي مستجيبةً للضغط، ويمكن استخدامه أيضاً في نظم تقوية الصوت بسبب قرينه من منبع الصوت.

تستخدم الميكروفونات ذوات الملقط و الميكروفونات الرقبية في كثير من طرازات الميكروفونات اللاسلكية Wireless Microphones، وهي الميكروفونات التي تكون مزودة بمرسلات لنقل الإشارة الكهربائية لاسلكياً إلى مستقبلات خاصة يتم وصلها سلكياً إلى التجهيزات الصوتية وذلك لإعطاء المتكلم حرية الحركة. وتستخدم الميكروفونات اللاسلكية موجات ذات ترددات حاملة قابلة للضبط أو الاختيار ضمن المحالين الترددين VHF و UHF.

#### ٤-٥ الميكروفون الحلقاني Throat Microphone

هو الميكروفون الذي يتأثر غشاوته بتماسه المباشر بالجزء الخارجي من الحلق وهو في ذلك أقرب ما يكون إلى حساس الانزياح. ويستخدم هذا الميكروفون بصورة خاصة في ظروف الضجيج العالي كما هو الحال في الحوامات والدبابات وحديثاً في النظم المقدادة كلامياً على أرض المعركة، حيث يكون الميكروفون مركباً على خوذة الجندي أو الطيار وينطبق الميكروفون على الحلق عندما تزور الخوذة. وتتصف هذه الميكروفونات بحساسيتها

المنخفضة جداً وخصوصاً عند الترددات العالية حيث تعطي مفهومية أقل للإشارة الكلامية.

#### ٤-٥-٣ الميكروفونات المخصصة للآلات الموسيقية ذوات الاستطاعة الصوتية

##### الضعيفة

تستخدم هذه الميكروفونات لالتقطان الإشارات الصوتية من الآلات الموسيقية ضعيفة الاستطاعة والتي يمكن أن تعمل ضمن بيئة محيطة عالية الضجيج، وذلك لمنع التداخل مع أصوات آلات أخرى. فمثلاً تستخدم هذه الميكروفونات لالتقطان صوت الآلات الموسيقية الورقية كصوت عود مثلاً يعزف عليه ضمن فرقة موسيقية كبيرة.

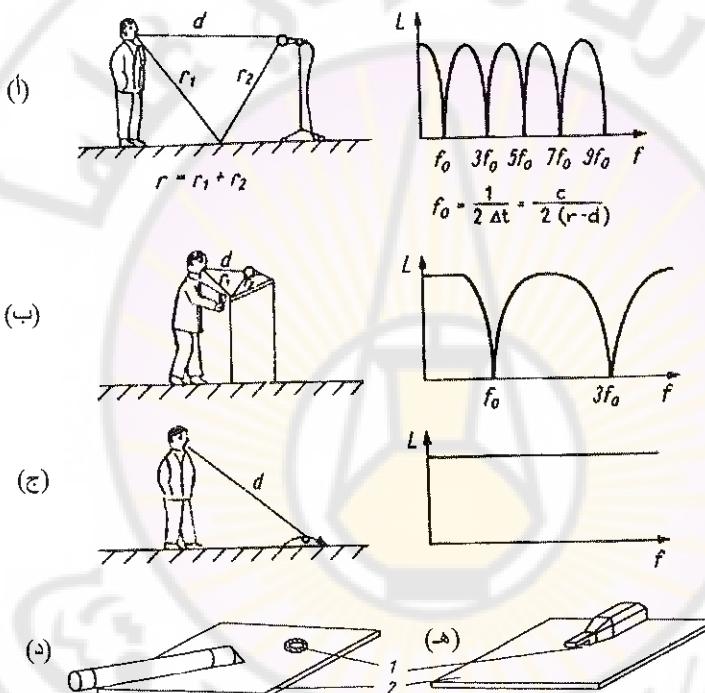
يمكن أن يكون الميكروفون مصمماً بحيث يتأثر غشاوته بتماسه المباشر بالأوتار الموسيقية وهو يشابه بذلك عمل الميكروفون الحلقاني، أو يمكن أن يركب بالقرب من منبع الصوت أي بالقرب من أوتار الآلة الموسيقية وهو يشابه بذلك الميكروفون الملقاط.

#### ٤-٥-٤ الميكروفون الحدودي Boundary Microphone

في نظم تقوية الصوت في المسارح وقاعات المحاضرات يثبت الميكروفون على قاعدة خاصة أمام المتكلّم (يكون ارتفاعها عادة بين 1.2 m إلى 1.5 m). وهذه الطريقة تؤدي إلى نشوء تشوه في الموجة الصوتية، حيث يرد إلى الميكروفون موجة مباشرة وموجة منعكسة مما يؤدي إلى نشوء ظاهرة ظاهرة الخفوت في الاتصالات، وهي تدعى ظاهرة المرشح المشطي Comb Filter. وهذا التشوه يؤدي إلى سماع صوت قوي أو مكبوت. ويوضح الشكل (4-23)(أ- ب) ظاهرة المرشح المشطي.

للتخلص من هذه الظاهرة يمكن وضع الميكروفون بحيث يكون قريباً من سطح الأرض وذلك لاستقبال الصوت المنعكس مباشرة من الأرض كما مبين في

الشكل (4-23)(ج). ويستخدم في الحال المعينة ميكروفون ذو استجابة قطبية بشكل كارديود أو سوبر كارديود. ويمكن أن يثبت الميكروفون على سطح قطعة معدنية بحيث يوجه غشاء الميكروفون نحو الأعلى كما مبين في الشكل (4-23)(د)، أو يمكن أن يوجه غشاء الميكروفون نحو الأسفل بحيث يستقبل الموجة الصوتية المنعكسة من سطح الصفيحة كما موضح في الشكل (4-23)(ه).



الشكل (4-23): الميكروفون الحدوسي (أ) و (ب) ظاهرة المرشح المشطي.  
 (ج) استخدام الميكروفون الحدوسي. (د) الميكروفون مثبت من الأعلى. (ه) الميكروفون مثبت من الأسفل.

## ٤-٦ توصيل الميكروفونات Microphones Connection

تعطى مواصفات الميكروفونات عادة في ظروف الدارة المفتوحة، ولكن بعض التطبيقات تتطلب أن يغذى الميكروفون حملاً ذا ممانعة محدودة. فإذا قيست خصائص الميكروفون وهو محمل مثلاً بمانعة تساوي ممانعته الداخلية فإن ميزات أدائه تختلف عن حال الدارة المفتوحة. وإذا كانت كل من الممانعة الداخلية ومانعة الحمل مقاومة بمحنة، فإن التغير الوحيد المحتمل هو نقصان مستوى الإشارة الناتجة مع ثبات الخصائص الترددية. أما إذا كانت ممانعة الحمل تتغير مع التردد فإن الاستجابة الترددية للميكروفون ستتأثر وستختلف عن تلك المعطاة في مواصفاته. وهذا يحدث إذا كان الكابل الذي يصل الميكروفون بالكمير الأولى ذا سعة كبيرة بين ناقليه. فكلما زادت سعة الكابل كلما زاد تخميد الترددات العالية، وهذا السبب لا يستحسن أن يكون طول كابل الميكروفون عادة أكثر من حوالي  $8\text{ m}$  إذا لم تكون الممانعة الداخلية للميكروفون منخفضة لدرجة كافية.

إذا استخدمنا ميكروفونات منخفضة الممانعة، بحيث تكون ممانعتها بين 20 و 200 أوم، فيمكن وصلها بكابل يصل طوله إلى أكثر من  $75\text{ m}$  بدون تأثير ملحوظ على الاستجابة الترددية. ويمكن القول: إن كابل توصيل الميكروفون يمكن أن يكون أطول كلما كانت ممانعة الميكروفون (مقاومته) أقل قيمة. وإذا كان من الضروري استخدام كابل طويل جداً نسبياً، فينصح بوضع مكير ترانزستوري أولي قريباً من الميكروفون بحيث يكون ذي كسب قابلاً للضبط وذلك للتعويض عن التخميد الذي يمكن أن ينشأ عن خط التوصيل.

## الفصل الخامس

### المجاهير

### The Loudspeakers

المجهاهار هو الوسيلة التي تقوم بتحويل الإشارة الكهربائية ذات الترددات السمعية إلى اهتزازات ميكانيكية تنتج موجات صوتية في المحيط. ويعتبر المجهاهار الحلقة الأخيرة في النظم الكهربائية حيث يربط بين مكبر الاستطاعة السمعية والهواء المحيط. وهناك أنواع كثيرة من المجاهير، أهمها المجهاهار ذو الملف المتحرك (أو المجهاهار الكهروديناميكي) والمجهاهار الكهروستاتيكي، والمجهاهار البيزو كهربائي. ولا تستخدم في النظم الصوتية عادة إلا المجاهير الكهروديناميكية، لأنها تعطي الموصفات الكهربائية المطلوبة بأبعد غير كبيرة نسبياً، بينما يمكن أن تستخدم أنواع أخرى من المجاهير في الحواسيب والمنبهات وبعض التطبيقات الخاصة التي تتطلب توليد اهتزازات سمعية مرتفعة التردد (مثلاً الاهتزازات فوق السمعية).

هناك نوعان رئيسيان من المجاهير، يعرف النوع الأول بالمجهاهار ذي الإشعاع المباشر، وله غشاء مهتز، يهتز ليعض الصوت مباشرة إلى الهواء المحيط (مثلاً المجهاهار الكهروديناميكي ذو الملف المتحرك). ويعرف النوع الثاني بالمجهاهار ذي الإشعاع الغير مباشر ويكون عادة ذا بوق يربط بين المجهاهار والهواء.

من البديهي أن لكل مجهاهار تطبيقاً مناسباً له لذلك يتم اختيار المجهاهار تبعاً للتطبيق وتبعاً لمواصفاته الفنية. وقبل التعرض للشرح المفصل لتركيب المجاهير، سوف نستعرض أهم مواصفاتها وخصائصها الفنية.

## ١-٥ الموصفات الفنية للمجاهير **Loudspeakers Properties**

لقد قامت المنظمات القياسية العالمية بتصنيف الخصائص القياسية للمجاهير. ونورد فيما يلي أهم هذه الخصائص ونطبقها لحالة المجهار الكهربائي ذي الملف المتحرك إلا إذا ذكر خلاف ذلك.

### ١-١-٥ المانعة الكهربائية للمجهار **Loudspeaker's Electrical Impedance**

يقصد بالمانعة الكهربائية للمجهار المانعة المحددة بين الطرفين اللذين توصل إليهما إشارة الصوت (أي بين طرفي الملف في حالة المجهار الكهربائي ذي الملف المتحرك)، وتكون قيمتها غالباً عند تردد الرنين الكهربائي للمجهار في حدود 4-16 أوم. ويفضل غالباً تصميم مكبر الاستطاعة السمعية وفق قيمة ممانعة المجهار بحيث نحصل على أعظم استطاعة خرج من المكبر دون تشويه.

### ١-٢-٥ الاستطاعة القصوى **Power Handling**

تستخدم الشركات الصناعية للمجاهير تعاريف مختلفة للاستطاعة القصوى التي تسمى غالباً الاستطاعة "المقنة" العظمى Maximum Power Rating أو المقدرة Power Handling Capacity. وتعرفها أغلب الأعجمية من حيث الاستطاعة التي تسمى الصناعية للمجهار بأكبر قيمة للاستطاعة خرج المكبر السمعي في حال الإشارة الجوية بحيث لا تتجاوز التشووهات غير الخطية حداً معيناً (مثلاً 5%) أو بحيث لا يحدث عطب ميكانيكي أو حراري للمجهار.

تسمى الاستطاعة المحددة في حالة استخدام إشارة اختبار جوية الاستطاعة الاسمية Nominal Power. وقد تستخدم لقياس الاستطاعة القصوى للمجهار إشارات اختبار أخرى مثل إشارة الضجيج Pink Noise.

وهي تتميز بأن الكثافة الطيفية لاستطاعتها تنحدر بمعدل 3dB لكل أوكتاف 3dB/Octave، بينما هي ثابتة مع التردد في حالة الضجيج الأبيض.

ينبغي التمييز بين الاستطاعة المتوسطة (الاستطاعة المستمرة Continues Power التي تسمى أحياناً باستطاعة rms) وبين استطاعة الذروة تبعاً لإشارة الاختبار، ففي حالة الإشارة الجيبية تكون استطاعة الذروة ضعف الاستطاعة المستمرة بينما في حالة الضجيج الوردي الذي يتم الحدّ فيه من قيم الذروة على مستوى 6 dB، تكون استطاعة الذروة أربع أضعاف الاستطاعة المستمرة. ويشار إلى أن أكثر الشركات تفترض أن الاستطاعة المستمرة للمجهار في حالة الضجيج الوردي مماثلة تقريباً للاستطاعة المستمرة في حال الإشارة الجيبية.

من المهم جداً عند مقارنة المحاهير من حيث الاستطاعة القصوى معرفة الشروط التي حددت فيها الشركة الصانعة قيمة تلك الاستطاعة.

### ٣-١ مردود المجهار

يقصد بمردود المجهار نسبة الاستطاعة الصوتية التي يولدها المجهار  $P_A$  إلى الاستطاعة الكهربائية  $P_E$  التي يغذي بها أي:

$$\eta_A = \frac{P_A}{P_E} \quad (5-1)$$

يكون مردود معظم المحاهير منخفضاً جداً وتتفاوت قيمته غالباً في حدود 0.3-1%， ولكن يمكن أن تصل إلى 5% في المحاهير البواسقة. ويجد أن نشير إلى أن معظم الشركات الصانعة للمجهاهير لا تذكر قيمة المردود بشكل صريح، ولكن يمكن استنتاج قيمته من معطيات أخرى تورد ضمن نشرات الموصفات الفنية للمجهاهير.

## ٤-١-٤ حساسية المجهار Loudspeaker Sensitivity

هي عبارة عن قيمة الضغط الصوتي في وسط غير متناه في نقطة تقع على محوره الصوتي وتبعد 1 m عن مرکزه الصوتي وذلك عندما يغذي المجهار بإشارة جيبية ترددتها 1000 Hz وجهدتها الفعالة V الذي يحدده المجهار ويكافئ ذلك تحديد الحساسية

وفق العلاقة:

$$\eta_s = \frac{p_A}{V} \quad [\text{Pa/V}] \quad (5-2)$$

حيث V جهد الدخل مقاساً بالفولت V و  $p_A$  الضغط الصوتي مقاساً بالباسكال Pa، على المحور الصوتي وعلى بعد 1 m من المرکز الصوتي للمجهار. ويمكن التعبير عن حساسية المجهار بالديسيبل فنحصل على العلاقة:

$$G_s[\text{dB}] = 20 \log\left(\frac{\eta_s}{\eta_0}\right) \quad (5-3)$$

حيث  $\eta_0$  الحساسية المرجعية وتساوي 1 Pa/V. تعبر شركات أخرى عن حساسية المجهار بقيمة الضغط الصوتي المحوري المقاس على بعد 1 m عند تطبيق إشارة جيبية استطاعتها W 1 أو الضغط الصوتي المقاس عند تطبيق الاستطاعة العظمى للمجهار.

يجدر الإشارة إلى أن الضغط الصوتي المعير عن الحساسية يقاس في الولايات المتحدة على بعد (4 قدم). بدلاً من المسافة 1 m المعتمدة في معظم بلدان العالم.

## ٤-١-٥ الاستجابة الترددية Frequency Response

يعبر عن الاستجابة الترددية Frequency response بالمنحنى الذي يمثل تغير الاستطاعة الصوتية أو الضغط الصوتي المحوري على بعد 1 m كتابع للتردد مع الحفاظ على قيمة ثابتة للجهد أو استطاعة إشارة دخل المجهار. يفضل عادة أن تكون

الاستجابة التردية منتظمة ضمن المجال الترددي السمعي بدقة كافية (مثلاً بحدود . $3\text{dB}$ )

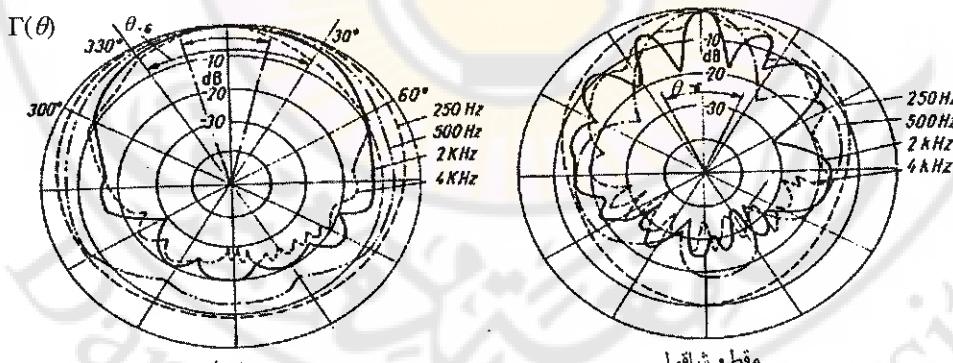
## ٦-١-٥ الاستجابة الاتجاهية Directivity Response

يعبر عنها بنسبة الضغط الصوتي  $p_A(\theta)$  الناتج عن المجهار باتجاه يميل بزاوية معينة  $\theta$  عن الاتجاه الحوري وعلى بعد  $r$  من المركز الصوتي للمجهار، إلى الضغط الصوتي الذي يحدده المجهار في نقطة تقع على المحور الصوتي وتبعد البعد  $r$  نفسه عن المركز الصوتي (عادةً على بعد  $1\text{m}$ ). ويعبر عن الاستجابة الاتجاهية بالعلاقة:

$$\Gamma(\theta) = \frac{p_A(\theta)}{p_A(0)} \quad (5-4)$$

يكون في الحالة العامة  $\Gamma(\theta) \leq 1$ . ويمكن التعبير عن الاستجابة الاتجاهية عادة بالدسيبل وتساوي:

$$D_s(\theta) = 20 \log[\Gamma(\theta)] \quad [\text{dB}] \quad (5-5)$$



الشكل (6-1): الاستجابة القطبية للمجهار كهروдинاميكي عند ترددات مختلفة (المقطعين الأفقي والشاقولي).

تمثل الاستجابة الاتجاهية غالباً بالإحداثيات القطبية ولذلك تسمى أيضاً الاستجابة القطبية Polar response. وبين الشكل (1-5) الاستجابة القطبية لجهاز معين بالنسبة للزاوية  $\theta$  في كل من المقطعين الأفقي والشاقولي.

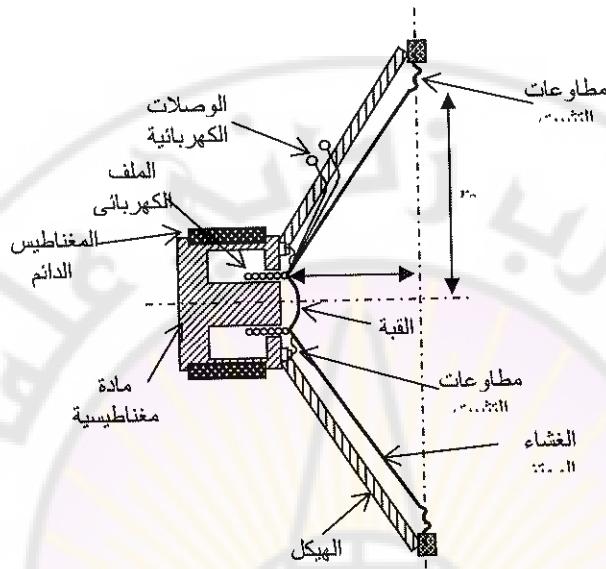
تعتبر الاستجابة القطبية إحدى الموصفات المهمة للمجاهير، وتنستخرج فيها زاوية التغطية، و تعرف بأنها الزاوية التي تنخفض فيها الاستجابة القطبية المعيّر عنها بالعلاقة (5-5) (يمقدار يساوي 6 dB، أو أحياناً 3 أو 10 dB).

## ٢-٥ الجهاز الكهروديناميكي ذو الملف المتحرك

تعدّ المجاهير الكهروديناميكية من أكثر المجاهير انتشاراً وتعتمد في عملها على مبدأ محول الطاقة الكهروديناميكي ذي الملف المتحرك. ويتألف الجهاز الكهروديناميكي ذو الإشعاع المباشر كما مبين في الشكل (2-6) من غشاء على هيئة مخروط Cone مصنوع من الورق المقوى أو من الألミニوم، يثبت طرافاه الداخلي والخارجي إلى الهيكل الداعم بمطاوّعات ثبيت. وتصنع هذه المطاوّعات في المجاهير الرخيصة من مادة الغشاء نفسها. بينما تصنع في المجاهير عالية الأداء من مواد لدنّة خاصة وذلك لإعطاء الجهاز خصائص أفضل. وتسمح هذه المطاوّعات بحرية حركة للغشاء بالاتجاه العمودي على سطحه فقط.

يثبت بالغشاء من المنتصف ملف كهربائي دائري الشكل بحيث يكون قابلاً للحركة ضمن حقل مغناطيسي قوي يتبع عن مغناطيس ضمن دارات مغناطيسية مناسبة. ويصنع الملف بحيث يكون خفيفاً قدر الإمكان بحيث لا يضيق حملأً ميكانيكياً إضافياً إلى المجموعة الميكانيكية. ويتم وصل الملف الكهربائي بوصلتين كهربائيتين مرنتين يثبت طرافاهما المخصوصان لتوصيل إشارة الدخول على الهيكل الداعم. ويُعطى الملف الكهربائي بقبة Dome، تصنع في المجاهير رخيصة الثمن من

مادة الغشاء أو تصنع من مادة خاصة في المحاير عالية الأداء بحيث تمر إلى الأمام الموجة الصوتية بعد أن تتعكس عن المجموعة المغناطيسية التي تمثل مرآة بالنسبة لها.



الشكل (5-2): مقطع عرضي للمجهار الكهروديناميكي ذي الملف المتحرك.

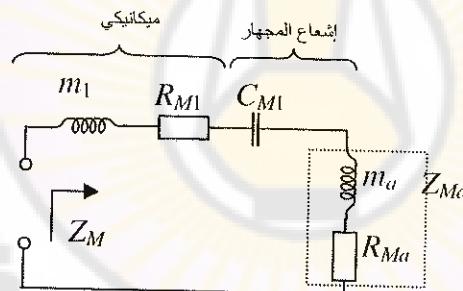
يتلخص عمل المجهار بأنه عند إمداده بتيار إشارة الصوت  $i$  ينحني الملف المتحرك وهذا الملف لقوة  $F = K_T i$ , حيث  $K_T$  عامل تحويل الطاقة الكهروديناميكي ( $K_T = B l$ )، حيث  $B$  الحقل المغناطيسي و  $l$  طول سلك الملف). وتؤدي القوة  $F$ ، إلى اهتزاز المجموعة الميكانيكية القابلة للحركة بسرعة  $u = F/Z_M$ ، حيث  $Z_M$  الممانعة الميكانيكية الكلية وفق دارة المائدة المبينة في الشكل (3-5). وتألف  $Z_M$  من كتلة  $m_1$  (كتلة الغشاء المهتز والملف المتحرك معاً) ومطابعة ميكانيكية  $C_M$  (مطابعة النهايات المرنة التي يثبت بها الغشاء المهتز)، ومقاومة ميكانيكية  $R_{M1}$  تمثل فقد الطاقة نتيجة الاحتكاك، إضافة إلى الممانعة  $Z_{Ma}$  التي تمثل ما يسمى الحمل الهوائي Air Loading. ويكافئ وجود  $Z_{Ma}$  ضمن دارة المائدة رد فعل الهواء على حركة الغشاء المهتز. ويتبين

أن  $Z_{Ma}$  يمكن أن تمثل عادةً بكتلة  $m_a$  ومقاومة ميكانيكية  $R_{Ma}$  على التسلسل. وتسمى  $R_{Ma}$  عادةً مقاومة الإشعاع Radiation Resistance لأن الاستطاعة الميكانيكية "المفقودة" فيها هي نفسها الاستطاعة المتقللة إلى الهواء، أي الاستطاعة الصوتية التي يشعها المجهار:

$$W_A = u^2 R_{Ma} = \frac{F^2}{|Z_M|^2} R_{Ma} \quad (5-6)$$

يتبيّن أن  $R_{MA}$  تتغيّر مع التردد تغّيرًا معقّدًا جدًا، وتعتبر متناسبة تقريباً مع مربع التردد من أجل  $1/k_a < 1$ ، حيث  $a$  نصف قطر المخروط المهتر. تكون الاستطاعة الميكانيكية الكلية وفق دارة المماثلة في الشكل (3-5):

$$W_M = u^2 R_M = \frac{F^2}{|Z_M|^2} (R_{M1} + R_{Ma}) \quad (5-7)$$

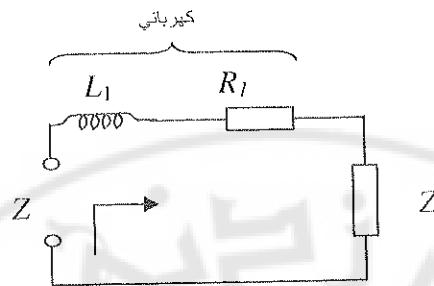


الشكل (3-5) دارة المماثلة للمجموعة الميكانيكية المهترة في المجهار ذي الملف المتحرك.

حيث  $R_M$  المقاومة الميكانيكية  $R_M = R_{M1} + R_{Ma}$ . ويبيّن الشكل (4-5) الدارة الكهربائية المكافئة، وفق العلاقة:

$$Z' = \frac{K_T^2}{Z_M} \quad (5-8)$$

سوف نوضح أدناه أن  $Z'$  يمكن أن تمثل عادةً مقاومةً وكتلةً.



الشكل (6-3) الدارة الكهربائية المكافئة للمجهاز ذي الملف المتحرك.

يتحدد الرنين الميكانيكي للمجهاز وفق دارة المماثلة في الشكل (3-5) بالعلاقة:

$$f_{M0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(m_1 + m_a) C_M}} \quad (5-9)$$

يعمل المجهاز عادةً عند ترددات  $f > f_{M0}$ ، أي عند الترددات الواقعية فوق تردد الرنين الميكانيكي. لذا تكون المانعة الكلية  $Z_M$  للمجموعة الميكانيكية محكمة بالكتلة، بافتراض أن  $\omega m >> 1/\omega C_M$  (حيث  $m = m_1 + m_a$ )، ومن ثم يمكن أن نكتب مع مراعاة كون  $m_1 > m_a$  عادةً:

$$Z_M \approx R_M + j\omega m_1 \quad (5-10)$$

حيث  $R_M = R_{M1} + R_{Ma}$ . يمكن أن نكتب وفق العلاقات (5-8) و (5-10):

$$Z' = \frac{K^2}{Z_M} = \frac{K^2}{R_{M1} + j\omega m_1} = K_T^2 \left[ \frac{R_{M1} - j\omega m_1}{R_{M1}^2 + (\omega m_1)^2} \right] \quad (5-11)$$

لذا نكتب:

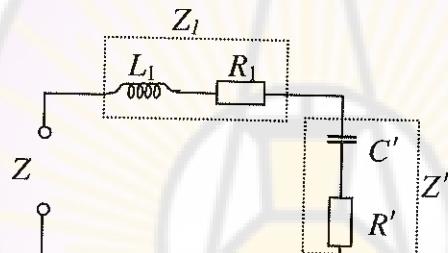
$$Z' = R' + \frac{1}{j\omega C'} \quad (5-12)$$

حيث:

$$R' = \frac{K_T^2 R_{M1}}{R_{M1}^2 + (\omega m_1)^2} = \frac{K_T^2 R_{M1}}{|Z_M|^2} \quad (5-13)$$

$$C' = \frac{K_T^2 (\omega m_1)}{R_{M1}^2 + (\omega m_1)^2} = \frac{K_T^2 (\omega m_1)}{|Z_M|^2} \quad (5-14)$$

هكذا نجد أن تأثير الممانعة الميكانيكية  $Z_M$  المحكومة بالكتلة وفق العلاقة (5-10) يعكس على الدارة الكهربائية بشكل ممانعة  $Z'$  ذات طابع سعوي وفق العلاقة (5-12)، ومن ثم يمكن رسم الدارة الكهربائية المكافئة للمجهاز كما في الشكل (5-5)، حيث نرمز بـ  $Z_1$  لممانعة الملف الصوتي.



الشكل (5-5): الدارة الكهربائية المكافئة للمجهاز الكهربوديناميكي.

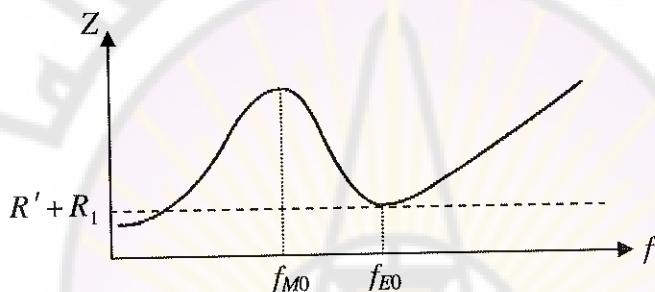
يستنتج من الشكل (5-5) أنه يحدث رنين كهربائي عند التردد:

$$f_{E0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C'}} \quad (5-15)$$

يبين الشكل (6-5) تغير طولية الممانعة الكهربائية  $|Z|$  مع التردد، وهي تكون صغرى عند تردد الرنين الكهربائي  $f_{E0}$ ، وتساوي عدنه  $(R_1 + R')$ . وبالمقابل تكون  $|Z|$  عظمى عند تردد الرنين الميكانيكي  $f_{M0}$ ، نظراً لأن  $|Z_M|$  تكون عدنه صغرى.

ويكون دوماً  $f_{E0} > f_{M0}$  لأن  $Z'$  لا تكون ذات طابع سعوي إلا عند الترددات التي تزيد عن  $f_{M0}$ .

عند هذا التردد تكون الممانعة الكهربائية صغيرة وتساوي  $(R' + R_1)$  وبالمقابل تكون هذه الممانعة عظمى عند تردد الرنين الميكانيكي حيث تكون  $Z_M$  صغيرة. ونجد دوماً أن  $f_E < f_M$  لأن  $Z'$  لا تكون ذات طابع سعوي إلا عند الترددات التي تزيد عن  $f_M$ ، وبالتالي لا يحدث الرنين الكهربائي إلا عند تردد يزيد عن  $f_M$ .



الشكل (5-6): تغير الاستجابة التردديّة للممانعة  $Z$  للمجهار الكهربائي.

عند الترددات المنخفضة جداً يصبح تأثير المطاوعة الميكانيكية  $C_M$  ملحوظاً ومن ثم يصبح تأثير الدارة الميكانيكية على الدارة الكهربائية تحربيضاً وتزايد الممانعة الكهربائية الكلية بتزايده التردد.

يعمل المجهار عادة في مجال الترددات التي تزيد عن تردد الرنين الميكانيكي، وتكون ممانعة صغيرة عند تردد الرنين الكهربائي وتساوي كما ذكرنا أعلاه  $(R_1 + R')$ . وتعتبر هذه الممانعة الصغرى غالباً كممانعة إسمية للمجهار Nominal Impedance، وتكون عادة 4 أو 8 أو 16 أوم.

تحدد الاستطاعة الميكانيكية التي تنتج في المحellar بالاستطاعة التي تأخذها  $R'$  المبينة في الدارة المكافئة في الشكل (5-5)، وهي وبالتالي تساوي:

$$P_M = i^2 R' = \frac{E^2}{(Z)^2} R' \quad (5-16)$$

بالمقابل تتحدد الاستطاعة الكهربائية التي يستهلكها المحellar بالاستطاعة التي تأخذها مقاومة الكهربائية الكلية  $R = R_1 + R'$ ، ونعبر عنها بالعلاقة:

$$P_E = i^2 R = \frac{E^2}{(Z)^2} (R_1 + R') \quad (5-17)$$

يمكن إيجاد مردود المحellar وفق العلاقة حساب مردود المحellar بتعويض العلقتين السابقتين بالعلاقة (1-6) واعتماداً على العلاقات (5-7) (5-8) (5-16) (5-17) :

$$\eta_A = \frac{P_A}{P_E} = \frac{P_A}{P_M} \frac{P_M}{P_E} = \frac{R_{Ma}}{R_M} \frac{R'}{R} \quad (5-18)$$

سنعرض في العلاقة الأخيرة عبارة  $R'$  وفق (5-13) مع مراعاة أن  $Z_M$  تكون عادة محسومة بالكتلة، بحيث نكتب بعد التقريب:

$$R' = \frac{K_T^2 R_M}{(\omega m)^2} \quad (5-19)$$

تكون عادة  $R' \gg R$ ، ومن ثم  $R_e \approx R_{e1}$ . وبعد التعويض في (5-18) نجد أن:

$$\eta_A = \frac{R_{Ma}}{R_M} \frac{(Bl)^2 R_M}{R (\omega m_1)^2} = \frac{(Bl)^2}{(\omega m_1)^2} \frac{R_{Ma}}{R} \quad (5-20)$$

وذلك باعتبار أن الممانعة الميكانيكية محسومة بالكتلة. ويفضل عملياً كونها محسومة بالكتلة، بحيث يغوص  $(\omega m_1)^2$  في العلاقة السابقة تناسب  $R_{Ma}$  مع مربع التردد كما ذكرنا سابقاً. ويسنترج من القسم الثاني من المعادلة السابقة أن مردود المحellar

الكهربدينيكي يكون منخفضاً جداً، نظراً لكون  $\omega m_1 < R_{Ma}$ . ويزداد المردود بزيادة الممانعة الميكانيكية  $R_{Ma}$ ، أي بزيادة سطح الغشاء المهتز أي بزيادة قطر الجهاز. ويمكن أيضاً أن تحقق الزيادة في المردود بزيادة قيمة التدفق المغناطيسي أو زيادة طول السلك الكهربائي دون التأثير على زيادة مقاومة الملف الكهربائي.

مثال: لدينا جهاز ذو ملف متتحرك يتألف من 1000 لفة قطرها الوسطي 3.6 cm ومقاومة الملف  $\Omega = 20$  وتحريضيته 3.5 mH، وقيمة الحقل المغناطيسي 0.19 Tesla، ويعطي الجهاز رنيناً كهربائياً عند 300 Hz. وتوصى إلى الجهاز إشارة جيبية ترددتها 1500 Hz وجدها الفعال V.2.5. ونفترض أنه يمكن إهمال كل من المقاومة الميكانيكية لاحتكاك الغشاء، ومطاوعة الغشاء المهتز، والكتلة  $m_1$ . والمطلوب:

- احسب كتلة الجموعة المهتزة للجهاز.
- مطال السرعة الاهتزازية ومطال الاهتزاز.
- الاستطاعة الكهربائية والاستطاعة المشعة بافتراض أن المقاومة المكافحة لتأثير المجموع الميكانيكي  $R' = 0.4\Omega$ .

الحل: بما أن طول سلك الملف  $l = \pi N d$ ، حيث  $N$  عدد اللفات، و  $d$  القطر الوسطي لللفات، لذلك يكون عامل التحويل الكهروميكانيكي مساوياً:

$$K_T = Bl = B(\pi N d) = 0.19 \times \pi \times 1000 \times 3.6 \times 10^{-2} = 21.49$$

من العلاقة (4-5) تكون الممانعة الكلية للدارة المبينة في الشكل (4-5) :

$$Z = (R_{el} + R') + j\omega L_1 + \frac{K_T^2}{j\omega m_1}$$

يحدث الرنين في هذه الدارة عندما:

$$\omega L_1 = \frac{K_T^2}{\omega m_1}$$

ومنه نجد أن:

$$m_1 = \frac{K_T^2}{(2\pi f_e)^2 L_1} = \frac{(21.49)^2}{(2 \times \pi \times 300)^2 \times 3.5 \times 10^{-3}} \approx 37.14 g$$

وتكون الممانعة عند التردد 1500 Hz:

$$Z \approx \sqrt{(R_{e1} + R')^2 + (\omega L_1)^2} \\ = \sqrt{(20 + 0.4)^2 + (2 \times \pi \times 1500 \times 3.5 \times 10^{-3})^2} \approx 38.78 \Omega$$

بالتالي تكون القيمة الفعالة للتيار:

$$i = \frac{E}{Z} \approx \frac{2.5}{38.78} = 0.0645 A$$

يتحدد مطال سرعة اهتزاز مخروط المجهار بالعلاقة:

$$u_m = \frac{F}{Z_M} \approx \frac{K_T i_m}{\omega m_1} \approx \frac{21.49 \times 0.0645 \sqrt{2}}{2 \times \pi \times 1500 \times 37.14 \times 10^{-3}} \approx 5.6 \text{ mm/S}$$

يكون مطال الاهتزاز:

$$A = \frac{u_m}{\omega} \approx \frac{5.6 \times 10^{-3}}{2 \times \pi \times 1500} \approx 0.594 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 0.594 \mu\text{m}$$

تتحدد الاستطاعة الكهربائية التي يأخذها المجهار من مصدر الإشارة بالعلاقة:

$$P_E = (R_{e1} + R') i^2 = (20 + 0.4)(0.0645)^2 = 0.0849 W$$

تكون الاستطاعة الصوتية التي يشعها المجهار:

$$P_A = P_M = R' i^2 = 0.4 \times 0.0645^2 = 1.664 \times 10^{-3} W \approx 1.6 \text{ mW}$$

ويكون مردود المجهار:

$$\eta_A = \frac{P_A}{P_E} = \frac{1.6}{84.9} = 1.88\%$$

### ٣-٥ أنواع المجاهير

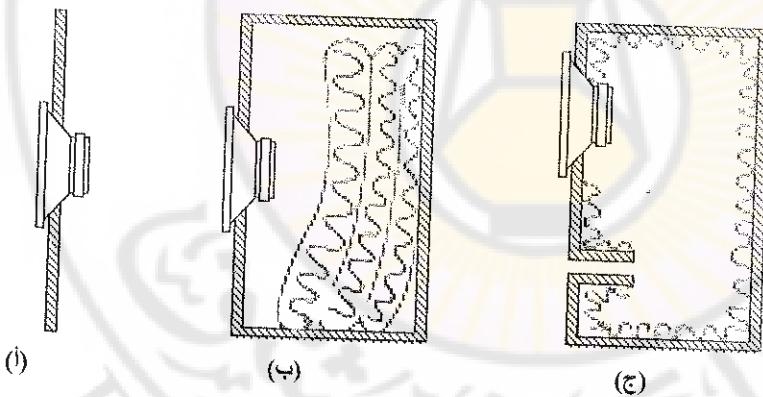
تحتاج النظم الصوتية إلى أنواع مختلفة من المجاهير من حيث خصائص الإشعاع، تبعاً لاختلافها بمقاس وشكل الصندوق أو الغلاف الخارجي Enclosure وخصائص السطح المشع ونوع محول الطاقة الكهربائي، بالإضافة إلى خصائص ترتيب كل تلك المكونات والتوافق بينها. وتبعاً لذلك يمكن الحصول على تنوع بالخصائص الاتجاهية لإشعاع الصوت ودرجة تركيز الإشعاع الصوتي وللمجال الترددية والمقياس، مما يساعد على إيجاد الحلول المناسبة للتطبيقات المختلفة.

### ٤-٣-٥ خصائص تركيب المجاهير الأحادية في بافلات

إن أبسط المجاهير المستخدمة عملياً هي المجاهير الأحادية Single Loudspeaker، صغيرة المقاس والاستطاعة، كالمجاهير المستخدمة في بعض النظم الصوتية (مثلاً التغطية الصوتية لغرف شقة كبيرة أو المجاهير المخصصة لإعطاء تأثيرات خاصة في قاعات الاستماع متعددة الأغراض)، ويركب كل مجهر أحادي داخل جدار أو سقف أو يركب داخل صندوق enclosure لتجنب حدوث قصر دارة صوتي Acoustic Short-Circuit. ويقصد بذلك منع تداخل الإشعاعين الصادرين عن الجانبين الأمامي والخلفي للغشاء المهتز (متروط المجهار)، حيث يمكن أن يؤدي التفاف الموجة الصادرة عن الموجة الخلفي للغشاء المهتز وتدخليها مع الموجة الأمامية إلى انعدام محصلة الموجتين. ويتم تجنب القصر الصوتي بتركيب المجهار ضمن حاجز أو بافل Baffle بشكل لوح مستوي كما في الشكل (5-6)(أ)، أو صندوق مغلق كما

في الشكل (6-5)(ب)، أو صندوق مغلق ذي فتحة بشكل أنبوب الشكل (6-5)(ج). وينقصد بالبافل الصوتي عموماً وسيلة العزل الصوتي للجانب الأمامي للغشاء المهتر في الجهاز.

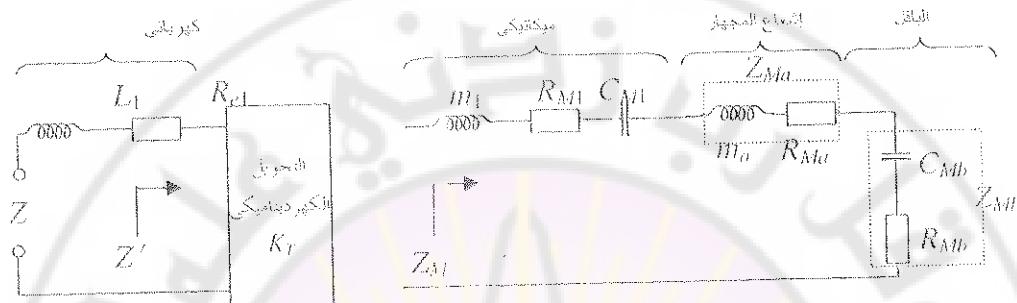
يشترط نظرياً أن يكون الحاجز المستوي Flat Baffle في الشكل (6-5)(أ) غير متناهي الأبعاد لكي يعزل صوتياً عزلاً تاماً الجانب الأمامي للغشاء المهتر في الجهاز في جانبه الخلفي، بحيث يتم تجنب حدوث "القصر الصوتي". ومع ذلك، يمكن أن يستخدم عملياً لوح حاجز Baffle Panel، محدود الأبعاد، فيما إذا كان مقاسه كبيراً للدرجة كافية، وبحيث لا تقل المسافة بين مركز الجهاز وأقرب حافة للوح الحاجز عن  $\frac{1}{8} \lambda_{\max}$ ، بافتراض  $\lambda_{\max}$  أطول موجة صوتية (طول الموجة المقابل لأدنى تردد صوتي ضمن المجال الترددي المطلوب).



الشكل (6-5): نماذج بaffles المجاهير الأحادية.

يعتبر الصندوق المغلق في الشكل (6-5)(ب) مكافئاً تقريباً لعمل اللوح الحاجز فيما إذا تم تغطية الجدران الداخلية للصندوق بمواد ماصة جيدة للصوت كاللباد أو الصرف الزجاجي. وفي حالة عدم وضع مواد ماصة للصوت داخل الصندوق، تؤثر

العوائق الميكانيكية المكافحة للهواء داخل الصندوق على عمل المحظار تأثيراً كبيراً، يتحلى عند الترددات المنخفضة بإضافة مقاومة ميكانيكية  $R_{Mb}$  ومطاوعة  $C_{Mb}$  على التسلسل مع  $Z_M$  و  $Z_{Ma}$ ، كما مبين في الشكل (7-5).



الشكل (7-5): الدارة المكافحة للمحظار الكهربائي متعدد داخل بالط.

يسفر ذلك بأنه عند الترددات المنخفضة يكون عمق الصندوق أصغر من ربع طول فيكتافى بالنسبة للوجه الخلفي للمحظار، مطاوعة  $C_{Mb}$  على التسلسل مع مقاومة ضياع ميكانيكية  $R_{Mb}$  (قارن مع عماقة دخل أنبوب مسايد لنهائية). وبما أن المطاوعة المكافحة للصندوق  $C_{Mb}$  و  $C_{M1}$  أقل من  $C_M$ ، لذلك يزداد تردد الرنين الميكانيكي، كما ينخفض مردود المحظار عند الترددات المنخفضة. وعند الترددات المتوسطة والمرتفعة يزدي تأثير الهواء داخل الصندوق إلى ظواهر راتبة تسمى للاستجابة الترددية للمحظار. ويفيد وضع المواد المناسبة للصوت دخل الصندوق لكي لا يتاثر تردد الرنين الميكانيكي للمحظار تقريباً، ولكي لا تتبع الظواهر الراتبية الناتجة عن تأثير الهواء داخل الصندوق.

تتحدد  $C_{Mb}$  بـالعلاقة التالية (قارن مع حالة راتبة هيلمھولتز):

$$C_{Mb} = \frac{V}{\rho_0 c^2 S_i} \quad (5-21)$$

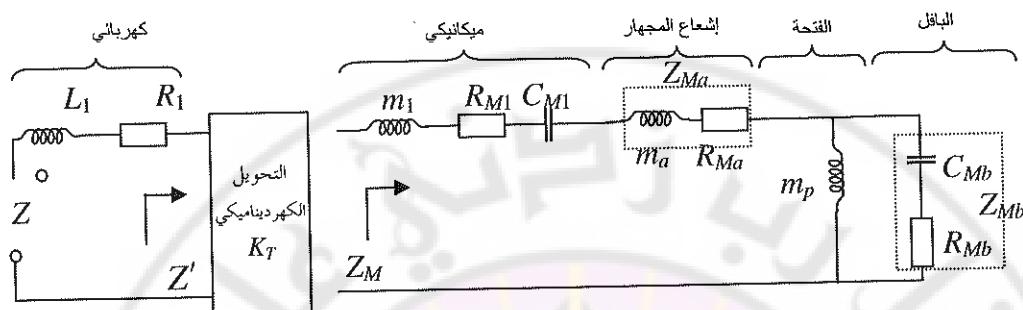
حيث  $V$  حجم الصندوق و  $S_1$  مساحة الفتحة التي يركب فيها المجهار في الشكل (5-6)(ج) وهي عادة فتحة دائرية قطرها يساوي تقريباً قطر المخروط (الغشاء المهتز) في المجهار. ويفضل عادة اختيار حجم الصندوق بحيث تكون  $C_{M6}$  أكبر كثيراً من  $C_{M1}$ ، حتى لا يرتفع كثيراً تردد الرنين الميكانيكي (مع مراعاة أن المواد الماصة لا تتحقق امتصاصاً كاملاً).

بما أن الصندوق في الشكل (5-6)(ب) وفي الشكل (5-6)(ج) يكفي بعمله تقريباً للوح الحاجز Baffle Panel، لذلك يسمى "بافل" أيضاً. ولا يفضل أن يكون الصندوق مغلقاً تماماً، بل ترك فيه فتحات ضيقة لتسريب الهواء لكي لا يؤدي تغير الضغط الجوي إلى إزاحة الغشاء في حالة السكون عن وضع التوازن الأصلي.

يسمى الصندوق في الشكل (5-6)(ج) بافل انعكاس الصوت الجهير Bass-Reflex Baffle مساحة هذا المنفذ بحيث تكون أصغر من المساحة الفعالة للغشاء المهتز للمجهار أو تكون مساوية لها. وعندما يتحرك الغشاء المهتز للمجهار، فإن جزءاً من إزاحته تضغط الهواء داخل الصندوق بينما يؤدي الجزء الآخر من الإزاحة إلى دفع الهواء من الصندوق إلى خارجه. ومن ثم يمكن أن يعتبر المنفذ "غشاء مهتز" ثانياً، يهتز بتأثير الإشعاع الناتج عن الوجه الخلفي للغشاء المهتز للمجهار. ويكافئ المنفذ عند الترددات المنخفضة أنبوباً "مفتوح النهاية" بحيث يكافئ كتلة  $m_p$  على التسلسل مقاومةً ميكانيكيةً. ومثل الكتلة  $m_p$  كتلة الهواء داخل المنفذ.

يبين الشكل (5-8) الدارة المكافئة لبافل انعكاس الجهير بعد إهمال المقاومة الميكانيكية للمنفذ (مقاومة الضياع الميكانيكية ومقاومة الإشعاع). ويتبيّن أن الرنين

الإضافي الناتج عن  $m_p$  و  $C_{Mb}$  في الدارة المكافئة في الشكل (5-8) يحسن الاستجابة التردية للبافل عند الترددات المنخفضة.



الشكل (5-8): الدارة المكافئة للمجهار الكهروديناميكي مثبت داخل انعكاس الجهير Bass-Reflex Baffle.

### ٢-٣-٥ خصائص الاستجابة التردية للمجهار الأحادي

تحدد القدرة الصوتية التي يشعها المجهار حسب العلاقة (5-7):

$$P_A = \frac{(Bli)^2}{Z_M^2} R_{Ma} = \frac{BLE}{Z^2 Z_M^2} R_{Ma} \quad (5-22)$$

تتغير القيم  $Z$ ,  $Z_M$ ,  $R_{Ma}$  بتغيير التردد على نحو معقد، ومع ذلك، يمكن جعل تغيرات تلك القيم تعوض بعضها بعضاً، بحيث تبقى  $P_A$  ثابتة نوعاً ما عند تغيير التردد ضمن مجال معين.

نستنتج من الشكل (5-5) أنه يمكن إضعاف تغير  $Z$  بجعل تردد الرنين الميكانيكي  $f_M$  أقل من أدنى تردد في المجال الترددي المطلوب للنظام الصوتي وجعل عامل الجودة دارة الرنين الكهربائية منخفضة جداً. ولذلك تختار تحريرية الملف الصوتي صغيرة جداً، بحيث لا تزيد قيمة  $Z$  كثيراً عند  $f > f_e$  ضمن المجال الترددي المطلوب، فتبقي  $Z = R' + R_{e1} \approx R_{e1}$  حيث تكون عادة  $R' \gg R_{e1}$ . ويفيد الثبات

النفريي لقيمة  $Z$  ضمن الحال التردد المطلوب في تبسيط تصميم المكير السمعي (ويشرط غالباً أن تكون ممانعة خرج المكير السمعي أصغر كثيراً من  $Z$ )

إذا افترضنا أن المجهار يعمل فوق تردد الرنين الميكانيكي، حيث تكون  $Z_M$  محسومة بالكتلة، وبحيث يمكن اعتبار  $Z_M \approx j\omega m_1$ ، فعندئذ يمكن إعادة كتابة المعادلة (5-22) بشكل نفريي على النحو:

$$P_A = \frac{(BIE)^2}{R_{el}^2} \frac{R_{Ma}}{(\omega m_1)^2} = P_E \frac{(BI)^2}{R_{el}} \frac{R_{Ma}}{(\omega m_1)^2} \quad (5-23)$$

حيث ترمز  $P_E$  للاستطاعة الكهربائية. وبيبين أن مقاومة الإشعاع  $R_{Ma}$  لمجهار مركب ضمن لوحة أو حاجز أو صندوق مغلق (كما في الشكل (6-5)(أ، ب، ج))، تتناسب تقريباً مع مربع التردد من أجل  $1 < ka$  (حيث  $a$  نصف قطر المخروط المهتر) ولذلك تتغير بشكل معقد بتغير التردد من أجل  $1 > ka$ . وبعوض تناسب  $(\omega m_1)^2$  مع مربع التردد تتناسب  $R_{Ma}$  تقريباً مع مربع التردد من أجل  $1 \leq ka$ .

يفسر تغير  $R_{Ma}$  بشكل معقد تبعاً للترايد من أجل  $1 < ka$ ، بأنه في هذه الحالة يكون  $\lambda > 2\pi a$  (لأن  $k=2\pi/\lambda$ )، ولذلك تقتصر منطقتان أو أكثر من سطح المخروط المهتر بأطوار متعاكسة، مما يؤدي إلى تزايد وتناقص  $R_{Ma}$  مع التردد بشكل شبه دوري.

نستنتج مما سبق أن الاستطاعة الصوتية التي يشعها المجهار تكون ثابتة تقريباً عند تغير التردد في مجال محدود، بخلاف من الأسفل تردد يزيد قليلاً عن تردد الرنين الميكانيكي وبحده من الأعلى تردد  $f_i$  يقابل  $1 \approx ka$  (حيث  $a$  نصف قطر المخروط المهتر) وطول الموجة المقابل له  $\lambda$  يساوي تقريباً  $2\pi a$  (لأن  $k=2\pi/\lambda$ ، أي يساوي تقريباً طول محيط الغشاء المهتر).

يتبيّن أنّه عند الترددات التي تزيد عن  $f_1$  تتغيّر الاستطاعة المشعّة على نحو معقد، ويزداد تغيّرها تعقيداً لأنّ مختلف مناطق المخروط تكتنّ عند الترددات التي تزيد عن حوالي  $2f_1$  بأطوار متراكمة. وبالنتيجة نجد أنّ الاستطاعة المشعّة تتراجّح عند الترددات المرتفعة نسبياً بين قيم عظمى وصغرى ولكنّها تميل للتناقص الحاد بتناسب مع  $1/f_1^4$ . يتحدد الضغط الصوتي الناتج عن المجهار ( $p(r)$  على بعد  $r$ ) بالعلاقة:

$$p(r) = \sqrt{\frac{\Gamma(\theta) P_A \rho c}{4\pi r^2}} \quad (5-24)$$

حيث  $\Gamma(\theta)$  عامل الاتجاهية. لذلك تتأثّر الاستجابة التردديّة للضغط الصوتي بالاستجابة التردديّة للاستطاعة الصوتيّة وتغيّر  $\Gamma(\theta)$  مع التردد. وفي حالة المجهار المركب ضمن لوح حاجز أو صندوق مغلق يتزايد عامل الاتجاهية  $\Gamma(\theta)$  (باتجاه محور المجهار) عند الترددات المرتفعة بتناسب مع  $(k)$  تقريباً، وهذا يعوض جزئياً التناقص الحاد للاستطاعة المشعّة عند الترددات المرتفعة نسبياً.

يمكن أن نفترض بالتالي أنّ المجال الترددي لاستجابة الضغط الصوتي يحدود من الأسفل بتردد أصغر  $f_{\min}$  يزيد قليلاً عن تردد الرنين الميكانيكي وتردد أعظم  $f_{\max}$  الذي يقابل  $f_1$  الذي يقابل  $ka = 1$  (أي  $\lambda = 2\pi a$ ).

تتضمّن ما سبق متطلبات توسيع المجال الترددي بإيقاف  $f_{\min}$  وزيادة  $f_{\max}$  ومن أجل إيقاف  $f_{\min}$  ينبغي إيقاف تردد الرنين الميكانيكي بزيادة كتلة ومملوءة المجموعة المهترّة، مع أنّ زيادة الكتلة تؤدي إلى خفض الاستطاعة المشعّة. وبالمقابل، من أجل زيادة  $f_{\max}$ ، ينبغي زيادة  $1/r$  بإيقاف قطر المخروط المهتر، مع أنّ هذا يؤدي إلى إيقاف الاستطاعة المشعّة التي تتناسب مع المساحة الفعالة للمخروط.

نستنتج من العلاقة (5-23) أنه يمكن زيادة الاستطاعة المشعة بزيادة النسبة ( $S/m$ )، وهذا يعني أنه ينبغي زيادة سطح الغشاء المهتر دون زيادة كتلته. ولذلك يصنع الغشاء المهتر بشكل مخروطي من ورق مقوى من نوع خاص، ويختار سطحه منحنياً نوعاً ما (ونختار زاوية الانفراج بين  $90^\circ - 130^\circ$ ).

### ٣-٣-٥ خصائص البافلات متعددة المجاهير

يتضح مما سبق أنه من الصعب جداً تصميم مجهاهار أحادي باستطاعة كافية، بحيث يكون عريض المجال. وفي حالة المجاهير الأحادية التي تزيد استطاعتها الكهربائية عن حوالي  $W 5$  يمكن أن يمتد المجال التردددي من حوالي  $Hz 80$  حتى حوالي  $kHz 10$  باستجابة ترددية ذات تفاوت مقبول ( $\pm 6 dB$ ). ولكن النظم الصوتية عالية الأمانة High-Fidelity-Sound systems تتطلب مجالاً ترددياً أوسع، بحيث يمتد مثلاً من حوالي  $Hz 50$  حتى حوالي  $kHz 15$ .

لذلك تستخدم على نطاق واسع بافلات أو صناديق مجاهير Loudspeaker Enclosure أبسط بافل للمجاهير عالية الأمانة مجهاهاراً كبيراً يسمى المدار Woofer ومجهاهاراً صغيراً يسمى الرعاق Tweeter. وبخصوص المجهار الكبير (من حيث القطر والاستطاعة) لإشعاع الترددات الصوتية من  $Hz 50$  مثلاً حتى حوالي  $kHz 2$ ، ويكون قادراً على إشعاع استطاعة كبيرة وتختار استطاعة الكهربائية  $W 20$  على سبيل المثال. وبال مقابل ينخصص المجهار الصغير لإشعاع الترددات المرتفعة، التي تزيد عن حوالي  $kHz 2$  وتختار استطاعته الكهربائية مثلاً حوالي  $W 3$ . وتوصى إشارة خرج المكبر السمعي إلى المجهارين عن طريق مرشح تمرير منخفض ومرشح تمرير مرتفع، بحيث تمر الترددات المنخفضة والمتوسطة إلى المجهار الكبير وتمر الترددات المرتفعة إلى المجهار الصغير.

وتستخدم للترشيح مكثفات وملفات ومقاومات. وتحتار القيمة نفسها لتردد قطع المرشجين، وهي تسمى تردد التقاطع Crossover Frequency. ويفترض ألا تظهر قمة أو انخفاض ملحوظ في الاستجابة التردية الإجمالية عند ذلك التردد. ويختار حجم الصندوق الذي يوضع فيه المجهاران، بحيث تكون قيمة المطاوعة  $C_{Mb}$  المحددة بالعلاقة (5-21) أكبر كثيراً من مطاوعة المجموعة الميكانيكية للمجهار الكبير (المدار) كما في حالة البافل ذي المجهار الأحادي.

يمكن الحصول على استجابة تردية أفضل وضمن مجال تردد أوسع بوضع ثلاثة مجاهير ضمن البافل بحيث يكون أحدهما (المدار Woofer) كبير المقاس والاستطاعة وبخصص إشعاع الترددات من حوالي 30 Hz مثلاً حتى حوالي 800 Hz، ويكون هناك مجهار آخر متوسط المقاس والاستطاعة وبخصص إشعاع الترددات المتوسطة من حوالي 800 Hz حتى حوالي 3 kHz، وهو يسمى مجهار المدى المتوسط Mid-range، بينما يكون المجهار الثالث (الرعاق Tweeter) صغير المقاس والاستطاعة وبخصص إشعاع الترددات العالية من حوالي 3 kHz حتى حوالي 16 kHz على سبيل المثال. ويمكن أن يضاف مجهار رابع يسمى السوبر زعاق Super Tweeter لإشعاع أعلى الترددات السمعية. وتوصيل إشارة خرج المكبر السمعي إلى المجاهير الثلاثة أو الأربع عن طريق مرحشات مناسبة، على أن تحتار ترددات قطعها (ترددات التقاطع) بدقة، وبحيث تكون الاستجابة التردية الإجمالية مستوية بأقل تفاوت ممكن. وبين الشكل (9-5) بعض تشكيلات بافلات أو صناديق مجاهير.

## ٤-٣-٤ مصفوفات المحاير Loudspeaker Arrays

تحتاج كثيرون من نظم تقوية الصوت إلى محابير تكون قادرة على إشعاع موجة صوتية ذات استطاعات كبيرة والتي مسافات بعيدة عن منطقة تركيبها دون التأثير على الميكروفونات المركبة بجانبها. ولتحقيق ذلك تحتاج إلى محابير ذات استجابة قطبية عالية الاتجاهية وبنفس الوقت استطاعة عالية. ويتم تحقيق ذلك عن طريق مصفوفة محابير وهي عبارة عن مجموعة من محابير متصلة تماماً مركبة بعضها بجانب البعض في صندوق واحد، بحيث تشع جميعها باتجاه واحد. وتسمى هذه المصفوفة عادة العاومود الصوتي Sound Column، ويوضح مبدأ عملها الشكل (5-10).

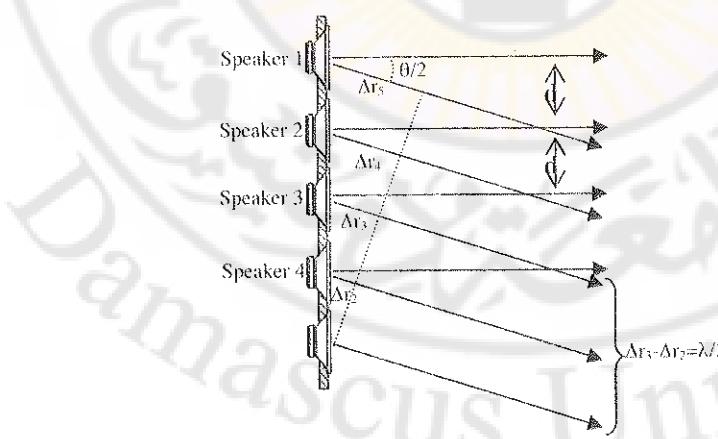


الشكل (5-9): يبين بعض تشكيلات بافلات أو صناديق محابير.

يوضح الشكل كيفية تحقيق الاستجابة القطبية العالية الاتجاهية. وفي المستوى العمودي على خط تركيب المحابير يتم جمع الضغوط الصوتية لكل المحابير في الطور

نفسه تقريباً، بينما في المستوى الأعلى أو الأخفض تلغى الموجات الصوتية بعضها بعضاً عندما يكون فرق المسير بين هذه الموجات مساوياً مثلاً  $\lambda/2$ ,  $3\lambda/2$  ... الخ. وبالتالي تحدد الاستجابة الاتجاهية للمصفوفة في المستوى العمودي على مستوى تركيبها بالاستجابة الاتجاهية لأحد المجاهير، بينما تكون هذه الاستجابة في مستوى تركيب المجاهير على هيئة حزمة ضيقة. ومن عيوب العاومود الصوتي أو مصفوفة المجاهير:

- إن الاستجابة القطبية لهذه المصفوفة تتعلق كثيراً بالتردد.
- عند استخدام مصفوفة مجاهير طولية يحدث هبوط حاد في مستوى الترددات العالية على مسافة معينة ضمن منطقة الاستماع نتيجة لتدحرج الموجات الصوتية الصادرة عن المجاهير المركبة عند أطراف المصفوفة، وقد أثبتت التجارب أنه عند استخدام مصفوفة بطول 2.4 m يحصل إلغاء لترددات تقارب 2.8 kHz عند مسافة 1.2 m.
- إن زيادة الاتجاهية في الاتجاه المرغوب يتراافق معها ظهور فصوص جانبية Side-lobes غير مرغوبة، وهذا يعني هدراً للطاقة الصوتية في اتجاهات لا يريد تغطيتها صوتياً.



الشكل(5-10): مصفوفة المجاهير وتأثير فرق المسير.

## ٥-٣-٥ الأبواق Horn Loudspeaker

إن المردود المنخفض للمجهاز الكهروديناميكي ذي المخروط المهتر Cone-Type، هو الذي يدعى في بعض الحالات إلى استخدام الماجاير الديناميكية البو唧ة Horn-Type. ويتألف المجهاز البو唧ي من رأس يعمل كمجهاز ذي مخروط مهتر وبو唧 يتسع تدريجياً كما هو مبين في الشكل(11-5). وقد شاع استخدام الأبواق التي يتزايد سطح مقطعها العرضي  $S_H$  حسب قانون أسي التالي:

$$S_H = S_0 \exp(\gamma r) \quad (5-25)$$

حيث  $\gamma$  الإحداثي الفراغي في اتجاه محور البو唧،  $S_0$  سطح فتحة مدخل البو唧 التي ترد إليها الموجة الصوتية من الرأس الديناميكي، أي عند  $r=0$ ، و  $\gamma$  عامل توسيع البو唧 Flare Rate.

وتعطى الاستجابة القطبية للمجهاز البو唧ي بعلاقة من الشكل:

$$\Gamma(\theta) = \frac{(1 - \gamma^2) \cos(\theta)}{1 - \gamma^2 \cos^2(\theta)} \quad (5-26)$$

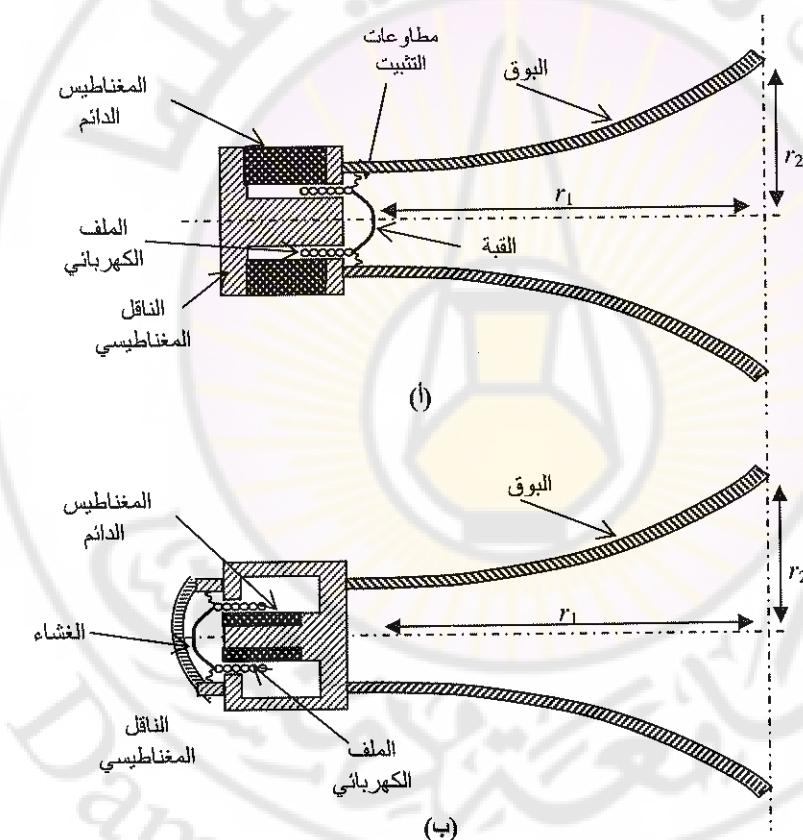
حيث  $\theta$  زاوية التغطية للمجهاز البو唧ي. وتتحدد الممانعة الميكانيكية لمدخل البو唧 الأسي غير متنه الطول بالعلاقة التالية:

$$Z_{MH} = \rho c S_0 \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\gamma}{2k} \right)^2} + j \frac{\gamma}{2k} \right] \quad (5-27)$$

حيث  $k = 2\pi f/c$  العدد الموجي. ولنلاحظ من العلاقة انه من أجل  $\gamma/2k > 1$  ، أي من أجل  $\omega < \gamma c/2$  ، لا يكون للممانعة أي جزء حقيقي ، أي لا تنتشر في البو唧 أي موجة صوتية (هذا يعني فيزيائياً أن دقاتن الوسط الهوائي في البو唧 هنتر عندئذ دون

أن يحدث أي انتقال للطاقة الميكانيكية) ويسمى هذا التردد بالتردد الخارج للبوق غير المتناه الطول.

ويبين الشكل (12-5) دارة المماطلة المكافئة للمجهاز البولي، وهي تختلف عن الدرة المقابلة في حالة المجهاز الكهربوديناميكي المبينة في الشكل (7-5)، وذلك باستبدال ممانعة الإشعاع  $Z_{Ma}$  بمانعة البوق  $Z_{MH}$  مع مراعاة تأثير التحويل نتيجة تغير سطح المقطع.



الشكل (11-5): مقطع عرضي للمجهاز البولي (أ) مجهاز القبة. (ب) مجهاز الضغط.

يتحدد الجرء الحقيقي للمممانعة  $Z_{MH}$  من أجل  $f > 2f_c$  بقيمة المقاومة الميكانيكية المنسوبة للدارة الأولى:

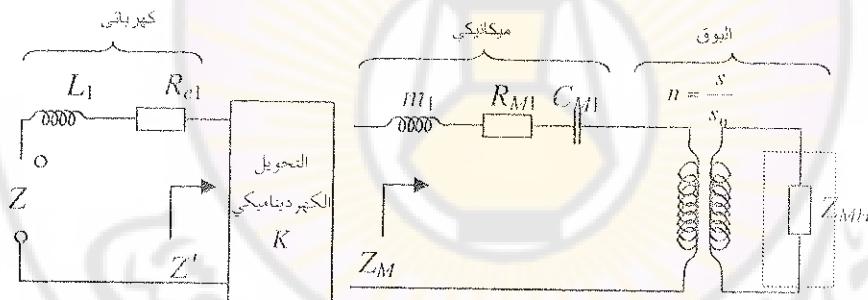
$$Z_{MH} \approx R_{MH} = n^2 \rho c S_0 \quad (5-28)$$

حيث  $n = S/S_0$  نسبة التحويل الميكانيكي، وذلك بإهمال تأثير مطلاوعة الهواء. وتكون الاستطاعة الصوتية المشعة:

$$P_A \approx \frac{F^2}{Z^2} R_{MH} \approx \frac{R_e^2}{(R_M + R_{MH})^2} R_{MH} = \frac{(BlE)^2}{R_e^2} \frac{R_{MH}}{(R_M + R_{MH})^2} \quad (5-29)$$

يبين أن قيمة مردود المجهار البوقي:

$$\eta_A = \frac{(Bl)^2}{R_e} \frac{R_{MH}}{(R_M + R_{MH})^2} \quad (5-30)$$



الشكل (5-12): الدارة المكافئة للمجهار البوقي.

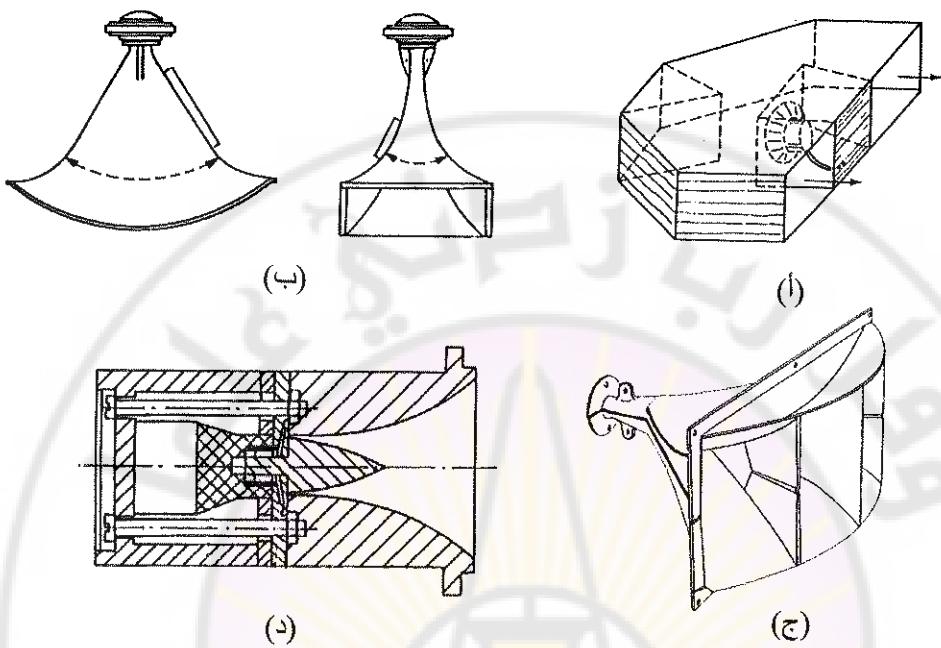
بالمقارنة مع العلاقة (5-20) نجد أن مردود المجهار ذي الإشعاع المباشر يتعلق بالنسبة الضئيلة  $R_M/\omega m$  بينما يتعلق مردود المجهار البوقي بالنسبة:

$$\frac{R_{MH}}{(R_M + R_{MH})^2} \quad (5-31)$$

يتبيّن من ذلك أن المجهار البوقي يمكن أن يعطي مردوداً أعلى بكثير من مردود المجهار ذي الإشعاع المباشر. ويمكن فيزيائياً تفسير ارتفاع مردود المجهار البوقي بأن البوّاق يقوم بتحويل المانعة الميكانيكية تدريجياً بحيث يؤمّن التوفيق بين المخروط المهتر والوسط الهوائي الغير متناء.

في الواقع لا يمكن تحقيق الشرط  $f_c > 2f_r$  عند ترددات منخفضة جداً، ولا عند الترددات العالية. وتصنّم مجاہير بوقيّة خاصة للعمل عند الترددات المنخفضة Bass Horns (لترددات أقل من 300 Hz)، وتتّبِع باستطاعات عاليّة محدودة 100-500W، ومجاہير تعمل في الترددات المتوسطة (300 Hz-3 kHz)، ومجاہير بوقيّة مخصوصة للعمل في الترددات العالية (kHz-16 kHz) وتصنّم Tweeter Horn، وتعمل باستطاعات منخفضة بمقدار 50 W. وبين الشكل (13-5) نماذج مختلفة من المجاہير ذات الأبوّاق، حيث يظهر الشكل (13-5)(أ) المجهار البوقي ذي الترددات المنخفضة ويظهر من الشكل أنه عبارة عن مجھار كهردينايكي مثبت داخل غرفة خاصة بشكل بوق تقريباً حيث تصدر الموجة نتيجة انعکاسها عن الجدار الخلفي من البوّاق.

كما يظهر الشكل (13-5)(ب) شكلاً من أشكال المجهار البوقي ذي الترددات المتوسطة، حيث يحقق شكل مقطع البوّاق المستطيل استجابة قطبية عالية. بينما يظهر الشكل (13-5)(ج) أحد الأشكال الكثيرة لمجهار بوقي ذي خلايا متعددة Multicellular Horn بالترددات المتوسطة حيث يبيّن الشكل أن بوق المجهار قد قسم إلى مناطق كثيرة وذلك لجعل الاستجابة المجهار التردديّة مستوية تقريباً. كما يظهر الشكل (13-5)(د) مجھاراً بوقياً الذي يعمل تحت تأثير الضغط Pressures Chamber horn وهو مخصوص للعمل في الترددات العالية.



الشكل(6-13): أشكال مختلفة من المجاهير البو唧ة (أ) مجهار البو唧ي للترددات المنخفضة. (ب) المجهار البو唧ي للترددات المتوسطة. (ج) المجهار البو唧ي ذو الخلية المتعددة. (د) مجهار الضغط البو唧ي للترددات العالية.

## الفصل السادس

### نظم تقوية الصوت

### Sound Reinforcement Systems

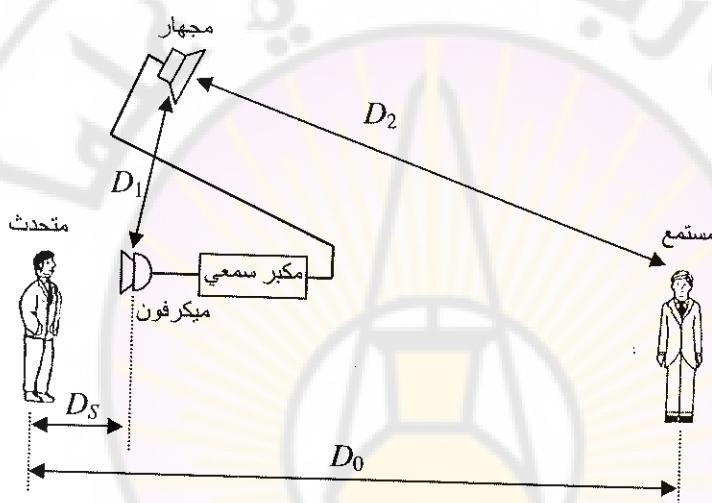
تستخدم نظم تقوية الصوت Sound Reinforcement Systems لتأمين مستوىً كافٍ للسمع الطبيعي في المناطق الواسعة والأماكن المفتوحة كالساحات والشوارع والملاعب وفي المناطق المغلقة كالقاعات والمسارح والملاعب المغلقة. ويقصد بنظام تقوية الصوت Sound Reinforcement System النظام الذي يكبر إشارات كلامية أو موسيقية تؤخذ من ميكروفون أو مجموعة ميكروفونات وتكرر بمكبرات سمعية Audio Amplifiers ويعاد تحويلها إلى صوت بمستوى أعلى بالجماهير، بحيث توزع هذه الجماهير على نحو مناسب لتغطية منطقة الاستماع Audience area بمستوى كافٍ للصوت، وذلك مع تحقيق متطلبات الجودة المناسبة.

يعتمد تصميم نظم تقوية الصوت بشكل كبير على خصائص الصوت المراد تقويته وعلى طبيعة المنطقة المراد تغطيتها صوتياً.

تستخدم في حالاتٍ كثيرة ولاعتبارات اقتصادية منطقة التغطية نفسها لأغراضٍ مختلفة، فقد تستخدم لمباريات رياضية أو لحفلات موسيقية أو لإلقاء المحاضرات والندوات. وفي هذه الحالة لابد من التوفيق بين جميع متطلبات منطقة التغطية بقدر الإمكان وذلك للحصول على نتائج مرضية من جميع النواحي.

يبين الشكل (6-1) نظام تقوية صوت يسيطر يستخدم في المناطق المكشوفة. وهو يشتمل على ميكروفون لالتقط الصوت من متحدث talker يبعد مسافة محددة

عن الميكروفون  $D_S$ . وتكبر إشارة الميكروفون بمكير سمعي Audio Amplifier ذي استطاعة خرج مناسبة، وتوصيل إشارة خرج المكير إلى مجهر (أو مجموعة مجاهير)، يبعد عن ميكروفون مسافة محددة ( $D_2$ ) بحيث يوجه إلى المستمع أو المستمعين Listeners. ونرمز بـ  $D_2$  للمسافة بين أبعد مجهر وأبعد مستمع بينما نرمز بـ  $D_0$  للمسافة بين أبعد مستمع والمتحدث.



الشكل (٦-١) : نظام تقوية صوت بسيط.

## ٦-١. المتطلبات الأساسية لنظم تقوية الصوت General Demands

مع أن معظم نظم تقوية الصوت تصمم لتحقيق أغراض خاصة ومحددة، فإن هذه النظم تشتراك بمتطلبات عامة تتفاوت أهميتها حسب التطبيق المصمم لها. وتأخذ بالحسبان عند تصميم نظام تقوية الصوت وتوزيع المجاهير المتطلبات الأساسية التالية:

١. يجب أن يكون أدنى مستوى للصوت أعلى من مستوى الضجيج الوسطي بمقدار 25 dB لتكامل المجال الترددية في المنطقة المراد تغطيتها.

2. يجب أن يكون أقل مستوى للصوت أقل من حوالي dB 105 من غير أن يصل إلى عتبة الألم dB 120 في أي حال من الأحوال.

3. يجب ألا يزيد تفاوت مستوى الصوت في منطقة الاستماع عن حوالي .4-10 dB

4. يجب أن يكون المجال الترددي في حالة الإشارات الموسيقية والغنائية في حدود 50-10000 Hz على الأقل، ويجب أن يكون في حالة الإشارات الكلامية في حدود 100-6500 Hz على الأقل.

5. يجب استبعاد احتمال الاهتزاز نتيجة التغذية الخلفية Acoustic feedback.

6. في حال استخدام أكثر من مجهر لتفصيل منطقة مشتركة، يجب أن توزع هذه المحاهير بحيث يكون الفارق  $\Delta L$  بين مستويي الصوتين الناتجين عن أقرب مجهرين لكل مستمع أقل من قيمة معينة تتوقف على الفاصل الزمني  $\Delta t$  بين لحظي وصول الإشارتين إلى المستمع.

7. يفضل في معظم الحالات توزيع المحاهير أن يليو المصدر الظاهري للصوت، أي اتجاه ورود الموجة الصوتية إلى المستمع، منطبقاً على المصدر الحقيقي للصوت تقريراً.

## ٢-٦ القيم المميزة لنظام تقوية الصوت

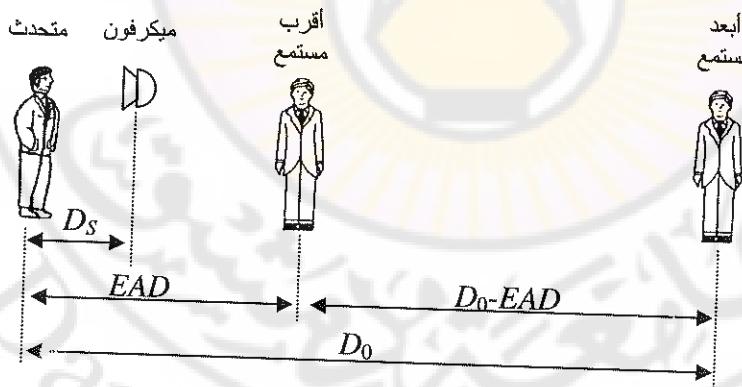
قبل البدء باستعراض طرق التغطية الصوتية الخارجية والداخلية لابد من معرفة على أهم القيم المميزة لهذه النظم.

## ١-٢-٦ الكسب الصوتي المطلوب (NAG)

يقصد بالكسب الصوتي Acoustic Gain زيادة مستوى الصوت في موقع المستمع في حالة تشغيل نظام تقوية الصوت بالمقارنة بمستوى الصوت في نفس المكان في حال عدم تشغيل نظام تقوية الصوت (أي مثلاً عند إطفاء المكبر السمعي).

تحدد القيمة المطلوبة للكسب الصوتي انطلاقاً من مفهوم المسافة الصوتية المكافئة Equivalent Acoustic Distance (EAD) الموضحة في الشكل (2-6).

تمثل المسافة الصوتية المكافئة EAD البعد بين المتحدث وأقرب مستمع (المستمع الذي يجلس في منتصف الصف الأول لمنطقة الاستماع على بعد 2 m من المتحدث على سبيل المثال)، بحيث يسمع عندها صوت المتحدث بمستوى كاف (دون تشغيل نظام تقوية الصوت)، يزيد عن مستوى الضجيج على الأقل 25 dB عند الترددات السمعية المتوسطة (مثلاً عند التردد 1000 Hz).



الشكل (2-6): المسافة الصوتية المكافئة.

يراد من نظام تقوية الصوت أن ينتج عند أبعد مستمع (عند بُعد  $D_0$ ) المستوى نفسه الذي ينتج عند أقرب مستمع (عند بُعد  $EAD$ ) من المتكلم).

حالة عدم تشغيل نظام تقوية الصوت. ويمكن أن نبين أن الكسب الصوتي المطلوب أو الكسب الصوتي الذي تحتاج إليه  $NAG$  يتحدد بال迪سيبل من العلاقة:

$$NAG = 20 \log_{10} \frac{D_0}{EAD} [\text{dB}] \quad (6-1)$$

على سبيل المثال، إذا افترضنا أن  $EAD=2 \text{ m}$  و  $D_0=32 \text{ m}$  فيكون:

$$NAG = 20 \log_{10} \frac{32}{2} = 20 \log_{10} 16 = 24 \text{ dB}$$

لكي يعطي نظام تقوية الصوت كسباً صوتيّاً بالقيمة المطلوبة أو أكبر، يفضل أن يكون كل من الميكروفون والجهاز ذا خواص اتجاهية Directivity مناسبة، كما ينبغي أن يختار البعد بينهما كافياً، بحيث لا تحدث بينهما تغذية خلفية صوتية Acoustic Feedback تسبب حدوث صفير Singing أو عواء Howling.

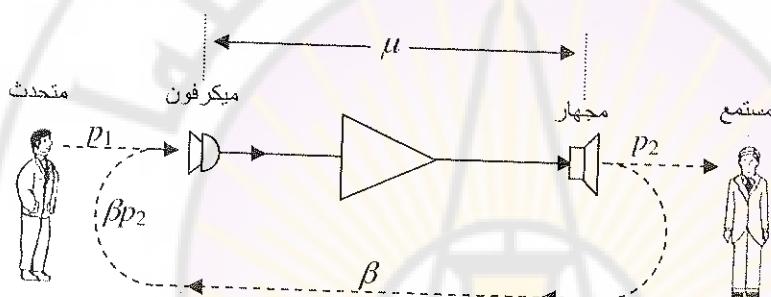
## ٦-٢-٢ التغذية الخلفية الصوتية Acoustic Feedback

يقصد بذلك ظهور اهتزاز أو تذبذب غير مرغوب فيه Undesirable Oscillation، نتيجة التغذية الخلفية لصوت الجهاز إلى الميكروفون (أي نتيجة لورود الصوت الصادر عن الجهاز إلى الميكروفون) بمستوى مرتفع يكفي لاستمرار صدور صوت حتى إذا سكت المتكلم.

يوضح الشكل (3-6) كيفية حدوث التغذية الخلفية الصوتية، حيث يرمز  $p_1$  للضغط الصوتي الذي يؤثر به صوت المتكلم على الميكروفون، ويرمز  $p_2$  للضغط الصوتي الناتج عن الجهاز عند أبعد مستمع مثلاً، ويرمز  $\mu$  للكسب الصوتي الذي يعطيه المكبر السمعي (النظام الصوتي) أي  $\mu = p_2/p_1$ ، ويمثل  $\beta$  عامل التغذية الخلفية الصوتية Acoustic Feedback Factor. وبدلاته يكون ضغط التغذية الخلفية الذي يؤثر به الجهاز على الميكروفون هو  $\beta p_2$ .

بفرض أن المتكلم أصدر صوتاً تصير المدة (أي لفظ مثلاً الحرف A) بضغط قيمته  $p_1$ , فسيكون الضغط الصوتي الناتج عن المجهار  $p_2 = \mu p_1$ . وبعد زمن يساوي  $\Delta t = D_F$  (حيث  $D_F$  طول مسار التغذية الخلفية Feedback path)، ويتمثل في أبسط حالة البعد بين المجهار والميكروفون  $D_F$ , و  $c$  سرعة انتشار الصوت، تضاف إلى القيمة الأصلية للضغط المؤثر على الميكروفون  $p_1$  القيمة  $\beta p_2 = \mu \beta p_1$  ليصبح المحصلة:

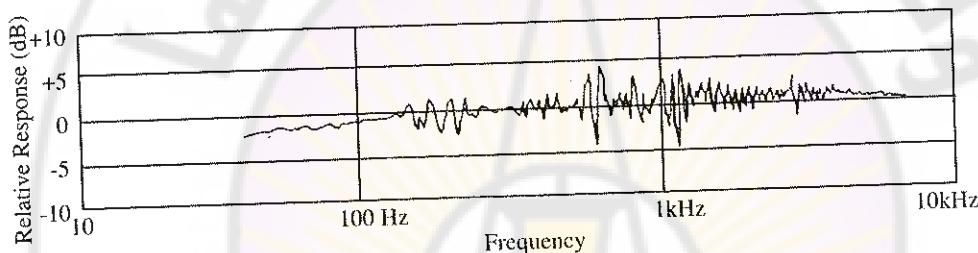
$$p_1 + \mu \beta p_1 = p_1(1 + \mu \beta) \quad (6-2)$$



الشكل (6-3): التغذية الخلفية.

تكون محصلة هذه القيمة بعد جولة Trip واحدة حول حلقة التغذية الخلفية أكبر من الضغط الأصلي  $p_1$  عندما يكون المقدار  $\mu \beta$  موجباً. ويسمي هذا المقدار كسب الحلقة Loop Gain. وإذا كان هذا المقدار موجباً تكون التغذية الخلفية موجبة Positive Feedback، وإذا كان  $1 + \mu \beta \geq 1$  أي من الترددات السمعية، يمكن أن ينبع صفير، وهو يستمر بالصدور حتى إذا سكت المتكلم، أي حتى إذا أصبح  $p_1 = 0$ . وتزايد قوة الصفير بعد كل جولة جديدة حول حلقة التغذية الخلفية، بحيث يصبح مزعجاً جداً وقد يؤدي إلى تعطل الميكروفون أو المكبر السمعي أو المجهار.

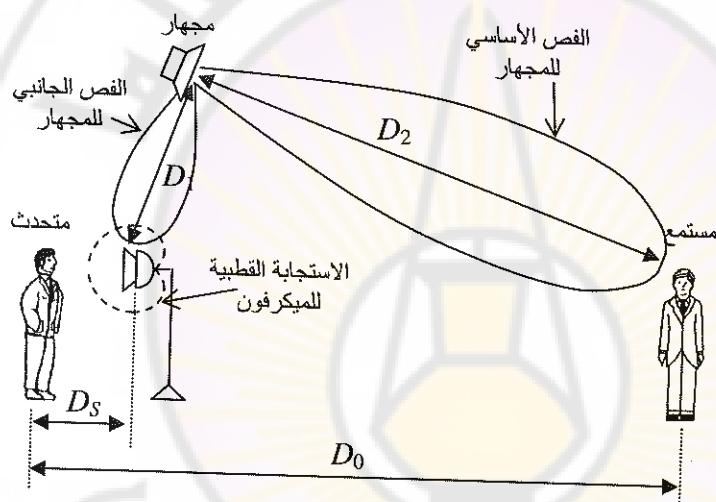
إذا كان كسب الحلقة  $\mu\beta$  أقل من الواحد لن يحدث الصفير، ولكن يمكن أن تؤدي التغذية الخلفية الصوتية إلى تعزيز بعض المركبات التردية أو إضعافها (حسب ما يكون موجاً أو سالباً)، مما يجعل الاستجابة التردية للنظام الصوتي غير منتظمة، كما هو موضح بالشكل (4-6). ويفترض في هذا الشكل أن نظام تقوية الصوت يعمل تحت عتبة التغذية الخلفية Feedback Threshold أو مشرف التغذية الخلفية Feedback onset بمقدار 3 dB، معنى أنه في الحالة الاسمية، بعد زيادة كسب المكبر الصمعي حتى العتبة التي يحدث عنها الصفير، تم انفاس ذلك الكسب بمقدار 3 dB.



الشكل (4-6): الاستجابة التردية للنظام صوتي يعمل تحت عتبة التغذية الخلفية بمقدار 3dB.

في الحال العامة، كي لا تؤدي التغذية الخلفية الصوتية إلى حدوث الصفير، ولكي لا تؤدي إلى عدم انتظام ملحوظ في الاستجابة التردية للنظام الصوتي، ينبغي خفض الكسب الصوتي عن عتبة التغذية بعامل أمان Safety Factor كاف، يسمى هامش استقرارية التغذية الخلفية (FSM) Feedback Stability Margin. وختبار قيمة هامش الأمان FSM عادة 6 dB (وهذا يقابل  $\mu\beta = 0.5$ ) إذا تم مسبقاً إجراء تسوية Equalization للاستجابة التردية للنظام الصوتي حتى تكون مستوية Flat Response بدقة كافية. وإذا لم يتم إجراء تسوية دقيقة للنظام يختار هامش الأمان FSM حوالي 12 dB على الأقل.

كما سبق أن ذكرنا، لكي نحصل على كسب صوتي عال دون حدوث تغذية خلفية (أي دون حدوث صفير) يفضل استخدام ميكروفونات و محاهير ذات اتجاهية مناسبة. ويوضح ذلك مثلاً بالشكل (6-5)، حيث يفترض أن الميكروفون ذو استجابة قطبية بشكل كارديود Cardioid، بينما يفترض أن المجهار ذو نموذج قطبي له فص رئيسي بشكل قطع ناقص ضيق نسبياً باتجاه محور المجهار، وله فص جانبي موجه للأعلى Bottom Lobe نحو الميكروفون، و ينبغي أن يؤخذ هذا الفص في الاعتبار.



الشكل (6-5): نظام تقوية صوت بسيط عند استخدام ميكروفون و مجهار موج.

### ٣-٢-٦ الكسب الصوتي الأقصى أو الكامن Potential Acoustic Gain

يقصد بالكسب الصوتي الأقصى أو الكامن (PAG) أكبر كسب صوتي يمكن أن يعطيه النظام الصوتي قبل حدوث تغذية خلفية صوتية (أي قبل ظهور تأثيرات سلبية ملحوظة للتغذية الخلفية الصوتية). وتحسب قيمة الكسب

الصوتي الأقصى أو الكامن  $PAG$  بالديسيبل أولاً بافتراض كون الميكروفون والمجهار عديي الاتجاهية Omni-directional اعتماداً على العلاقة:

$$PAG_{omni} = 20 \log_{10} \frac{D_0 D_1}{D_s D_2} - FSM \quad [dB] \quad (6-3)$$

تؤخذ قيمة  $FSM$  على الأقل 6dB فيما إذا أجريت تسوية دقيقة للنظام الصوتي كما سبق أن ذكرنا. وتحسب قيمة  $PAG$  حال كون الميكروفون والمجهار اتجاهيين Directional كما افترضنا في الشكل (6-5)، وفق العلاقة:

$$PAG = PAG_{omni} + \Delta G_M + \Delta G_S \quad [dB] \quad (6-4)$$

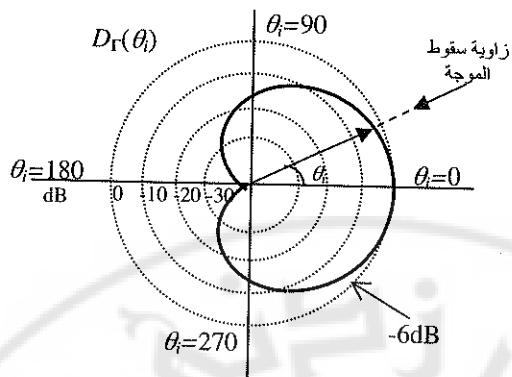
حيث نرمز :  $\Delta G_S$  و  $\Delta G_M$  للزياداتين الممكنتين لقيمة الكسب الصوتي بفضل اتجاهي المجهار والميكروفون. وتمثل  $\Delta G_M$  بالديسيبل اختلاف الحساسية المخورية للميكروفون باتجاه المتحدث عن حساسيته بالاتجاه نحو المجهار، كما تمثل  $\Delta G_S$  بالديسيبل أيضا الفائدة الناجمة عن الاتجاهية المجهار نتيجة انحراف الاتجاه نحو الميكروفون عن الاتجاه المخوري للمجهار. وإذا كان الميكروفون من نوع الكارديود تبلغ قيمة  $\Delta G_M$  نظرياً 6 dB كما هو موضح بالشكل(6-6)، ويمكن أن تبلغ  $\Delta G_M$  لبعض أنواع المحاهير حوالي 6 dB أيضاً أو أكثر.

كمثال تطبيقي لنفترض في حالة الشكل (1-6) أو الشكل (6-5) أن:

$$FSM = 6 \text{ dB} , D_2 = 36 \text{ m} , D_1 = 9 \text{ m} , D_0 = 32 \text{ m} , D_s = 0.4 \text{ m}$$

فيكون:

$$\begin{aligned} PAG_{omni} &= 20 \log_{10} \frac{D_0 D_1}{D_s D_2} - FSM = 20 \log_{10} \frac{(32)(9)}{(0.4)(36)} - 6 \\ &= 20 \log_{10} 20 - 6 = 20 \text{ dB} \end{aligned}$$



الشكل (6-6): الاستجابة القطبية للميكروفون الكارديود.

سيق أن وجدنا الكسب الصوتي المطلوب  $NAG$ , فكانت قيمته  $24\text{dB}$ , أي أن  $NAG > PAG$ . ويمكن جعل  $PAG > NAG$  بالإستفادة من اتجاهية الجهاز أو الميكروفون. وإذا كان الميكروفون من نوع كارديود، فإن اتجاهيته تسمح لنا بزيادة الكسب الصوتي بمقدار  $6\text{ dB}$ ، ليصبح  $PAG = 26\text{ dB}$  وبالتالي يصبح  $PAG > NAG$ ، ويمكن أن نسمح بكسب صوتي أكبر بالإستفادة من اتجاهية الجهاز أيضاً.

### ٦-٣ خصائص النظم الداخلية لتنقية الصوت Indoor System

تؤثر الخصائص الصوتية للقاعات تأثيراً كبيراً على نوعية الصوت، وإذا لم تؤخذ هذه الخصائص بالحسبان يصعب الحصول على نوعية جيدة للصوت حتى في حالة استخدام أكثر التجهيزات الصوتية إنفاقاً وكلفةً. وأهم العوامل المحددة للقاعات أبعاد القاعات، التصميمات الهندسية للقاعات، وخصائص الجدران والأثاث.

## ٦-٣-٦ معاملات الانعكاس و الامتصاص Absorption Coefficients and Reflection and

يمكن للتبسيط أن نفترض أن انتشار الأمواج الصوتية مشابه لانتشار الضوء (وهذا يصح عملياً للترددات السمعية المرتفعة نسبياً فقط). وعند سقوط موجة صوتية على الجدار الفاصل بين قاعتين فإن جزءاً من طاقة الموجة الصوتية سوف ينعكس وجزءاً آخر سوف يمتص، أو ينفذ إلى القاعة الأخرى. ومع ذلك سوف نفترض أن كل الطاقة المفقودة (أي مجموع الطاقة الممتصة فعلياً والطاقة التي تنفذ من خلال الجدار) كطاقة ممتصة. ولذا نعرف عامل امتصاص الجدار **Absorption Coefficient** بالعلاقة:

$$\alpha_a = 1 - \alpha_r \quad (6-5)$$

حيث  $\alpha_a$  معامل الانعكاس. وسوف نرمز لـ  $\alpha_a$  ببساطة بـ  $a$ ، وتعلق قيمته بمادة الجدار وتردد الموجة الصوتية الساقطة على الجدار. وتتراوح قيم معاملات الامتصاص من 0 عندما يكون السطح عاكساً تماماً، إلى 1.0 عندما يكون السطح ماصاً تماماً. يكون السطح ماصاً جيداً إذا كان  $a > 0.75$ ، ويكون عاكساً جيداً إذا كان  $a < 0.45$ . وتعطي معظم المراجع العلمية قيم معاملات الامتصاص للترددات 4000 Hz، 2000 Hz، 1000 Hz، 500 Hz، 250 Hz، 125 Hz هذه الترددات في المدى الترددية الذي يتضمن معظم طاقة الكلام والأصوات الموسيقية. ويبيّن الجدول (6-1) قيم معاملات الامتصاص لأكثر المواد المستخدمة عند الترددات المذكورة أعلاه.

الجدول (6-1): معاملات الامتصاص.

معاملات الامتصاص						المادة
125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	
0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25	• أسمنت مسلح - غير مدهون. - مدهون.
0.01	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08	
0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	• ألواح الفايبر Fiberboard - مدهونة. - غير مدهونة.
0.05	0.10	0.15	0.25	0.30	0.30	
0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02	• أرض Floor - أسمنت مسلح. - إسفلت، وملاط. - خشب. - خشب مثبت على أسمنت.
0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	
0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	
0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	
0.09	0.25	0.60	0.81	0.75	0.74	0.25cm - FiberGlass 0.50cm - 1.0 cm -
0.20	0.56	0.89	0.93	0.84	0.80	
0.39	0.91	0.99	0.98	0.93	0.88	
0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	• زجاج Glass - زجاج ميلك. - زجاج عادي.
0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	
0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65	• السجاد - سجاد مركب على أسمنت - مركب على طبقة من المطاط
0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73	

معاملات الامتصاص للحضور ومقاعد الحضور (للشخص الواحد أو للمقعد الواحد لواحدة السطح)

2.5	3.5	4.0	4.5	5.0	4.5	• أشخاص جالسون على مقاعد منجلدة.
1.5	3.5	4.0	4.5	3.5	3.5	• مقاعد حضور - منجلدة بقماش صناعي.
2.5	3.0	3.0	2.0	1.5	1.0	- منجلدة بالجلد، مواد من البلاستيك.
0.15	0.20	0.25	0.30	0.50	0.50	- مقاعد خشبية غير منجلدة.

## ٦-٣-٢ خصائص الانعكاس والألغاط الرنينية في القاعات

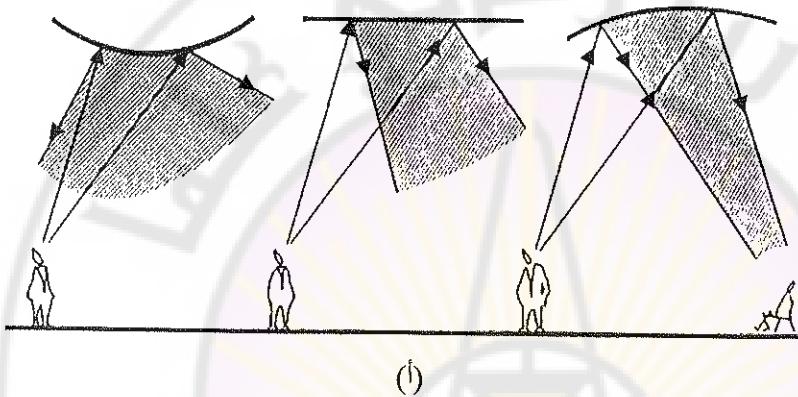
بعد التصميم الهندسي للقاعات مهمًا جدًا من أجل تصميم النظم الصوتية بحيث تحقق مواصفات الأداء المطلوبة منها. ويجب أن يؤخذ بالحسبان في التصميم الهندسي للقاعات أبعادها الهندسية و خصائص انعكاس وامتصاص الموجات الصوتية فيها.

من المعروف أن الموجة الصوتية تتعكس عن أي سطح تسقط عليه (فيما إذا كانت المانعة الصوتية النوعية له مختلفة عن  $900^{\circ}$ ) إذا كان مقاس السطح كبيراً بالمقارنة مع طول الموجة. وإذا كانت أبعاد جدران القاعة أكبر كثيراً من طول الموجة، تتعكس الموجة الصوتية عنها كانعكاس الضوء عن المرآة. ويوضح الشكل (6-7-أ) أحوال انعكاس الموجة الصوتية عن سطح مستوٍ أو مقعر أو محدب. وفي حال الانعكاس عن سطح مقعر يمكن أن تلتقي الأشعة الصوتية في نقطة واحدة، تعتبر كخيال لمصدر الصوت وتكون كثافة الطاقة فيها مرتفعة نسبياً. يسمح بوجود السطوح المقعرة في القاعات إذا كان قطر الت-curvature أكبر من أربعة أضعاف أبعاد القاعة، بحيث تستبعد احتمالات تشكل أحجية لمصادر الصوت. ويفضل عند تصميم القاعات أن تكون جدران القاعة المقابلة غير متوازية، وبحيث يقسم الجدار إلى عدة أجزاء تختلف بزايا ميلاتها، أو يختار الجدار على هيئة سن المنشار، وذلك لتشتيت الموجة الصوتية المنعكسة وجعل كل من أجزاء الجدار أصغر من طول الموجة أو مقاربة له. وبين الشكل (6-7-ب) مقطعاً عرضياً لسقف قاعة مؤلف من أجزاء مختلفة لتشتيت الموجة الصوتية.

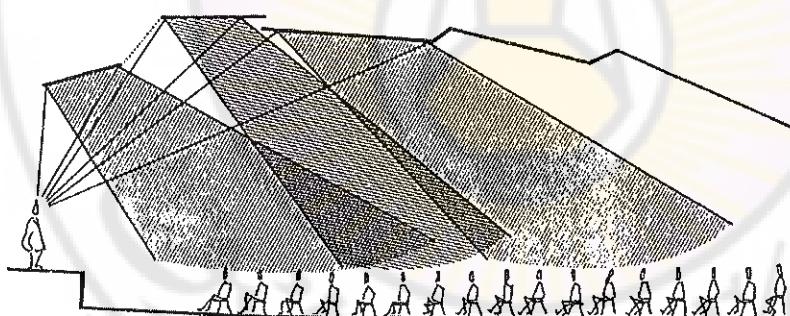
لكي نوضح تأثير الانعكاسات في القاعات، سنستعرض حالة قاعة متوازية المستطيلات تعكس الموجة الصوتية عن كل جدرانها، بحيث تنتج موجات مستقرة تؤدي إلى حدوث الرنين عند الترددات المحددة وفق العلاقة:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (6-6)$$

ترمز  $L_x, L_y, L_z$  لطول القاعة وعرضها وارتفاعها على الترتيب، بينما ترمز  $n_x, n_y, n_z$  لأي أعداد صحيحة تعبر عن أنماط الاهتزاز . Variation Modes



(ا)



(ب)

الشكل (6-7): تصميم القاعات الصوتية (أ) طرق انعكاس الموجات الصوتية عن الجدران المقعرة والمحدبة. (ب) تصميم الجدران في قاعات الاستماع.

على سبيل المثال، في حالة غرفة مكعبية أبعادها،  $L_x=L_y=L_z=4$  m، نوجد أحضر تردد رنين بافتراض  $n_x=n_y=n_z=0$  و  $n_x=1$  مثلاً:

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{4}\right)^2 + \left(\frac{0}{4}\right)^2 + \left(\frac{0}{4}\right)^2} = \frac{340}{2} \sqrt{\frac{1}{4}} = 85 \text{ Hz} \quad (6-7)$$

يكون عدد أنماط الرنين كبيراً جداً ضمن المجال الترددي السمعي. وتؤثر الظواهر الرنينية تأثيراً كبيراً على الاستجابة التردية للقاعات، حيث تجعلها أعظمية للتترددات الموافقة للتترددات أنماط الرنين، وتحضر بين ترددات الرنين، فيظهر فيها عدم انتظام كبير. وفي حالة قاعة بشكل متوازي مستويات، يفضل اختيار أبعاد القاعة وفق العلاقات التالية لكي تكون ترددات الأنماط موزعة بانظام تقريرياً (ضمن المجال الترددي السمعي).

$$\frac{L_x}{L_y} = \frac{L_y}{L_z} \quad (6-8)$$

$$L_x = L_y + L_z \quad (6-9)$$

يمكن أن نعبر عن أبعاد القاعة وفق العلاقات المذكورة بدلالة حجم القاعة:

$$V = L_x L_y L_z \quad (6-10)$$

يتبيّن وفق العلاقات (6-8) و (6-10) :

$$L_z = 0.62 \sqrt[3]{V} \quad L_y = \sqrt[3]{V} \quad L_x = 1.62 \sqrt[3]{V} \quad (6-11)$$

$$L_x : L_z : L_y = 1.62 : 1 : 0.62 \approx 8 : 5 : 3 \quad (6-12)$$

تدعى النسب السابقة بالنسبة المرغوبة صوتيًا Desirable Room Ratios وعندما تتحقق هذه النسبة تتوزع ترددات الرنين طيفياً بانظام تقريرياً، من ثم تصبح ظواهر الرنين غير ملحوظة فيما إذا كانت "عوامل الجودة" للظواهر الرنينية منخفضة

نسبةً. ولذلك تصمم قاعات الاستماع و استديوهات الإذاعة والتلفزيون، بحيث تتحقق النسب المئوية في العلاقة (6-11) بدقة  $\pm 10\%$ . ويختار حجم هذه القاعات كبيرةً لدرجة كافية، بحيث يكون أخفض ترددات أنماط الرنين وأقل من الحد السفلي لل المجال الترددي السمعي.

#### ٦-٣-٤ ظاهرة التردد **Reverberation**

هي الظاهرة التي تتحم عن انعكاس الموجات الصوتية عن الجدران في القاعات ووصولها إلى المستمع، بحيث تندمج مع الصوت المباشر وبحيث لا يميزها المستمع كصدى، أي بحيث لا تشكل تكراراً للصوت وإنما تؤدي إلى تقويته و "تجمله"، وتكتسب النطق وضوحاً إضافياً. وهذه الظاهرة يجب أن تؤخذ بالحسبان عند تصميم قاعات الاستماع.

يبين الشكل (6-8-أ) شرحًا تفصيلياً لهذه الظاهرة في مسرح، حيث يمكن أن ترد إلى الشخص المستمع موجة صوتية مباشرة من المتكلم و موجات منعكسة عن جدران المسرح. وإذا رسمنا مطالات الموجات الصوتية الواردة إلى المستمع لحال رشقة نغمة tone-burst أي موجة صوتية تمثل نغمة قصيرة الامد، فإنها تعطي "رشقات" متتالية، كما في الشكل (6-8-ب). وقد اعتبر العالم سابين Sabine أن تأثير الانعكاسات يبقى ملحوظاً للمستمع طالما أن مستوى طاقة الموجات المنعكسة لا يقل بأكثر من 60 dB عن مستوى الإشارة الأصلية. وبناء على ذلك يعرف زمن التردد Reverberation Time بأنه الزمن الذي تنخفض فيه الكثافة المتوسطة للطاقة الصوتية للموجات المنعكسة داخل غرفة بمقدار 60 dB بعد توقف المبع الصوتي.

يحسب زمن التردد داخل غرفة ما باستخدام العلاقة التالية المسماة بعلاقة سابين:

$$T = \frac{0.164 V}{\bar{a} S} \quad (6-13)$$

حيث  $T$  زمن التردد عند 60dB و يقاس بالثانية، و  $V$  حجم الغرفة بالتر المكعب، و  $\bar{a}$  مجموع سطوح الغرفة بالتر المربع، و  $\bar{a}$  معامل الامتصاص الوسطي للغرفة، ويعطى بالعلاقة:

$$\bar{a} = \frac{a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots + a_n S_n}{S} \quad (6-14)$$

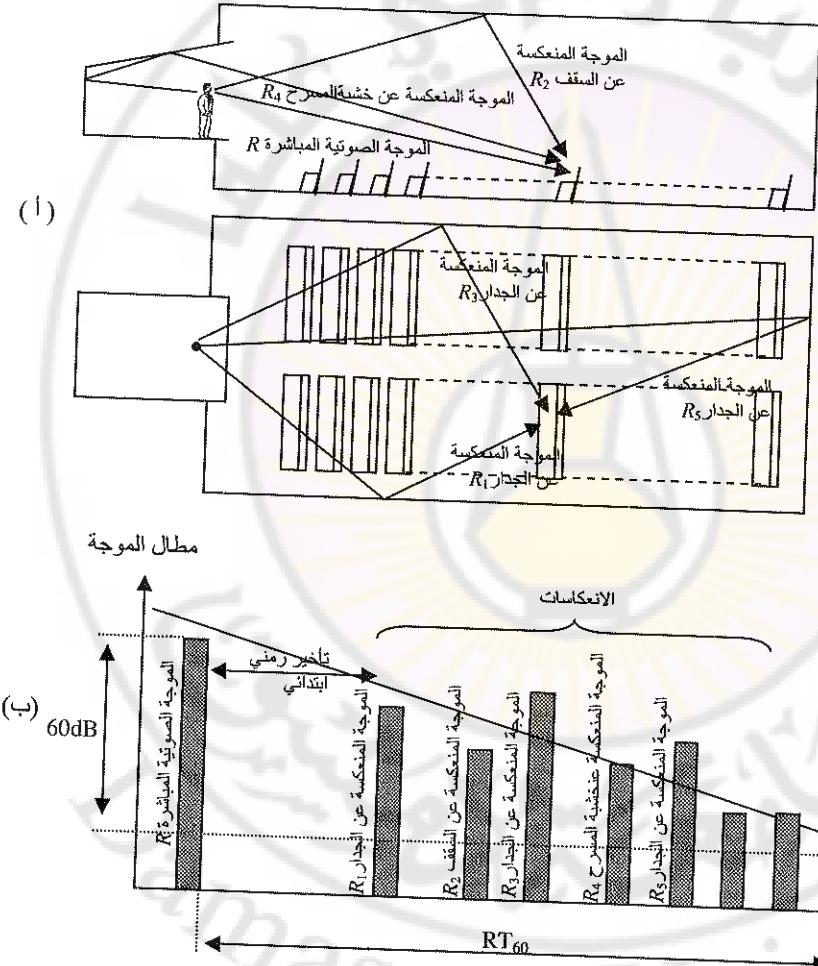
حيث  $S_1, S_2, \dots, S_n$  مساحات جدران القاعة و مختلف السطوح الأخرى،  $a_1, a_2, \dots, a_n$  معاملات امتصاصها على الترتيب.

يمكن إعادة كتابة العلاقة (6-13) بالصيغة التالية:

$$T_{60} = \frac{V}{6 \bar{a} S} \quad (6-15)$$

يختلف التردد عن الصدى حيث إن الصدى Echo هو انعكاس الموجة الصوتية عن حاجز ما والعودة إلى المستمع بعد فترة زمنية تزيد عن حوالي 40 ms. بحيث يلاحظ المستمع الصدى أو الصوت المنعكس. ويكون الصدى مؤذياً دائماً في معظم النظم الصوتية و يجب تفاديه، بينما يمكن أن يكون التردد أكثر النظم الصوتية المغلقة مفيداً، إذا كان زمن التردد ذا قيمة مناسبة. وتدعى الغرف التي يكون فيها التردد مهملاً نتيجة لكون معامل الامتصاص الوسطي لها عالياً جداً بالغرف الميتة Dead Rooms، بينما تدعى الغرف التي لها زمن تردد كبير نسبياً بالغرف الحية Live Rooms. و تصمم الغرف عادة بحيث يختار زمن التردد بقيمة تحقق المتطلبات الصوتية للغرفة، وبحيث يستفاد من الطاقة الصوتية بقدر الامكان. و يختار زمن التردد بعناية خاصة في حالة الاستديوهات و قاعات التسجيل. وفي حالة القاعات متعددة الاستخدام Multipurpose Halls يفضل توافر إمكانية تغيير زمن التردد، بحيث يمكن انقاشه عند استخدام القاعة للمحاضرات، وبحيث يمكن زيادته عند استخدامها

للحفلات الموسيقية. وقد يكفي بتغيير زمن التردد عن طريق تغيير تأثير القاعة نفسها، أو تستخدم تجهيزات خاصة للتردد "الاصطناعي". ويمكن أن يكفي لتحقيق ذلك في حالات كثيرة بتغيرات بسيطة في تأثير القاعة نفسها. وقد وجد تجربياً أن زمن التردد الامثل Optimum Reverberation Time الواجب تحقيقه يتعلق بحجم الغرفة والاستخدامات المخصصة لها بالعلاقة التقريرية التالية:



الشكل (8-6): ظاهرة التردد (ا) الانبعاثات داخل غرفة، (ب) زمن التردد.

$$T_{\text{Opt}} = r_p (0.012 \sqrt[3]{V} + 0.107) \quad (6-16)$$

حيث  $T_{\text{Opt}}$  القيمة المثلثى لزمن التردد الواجب تحقيقها في قاعة ما حجمها  $V$ . و  $r_p$  ثابت يتعلق بالاستخدامات المخصصة لها، و تختار قيمته حوالي 4 عند تصميم القاعة لتكون قاعة استماع أو قاعة محاضرات، و حوالي 5 من أجل استخدام القاعة للحفلات الموسيقية و حوالي 6 لاستخدامها لموسيقى الكورال.

يسنتج من التحليل المفصل لظاهرة التردد في قاعة ينتج فيها الصوت عن منبع استطاعته الصوتية  $W_A$  أن شدة الصوت التردادي تعطى بالعلاقة

$$I_r \approx \frac{4W_A}{\alpha S} \quad (6-17)$$

### ٦-٣-٥ المسافة الحرجة Critical Distance

عند تحديد الكسب الصوتي للنظم الداخلية لتنمية الصوت، كما في حال قاعات الاستماع، قاعات المحاضرات أو قاعات الاحتفالات، يجب أن تؤخذ بالحسبان الانعكاسات عن سطوح القاعة (جدرانها وسقفها وارضيتها)، وظاهرة التردد الناتجة عن تلك الانعكاسات. ويعبر عن شدة الصوت في القاعة في حالة عدم تشغيل نظام تقوية الصوت بالعلاقة:

$$I = I_d + I_r \quad (6-18)$$

حيث  $I_d$  شدة الصوت المباشر direct، و  $I_r$  شدة الصوت التردادي reverberant على نحو مبسط يمكن اعتبار أن  $I_r$  ثابتة تقريباً في كل أنحاء القاعة وتعطى بالعلاقة (6-17)، بينما تنخفض  $I_d$  كلما ابتعدنا عن منبع الصوت، بتناسب عكسي مع مربع البعد، حسب العلاقة:

$$I_d = \frac{2W_A}{4\pi D^2} \quad (6-19)$$

حيث  $Q$  اتجاهية المنبع و  $D_g$  البعد عنه.

Critical Distance تسمى المسافة التي يكون عندها  $I_d = I_r$  المسافة الحرجة وسوف نرمز لها  $D_c$ . ونستنتج مقارنة العلقتين (6-17) و (6-19) أنه عندما

$$D = D_c$$

$$\frac{Q W_A}{4\pi D_c^2} \approx \frac{4 W_A}{\bar{a} S}$$

$$D_c = \sqrt{\frac{Q \bar{a} S}{16\pi}} \approx 0.14\sqrt{\bar{a} S}$$

إذا افترضنا أن منبع الصوت هو منبع كروي عديم الاتجاهية بحيث  $Q=1$ ، فإن:

$$D_c = 0.14\sqrt{\bar{a} S}$$

اعتماداً على تعريف  $D_c$  وحسب العلقتين (6-17) و (6-18) يمكن أن تكتب:

$$\frac{I_d}{I_r} = \frac{D_c^2}{D^2}$$

تتجلى أهمية النسبة  $I_d/I_r$  من خلال تأثيرها على وضوح الكلام أو وضوح النطق Articulation. فإذا كان البعد عن المتكلّم أكثر من  $4D_c$  مثلاً فإن  $I_d < 16 I_r$ ، أي يسود تقربياً الصوت التردادي، مما يسعى كثيراً إلى وضوح النطق أو المفهومية Intelligibility، ولذلك يفضل لتحسين وضوح النطق أو المفهومية داخل القاعة زيادة المسافة الحرجة. ويتم ذلك عن طريق زيادة المقدار  $\bar{a}$ ، على أن يؤخذ في الاعتبار مع مراعاة متطلبات الحصول على قيمة مناسبة لزمن التردد وفق علاقة ساين.

عند استخدام نظام تقوية الصوت في القاعة، يحدث تأثير متبادل بين ظاهري التردد والتغذية الخلفية. ويتبيّن أن ظاهرة التردد تؤدي إلى زيادة تأثير التغذية الخلفية

الصوتية، كما أن تأثير التغذية الخلفية الصوتية يكافيء زيادة معامل الانعكاس المتوسط، أي يكافيء إنفصال القيمة المتوسطة لمعامل الامتصاص، مما يؤثر على المسافة الحرجة. ويتبين أنه يمكن إجراء حسابات الكسب الصوتي (NAG,PAG) في حالة قاعات الاستماع Auditorium أو غيرها من الأماكن المغلقة بنفس العلاقات المطبقة في حالة الأماكن المكشوفة (النظم الخارجية)، إذا استبدلنا في تلك العلاقات قيم المسافات ( $D_0, D_s, D_1, D_2, EAD$ ) في الشكل (6-1) و الشكل (6-2) بما يقابلها حسب العلاقة:

$$D' = \sqrt{D_c^2 + D_x^2} \quad (6-20)$$

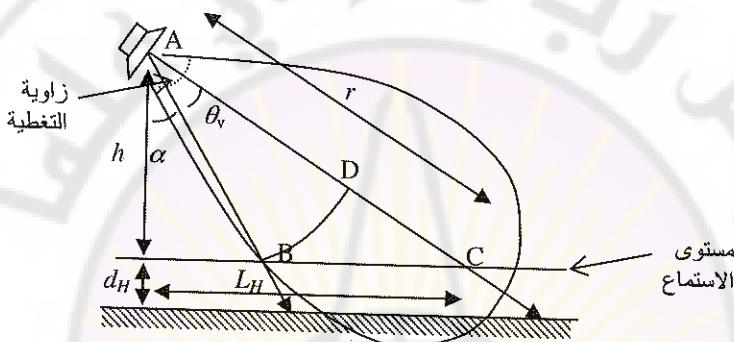
حيث ترمز  $D_x$  لأي من المسافات المذكورة أعلاه، بينما ترمز  $D_c$  للمسافة الحرجة.

يفضل في حالة النظم الداخلية استخدام ميكروفونات ومحاهير اتجاهية، مع إبعاد الميكروفونات بمسافة كافية عن المحاهير، بحيث لا تقع الميكروفونات في مجال تأثير الصوت المباشر للمحاهير (وعندئذٍ تتلقى الميكروفونات أساساً فقط صوتاً ترددانياً من المحاهير وهذا يسمح بالحصول على كسب صوتي كامن أعلى مما في حالة وضع الميكروفونات في مجال الصوت المباشر للمحاهير).

#### ٤-٦ اختيار أماكن تركيب المحاهير في المناطق المغلقة Indours Loudspeaker Placement

تستخدم عدة طرق لتركيب المحاهير داخل القاعات، بحيث يتم تحقيق التغطية المثلثي تقريباً. وتحتار طريقة تركيب المحاهير تبعاً للغرض الذي تتحققه القاعة، وتبعاً لكون القاعة مجهزة بميكروفونات أم غير مجهزة. وفي معظم الحالات يفضل تركيب المحاهير، بحيث يهدو المصادر الظاهري للصوت منطبقاً على المصادر الحقيقي للصوت تقريباً(وفق اتجاهية ورود الموجة الصوتية إلى المستمع).

تركيب المجاهير في معظم الحالات في القاعة بزوايا ميلان مناسبة بحيث تكون قادرة على تغطية أكبر منطقة ممكنة وبحيث توجه إلى أبعد مستمع في القاعة كما هو مبين في الشكل (6-9)، حيث يحسب الارتفاع  $h$  في الشكل بالنسبة لمستوى الاستماع، ويرمز  $d_H$  لارتفاع هذا المستوى عن مستوى الأرض، ويفترض مساواً 1 m في حال اعتبار المستمعين جالسين و 1.5 m في حال اعتبار المستمعين واقفين.



الشكل (6-9): تأثير زاوية التغطية للمجهار.

عند تغطية منطقة معينة نسعى عادةً إلى تحقيق انتظام جيد للتغطية أفقياً. وفي حالة الشكل (6-9) نفترض أن محور المجهار موجه لأبعد نقطة في منطقة الاستماع وهي النقطة C. ونفترض D هي متصف AC، كما نفترض أن AB يمثل الحد السفلي لزاوية التغطية الشاقولية (-6dB)، وبحيث  $AB=AD$ . وتحقق بذلك تغطية المنطقة BC بانتظام جيد لأن فقد نتيجة المسافة عند B بالمقارنة مع D معوض بنقص الفقد بالنسبة للمسافة بالمقارنة مع C (بقدار 6dB). ويمكن حساب زاوية التغطية المطلوبة للمجهار انطلاقاً من أن:

$$\cos \alpha = \frac{h}{r/2}, \quad \cos(\theta_v + \alpha) = \frac{h}{r} \quad (6-21)$$

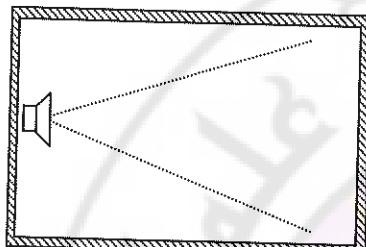
## ٤-٦ قاعات الاستماع Auditorium Rooms

تجهز قاعات الاستماع عادةً بنظم تقوية الصوت، وتركيب الميكروفونات عادةً على منصة القاعة، وعند دراسة التغطية الصوتية في قاعات الاستماع، يجب أن تؤخذ بالحسبان التغذية الخلفية، بالإضافة إلى ظاهرة الترداد للحصول على أفضل مفهومية في الكلام.

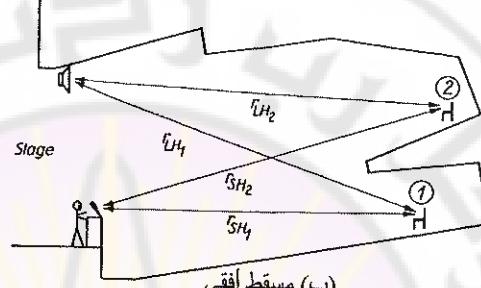
يفضل غالباً أن نستخدم للتغطية الصوتية لقاعات الاستماع طريقة المحاير المركزية Central loud speaker System، ويستخدم في هذه الطريقة مجهر واحد ذو استطاعة عالية أو مجموعة مجاهير مرکزة مكان واحد، ومرکبة فوق أو خلف مصدر الصوت الحي Live Source of Sound مباشرة، على أن يوجه المجهر أو مجموعة المحاير نحو أبعد مستمع في القاعة (أي منتصف أبعد صف)، وبحيث تستخدم ميكروفونات ومجاهير ذات اتجاهية جيدة لإضعاف تأثير التغذية الخلفية. وفي هذه الحال يتافق المصدر الظاهري للصوت مع مكان مصدر الصوت الحي. ويوضح هذا المفهوم التصوير الصوتي Acoustic Imaging أو الواقعية Realism. وإذا تم التحقيق الأمثل لعوامل التصميم الأخرى كزمن الترداد والتغذية الخلفية، يمكن أن ينبع عند الحضور شعور بأنهم يسمعون الصوت الأصلي مباشرة، وكأنه لا يوجد نظام تقوية صوت. ومن الضروري تجنب حدوث تأخير زمني أكثر من ms 30-50 للصوت القادم من المحاير بالمقارنة بالصوت الحي، حتى يتم استبعاد حدوث الصدى.

يوضح الشكل (6-10) الأماكن النموذجية لتركيب المحاير المخصصة لنظم تقوية الصوت في قاعات الاستماع. ويفترض في الشكل (6-10-أ) استخدام مجهر واحد يركب فوق المنصة Platform أو مقدمة القاعة procearium، قريباً من السقف وبحيث يكون ذا ارتفاع مناسب فوق المتكلم أو الميكروفون، كما سبق أن

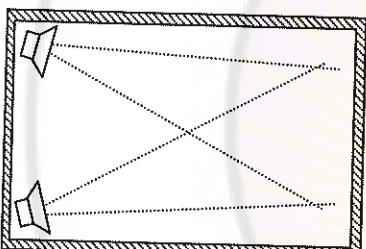
أو ضمننا بالشكل (6-1) و بالشكل (6-5). وإذا لم يكفي مجهاً واحد للتنفس الصوتية للقاعة بمستوى كافٍ، تستخدم أعمدة صوتية sound columns ترتب فيها المجاهير عادة شاقوليًّاً، أو صناديق مجاهير يحتوي كل منها على مجاهير هدّارة و مجاهير مجال متوسط و مجاهير زعقة.



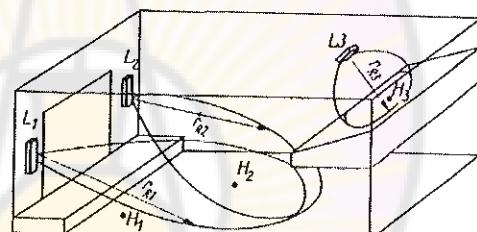
(أ) مسقط شاقولي



(ب) مسقط أفقي



(ج) مسقط شاقولي



(د) مسقط جانبي

الشكل (7-10): تركيب المجاهير في قاعات الاستماع.

يبين الشكل (7-10-ب) إحدى طرق المجاهير المركبة ويستخدم فيها مجهاً مركباً على جانبي المنصة وذلك لتأمين التغطية الصوتية الكافية وبنفس الوقت من أجل الحفاظ على الجمالية الهندسية للقاعة. ويبيّن بالشكل (7-10-د) الطريقة المركبة المستخدمة في مسرح ويستخدم فيها مجهاً أو مصفوفة مجاهير  $L_1$  و  $L_2$  على جانبي المنصة موجهين نحو المستمعين في القسم الأسفل من المسرح.

ونلاحظ أنه يمكن إضافة مجهر إضافي  $L_3$  لدعم النظام الصوتي في القسم الأعلى من المسرح وذلك لبعده عن المنصة.

## ٦-٤-٦ الغرف المسطحة Flat Rooms

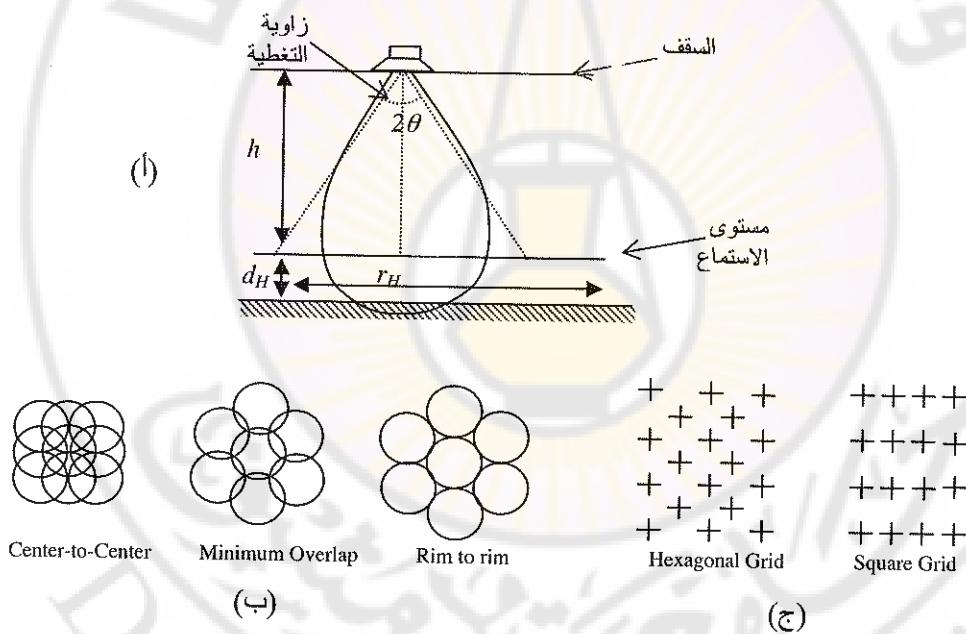
يصعب تحقيق التغطية المنتظمة بمجهار مركزي أو مجموعة مجاهير (أي في مقدمة الغرفة) عندما يكون ارتفاع السقف منخفضاً كما هو الحال مثلاً في القاعات المسطحة Flat Rooms، كصالات الانتظار في المطارات، محطات القطار، الفنادق،... إلخ، أو يمكن أن تكون في المطاعم، المكاتب، المتاحف، المعارض المغلقة، المحازن،... إلخ. وتعتبر الطريقة المفضلة لتغطية الصوت في معظم هذه الأمثلة هي الطريقة الموزعة Distributed Loudspeaker System.

تركب المجاهير في الطريقة الموزعة في أكثر الحالات في سقف الغرفة وتوجه بحيث تشع نحو أرض الغرفة، بحيث تومن المجاهير مسماوية منتظمة تقريباً في كل منطقة تواجد المستمعين. وتفادياً للتأثيرات السلبية للانعكاسات الناتجة عن توجيه المجاهير مباشرةً نحو أرض الغرفة، يفضل تأثير أرض سقف الغرفة بمواد ذات عامل إمتصاص عالٍ لإضعاف الانعكاسات.

يتحدد عدد المجاهير الواجب تركيبها في غرفة ما لتحقيق تغطية منتظمة بمستوى معين للصوت داخل القاعة بالعلاقة بين سطح الغرفة وزاوية التغطية وارتفاع الغرفة. ويبيّن الشكل (6-11-أ) العلاقة بين زاوية التغطية والمسافة  $h$  بين مستوى الاستماع وبين المجهار. ويعطى عدد المجاهير بالعلاقة التالية:

$$N_{Sp} = F_C \frac{S}{r_H^2} \quad \text{with} \quad r_H = h \tan \theta \quad (6-22)$$

حيث  $S$  مساحة سطح الغرفة، و  $r_H$  نصف قطر منطقة التغطية و  $F_C$  ثابت يتعلق بكثافة التغطية المطلوبة. ويبيّن الشكل (6-11-ب) ثلاثة أنواع من كثافة التغطية المطلوبة، حيث يمكن أن تكون التغطية من المركز إلى المركز Center to center، ويمكن أن تكون بأقل تراكب ممكن Minimum Overlap، أو تكون من الحيط إلى الحيط. ويبيّن الشكل (6-11-ج) طريقتين ممكنتين لتوزيع المجاهير في سطح الغرفة، فيمكن أن يكون التوزيع بشكل رباعي Square Grid، ويمكن أن يكون التوزيع بشكل سداسي Hexagonal Grid. ويبيّن الجدول (7-2) قيم الثابت  $F_C$  للأنواع السابقة تبعاً.



الشكل(6-11): التغطية الموزعة (أ) العلاقة بين زاوية التغطية وبين تحديد المسافة بين المجاهير. (ب) كثافة التغطية. (ج) طرق التوزيع.

لدرجة التراكب وطريقة توزيع المحاهير. وفي الغرف المسماة طحه التي يزيد ارتفاعها عن 6 m ويراد تغطيتها بإشارة الكلام بحيث لا تزيد المسافة بين المستمع والمحهار عن المسافة الحرجة، تركب المحاهير بحيث تتبدلي من سقف الغرفة وتثبت على ارتفاع 6 m من مستوى الاستماع بحيث تكون قريبة من المستمع.

رغم مزايا التغطية الموزعة من وجها نظر تأمين التغطية المنتظمة تقريباً في منطقة الاستماع، فهي ذات عيوب أيضاً كونها أكثر كلفة اقتصادية عادةً من بقية الطرق.

### ٦-٤-٣- الغرف عالية الضجيج High Noisy Rooms

في القاعات الكبيرة مثل صالات المعارض المعلقة والواسعة أو في المصانع يكون مستوى الضجيج عالياً جداً. وبسبب كبر هذه القاعات فإن زمن تردادها يكون كبيراً جداً أيضاً ولا يمكن إنقاذه باستخدام مواد ذات عامل امتصاص عال بسبب طبيعة القاعة نفسها التي تفرض أن يكون تأثيرها رخيضاً وذات معاملات امتصاص منخفضة مثل. وبسبب الحاجة إلى مستوى صوتي عال بسبب الضجيج المرتفع في مثل هذه الصالات، يفضل في مثل هذه الأحوال استخدام الطريقة الموزعة على ارتفاع منخفض من مستوى السمع بحيث لا تزيد عن 3 m فوق مستوى السمع. ويمكن أيضاً استخدام مصفوفات من المحاهير تركب على طول جدار الصالة (عندما لا يزيد طول الجدار عن 20 m) لتحقيق التغطية الممكنة.

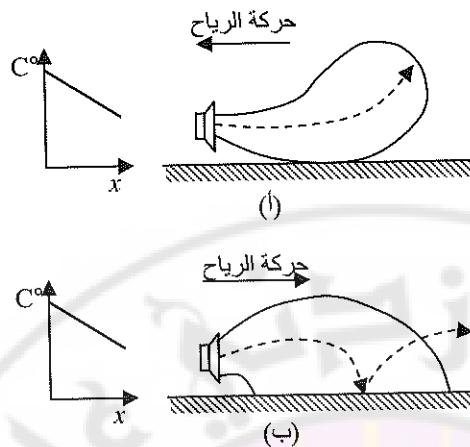
الجدول (6-2): ثابت  $F_c$  لأنواع توزيع المحاهير.

$F_C$ (توزيع بشكل سداسي)	$F_C$ (توزيع بشكل رباعي)	كثافة التغطية
$2/\sqrt{3}$	1	من المركز إلى المركز
$2/(3\sqrt{3})$	$1/2$	تدخل بسيط
$1/(2\sqrt{3})$	$1/4$	من الحيط إلى الحيط

## ٦-٥ بعض خصائص النظم الخارجية لتنقية الصوت **Outdoor System**

تحتلت دراسة تصميم النظم الخارجية عن دراسة النظم في المناطق المغلقة. ففي المناطق المكشوفة لا تؤثر ظاهرة الترداد على هذه النظم بسبب عدم وجود جدران تغلق المنطقة المكشوفة. إلا أن هذه النظم تواجه مشاكل مهمة منها المستوى العالي للضجيج، وخصوصاً عند تعطيل الملاعب الرياضية أو الحفلات الموسيقية المفتوحة. وتظهر مشاكل النظم الخارجية أكثر عند هبوب الرياح أو عند مرور طائرات أو عربات بالقرب من منطقة التغطية. وفي المناطق المكشوفة الأكثر هدوءاً يمكن أن يكون مستوى الضجيج عالياً ويمكن أن يزيد عن 75 dB. وتتطلب المستويات العالية للضجيج استطاعات عالية للنظام الصوتي، مما يؤدي إلى نشوء ظاهرة الصدى.

يؤخذ بالحسبان في النظم الخارجية اعتماد سرعة الصوت على درجة الحرارة بمقدار يصل إلى  $0.6 \text{ m/s}$  لكل درجة مئوية. وتأثير الرياح وتغيرات درجة الحرارة على منطقة التغطية، فعند انتشار الصوت فوق منطقة تعانى من طبقات مختلفة من الهواء ومتناوله في درجات الحرارة فإنها تعانى من تغير في اتجاهها. وإذا كان الهواء ساخناً بالقرب من سطح الأرض وبارداً في الطبقات العليا يحدث تشتت للصوت، وتضيع معظم الطاقة الصوتية القرية من سطح الأرض، كما هو مبين في الشكل (6-12-أ)، وتحدث هذه الحالة عندما تكون أشعة الشمس ساقطة بشدة على سطح أرض مستوي. ويحدث الحالة المعاكسة أي تتشتت الموجة الصوتية في المنطقة القرية جداً من الجاهير، مما يؤدي إلى انتشارها إلى مسافات كبيرة، كما هو مبين في الشكل (6-12-ب).



الشكل (6-12): تأثير تغير درجة الحرارة والرياح على إنتشار الموجات الصوتية

وبالإضافة لذلك تقوم الرياح بتأثير مشابه عند تحرّكها بالقرب من المنبع الصوتي، حيث تكون سرعة الرياح أقل عند مستوى الأرض و تؤدي إلى تشتت الموجة الصوتية إلى الأعلى إذا تحركت الرياح باتجاه معاكس لانتشار الموجة الصوتية، وبالعكس تؤدي إلى تشتتها بالقرب من سطح الأرض إذا تحركت باتجاه انتشار الموجة الصوتية.

## ٦-٦ اختيار تركيب المجهير في المناطق المفتوحة Outdoor Loudspeaker Placement

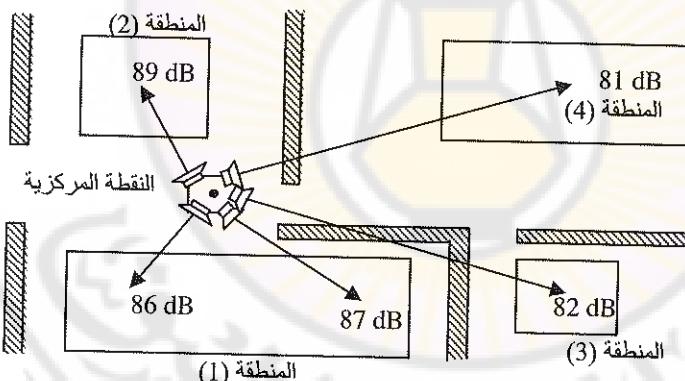
من أشهر المناطق الخارجية التي تحتاج إلى نظم تقوية هي:

- مناطق المعارض المفتوحة، المصانع،... الخ.
- مناطق الرياضية مثل ملاعب كرة القدم، المسابح،... الخ.
- مناطق الخدمات مثل الموانئ، محطات وسائل المواصلات،... الخ.

تتأثر هذه المناطق بطبيعة الوسط المنتشر وتغيرات درجات الحرارة، وتغيرات مستوى الضجيج، بالإضافة إلى التداخل مع نظم تقوية الصوت الأخرى. وللتغطية هذه المناطق يجب أن تكون التغطية اقتصادية أي غير مكلفة، وأن تتحقق هذه النظم مستويًا كافيًا

للصوت، بحيث يزيد  $10 \text{ dB}$  عن مستوى الضجيج ضمن مجال الترددات السمعية حتى  $10 \text{ kHz}$ . وبنفس الوقت ينبغي ألا يزيد مستوى الصوت عن حد معين، لكي لا يسبب إزعاجاً للمستمعين أو الأشخاص القريبين من منطقة التغطية.

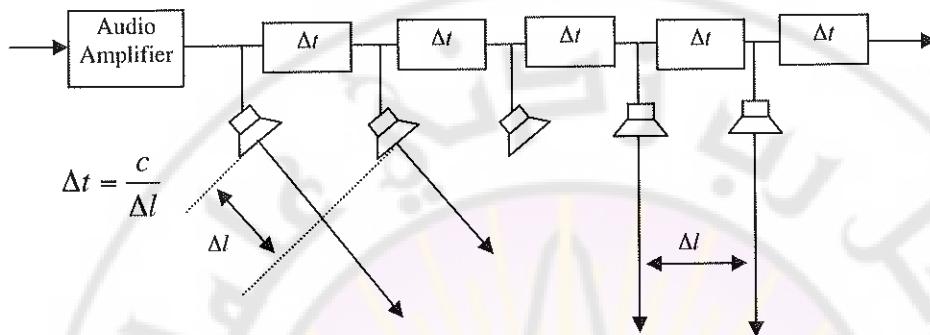
لتفادي وصول صوت من مصادرين مختلفين ولكي لا يكون الفارق الزمني بين هذين الصوتين أكثر من  $50 \text{ ms}$  (لكي لا ينبع الشعور بالصدى)، تستخدم الطريقة المركزية في كثير من حالات التغطية الخارجية. وتستخدم هذه الطريقة لتغطية المناطق الصغيرة نسبياً، حيث تثبت في مكان مرتفع نسبياً مجموعة من المحاهير ويوجه كل مجهاهار أو مجموعة المحاهير إلى منطقة محددة بمستوى الجهارة المرغوب تبعاً للكسب الصوتي المطلوب. ولتقليل تأثير هذه المحاهير على المستمعين الأقرب يختار مكان تركيب هذه المحاهير بحيث تكون متباعدة على ارتفاع كاف. يبين الشكل (6-13) مثلاً على الطريقة المركزية المستخدمة لتغطية مجموعة من مناطق متغيرة.



الشكل (6-13): الطريقة المركزية في تغطية المناطق المفتوحة.

تعد الطريقة المركزية غير محددة عادة لتغطية المناطق المكشوفة الواسعة على نحو كامل، ولذلك تستخدم في أكثر حالات المناطق المكشوفة الواسعة الطريقة الموزعة، وذلك بتوزيع محاهير أو مصفوفات من المحاهير على كامل المنطقة. ولتفادي نشوء ظاهرة الصدى يتم وصل المحاهير عن طريق مؤخرات زمنية بحيث يكون زمن التأخير

الرمي الإضافي  $\Delta t$  لكل مجهاً مساوياً للزمن اللازم للموجة الصوتية للوصول من مجهاً إلى آخر. وبين الشكل (6-14) طريقة استخدام المؤخرات الزمنية في تحقيق التغطية في المناطق المكشوفة الواسعة وذلك لتفادي حدوث الصدى.



الشكل (6-14): استخدام المؤخرات الزمنية للتخلص من ظاهرة الصدى عند تغطية المناطق الخارجية الواسعة.



# الفصل السابع

## النموذج الرقمي لتوليد الإشارة الكلامية

### The Digital Implementation of Speech Signal

تعد إشارة الكلام من أهم الإشارات الصوتية نظراً لأهميتها في التطبيقات العملية وبسبب خصائصها التي تميزها عن بقية الإشارات الصوتية، يستفاد من هذه الخصائص في عدد كبير من التطبيقات التي تتعامل مع الإشارات الكلامية والتي سوف تتحدث عنها بالتفصيل لاحقاً. وللتعرف على خصائص إشارة الكلام، لابد أولاً من التعرف على "جهاز توليد الكلام" عند الإنسان، ولابد أيضاً من دراسة خصائص تصميم نموذج يشابه بعمله "جهاز توليد الكلام".

#### ١-٧ مصادر الصوت الطبيعية Natural Sound Source

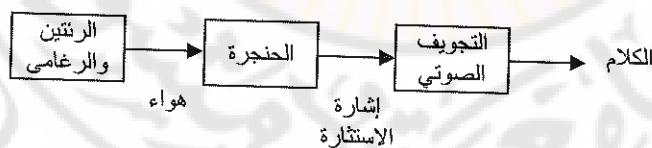
تصنف مصادر الصوت الطبيعية إلى: صوت الإنسان وصوت الآلات الموسيقية، (حيث لا تعدد الأصوات الصادرة عن مضخمات الصوت والأجهزة الالكترونية من مصادر الصوت الطبيعية). وتتألف إشارات الأصوات الطبيعية من مجموعة نغمات أو ترددات (تردد أساسى و مضاعفاتة في حالة الأصوات الدورية)، فمن أجل إشارة الكلام يكون التردد الأساسي محصوراً بين حوالي  $80\text{ Hz}$  و  $400\text{ Hz}$  وهو يحدد طبقة الصوت Pitch، بينما يمتد مدى المركبات الترددية لإشارة الكلام حتى  $3500\text{ Hz}$  ويمكن أن يصل إلى  $10\text{ kHz}$ . وتدعى ترددات تلك المركبات ترددات البيان Formant Frequencies.

تختلف خصائص الإشارة الناتجة عن الأجهزة الموسيقية باختلاف نوع الآلة، وتتميز آلة الأرغن مثلاً بمدى طيفي واسع، حيث يمتد مدى تردداتها الأساسية حوالي 16 Hz إلى 9 kHz. ويمتد مدى الترددات الأساسية للبيانو حوالي 3 أو كتاف فقط، بينما يمتد مدى الترددات العليا (التوافقيات) للآلات الموسيقية حتى 15 kHz أو أكثر. وتحتفي الإشارة الموسيقية عن إشارة الكلام في أن معظم المركبات التردية للإشارة الموسيقية مهمة لتشكيل الصوت الموسيقي الناتج، فلا يمكن الاستغناء عن أي منها ضمن المجال الطيفي للإشارة.

سوف نركز في هذا الفصل اهتمامنا فقط على إشارة الكلام لما لها صفات معقدة وخاصة. ولكن قبل البدء في شرح خصائص إشارة الكلام لابد من التعرف بشكل سريع على جهاز توليد الكلام.

## ٢-٧ جهاز توليد الكلام

يتالف جهاز توليد الكلام عند الإنسان من ثلاثة أقسام رئيسية: الرئتين والقصبة الهوائية، القسم الثاني الحنجرة و القسم الثالث الجهاز الصوتي أو التجويف الصوتي Vocal Tract. ويبين الشكل (1-7) المخطط الصندوقي لجهاز توليد الكلام عند الإنسان.



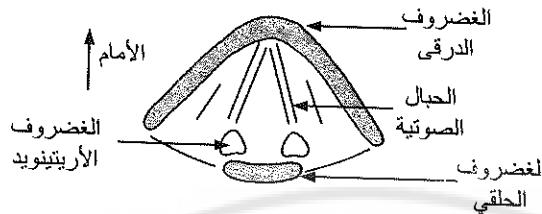
الشكل (1-7): جهاز توليد الكلام عند الإنسان.

تعد الرئة كمولد للطاقة في جهاز توليد الكلام حيث تقوم بضخ الهواء إلى القسم الثاني أو الحنجرة عن طريق القصبة الهوائية. ويتم التحكم عن طريق الرئة بارتفاع وانخفاض شدة الكلام، ولكنها في الغالب لا تدخل في تشكيل إشارة الكلام، إلا في حالات اللهاث.

تعد الحنجرة الجهاز الرئيسي في توليد الأصوات وهي عبارة عن تركيب معقد من العضلات والغضاريف والحبال الصوتية وتتألف بشكل أساسي من الأقسام التالية:

- الغضروف الحلقاني Cricoid Cartilage
- الغضروف الدرقي Thyroid Cartilage
- الغضروف الأرتينيويd Arytenoid Cartilage
- الحبال الصوتية.

يبين الشكل (2-7) رسمياً توضيحاً للمقطع العرضي للحنجرة. وتمتد الحبال الصوتية من أمام إلى خلف الحنجرة، بحيث تبقى مشدودة وتتصل من الأمام بالغضروف الدرقي ومن الخلف بالغضروف الأرتينيويd، والموصول بدوره بالجزء الأعلى للغضروف الحلقاني. وتصل هذه الغضاريف بالغضروف الحلقاني مجموعة عضلات مهمتها تحريك الجزء الخلفي للحبال الصوتية بحيث تقترب أو تبتعد عن بعضها البعض. وعندما يكون الجزآن المذكوران للحبال الصوتية متبعدين عن بعضهما البعض يكون الإنسان في حالة التنفس الطبيعية. وعندما يكون جزاً الحبال مقتربان بعضهما من بعض يغلقان مجرى التنفس جزئياً لتهتز فيها الحبال الصوتية بحيث تصدر أنواعاً مختلفة من الإشارات. وتدعى هذه الإشارات معاً بإشارة الاستثارة Excitation Signal وتعدّ المصدر الأولي لإشارة الكلام.



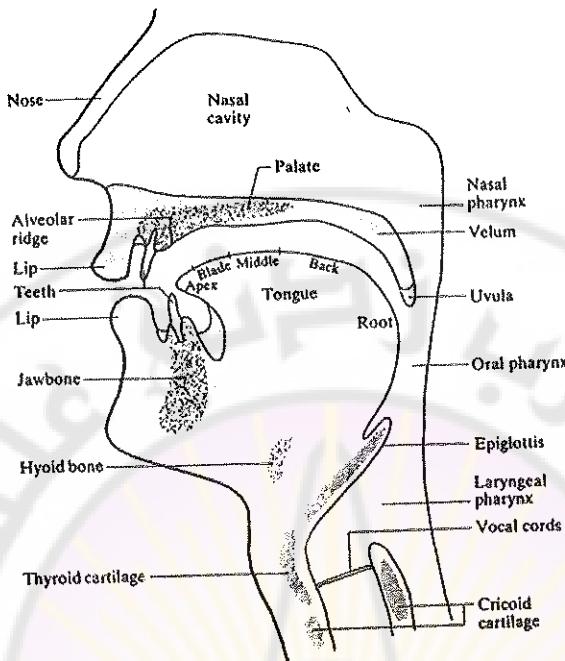
الشكل (7-2): رسم توضيحي للمقطع العرضي للحنجرة عند الإنسان.

يسمى القسم الثالث الجهاز الصوتي أو التجويف الصوتي وهو يمتد من الحنجرة إلى فتحة الفم بالإضافة إلى التجويف الأنفي، وبين الشكل (3-7) رسمًا توضيحيًا للمقطع العرضي للجهاز الصوتي. ويتألف هذا القسم من العناصر التالية:

- .**Laryngeal pharynx**
  - تجويف البلعوم الحلقي
  - **Oral pharynx**
  - تجويف البلعوم الفموي
  - **Nasal pharynx**
  - تجويف البلعوم الأنفي
  - التجويف الفموي
  - **Nasal Cavity**
  - التجويف الأنفي

بالإضافة لذلك يحتوي هذا القسم على مجموعة من العناصر التالية:

- .**Epiglottis**
  - لسان المزمار
- .**Lower jaw**
  - الفك السفلي
- .**Plate**
  - الفك العلوي
- .**Tongue**
  - اللسان
- .**Teeth**
  - الأسنان
- .**Velum**
  - اللهبة
- .**Lips**
  - الشفتين

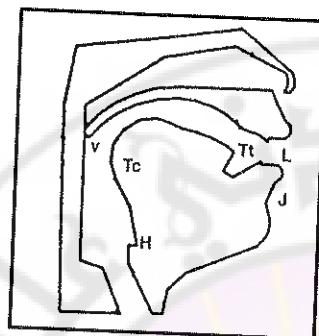


الشكل (3-7): رسم توضيحي للمقطع العرضي للجهاز الصوتي عند الإنسان.

تُنْوِل مَهْمَةً ذَلِكَ الْقَسْمِ إِلَى تَشْكِيلِ الْلَّفْظِ وَإِعْطَاءِ الْأَصْوَاتِ النَّابِثَةِ عَنِ الْخَنْجَرَةِ شَكْلَ الْكَلَامِ الْمُفْهُومِ، حِيثُ أَنْ مَعْظَمَ أَجْزَاءِ هَذَا الْقَسْمِ تَسَاهِمُ فِي تَولِيدِ الْأَحْرَفِ. وَتَسَاهِمُ الشَّفَاهُ وَالْأَسْنَانُ وَاللِّسَانُ وَالْفَكُ السُّفْلَى بِالْجُزْءِ الأَكْبَرِ مِنْ عَمَلِيَّةِ تَشْكِيلِ الإِشَارَةِ، يَنْسَمِمُ يَسَاهِمُ اللِّسَانُ بِتَغْيِيرِ حَجْمِ وَشَكْلِ التَّحْوِيفِ الصَّوْتِيِّ كَمَا أَنْ تَغْيِيرُ مَكَانِ الْلَّهَاظَةِ يُسَمِّحُ بِفَتْحِ وَإِغْلَاقِ التَّحْوِيفِ الصَّوْتِيِّ لِتَشْكِيلِ مَجْمُوعَةٍ مِنْ الْحَرَوْفِ.

يَبْيَنُ الشَّكْلُ (4-7) التَّمَثِيلُ التَّقْرِيبِيُّ لِلْجَهازِ الصَّوْتِيِّ، حِيثُ يُسْتَخدَمُ هَذَا الشَّكْلُ فِي دراسة انتشار الموجة الصوتية داخل هذا التحوييف، عَنْدَهَا يَعْدُ الْفَكُ الْعُلُوِّ ثَابِتًاً، وَيُؤْخَذُ بَعْنَ الاعتبار تَغْيِيرُ حَرْكَةِ اللِّسَانِ وَمَوْقِعِ الْفَكِ السُّفْلَى، بِالإِضَافَةِ إِلَى تَغْيِيرِ

حركة اللهاة. وعندما تكون اللهاة مفتوحة فإن التجويف الأنفي يضاف إلى التجويف الفموي.



- H موقع لسان المزمار
- J زاوية فتح الفك السفلي
- L ميلان وارتقاع الشفاه
- Tc موقع اللسان
- V موقع اللهاة

الشكل (4-7): تمثيل الجهاز الصوتي.

### ٧- ٣- خصائص انتشار الموجة الصوتية في جهاز توليد الكلام

إن دراسة خصائص انتشار الموجة الصوتية في داخل الجهاز الصوتي صعبة جداً حتى باستخدام التمثيل التقريري المبين في الشكل (4-7)، ولنتمكن من ذلك سوف نفترض ما يلي:

- سوف نفترض أن التجويف الصوتي عبارة عن أنبوب متغير سطح المقطع طوله حوالي 17 cm يبدأ بالبنبع الصوتي الذي هو عبارة عن الحنجرة، وينتهي بفتحة الفم. ويحصل بالأنبوب على بعد 8.5 cm أنبوب آخر طوله 13 cm يمثل التجويف الأنفي.
- سوف نفترض أن الموجة الصوتية المتتشرة في الجهاز موجة مستوية.

- سوف نفترض أن انتشار الموجة في هذا التجويف خطى، أي أن النسبة بين سرعة دقائق الوسط إلى سرعة الصوت صغيرة، وتساوي هذه النسبة داخل التجويف إلى 0.02.

يمكن عندها تمثيل انتشار الموجة الصوتية في التجويف الصوتي داخل الأنابيب كما هو مبين في الشكل (7-5)، وتنشر الموجة على طول الحور  $x$  ابتداء من الحنجرة عند  $x=0$  وانتهاء بالشفتين عند  $x=L$ . سوف نعتبر أيضاً أن سطح مقطع هذا الأنابيب يتغير تبعاً لمسافة  $x$  فقط، وافتراضنا هنا أن تغير سطح المقطع ثابت تقريباً بالمقارنة مع سرعة انتشار الموجة الصوتية.

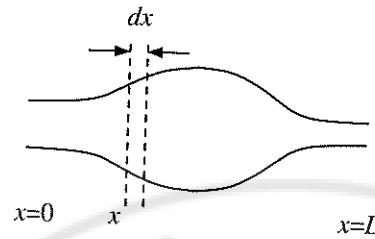
سوف نطبق الدراسة على طبقة هوائية رقيقة جداً  $dx$  على بعد  $x$  من المنبع الصوتي. وباستخدام قانون نيوتن الثاني يمكن وبنفس الطريقة المبينة في الفصل الأول استنتاج المعادلة التالية [وهي تقابل المعادلة (1-24)]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho}{A} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7-1)$$

حيث يمثل  $p$  الضغط الصوتي و  $u$  السرعة الاهتزازية لدقائق الوسط و يمثل التابع  $A(x)$  التابع لسطح مقطع التجويف الصوتي و يمكن أن نستنتج أيضاً المعادلة التالية لانتشار الموجة الصوتية في التجويف الصوتي:

$$\frac{\partial}{\partial x} A \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{A}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (7-2)$$

وتشبه هذه المعادلة معادلة انتشار الموجة الصوتية في الهواء في أنابيب غير محدود الطول وتسمى معادلة ويستر للبوق Webster's horn equation، حيث أخذ بالاعتبار المشتق من الدرجة الأولى للضغط الصوتي  $p$ ، وذلك باعتبار أن الحدود ذات المشتقات الأعلى يمكن إهمالها عند انتشار الموجة الصوتية في التجويف الصوتي.



الشكل (7-5): تمثيل التجويف الصوتي كأنبوب بسطح مقطع متغير.

باعتبار أن معادلة انتشار الموجة الصوتية في التجويف الصوتي هي عبارة عن معادلة خطية من الدرجة الثانية، فإن الحل العام لهذه المعادلة يمثل ترکيباً خطياً لحلين مستقلين  $\phi(x,t)$  و  $\varphi(x,t)$ ، على النحو:

$$p(x) = a\phi(x,t) + b\varphi(x,t) \quad (7-3)$$

يكون  $a$  و  $b$  في الحال العامة تابعين للزمن  $t$ . و نستنتج أن الضغط الصوتي عند مدخل الأنابيب الصوتي أي عند  $x=0$  و عند مخرج الأنابيب الصوتي أي عند  $x=L$  عبارة عن تابع خططي لكل من قيم  $a$  و  $b$ . وبنفس الطريقة يمكن استنتاج علاقة مماثلة للسرعة الاهتزازية لدقائق الوسط، و باجراء عدد من العمليات الحسابية يمكن أن نستنتاج أن العلاقة بين دخل الأنابيب و خرج الأنابيب لكل من الضغط والسرعة يعطى وفق ما يلي:

$$\begin{bmatrix} P_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{out} \\ V_{out} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} P_{out} \\ V_{out} \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

تدعى المصفوف  $K$  مصفوفة شين Chain Matrix. وتعتمد قيمها على قيم كل من الحللين المستقلين  $\phi(x,t)$  و  $\varphi(x,t)$  عند  $x=0$  و  $x=L$  من أجل القيم الممكنة للتابع  $(A(x))$ ، حيث يصعب حسابها للتجويف الصوتي.

من أجل أنبوب ثابت سطح المقطع يمكن استنتاج أن قيم المصفوفة تعطى بالعلاقة التالية:

$$K = \begin{bmatrix} \cosh(\sigma L) & \beta_c \sinh(\sigma L) \\ \beta_c \sinh(\sigma L) & \cosh(\sigma L) \end{bmatrix} \quad (7-5)$$

حيث إن  $\beta_c$  و  $\sigma$  ثابتان تابعان لتأثير الاحتكاك بالجدار، واهتزاز الجدار بالإضافة إلى تأثير درجة الحرارة. من أجل دراسة الجهاز الصوتي يمكن أن نفترض بالتقريب أن الأنابيب الصوتي المبين في الشكل (7-5) مُؤلف من  $N$  أنابيب اسطواني بطول  $A=L/N$ . وتحسب مصفوفة التحويل الكلية النهائية بالعلاقة:

$$K = K_1 K_2 K_3 \cdots K_N \quad (7-6)$$

يمكن بهذه الطريقة حساب أي سرعة اهتزازية وضغط صوتي بالتقريب بتقسيم هذا الأنابيب إلى مجموعة من أنابيب اسطوانية وحساب مصفوفة شين Chain لكل جزء. وبنفس الطريقة يمكن إضافة تأثير التحوييف الأنفي على التحوييف الفموي حيث يتم ذلك بإضافة مصفوفة أخرى على التفرع مع التحوييف الفموي.

بالقيام بعدد من عمليات حسابية معقدة يمكن أن تؤدي مصفوفة شين إلى مجموعة من المعاملات تسمى معاملات التبؤ الخططي Linear Prediction Coefficients (LPC) التي سوف نبيّنها لاحقاً في الفصل القادم. وجدّير بالذكر هنا أن دراسة انتشار الموجة الصوتية داخل أنابيب اسطواني الشكل يمكن أن تتم بطريقة أخرى باستخدام المماثلة بين المجموعات الميكانيكية والكهربائية كما سنرى لاحقاً.

## ٤-٧ إشارة الاستشارة Excitation Signal

تم عملية توليد إشارة الكلام على مرحلتين: في المرحلة الأولى يتم بتواليد إشارة الاستشارة Excitation Signal وذلك في قسم الحنجرة بالإضافة إلى المنطقية الأعلى من الحنجرة Glottis. ويتم في المرحلة إجراء الثانية تعديل Modulation للإشارة المستشارية المولدة في المرحلة الأولى وذلك في القسم الثالث من الجهاز. وتصنف إشارة الكلام إلى:

- إشارة الأحرف المجهورة Voiced: و هذه الإشارة هي الإشارة الأهم وتنتج من طريق اهتزاز الحبال المجهورة دوريًا. ويجري توليد هذه الإشارة عن طريق إغلاق الحبال الصوتية واقتراها بعضها من بعض مما يؤدي إلى اهتزازها تحت تأثير الهواء القادم من الرئتين. وتبتعد هذه الحال بعضها من بعض بحيث تسمح للهواء بالمرور وذلك دوريًا، مما يؤدي إلى نشوء إشارة صوتية حلال أوقات الإغلاق و من ثم تتبعها أوقات صمتٍ خلال مدد الابتعاد. وتم هذه العملية بشكل متكرر. ويمثل دور تكرار الانفتاح والإغلاق دور طبقة الكلام Pitch وهو نفسه الدور الأساسي للإشارة الكلامية Pitch period و يتراوح تردد طبقة الكلام من 80 مرة بالثانية عند الرجال ويصل إلى 400 مرة بالثانية عند النساء والأطفال.
- إشارة الهمس Whispering: تتولد هذه الإشارة من اقتراب الحال الصوتية وابتعاد بعضها من بعض بطريقة مشابه لطريقة توليد إشارة الأحرف الصوتية ولكن لا يحدث الإغلاق تماماً، ومن ثم فإن هذه الفتحة الصغيرة تسمح بمرور كمية من الهواء مما يعطي صحيحاً يضاف لإشارة الاستشارة الناتجة.

وتشمل بقية إشارات الاستشارة المولدة الإشارة الاحتاكية، وإشارة الضغط، والإشارة الاهتزازية، وتولد في المنطقة التي تلي الحجرة وهي فتحة المزمار ويمكن تقسيم الأصوات في اللغة تبعاً لإشارة الاستشارة المولدة لها وتقسم الأحرف عموماً إلى أحرف "مجهورة" Voiced وأحرف غير مجهورة Unvoiced.

## ٦-٥ تمثيل إشارة الكلام Speech Display

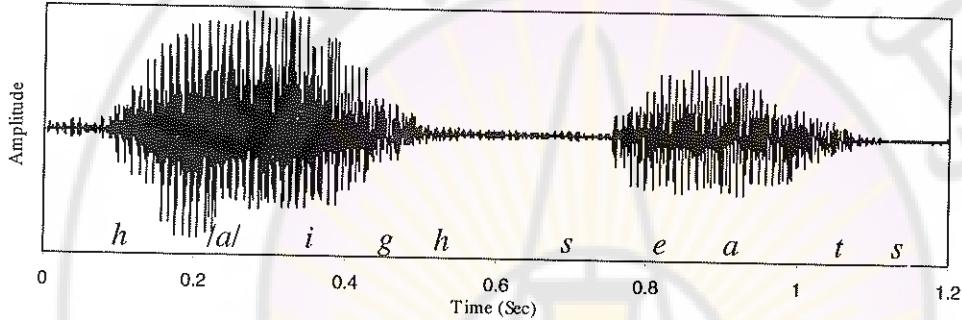
تستخدم ثلاث طرق أساسية لتمثيل إشارة الكلام. الطريقة الأولى هي طريقة التمثيل الزمني بالشكل الموجي للضغط Pressure waveform، والطريقة الثانية هي طريقة التمثيل التردي بواسطة طيف الاستطاعة Power Spectrum، أما الطريقة الثالثة فهي تجمع بين أسلوبي الطريقتين المذكورتين معاً من خلال ما يسمى بالمخيط الطيفي أو السبيكتروغرام Spectrogram.

## ٦-٦ الشكل الموجي للضغط Pressure waveform

إن أسهل وأفضل طريقة لتمثيل الإشارة الكلامية هي تمثيل الضغط الصوتي تابعاً للزمن. يبين الشكل (6-7) مدة 1.2sec من إشارة كلام للكلمي "High Seats" معنانة بتردد أعلى 8000Hz، حيث نلاحظ من الشكل أن طبيعة الإشارة تتغير مع الزمن حيث يختلف شكل الموجة كثيراً في حال كون إشارة الأحرف المجهورة voiced كما هو مبين للحرف /i/ أو غير مجهورة unvoiced كما هو مبين للحرف /s/. ويمكن أن نسجل النتائج التالية:

- الإشارة التي تمثل الحرف المجهور /i/ مثلاً تتغير على نحو بطيء أو بتردد منخفض بالمقارنة بالإشارة التي تمثل الحرف غير المجهور /s/ مثلاً حيث تتميز بالتردد العالي.

- الإشارة التي تمثل الحرف المجهور /i/ مثلاً تتميز بأنها إشارة دورية أو شبه دورية Quazi-periodic لها دور محدد يساوي إلى دور طبقة الصوت pitch period، بينما الإشارة التي تمثل الحرف غير المجهور /s/ مثلاً إشارة غير دورية أو شبه عشوائية.
- مطال الإشارة التي تمثل الحرف المجهور أكبر بكثير من مطال الإشارة التي تمثل الحرف غير المجهور.

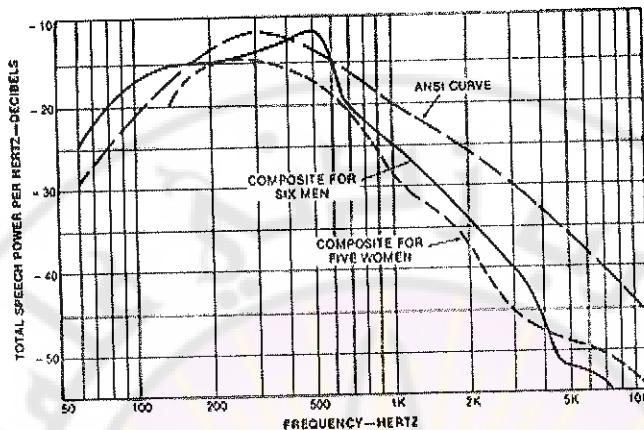


الشكل (6-7): عينات من إشارة كلام مرسومة كتابع مطال الزمن عند أخذ معدل أخذ عينات مساوي إلى 8kHz.

## ٢-٥-٧ طيف الاستطاعة Power Spectrum

الطريقة الثانية المستخدمة لتمثيل الإشارة الكلامية هي التمثيل الترددية (أي في حالة الإشارات الدورية تمثل مطال التوافقيات كتابع للتردد). وهو يفيد تبيان أوضاع للمركبات الترددية الأكثر شدة أي الأكثر أهمية في التمثيل الترددية للإشارة الكلامية. يبين الشكل (7-7) الطيف الترددية لإشارة كلام تم الحصول عليه باستخدام ستة من المتحدثين الرجال وخمسة من النساء، وعدد كبير من الكلمات لرسم غلاف الطيف الترددية للحصول على التصور الواضح لهذا الطيف حيث إن الإشارة الكلامية يمكن

أن تحتوي في كثير من الأحيان على إشارات غير كلامية تشمل مثلاً أوقات صمت أو صحيح.



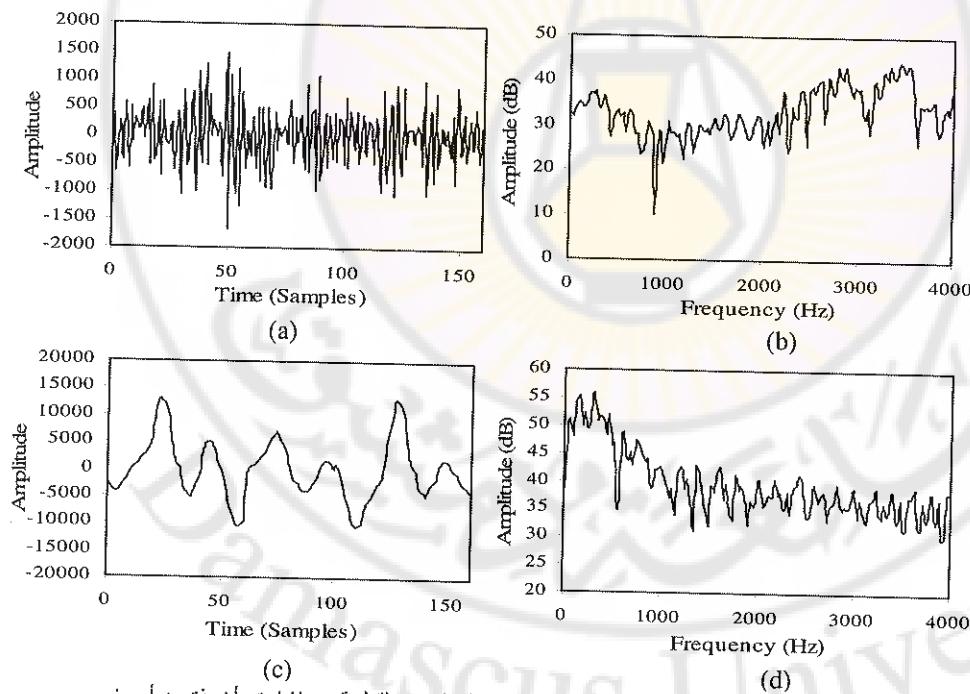
الشكل (7-7): الطيف التردد للإشارة كلام مرسومة لستة متحدثين من الرجال والنساء مقارنة بالمنحنى القياسي للمنظمة القياسية لشمال أمريكا ANSI.

نلاحظ من الشكل أن الطيف التردد للكلام مشابه للاستجابة التردية لمرشح قرير منخفض LPF عند الترددات التي تزيد عن 500 Hz. ونلاحظ أيضاً أن الطيف التردد للإشارة في المدى المخصوص بين 200 Hz إلى 4000 Hz يتضمن معظم طاقة الإشارة (بنسبة تصل إلى 91.5%)، ويتضمن الطيف في مدى الترددات التي تزيد على 3000 Hz فقط 11% من طاقة الإشارة ويعكس عدم الحاجة في الاتصالات الهاتفية بالخروج خارج المجال المخصوص بين 200 Hz إلى 4000 Hz. ونلاحظ أيضاً الاختلاف بين غلاف الطيف التردد بين الرجل والمرأة.

وللتعقب أكثر في خصائص الطيف التردد للإشارة الكلام، فإننا يجب التفرير بين نوع الإشارة المطروقة من حيث الحروف المجهورة وغير المجهورة. ونقارن في الشكل (8-7) التمثيل الرزمي والطيف التردد للكل كل من الحرفين /s/ و /a/ للإشارة الكلامية المبينة في الشكل (6-7) حيث يتضح الاختلاف في الاستجابة

الترددية بين الحرف المجهور وغير المجهور، ففي حالة الحرف المجهور نلاحظ أن الطيف الترددية مشابه لشكل الاستجابة التردودية لمرشح التمرين المنخفض  $LPF$  أي أن طاقة الإشارة معظمها تتوارد في منطقة الترددات المنخفضة، بينما في حالة الإشارة المعبأة عن الحروف غير المجهورة نلاحظ أن الطيف الترددية مشابه لشكل الاستجابة التردودية لمرشح التمرين المرتفع  $HPF$  أي أن معظم طاقة الإشارة تتوارد في منطقة الترددات العالية.

نلاحظ أيضاً من الطيف الترددية للأحرف المجهورة أنّ يحتوي قمماً عالياً عند ترددات معينة، لها أهمية كبيرة في وصف سلوك الجهاز الصوتي. وتدعى هذه الترددات بترددات البواني **Formant frequencies** وتعكس شكل التجويف الصوتي وخصائصه.

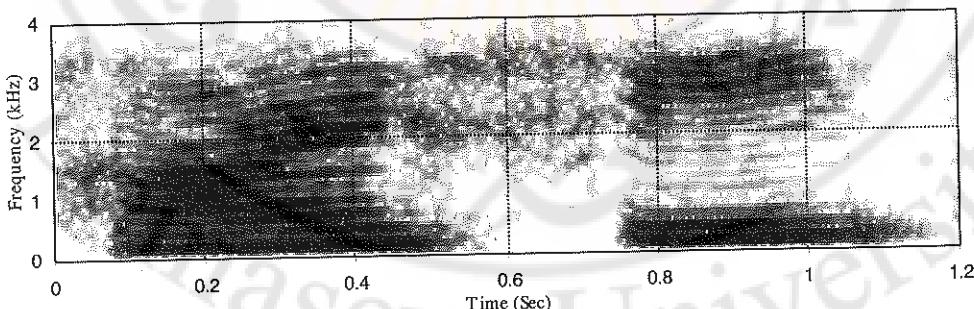


الشكل (8-7): مقارنة بين الطيف الترددية والتمثيل الزمني لقطعة من إشارة مأخوذة من حرف مجهورة في (c) و (d) ومن إشارة مأخوذة من أحرف غير مجهورة (a) و (b).

وباعتبار أن الأحرف المجهورة تعطي مفهومية للكلام Intelligibility (أي أن الكلام لن يفهم في حال غياب أو عدم سماع هذه الأحرف) وأن الأحرف غير المجهورة تعطي الكلام وضوحاً Clearance. ويمكن أن نستنتج أن الترددات المنخفضة للإشارة الكلامية مهمة جداً في الحافظة على مفهومية هذه الإشارة، بينما تكمن أهمية الترددات العليا للإشارة الكلامية في الحافظة على وضوح هذه الإشارة.

### ٣-٥-٧ التمثيل المختلط السبيكتروغرام Spectrogram

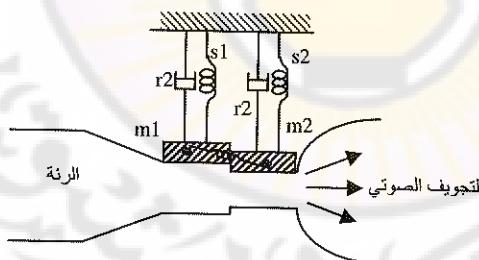
يستخدم لتمثيل الإشارة الكلامية في الطريقة الثالثة المخطط الطيفي أو السبيكتروغرام وهو يعبر عن العلاقة بين الزمن والتردد معاً. وبين الشكل (9-7) السبيكتروغرام للإشارة الكلامية المبينة في الشكل (6-7) السابق، حيث يمثل المحور الأفقي الزمن بينما يمثل المحور الشاقولي التردد. ونلاحظ من الشكل بقعاً سوداء يعبر عن كثافة الإشارة عند زمن معين وتردد معين. ونقصد بكثافة الإشارة هنا معدل طاقة الإشارة المحسوبة خلال مدة زمنية صغيرة ضمن مجال تردد ضيق. وتدل المناطق الأكثر سواداً المتواجدة بكثرة في الجزء المعبر عن الأحرف المجهورة (قارن بين الشكل (6-7) وبين الشكل (9-7)) على ترددات البواني Formants. ونلاحظ أيضاً كيف تكون طاقة الإشارة موزعة بكثافة منخفضة للأحرف غير المجهورة.



الشكل (9-7): قطعة من إشارة كلام كتابع الزمن تردد (سبيكتروغرام) لفترة 1.2 sec من إشارة كلام معتمد يساوي إلى 8kHz.

## ٦-٧ نموذج توليد الكلام Speech Production Model

يقصد بنموذج توليد الكلام الجهاز المستخدم لتوليد إشارات مشابه لإشارات الكلام، ويتمثل بتصميمه جهاز الكلام الطبيعي للإنسان. ويتبين أن عملية المماثلة للحركة الميكانيكية للتجويف الصوتي بالإضافة إلى المماثلة الميكانيكية لتدفق الهواء لا يمكن أن تتم إلا باستخدام درجات متعددة من الافتراضات تتيح الحصول على نتائج قريبة أو بعيدة عن الواقع. فمثلاً يمكن تمثيل النموذج الصوتي بجهاز عبارة عن "صندوق أسود Black-box" يشابه بعمله تدفق الهواء من الحنجرة، أو يمكن تمثيله باستخدام نظام أكثر تعقيداً كالملفين في الشكل (7-10). يبين هذا الشكل المثلث الميكانيكي للحنجرة، ويظهر من الشكل أن الدخل هو عبارة عن ضغط الهواء القادم من الرئتين، بينما الخرج هو عبارة عن الهواء المعدل، وهو يدخل لاحقاً إلى التجويف الفموي والأنفي. ونلاحظ أنه تم تمثيل الحنجرة بكتلتين  $m_1$  و  $m_2$  مربوطتين بمحمولة  $s_1$  و  $s_2$  يمكن التحكم بحركتها وقيمتها للحصول على الاهتزازات الميكانيكية المطلوبة لمحاكاة حركة الحنجرة عند الإنسان.



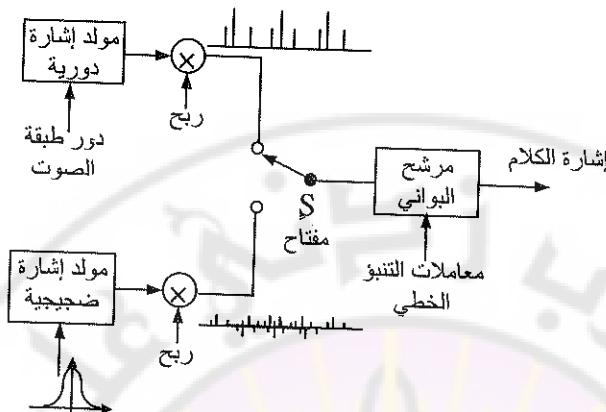
الشكل (7-10): جهاز المحاكاة الميكانيكي للحنجرة.

يتبع هذا القسم أيضاً قسم آخر يمثل حركة التجويف الأنفي والفموي. وهذه المماثلة الميكانيكية تتطلب عملاً شاقاً ومتيناً للحصول على أحد الأحرف المنطقية بالإضافة إلى أن النتائج غير مرضية على الإطلاق.

يتبين أن الحل البديل والأمثل هو تصميم نظام رقمي أو نموذج تمثيل رقمي لمماثلة جهاز توليد الكلام عند الإنسان. ويتألف النظام من جزئين: الجزء الأول يصف أو يماثل توليد إشارة الاستشارة في الحنجرة، والجزء الثاني يماثل شكل التح giof الصوتي بشقية الأنفي والفموي ويصفه.

لقد بينا سابقاً أن إشارة الاستشارة Excitation Signal المولدة في الحنجرة تتكون عموماً من نوعين من الإشارات: الإشارة الأولى عبارة عن إشارة يتم لها تشكيل الحروف المجهورة، وهي عبارة عن إشارة شبه دورية Quasi-periodic، دورها يساوي إلى دور طبقة الصوت Pitch period وتميّز بأن لها مطلاً كبيراً مقارنة بالإشارة الثانية. والنوع الثاني عبارة عن إشارة عشوائية أو شبه عشوائية يتم بواسطتها تشكيل الأحرف غير المجهورة. وللمماثلة هذا الجزء فإننا نحتاج إلى مولد إشارة كما في الشكل (11-7) ويمثل هذا الشكل المخطط الصندوقى لجهاز توليد الكلام ويكون المولد الأول عبارة عن مولد قطار نبضات دورية، يمكن التحكم بدورها ويساوي دور طبقة الصوت. والمولد الثاني عبارة عن مولد إشارة ضجيجية ذات قيم مخصوصة بين  $+1$  وبين  $-1$  - ذات تابع توزيع توزيع كثافة احتمالي Probability distribution function وفق التوزيع الغوصي Gaussian distribution، كالمبين في الشكل (12-7).

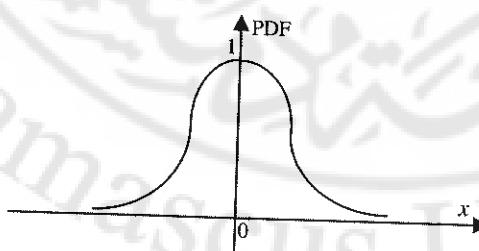
يفترض أن مرشح البواني Formant Filter في الشكل (12-7) يقوم بمماثلة التح giof الصوتي أي التح giof الفموي والأنفي، ويشابه هذا المرشح بعمله الأنابيب الصوتي ولكنه يتغير بشكل لحظي من أجل مماثلة حركة الفم واللسان ... الخ.



الشكل (7-11): المخطط الصندوقي النموذج الرقمي لتوليد الإشارة الكلامية.

يتم حساب معاملات هذا المترافق بطرقتين، وتعتمد الطريقة الأولى على استخدام معادلات انتشار الموجة الصوتية في التجويف باعتبار أن التجويف الصوتي يمكن دراسته باعتباره سلسلة من عشرين أنبوب اسطواني، حيث تتحسب مصفوفة شين لكل أنبوب اسطواني باستخدام العلاقة (7-5) و من ثم تتحسب المصفوفة الكاملة للتجويف الصوتي من العلاقة (7-6)، ثم يتحسبتابع التحويل للمرتفع  $(h(n))$ ، بحيث يتم الحساب كل 20 ms. أي أنه من الصعب تحقيق هذا المترافق باستخدام معادلات الحركة

الموجية



الشكل (7-12):تابع التوزيع الاحتمالي للإشارة العشوائية.

ولذا نلحداً إلى طريقة ثانية تعتمد على طرق المعالجة الرقمية ومن أهمها طرق التبؤ الخططي Linear Prediction Methods. وسوف نستعرض لاحقاً طرق حساب هذه المعاملات بالتفصيل.



## الفصل الثامن

### رموز الكلام

### Speech Coders

تستخدم رموز الكلام الرقمية في كثير من التجهيزات التي تحتاجها في حياتنا اليومية حيث تستخدم في بعض النظم الهاتفية، أجهزة التسجيل الهاتفية، الهواتف الخلوية...الخ. ويسمح رمز الكلام مثلاً بتخزين إشارة الكلام الرقمي بعد ضغطها ومن ثم الاستماع إليها لاحقاً (كمثال على ذلك أجهزة الرد الآلي). وتنمية عملية التخزين الرقمي بكوكها أرخص (بالمقارنة بالتخزين التماثلي) ويسهل التحكم بها، كما يمكن استخدام رموز الكلام للضغط الرقمي لإشارة الكلام من أجل إنقاص عرض الحال المطلوب للإرسال. ويضاف إلى ذلك أن الإشارة الرقمية تكون أقل تأثيراً بأخطاء الإرسال من الإشارة التماثلية. ويمكن أن يستخدم الكلام الرقمي المضغوط ضمن عملية تشفير في أثناء نقل الكلام وذلك للمحافظة على سرية المكالمات الهاتفية. ويعتبر رمز الكلام ذا أهمية خاصة في نظام الهاتف المحمول حيث توفر عملية ضغط الكلام إمكانيات أكبر تتيح لعدد أوسع من المشتركين في الإرسال والاستقبال باستخدام قناة إرسال مشتركة.

يعرف رمز الكلام بأنه الوسيلة المستخدمة لإنقاص أو لخفض كمية المعلومات الضرورية للتعبير عن إشارة الكلام من أجل إنقاص عرض الحال المطلوب في عمليات الإرسال أو لخفض حجم الذاكرة المستخدمة في عمليات تخزين الإشارة المجهورة، وذلك السماح بخفض مقبول لجودة الكلام الناتج.

في هذا الفصل سوف نستعرض بعض أنواع مرمّزات الكلام وتطبيقاتها والإشارة إلى المرمّزات القياسية العالمية المستخدمة.

## ١-٨ التنبؤ الخطي Linear Prediction

قبل البدء بالحديث عن مرمّز الكلام لابد من التعرف على التنبؤ الخطي ومعاملات التنبؤ الخطي التي أشرنا إليها سابقاً في الفصل السابق، لما لهذه المعاملات وفكرة التنبؤ الخطي من استخدامات كثيرة في مرمّزات الكلام وفي مرمّزات الإشارة السمعية كما سنرى لاحقاً.

تتميز إشارة الكلام بخاصية مهمة جداً وهي الترابط العالى بين عيناتها. ويظهر هذا الترابط جلياً في حالة الإشارة الكلامية التي تمثل الأحرف المجمورة (حيث يظهر الترابط كبيراً في الإشارات الدورية أو شبه الدورية). ويعبر عن الترابط باستخدام تابع الترابط الذاتي وفق العلاقة:

$$r_i = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n)s(n-i) \quad i = 1, \dots, p \quad (8-1)$$

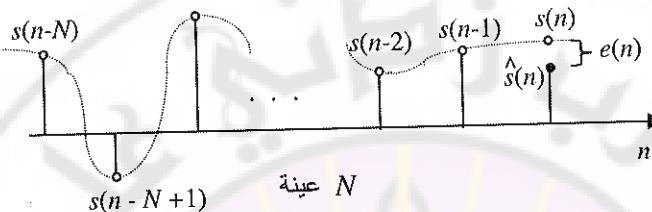
حيث إن  $s(n)$  تمثل عينات إشارة الكلام و  $p$  درجة الترابط. ويمكن حساب هذا الترابط من المرتبة الأولى  $i=1$  أو المرتبة الثانية أو الثالثة.....الخ. وباعتبار أننا نتعامل مع الإشارة خلال مدة محددة، ولذا يفيد كتابة (8-1) على النحو:

$$r_i = \sum_{n=0}^{N} s(n)s(n-i) \quad i = 1, \dots, p \quad (8-2)$$

حيث  $N$  عدد عينات الإشارة في إطار زمني محدد.

التنبؤ الخطي هو الطريقة المستخدمة للتنبؤ (أو للتنبؤ به) مجموعة من عينات إشارة كلام باستخدام عينات سابقة ولاحقة من نفس الإشارة، عن طريق استخدام

عدد من معادلات خطية تربط بين عينات من إشارة الكلام (الدخل) و عينات من الإشارة المتباينة (الخرج). وبين الشكل (1-8) فكرة التنبؤ الخطى للعينة  $\hat{s}(n)$  باستخدام العينات  $s(n-P)$  و  $s(n-1)$  و ... . $s(n-P)$



الشكل (1-8): التنبؤ الخطى للعينة  $(n)\hat{s}$  باستخدام عدد  $p$  عينة سابقة.

يمكن التعبير عن التنبؤ رياضياً بالعلاقة التالية:

$$\hat{s}(n) = \sum_{i=1}^p a_i s(n-i) \quad (8-3)$$

حيث إن  $a_i$  معاملات التنبؤ الخطى. ويسمى الفرق بين عينة إشارة الدخل (إشارة الكلام)  $s(n)$  و عينة الإشارة المتباينة  $\hat{s}(n)$  (انظر الشكل (1-8)) بخطأ التنبؤ ويساوي:

$$e(n) = s(n) - \hat{s}(n) \quad (8-4)$$

يتبع يضم العلاقة (8-3) في العلاقة (8-4) بحد:

$$e(n) = s(n) - \sum_{i=1}^p a_i s(n-i) \quad (8-5)$$

يتم حساب معاملات التبؤ الخطى  $a_i$  بحيث نحصل على أقل قيمة لتوسيط مربع الخطأ أو الخطأ التربيعي الوسطى (Mean Square Error)  $e(n)$  وفق العلاقة التالية:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^2(n) = \sum_{i=0}^p a_i \sum_n s(n-i)s(n) \quad (7-6)$$

يتم ذلك باشتقاء المعادلة (6-8) بالنسبة للمعاملات  $a_i$  وجعل الناتج مساوياً للصفر وذلك خلال إطار زمني محدد من إشارة الكلام. وتستخدم لإجراء الحساب المطلوب طريقتان:

- الطريقة الأولى: وهي الطريقة المعتمدة على حساب المجموع  $\sum$  في المعادلة (8-6) خلال كامل المجال الزمني، أي يمكن كتابة الحل على النحو التالي:

$$\sum_{i=0}^p a_i r_{i-j} = 0 \quad j = 0, 1, 2, \dots, p \quad \text{where } a_0 = 1 \quad (8-7)$$

يسمى  $r_i$  تابع الترابط Correlation Function ويحسب خلال نافذة Window تستوعب عدداً محدوداً  $N$  من عينات إشارة الدخل ويعطي بالعلاقة:

$$r_i = \sum_{n=0}^N s(n)s(n-i) \quad i = 1, \dots, p \quad (8-8)$$

يمكن استخدام أنواع مختلفة من النوافذ أشهرها النافذة المربعة Rectangular وتعطى بالعلاقة:

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{for } n = 0, \dots, N-1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (8-9)$$

أو نافذة هامينغ Hamming Window، وتعطى بالعلاقة:

$$w(n) = \begin{cases} 1 + 0.84 \cos[2\pi(n - N/2)/N] & \text{for } n = 0, \dots, N-1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (8-10)$$

2. الطريقة الثانية: وهي تعتمد على حساب الجموع  $\sum_n$  في المعادلة (8-6) باستخدام عدد محدود من عينات إشارة الدخل، ومن ثم يمكن كتابة الحل على النحو التالي:

$$\sum_{i=0}^p a_i c_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, p \quad \text{where } a_0 = 1 \quad (8-11)$$

يسمى  $c_{ij}$ تابع التغير Variance Function ويعطى بالعلاقة:

$$c_{ij} = \sum_{n=0}^{N-1} s(n-i)s(n-j) \quad (8-12)$$

تسمى الطريقة الأولى بطريقة الترابط الذائي Autocorrelation Method، بينما تسمى الطريقة الثانية طريقة التغير المشترك Covariance Method.

## ٢-٨ طريقة الترابط الذائي Autocorrelation Method

بالعودة إلى المعادلة (8-7) نجد أنها عبارة عن  $P$  معادلة خطية بـ  $P$  متتحول، أي يمكن كتابتها بالشكل:

$$\begin{aligned} r_{-1}a_0 + r_0a_1 + \dots + r_{p-1}a_p &= 0 \\ r_{-2}a_0 + r_{-1}a_1 + \dots + r_{p-2}a_p &= 0 \\ r_{-3}a_0 + r_{-2}a_1 + \dots + r_{p-3}a_p &= 0 \\ \dots & \\ r_{-p}a_0 + r_{1-p}a_1 + \dots + r_0a_p &= 0 \end{aligned} \quad (8-13)$$

يمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة مصفوفات على اعتبار أن معامل التنبؤ الخطي ذي الدرجة الأولى  $a_0=1$  عندما يكون الخطأ مساوياً  $E$ :

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_p \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{p-1} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{p-2} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ r_p & r_{p-1} & r_{p-2} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8-14)$$

تدعى المصفوفة المبينة في الطرف الأيسر من العلاقة السابقة بمصفوفة الترابط Correlation Matrix ويرمز لها بـ  $R$ , حيث نلاحظ أنها مصفوفة مربعة ومتناهية Toeplitz مصفوفة. ويذكر الاستفادة من هذه الخاصية لإيجاد طريقة تكرارية بسيطة وسريعة تدعى طريقة ديرين Durbin (نسبة إلى مخترعها). وسوف نلخصها فيما يلي:

لنفترض أننا نريد حل المعادلة (8-14) من أجل  $p=3$ , عندما نحسب القيم

السابقة للمصفوفة من أجل  $p=2$  وهي  $a_1(2)$  و  $a_2(2)$ :

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_1 & r_0 & r_1 \\ r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1(2) \\ a_2(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8-15)$$

ونريد استخدامها في حل المعادلة:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1(3) \\ a_2(3) \\ a_3(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8-16)$$

باعتبار أن المصفوفة  $R$  متناظرة و مثليه متناظرة أي مصفوفة Toeplitz، يمكن نعكس المعادلة (8-15) دون أن يتغير الحل فتصبح:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_1 & r_0 & r_1 \\ r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2(2) \\ a_1(2) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (8-17)$$

بتطبيق نفس الفكرة على مصفوفة المعاملات في المعادلة (8-16) يمكن بذلك تقسيمها إلى جزئين كما يلي:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ a_1(3) \\ a_2(3) \\ a_3(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a_1(2) \\ a_2(2) \\ 0 \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} 0 \\ a_2(2) \\ a_1(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8-18)$$

حيث  $k_3$  معامل خاص سوف نحدده لاحقاً. وبتعويض المعادلة السابقة في المعادلة (8-16) نحصل على:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ a_1(2) \\ a_2(2) \\ 0 \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} 0 \\ a_2(2) \\ a_1(2) \\ 1 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} E_2 \\ 0 \\ 0 \\ q \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} q \\ 0 \\ 0 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (8-19)$$

حيث  $q$  ثابت يتحدد قيمته بشكل تكراري. ونحل المعادلة السابقة بعد جعل الطرف الثاني مساوياً للصفر أي:

$$q + k_3 E_2 = 0 \quad (8-20)$$

منه نجد:

$$k_3 = -\frac{q}{E_2} = -\frac{1}{E_2} \sum_{i=0}^2 a_i r_{3-i} \quad (8-21)$$

يسمى  $E_3$  بخطأ التنبؤ الجديد. ويعطى بالعلاقة:

$$E_3 = E_2(1 - k_3^2) \quad (8-22)$$

يعمم الحل السابق من أجل  $n$  معادلة، بحيث يمكن حل المعادلة (8-14) تكراراً:

$$a_i(n) = a_{i-1}(n-1) + k_n a_{n-i}(n-1) \quad (8-23)$$

حيث نفترض دوماً أن  $a_0(n) = 1$  وأن:

$$k_n = \frac{-1}{E_{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i(n-1) r_{n-i} \quad (8-24)$$

$$E_n = E_{n-1}(1 - k_n^2) \quad (8-25)$$

تسمى المعاملات  $k_n$  معاملات الانعكاس Reflection Coefficients ولها أهمية كبيرة في نظم معالجة الرقمية لإشارة الكلام وخصوصاً في تحديد استقرار مرشح التنبؤ Partial-Correlation الخطي. وتسمى أيضاً معاملات الترابط الجزئي Partial-Correlation Coefficients (PARCOR).

Durbin تلخص خوارزمية حساب معاملات التنبؤ الخطي باستخدام طريقة

وفق ما يلي:

1. نبدأ من العينة  $n=0$  (العينة الأولى):

2. من أجل العينة  $n$ :

أ- نحسب قيمة  $k_n$  باستخدام العلاقة (8-24).

ب- إذاً تصبح قيمة معامل التنبؤ  $= k_n \cdot a_n(n)$

ج- من أجل قيم  $n$  تتراوح من 1 إلى  $n-1$  نحسب قيم المعاملات الجزئية باستخدام المعادلة (8-23).

د- نحسب قيم خطأ التنبؤ باستخدام المعادلة (8-25).

3. يجعل  $n=n+1$  ثم نعود إلى الخطوة الثانية.

عندما نستطيع حساب قيم معاملات التنبؤ الخطى على نحو تابعى وبكلفة حسابية صغيرة نسبياً.

### ٤-٢-٨ طريقة التغير المشترك Covariance Method

تعتمد هذه الطريقة على حساب المعاملات ضمن الإطار المطلوب والأطر السابقة وبطريقة مشابه لطريقة الترابط الذاتي. تكتب المعادلة (8-11) بالشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2p} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdots & c_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{p1} & c_{p2} & c_{p3} & \cdots & c_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} c_{10} \\ c_{20} \\ c_{30} \\ \vdots \\ c_{p0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Ca=c} \quad (8-26)$$

نلاحظ أن المصفوفة  $\mathbf{C}$  متناظرة ولكن ليست من مصفوفات Toeplitz لذلك فإن طريقة Durbin المستخدمة لحساب معاملات الترابط الذاتي لا يمكن استخدامها في الحل. لذلك نستخدم طريقة أخرى تدعى طريقة تشولسكي Choleski نسبة إلى مخترعها. وتعتمد هذه الطريقة على تقسيم المصفوف  $\mathbf{C}$  إلى مصفوفتين مصفوفة مثلثية عليها  $\mathbf{U}$  ومصفوفة مثلثية دنيا  $\mathbf{L}$ , أي  $\mathbf{C=LU}$ , إذاً يتم تقسيم الحل إلى حلين:

$$\mathbf{Lk=c} \quad (8-27)$$

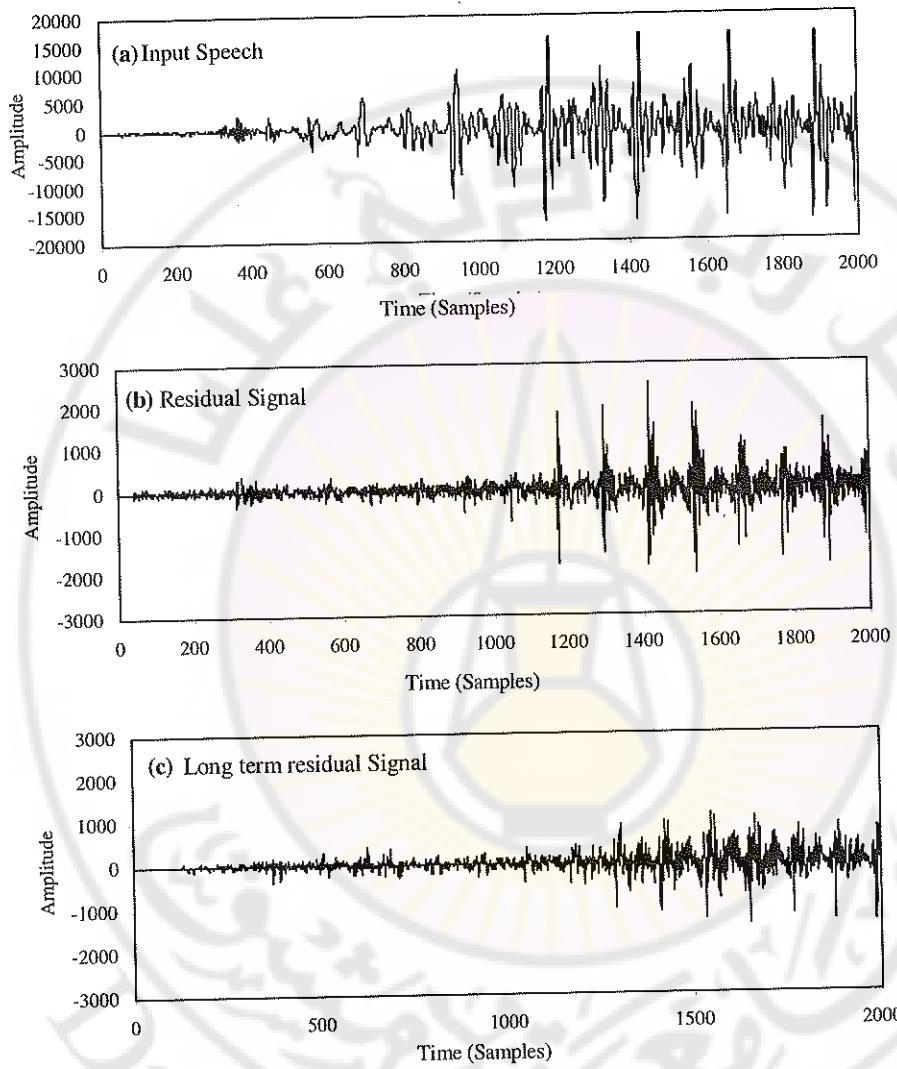
$$\mathbf{Ua=k} \quad (8-28)$$

ومن ثم يتم حل المعادلين (8-27) و (8-28) باستخدام طريقة مشابه لطريقة Durbin وعلى نحو تابعى أيضاً (ويمكن للطالب العودة للمراجع لمزيد من المعلومات).

والجدير بالذكر أن الطريقة الأولى هي الأكثر استخداماً بسبب تعقيدها المنخفض ونتائجها الجيدة حيث تستخدم في تحديد معاملات مرشحات البوان Short Term Formant Filters و يسمى أيضاً مرشح التنبؤ قصير الأمد Prediction، بينما ينحصر بعض تطبيقات الطريقة الثانية في تحديد معاملات مرشحات طبقة الصوت Pitch Filter و يسمى أيضاً مرشح التنبؤ طويل الأمد Long Term Prediction.

يُبين الشكل (2-8) أثر استخدام كل من مرشح البوان Formant Filter ومرشح طبقة الصوت Pitch Filter على عينة من إشارة كلام بطول 250 ms لكلمة "Glass" معتانه بتردد 8 kHz ومكتملة 16 Bit لكل عينة. ونلاحظ من الشكل أنه بعد استخدام المرشح الأول (مرشح البوان) أصبحت إشارة الخطأ صغيرة مقارنةً بالإشارة الأصلية ولكنها تحتوي على بعض القمم التي تظهر دورياً أو شبه دوري حيث تغير عن تأثير طبقة الصوت، ونلاحظ أيضاً أن هذه القمم تختفي بعد استخدام المرشح طبقة الصوت (Long Term Prediction) حيث تصبح إشارة الخطأ الناتجة صغيرة جداً تشبه إشارة عشوائية، وهذا هو المبدأ الذي تعتمد عليه فكرة استخدام التنبؤ الخططي في معظم مرّمّزات الكلام. ويمكن أن نبين هنا أن تأثير استخدام المرشحين هو بمعنى آخر إزالة آلية ترابط في إشارة الكلام وترشيح هذا الترابط ليقى فقط في خرج المرشح المعلومات المتبقية ونعتبرها هنا بخطأ التنبؤ.

تستخدم معاملات التنبؤ الخططي Linear Prediction Coefficient (LPC) في كثير من مرّمّزات الكلام و مرّمّزات الإشارة السمعية (حيث يمكن استنتاج معاملات مشابه للإشارات السمعية). وتستخدم هذه المعاملات أيضاً في نظم التعرف على الكلام Recognition Speech ونظم التعرف على المتكلّم Speaker Recognition.



الشكل (8-2): نموذج إشارة الفرق بين ms 250 من إشارة كلام مأخوذة من كلمة "Glass" وإشارة الخطأ الناتجة عن كل من مرشحي (b) Format Filter و (c) Pitch Filter.

الكلام حيث يتم تحليل إشارة الكلام في كل إطار على حدة، ومن ثم يتم تكمية هذه المعلومات لترسل أو تخزن. في المستقبل تستخدم المعلومات المرسلة أو المخزنة لإعادة تركيب الإشارة من جديد. وتسمى هذه الطريقة بعملية التحليل والتركيب Analysis-by-Synthesis كما هو مبين في الشكل (3-8).



الشكل (3-8): عملية التحليل والتركيب.

### ٣-٨ خصائص مرّمّزات الكلام Speech Coder Attributes

تقسم خصائص مرّمّزات الكلام إلى خمسة وهي: نسبة الضغط أو معدل إرسال البيانات Bit rate، الجودة Quality، درجة التعقيد Complexity، زمن التأخير Delay، والمتانة (المนาعة) ضد أخطاء القناة Channel Robust. ويعد بعض هذه الخصائص من المتطلبات الأساسية في التطبيق وبعضها الآخر يمكن السماح بالانخفاض في بعض التطبيقات الأخرى. و على سبيل المثال من المتطلبات الأساسية لقنوات الاتصال تحقيق أقل معدل إرسال البيانات بحيث يمكن التضحية بجودة الصوت، بينما في تطبيقات الهاتف المحمول تعد المتانة من أخطاء القناة والانخفاض في درجة تعقيد المرمز من المتطلبات الأساسية، بينما يمكن التنازل عن جودة الكلام في بعض الأحيان أو معدل إرسال البيانات، في حين من غير المهم التركيز على درجة تعقيد المرمز أو المتانة ضد أخطاء القناة أو حتى التأخير الزمني في المرّمّزات المستخدمة في تسجيل الإشارات

الكلامية وإنما يتم التركيز على معدل إرسال البيانات و جودة الكلام. و نبين في ما يلي  
الخصائص الأساسية لرمز الكلام:

**1. نسبة الضغط أو معدل إرسال البيانات:** وهي النسبة بين معدل إرسال البيانات قبل عملية الضغط و معدل إرسال البيانات بعد عملية الضغط. وإذا افترضنا أن معدل إرسال البيانات للإشارة الأصلية (بعد تحويل إشارة الكلام إلى إشارة رقمية) مساوياً  $128 \text{ kb/s}$  و معدل إرسال البيانات بعد استخدام مرمز الكلام مساوياً  $16 \text{ kb/s}$  فان نسبة الضغط تساوي  $128/16 = 8$ . يوجد حالياً مرمزات معيارية ذات معدل إرسال بيانات يبدأ من  $64 \text{ kb/s}$  وينخفض إلى  $2.4 \text{ kb/s}$ .

**2. جودة الكلام:** تتحدد جودة الكلام الناتج عن المرمز بمدى تقبل المستمع للكلام الناتج و بمدى نقاط هذا الكلام وخلوه من الضجيج. وتقيس جودة المرمز باستخدام الاختبار بالإصغاء الشخصي Subjective Listening Test بمجموعة من الأشخاص (لا تقل عن خمسين) عند سماعهم (إشارات كلام ناتجة عن المرمز المراد قياس جودته) عن طريق سماعات رأسية أو عن طريق هاتف أو مخاهير ضمن غرفة معزولة، بحيث يختار المستمع واحداً من خمسة خيارات المبنية في الجدول (1-8)، ويتم بعد ذلك حساب متوسط نتائج الاستبيان. ويدعى هذا الاختبار باختبار متوسط الرأي Mean Opinion Square (MOS). MOS ويرمز له اختصاراً بـ

الجدول (1-8): جدول خيارات اختبار الجودة MOS.

الخيار الجودة	الفئة	الوصف
Excellent	5	التشويه بإشارة الكلام غير مدرك حسياً.
Good	4	التشويه بإشارة الكلام بالكاد مدرك ولكنه غير مزعج.
Fair	3	التشويه بإشارة الكلام مدرك ومزعج قليلاً.
Poor	2	التشويه بإشارة الكلام مزعج ولكن الإشارة يمكن فهمها.
Bad	1	التشويه مزعج جداً والإشارة غير مفهومة.

يجب أن لا تكون قيمة MOS التي تتحققها مرمّزات الكلام ذات الجودة العالية أقل من 4. وتسمى الجودة المحسورة بين  $MOS=4.0$  وبين  $MOS=4.5$  بجودة الكلام المنشودة Toll Quality، بينما تسمى الجودة المحسورة بين 3.0 و أقل من 4.0 بجودة الاتصالات Communication Quality الصنعي أو التركيبي .Synthesis Speech Quality

3. المثانة من أخطاء القناة: تعد المثانة من أخطاء القناة من أهم خصائص المرمّزات المستخدمة في نظم الاتصالات الخلوية، حيث تتعرض قناة الاتصالات في هذه الأنظمة إلى أخطاء كبيرة. ولذلك لا يتأثر جودة الكلام المستعاد يجب أن يحافظ المرمز على جودة عالية للكلام عند وجود أخطاء في قناة الإرسال. وتقيس هذه المثانة عادة بالمعدل النسبي للأخطاء التي تتعرض لها الإشارة المرسلة في قناة الاتصال (مثلاً عند حصول خطأ في بت وحيد لكل 10000 بت أي أن نسبة الخطأ يمكن أن تصل إلى  $10^{-4}$ ).

**4. زمن التأخير:** هو الفرق الزمني بين لحظة دخول عينة إلى المرمز وبين لحظة استعادتها منه، دون أن يؤخذ بالاعتبار زمن تأخير قنوات الاتصال. ويجب أن تعمل المرمّزات بأقل زمن تأخير وخصوصاً المرمّزات المستخدمة في نظم الاتصالات، حتى لا يؤدي التأخير الزمني إلى ظهور الصدى في المكالمات الهاتفية. ويحدث زمن التأخير في المرمّزات نتيجة الزمن الذي يحتاجه النظام الإلكتروني لترميز وفك ترميز الكلام، وهذا الزمن يتعلق بدرجة تعقيد المرمز وهو صغير جداً ويمكن إهماله، أما التأخير الملاحظ فيتخرج بسبب قيام عدد كبير من المرمّزات بتخزين جزء من إشارة الكلام (يدعى بالإطار Frame) من أجل المعالجة، بالإضافة لقيامه أحياناً تقوم بتخزين جزء مستقبلي أو جزء من إطار جديد يدعى بالإطار المُقبل Lookahead. ويتناوب زمن التأخير ومع مقاس الإطار (ويتراوح هذا الزمن من 10 ms إلى 60 ms). وقد حدد الاتحاد الدولي للاتصالات زمن التأخير بأن لا يزيد عن 20 ms للمرمّزات القياسية المستخدمة في نظم الاتصالات.

**5. درجة التعقيد:** تتعلق هذه الخاصية بالكلفة الاقتصادية و استهلاك الطاقة للرمز، حيث تتعلق درجة تعقيد المرمز بـ عدد العمليات الرياضية اللازمة لإتمام ترميز وفك ترميز إشارة كلام. وتعتبر الكلفة الاقتصادية و انخفاض استهلاك الطاقة أهم البارامترات لدى اختيار مرمّزات الكلام المستخدمة في تطبيقات الاتصالات الخلوية.

تصمم معظم مرمّزات الكلام بالمحاكاة على الحاسوب، ومن ثم تنقل هذه المحاكاة لتطبيق على معالج معالجة الإشارة Digital Signal Processors (DSP) بحيث تصمم بعد ذلك دارات داريات عالية التكامل لتقوم بهذا الدور. وتقيس درجة التعقيد عادة بعد العمليات الحسابية (الجمع و الضرب) اللازمة

لتنفيذ العمل المطلوب من المرمز، أو عدد التعليمات التي يحتاجها المرمز لتنفيذ العمل بالثانية الواحدة (MIPS).

يجب على مرمز الكلام أن يتمتع بدرجة تعقيد منخفضة بحيث يمكن أن يقوم بعملية الفك والتركيب في الزمن الحقيقي Real Time وبحيث يمكن تطبيق هذا المرمز عملياً باستخدام معالج الإشارة الرقمي Digital Signal Processor (DSP).

تصنف مرزمات الكلام إلى صنفين أساسين يشمل أحدهما مرزمات الكلام ضيقة المجال Narrowband Speech Coder وستستخدم لإشارات كلام ضمن المجال الترددية المأهولة والمخصوص بين الترددات 200 Hz و 3.2 kHz أو إلى 4 kHz. ويشمل الصنف الثاني مرزمات المجال العريض Wideband Speech Coder وستستخدم لإشارات كلام ذات مجال ترددية مخصوصة بين حوالي 50 Hz و 7 kHz، حيث تستخدم في بعض التطبيقات الخاصة التي تقتضي بجودة الكلام ولا تذكر على عرض مجال قناة الاتصال. وسوف نركز في هذا الفصل على المرزمات ذات المجال الضيق لما لتطبيقات هذا النوع من انتشار واسع في الحياة العملية.

#### ٤-٨ أنواع مرزمات الكلام Types of Speech Coders

تصنف مرزمات الكلام إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

1. مرزمات الموجة Waveform coding.
2. مرزمات التنبؤ الخططي LPC coder.
3. مرزمات التحليل والتركيب Analysis synthesis speech coders.

Analysis synthesis speech coders.

تعتمد مرّمّزات النوع الأول على ترميز إشارة الموجة نفسها دون الاستفادة من خصائص الكلام، وتنميّز بجودة الكلام عالية و درجة تعقيد منخفضة جداً دون إضافة تأخير زمني كبير على إشارة الكلام، إلا أن معدل إرسال البتات عالٍ فهو يبدأ من 64 kb/s ويمكن أن يصل إلى 32 kb/s، في حين أن المرّمّزات من هذا النوع التي تعمل بمعدل أقل من 32 kb/s تعاني من انخفاض كبير في جودة الكلام.

تستفيد مرّمّزات النوع الثاني من خصائص الكلام وخصائص انتشار الصوت داخل التجويف. وتعتمد في تصميمها على نموذج توليد الكلام وتستخدم لذلك معاملات التتبؤ الخططي LPC. ويتميز هذا النوع بمعدل إرسال بثات منخفض جداً يبدأ من 4 kb/s وينخفض إلى 1.2 kb/s، إلا أن جودة الكلام الناتج عن المرّمز منخفضة جداً وتكافئ جودة الكلام الصنعي أو التركيبي .Synthesis Speech Quality

أما النوع الثالث فهو من أحدث الأنواع وأكثرها تطويراً وانتشاراً، وهو هجين بين النوعين السابقين ويعتمد بتصميمه على فكرة التحليل والتركيب المبينة في الشكل (3-8). ويتميز هذا النوع بمعدل إرسال بثات يتراوح بين المتوسط والمنخفض ويبدأ من 16 kb/s وينخفض إلى 4 kb/s، وبجودة صوت تقارب جودة الصوت المنشودة وتساويها أحياناً، إلا أن سيئة هذا النوع هي درجة تعقيده وتأخيره الزمني العالين. وسوف نستعرض في هذه الفقرة فكرة سريعة عن أهم مرّمّزات الأنواع الثلاثة ومبدأ عمل كل منها.

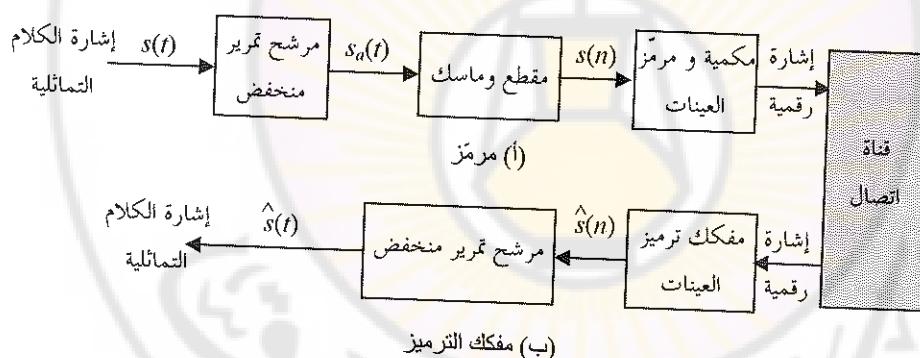
#### ١-٤-٨ مرّمّزات الموجة Waveform Coder

هناك أنواع كثيرة من مرّمّزات الكلام التي تقع ضمن هذا النوع منها مرّمز التعديل النبضي الترميزي (PCM) Pulse Code Modulation، مرّمز التعديل النبضي

الترميزي التفاضلي (DPCM) مرمز التعديل النبضي الترمزي التفاضلي المتكيف Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM) تعديل دلتا (Delta Modulation (DM))، مرمز تعديل دلتا المتكيف Adaptive Delta Modulation (ADM) سنيين لاحقاً أشهر هذه الأنواع وأكثرها انتشاراً. Subband Coder (SBC)

#### ٤-١-٤-٨ مرمز التعديل النبضي الترمزي

يعدّ مرمز التعديل النبضي الترمزي المبين مخططه الصندوقى في الشكل (4-8) النظام الأساسي المستخدم في تحويل إشارة الكلام التماثلية إلى رقمية. وتعود إشارة الكلام الرقمية الناتجة عن هذا المرمز مدخل إلى الأنواع الأخرى التي سنبيتها لاحقاً.



الشكل (4-8): المخطط الصندوقى لمرمز التعديل النبضي الترمزي PCM.

تلخيص عملية ترميز إشارة الكلام في الخطوات التالية:

1. تمرر إشارة الكلام التماثلية أولاً بمرشح ترمير منخفض LPF له تردد قطع يساوي إلى نصف تردد الإعتيان.

2. يتم اعتبار إشارة خرج المرشح بتردد اعتبار  $f_s$  يساوي أو أكبر من تردد الإشارة الأعظمي  $f_m$  أي  $f_s \geq 2f_m$  حسب شرط شانون.

3. يتم بعد ذلك تكمية الإشارة الناتجة باستخدام مكمي Quantizer بعدد مستويات يساوي  $L_q = 2^B$ , حيث  $B$  عدد البتات المستخدمة في تكمية العينة الواحدة.

4. ترمز كل عينة ناتجة ثنائياً "برمز ثنائي" مقابل لكل مستوى تكمية ثم ترسل تسلسلياً.

بالنسبة لإشارة الكلام يتم اختيار التردد الأعظمي  $f_m$  للإشارة مساوياً 4 kHz في مرّزات ضيقـة المجال الترددـي، أي يستخدم تردد اعتبار يساوي  $f_s = 2 \times 4 \text{ kHz} = 8 \text{ kHz}$  حسب شرط شانون.

المشكلة تكمن في تحديد عدد مستويات التكمية التي تعطي خطأ تكمية أقل ما يمكن. ويمكن تحديد عدد مستويات التكمية بلاحظـة نسبة الإشارة إلى الضجيج التي تنتـجـها المكمـيـهـ، والتي تعطـيـ بالعـلـاقـهـ:

$$SNR = \frac{X_{rms}^2}{d_q^2 / 12} = 12 \frac{X_{rms}^2}{d_q^2} \quad (8-29)$$

حيث  $d_q$  خطـوةـ التـكمـيـهـ (الـفـرقـ بـيـنـ مـسـتـوـيـ تـكـمـيـهـ)، و  $X_{rms}^2$  مـتوـسـطـ مـرـبـعـاتـ الإـشـارـةـ وـيـعـطـيـ:

$$X_{rms} = \frac{A_{max}}{h_q} \quad (8-30)$$

حيث  $h_q$  ثابت ويساوي إلى 4، و  $A_{max}$  المطال الأعظمي للإشارة. وإذا كانت عملية التكمية تبدأ من مستوى الصفر فإن:

$$A_{max} = 2^{B-1} \times d_q \quad (8-31)$$

نلاحظ من العلاقة السابقة:

- إن نسبة الإشارة إلى الضجيج تزداد بازدياد مطال الإشارة أي أن الإشارة ذات المطال الأكبر لها ضجيج أقل والعكس بالعكس (وهذا غير منطقي وخصوصاً عند اختلاف المتحدين واختلاف ارتفاع والانخفاض جهارة الصوت لكل منهم).

- إن نسبة الإشارة إلى الضجيج تتناسب عكساً مع مربع المسافة بين مستويات التكمية، أي يتطلب الحصول على  $SNR$  عالي زيادة عدد البتات اللازمة لتكمية كل عينة، مما ينعكس سلباً على عرض المجال.

باعتبار أن الكلام هو عبارة عن مزيج من أحرف مجهرة وأحرف غير مجهرة، وبملاحظة أن إشارة الأحرف المجهرة لها مطال كبير مقارنة بإشارة الأحرف الغير المجهرة لذلك لا يمكن إنقاص عدد مستويات التكمية للرمز لأن ذلك يؤدي إلى انخفاض أن نسبة الإشارة إلى الضجيج بشكل كبير، ففي حالة الأحرف الغير مجهرة يصبح الضجيج أعلى من الإشارة نفسها. يمكن تحقيق نسبة  $SNR$  مقبولة عند التكمية المنتظمة بتكمية كل عينة بـ bit 16 أو (12 على الأقل). ويمكن حساب معدل إرسال البتات لرمز PCM كما يلي:

$$\text{Bit rate } \{PCM\} = 8000 \text{ [sample/s]} \times 16 \text{ [bit/sample]} = 128 \text{ kbit/s}$$

هذا الرقم كبير جداً فمثلاً لتخزين 2.5 ثانية من إشارة كلام، يتطلب ذلك ذاكرة لا تقل عن 40 kbyte. من هنا تبع الحاجة ماسة إلى وسيلة لخفيض معدل إرسال البيانات.

#### ٤-١-٢ مرمّزات التعديل النبضي الترميزية اللوغاريتمي LogPCM

يسمى هذا المرمز برمز ذي التكميم غير المنتظمة. إن السيئة الأساسية لرمز PCM كما بينا سابقاً هو انتظام خطوة التكميم التي تتطلب استخدام عدد بذات كبير لتكميم كل عينات إشارة الكلام. ولتحسين أداء المرمز عند خفض عدد البيانات اللازم لتكميم كل عينة يستخدم مكمي غير منتظم (مكمي متكيف Adaptive)، بحيث تكون خطوة التكميم  $d_q$  صغيرة عندما تكون مطالات عينات الإشارة صغيرة (إشارة غير مجهرة مثلاً) أو تكون خطوة التكميم  $d_q$  كبيرة عندما تكون مطالات الإشارة كبيرة (إشارة مجهرة مثلاً). ونظراً لصعوبة تحقيق ذلك عملياً فإنه يستعاض عن تغيير خطوة التكميم بضرب الإشارة نفسها بتتابع  $C_L(x)$  غير خططي، وبحيث يكون التابع خطياً تقررياً عند قيم الإشارة الصغيرة ويكون تشوه التابع كبيراً عند ارتفاع مطال الإشارة.

ويسمى هذا التابع بتتابع الضغط Companding و يتبع قانوناً خاصاً يسمى قانون الضغط. ثم يتم إعادة الإشارة إلى قيمها الأصلية بضربها بمقلوب التابع  $C_L^{-1}(x)$ . وبين الشكل (5-8) مبدأ عمل المكمية الغير المنتظمة حيث تبدأ بعملية الضغط بتتابع  $C_L(x)$  ثم تليه تكميم متناظمة وتنتهي بعملية فك الضغط بتتابع  $C_L^{-1}(x)$  للحصول على الإشارة الأصلية ولكن مكممة.

تستنتج معادلة تابع الضغط بلاحظة تابع التوزيع الاحتمالي لمطال إشارة الكلام، حيث وجد أن لها تابع كثافة احتمالية قريب من تابع غاما Gamma عندما تكون  $\alpha=2$  و  $\beta=1$  ويعطى:

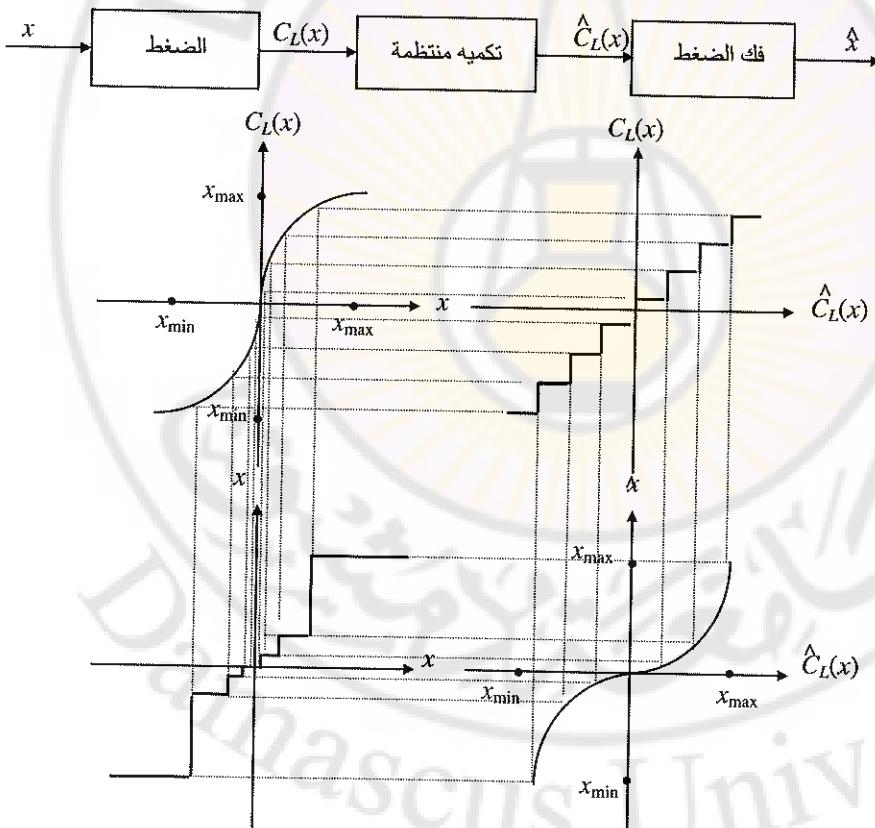
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^2(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (8-32)$$

إلا أن التابع المستخدم في مرمز LogPCM أقرب إلى التابع المبين في العلاقة السابقة ولكنها أقل تعقيداً. وقد حددت مؤسسات الاتصالات نوعين من القوانين:

### 1. قانون الضغط $\mu$ -Law (μ-Law Compressor)

يعطى هذا القانون بالعلاقة:

$$c_L(x) = x_{\max} \frac{\log_e(1 + \mu |x| / x_{\max})}{\log_e(1 + \mu)} \operatorname{sgn}(x) \quad (8-33)$$



الشكل (8-5): عملية التكمية غير المنتظمة باستخدام تابع الضغط.

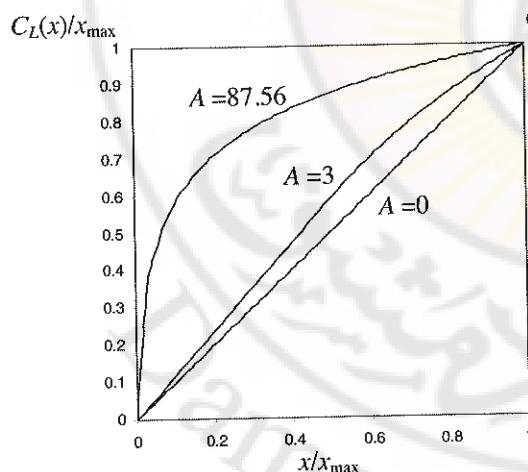
حيث  $\text{sgn}(x)$  تشير إلى إشارة الجذرية للإشارة  $x$ ,  $\mu$  ثابت قانون الضغط, و  $x_{\max}$  القيمة العظمى لمطال الإشارة. ويبيّن الشكل (6-8)(أ)تابع الضغط  $C_L(x)$  من أجل قيمًا مختلفة للثابت  $\mu$  عند  $x > 0$ .

## 2. قانون الضغط A-Law

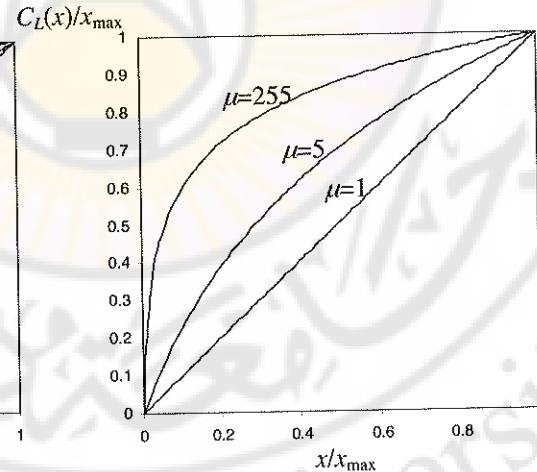
يعطى هذا القانون بالعلاقة التالية:

$$C_L(x) = \begin{cases} \frac{A|x|}{1 + \log_e A} \text{sgn}(x) & 0 \leq \frac{|x|}{x_{\max}} \leq \frac{1}{A} \\ X_{\max} \frac{1 + \log_e(A|x|/x_{\max})}{1 + \log_e A} \text{sgn}(x) & \frac{1}{A} < \frac{|x|}{x_{\max}} \leq 1 \end{cases} \quad (8-34)$$

حيث  $\text{sgn}(x)$  تشير إلى إشارة الجذرية للإشارة  $x$ ,  $A$  ثابت قانون الضغط,  $x_{\max}$  القيمة العظمى للإشارة. ويبيّن الشكل (6-8)(ب)تابع الضغط  $C_L(x)$  من أجل قيمًا مختلفة للثابت  $A$  عند  $x > 0$ .



(أ) قانون الضغط  $A$ .



(ب) قانون الضغط  $\mu$ .

الشكل (6-8): مقارنة بين قانوني الضغط  $\mu$ -Law و A-Law من أجل قيم  $x > 0$ .

عند استخدام مكمي تستخدم أحد القوانين المبينة في العلاقة (8-33) أو العلاقة (8-34) في مرمز PCM فان المرمز الناتج يسمى مرمز التعديل النبضي الترميزي اللوغاريتمي Log-PCM. اختير هذا المرمز من قبل

الاتصال الدولي للاتصالات

ITU-T كمرمز معياري International Telecommunication Union (ITU-T)

عند استخدام تابع الضغط A-Law عندما تكون  $A = 56.87$  أو استخدام تابع

الضغط  $\mu$ -Law عندما تكون  $\mu = 255$ . ويعطي المرمز Log-PCM جودة الكلام

تكافئ جودة الكلام المنشودة Toll Quality عند التكميم المتقطمة بـ 8 bit لكل

عينة، أي أن معدل إرسال البتات يساوي إلى 6 kbit/s عند تردد انتشار يساوي

8 kHz. ويرمز لهذا المرمز المعياري G.711.

#### ٤-١-٣- مرمز التعديل النبضي الترميزي التفاضلي المكثف ADPCM

لخفض معدل إرسال البتات على نحو أكبر دون التأثير على جودة الإشارة، وذلك عن

طريق إنقاص مطال العينة المراد تكميتها وذلك بالاستفادة من خصائص إشارة الكلام.

وبسبب الترابط العالي بين عينات إشارة الكلام وخصوصاً خلال أوقات زمنية صغيرة

ترواح بين 10 ms والـ 30 ms، ويظهر هذا الترابط جلياً بين العينات المتحاوره.

وللتعبير عن هذا الترابط نستخدم النسبة  $r_c$  بين تابع الترابط  $r_i$  (العلاقة (8-2))

للعينات ( $i$ ) إلى تابع الترابط  $r_0$  للعينة (0)، أي:

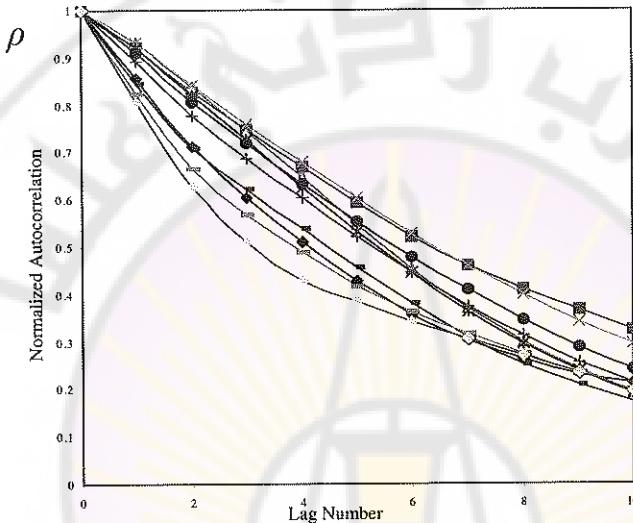
$$r_c = \frac{r_i}{r_0} \quad (8-35)$$

يبين الشكل (7-8) قيمةً مختلفة لهذه النسبة، حيث نلاحظ أن الترابط عالي بين العينات

المتحاوره وتتحفظ مع ازدياد بعد العينات بعضها من بعض. وبالاستفادة من هذه

الخاصة نلاحظ أن الفرق بين العينة  $s(n)$  والعينة السابقة  $s(n-1)$  صغيراً جداً ولا يتعلق أبداً بقيمة كل من العينتين  $s(n)$  و  $s(n-1)$ .

$$d(n) = s(n) - s(n-1) \quad (8-36)$$



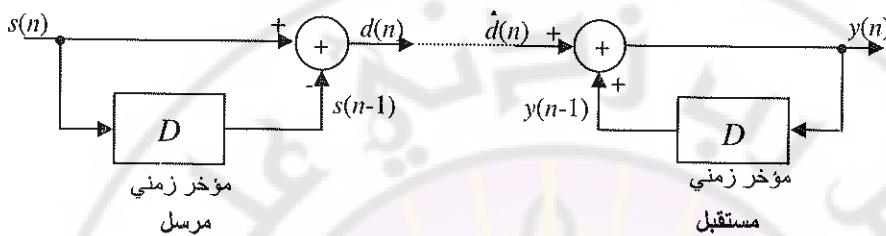
الشكل (8-8): تابع الترابط الذاتي من الدرجة الأولى إلى الدرجة العاشرة محسوبة باستخدام إشارة كلام بطول 20 ثانية.

بسبب كون إشارة الفرق  $d(n)$  أصغر من الإشارة نفسها  $s(n)$  يمكن تكميمه (8-29)، بعدد بتات أقل دون أن تنخفض نسبة الإشارة إلى الضجيج المبينة في العلاقة يسمى النظام الذي يعتمد هذه الطريقة مرمز التعديل النبضي الترميزي التفاضلي .Differential PCM

يبين الشكل (8-8) المخطط الصندوقى لهذا النظام. حيث نلاحظ أن إشارة الفرق  $d(n)$  يمكن الحصول عليها بطرح العينة الحالية من الإشارة  $s(n)$  من العينة السابقة  $s(n-1)$  التي نحصل عليها باستخدام مؤخر زمئي أو ذاكرة من خانة واحدة. ولاستعادة الإشارة الأصلية  $s(n)$  نقوم بجمع إشارة الفرق  $d(n)$  المرسلة مع العينة

المستقبلة السابقة  $(n-1)y$ . وذلك بافتراض أننا نرسل الإشارة  $d(n)$  بدون تكميم وأن عملية الإرسال تتم دون حصول أي أخطاء في قناة الاتصال. ويمكن البرهان على أن

$s(n)$  هي نفسها  $y(n)$ :



الشكل (8-8): المخطط الصندوقي لمرمز التعديل النبضي الترميز التقاضي DPCM.

$$y(n) = y(n-1) + d(n) \quad (8-37)$$

وبتعويض العلاقة (8-36) في العلاقة السابقة نحصل:

$$y(n) = y(n-1) + [s(n) - s(n-1)] \quad (8-38)$$

بافتراض انه عند أول عينة أي عند  $n=1$ , وباعتبار أن إشارة الفرق المستقبل هي

$\hat{d}(n)$  نجد:

$$y(0) = s(0) = 0 \quad (8-39)$$

بالتعمويض في العلاقة (8-38) نجد:

$$y(1) = s(1) \quad (8-40)$$

تصبح هاتان القيمتان القيم المخزنة في الذاكرةتين لاستخدامهما في العينة التالية عند  $n=2$ . من أجل  $n=2$  عينة نستنتج أن:

$$y(n-1) = s(n-1) \quad (8-41)$$

بالتعميض في العلاقة (8-38) نجد:

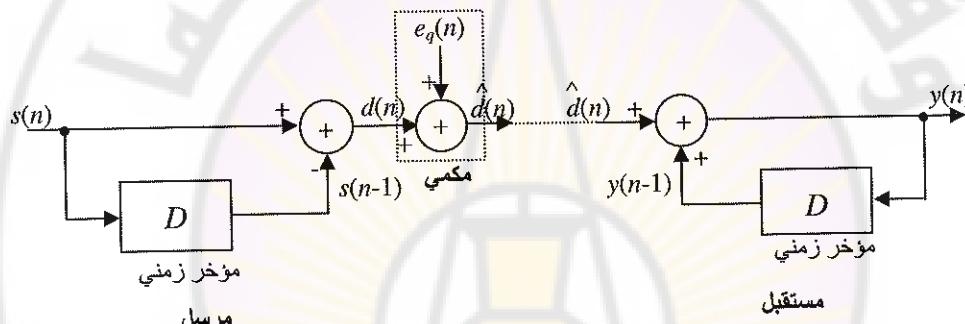
$$y(n) = s(n) \quad (8-42)$$

عملياً يتم تكمية إشارة الفرق  $d(n)$  لإرسالها عبر قناة الاتصال كما هو مبين في الشكل (8-9)، هذه العملية تؤدي إلى إضافة خطأ تكمية  $e_q(n)$  للإشارة  $d(n)$ :

$$\hat{d}(n) = d(n) + e_q(n) \quad (8-43)$$

بالتعميض في (8-37) نجد أن:

$$y(n) = y(n-1) + \hat{d}(n) = d(n) + e_q(n) \quad (8-44)$$



شكل (8-9): المخطط الصندوقى لمرمز التعديل النبضي الترميزى الفاصلى DPCM بإضافة التكمية خلال الإرسال.

بالتعميض العلاقة (8-38) نجد:

$$y(n) = y(n-1) + [s(n) - s(n-1)] + e_q(n) \quad (8-45)$$

بتطبيق نفس الاستنتاج المبين في (8-41) نجد:

$$y(n-1) = s(n-1) + e_q(n) \quad (8-46)$$

بالتعميض في العلاقة (8-45) نجد:

$$y(n) = s(n-1) + e_q(n) + s(n) - s(n-1) + e_q(n) \quad (8-47)$$

أي أن:

$$y(n) = s(n) + 2 \times e_q(n) \quad (8-48)$$

تدل العلاقة السابقة على أن خطأ التكمية يتراكم عند المستقبل مما يؤدي إلى تشوّه في الإشارة المستقبلة. ويتم التخلص من هذه المشكلة بتكمية إشارة الفرق  $d(n)$  في أثناء حسابها كما في الشكل (10-8):

$$d(n) = s(n) - c(n-1) \quad (8-49)$$

أي:

$$\hat{d}(n) = s(n) - c(n-1) + e_q(n) \quad (8-50)$$

نجد في دارة المستقبل أن:

$$y(n) = y(n-1) + \hat{d}(n) \quad (8-51)$$

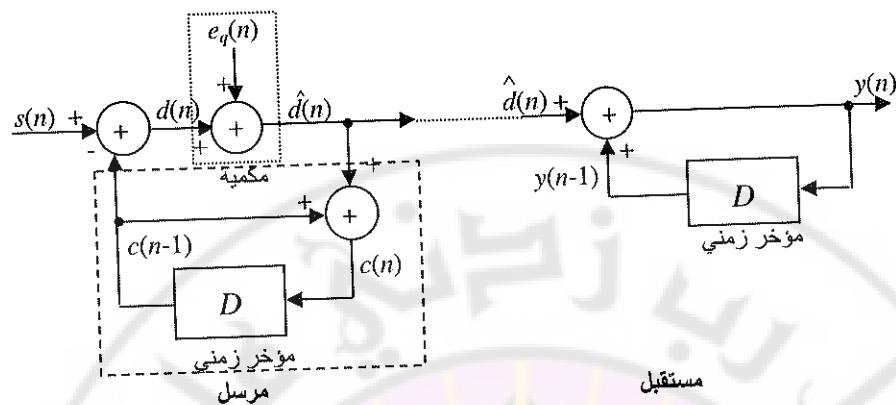
بالتعويض العلاقة (8-50) في (8-51) نجد أن:

$$y(n) = s(n) - c(n-1) + e_q(n) + y(n-1) \quad (8-52)$$

نلاحظ في الشكل (10-8) أن جزءاً من المرسل (المبين ضمن المربع المنقط) مطابق تماماً للمستقبل حيث نجد أن  $c(n-1) = d(n-1)$  و منه نجد:

$$y(n) = s(n) + e_q(n) \quad (8-53)$$

أي أن خطأ التكمية لا يتراكم نتيجة للعملية التفاضلية كما في الحالة السابقة. يمكن جعل إشارة الفرق  $d(n)$  أصغر ما يمكن وذلك للحصول على خفض معدل لإرسال نبضات دون التأثير على جودة الإشارة.



الشكل (10-8): المخطط الصندوفي لرمز التعديل النبضي الترمي التفاضلي DPCM بعد تعديل موضع التكمية خلال الإرسال.

باستبدال المؤخر الزمني بمرشح تنبؤ خطبي، يمكن الحصول على أداء أفضل للرمز مع تحفيض معدل إرسال البتات. وحيث يتولد لدينا عينة من الإشارة المتباينة  $\hat{s}(n)$  عوضاً عن الإشارة المؤخرة  $s(n-1)$  وتصبح إشارة الفرق:

$$d(n) = e(n) = s(n) - \hat{s}(n) \quad (8-54)$$

حيث إن:

$$\hat{s}(n) = \sum_{i=1}^p a_i s(n-i) \quad 1 \leq n \leq N \quad (8-55)$$

حيث  $N$  عدد عينات إشارة الكلام في إطار زمني واحد، و  $P$  درجة التنبؤ. يختار حجم الإطار بين 10 ms و 30 ms، وتتراوح درجة التنبؤ الخطبي بين 8 و 12. ونلاحظ أنه إذا كان التنبؤ من الدرجة الأولى أي  $p=1$  ومعامل التنبؤ الخطبي  $a_1=1$  فإن عملية التنبؤ تشابه المؤخر الزمني المبين في العلاقة (8-36).

يبين في الشكل (8-11) المرمز DPCM باستخدام مرشح تنبؤ خططي. ونلاحظ من الشكل أن معاملات التنبؤ الخططي يتم حسابها من المرسل باستخدام إشارة الكلام ( $s(n)$ ) باستخدام إحدى طريقتين طريقة Autocorrelation Method أو Covariance Method، ثم يتم تكمية هذه المعاملات وترسل إلى المفكك (المستقبل) كمعلومات جانبية Side Information، حيث تستخدم في إعادة توليد إشارة الكلام. وتستخدم طرق عديدة لتكمية معاملات التنبؤ، حيث تحول إلى معاملات أخرى ومن ثم يتم تكميتها. ويسمى ( $H(n)$ )تابع التحويل لمرشح التنبؤ الخططي وهو عبارة مرشح كلي للأقطاب All-pole، ويوصف ( $H(n)$ ) بالعلاقة التالية:

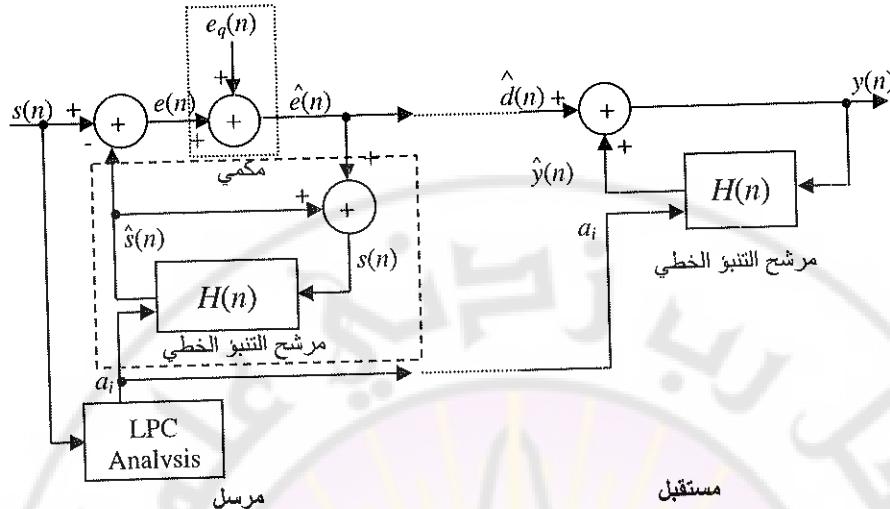
$$H(n) = \frac{s(n)}{\hat{s}(n)} = \frac{s(n)}{\sum_{i=0}^p a_i s(n-i)} \quad (8-56)$$

وبنفس الطريقة يمكن استنتاج أن:

$$y(n) = s(n) + e_q(n) \quad (8-57)$$

لتحسين أداء المرمز يستخدم مكافي متكييف بحيث يتم تعديل خطوة التكمية اعتماداً على طاقة إشارة الدخل (يتم تعديل خطوة التكمية بالاعتماد على متوسط مربعات إشارة الدخل). ويصبح المخطط الصندوقي للمرمز ويسمى مرمز التعديل النبضي الترمزي التفاضلي المتكييف ADPCM مبين الشكل (8-12).

يمكن حساب معاملات التنبؤ الخططي LPC باستخدام الإشارة المستقبلة (المركبة) ( $\hat{s}(n)$ ) عوضاً عن الإشارة الكلام الأصلية ( $s(n)$ ، تسمى هذه الطريقة بالتنبؤ الخلفي Backward Prediction، وبالتالي لا يتم إرسال أي معلومات جانبية إلى المفكك.

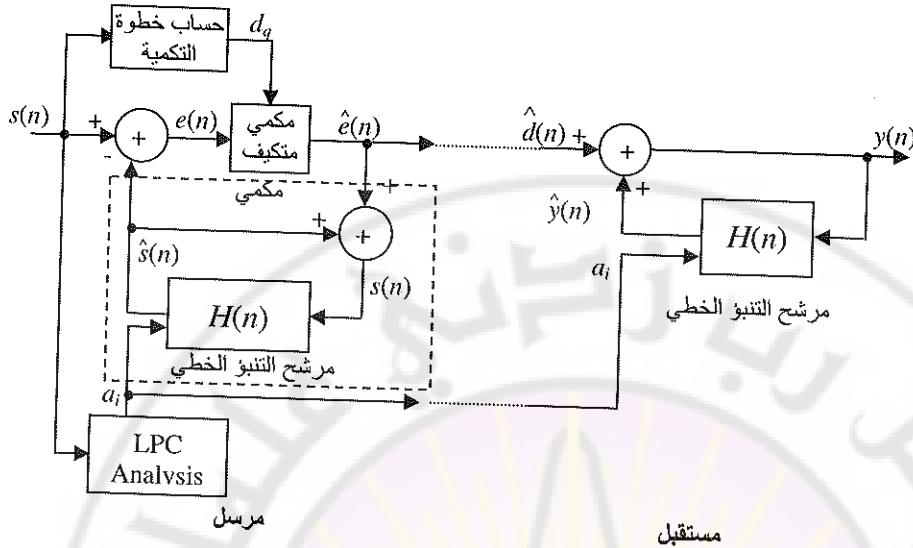


الشكل (11-8): المخطط الصندوقى لرمز التعديل النبضي الترميزي التقاضلى DPCM بعد إضافة مرشح التنبؤ الخطى.

باستخدام التنبؤ الخلفى بالمرتبة العاشرة، مع تكيف خطوة التكميم Adaptive Quantization، اختير هذا المرمز من قبل الاتحاد الدولى للاتصالات International Telecommunication Union (ITU-T) كرمز معياري يعمل عند معدل إرسال البتات مساوياً إلى  $32 \text{ kbit/s}$  ويعطى كفاءة صوت منشودة متساوية إلى كفاءة الصوت الناتجة عن مرمز Log-PCM عند معدل إرسال البتات مساوى  $64 \text{ kbit/s}$ . ويرمز لهذا المرمز .G.726.

#### ٢-٤-٨ مرمزات التنبؤ الخطى **LPC coder**

تسمى أيضاً مرمزات **Vocoder**، وتعتمد في مبدأ عملها على نموذج توليد الكلام عند الإنسان. وبين الشكل (13-8) المخطط الصندوقى للرمز LPC، حيث يقوم المرسل بحساب معاملات التنبؤ الخطى وطبقه الصوت ويجد: فع الإشارة هل هي مجهرة أم غير مجهرة، ثم يقوم بارسال هذه المعاملات فقط إلى المستقبل ليقوم بدوره بتركيب إشارة الكلام منها.



الشكل (8-12): المخطط الصندوقى لرمز التعديل النبضي الترميزى التفاضلى المتكيف ADPCM بعد إضافة مرشح التبؤ الخطى.

يتتألف المرمز من جزئين أساسين، والجزء الأول يقوم بحساب معاملات التبؤ الخطى LPC، والقسم الثانى يقوم بحساب طبقة الصوت Pitch ويحدد ما إذا كانت الإشارة صوتية أم لا. وفي المستقبل يقوم جهاز المستشار بتوليد إما إشارة دورها يساوى دور طبقة الصوت عندما تكون الإشارة مجهرة أو يقوم بتوليد إشارة عشوائية إذا كانت إشارة الكلام غير المجهرة. ويتم بعد ذلك ترشيح الإشارة في مرشح التبؤ الخطى المعطى بالعلاقة (8-56).

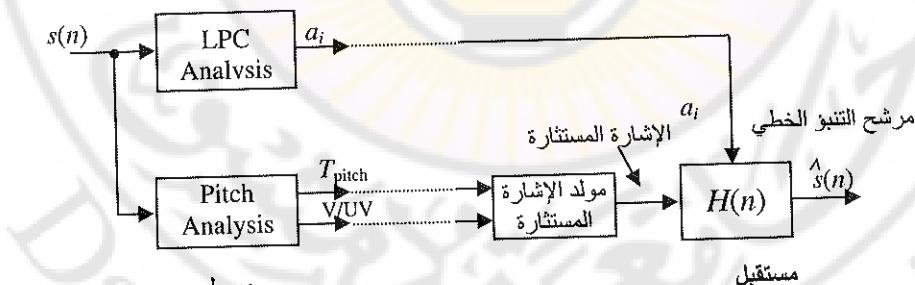
يعتبر مرمز LPC-10 من أشهر أنواع هذه المرمزات، حيث يعمل عند معدل إرسال برات منخفض يساوى 2400 bits/sec. ويعتمد هذا المرمز على إشارة كلام PCM معتنلة بتردد اعتنال 8 kHz، ومكممة باستخدام 12 bits لكل عينة. ويقوم المرمز بتقسيم إشارة الدخول إلى أطر عرض 22.5 ms (أى 180 عينة في كل إطار)، يستخدم الإطار في حساب معاملات التبؤ الخطى (من الدرجة العاشرة  $p=10$ )

باستخدام طريقة Covariance Method، حيث يتم تكمية المعاملات باستخدام 41 Bits موزعة على النحو التالي: يتم تكمية المعاملات  $a_1$  إلى  $a_4$  باستخدام 5 bits لكل معامل، والمعاملات  $a_5$  إلى  $a_8$  باستخدام 4 bits لكل معامل والمعامل  $a_9$  بـ 3 bits والمعلم  $a_{10}$  بـ 2 bits. ويتم حساب تردد طبقة الصوت باستخدام طريقة Covariance Method أيضاً، وتكمم باستخدام 7 bits، ثم يتم تحديد ما إذا كانت الإشارة مجهرة أو غير مجهرة باستخدام خوارزمية معقدة تعتمد على مقارنة طاقة الإشارة مع مستوى حدودي يتبع الضحيم الخلفي. ويتم أيضاً حساب وتمكيم ربع الإشارة (طاقة إشارة الكلام) باستخدام 5 Bits. فيصبح معدل إرسال البتات متساوياً:

$$\text{Bitrate}\{\text{LPC-10}\} = (41 + 7 + 5) [\text{bits}/\text{Frame}] \times (\text{No. of Frame})/\text{Sec}$$

$$\text{Bitrate}\{\text{LPC-10}\} = 54 [\text{bits}/\text{Frame}] \times 8000/180 = 2.4 \text{ kb/s} \quad (8-58)$$

السيئة الأساسية لهذا المرمز هي الجودة المنخفضة لإشارة الكلام والتي تكافئ جودة الكلام الصنعي أو التركيبي .Synthesis Speech Quality



الشكل (8-13): المخطط الصندوقي العام لرمز LPC.

#### ٤-٣ مرمّزات التحليل والتركيب Analysis-by-Synthesis

يعتمد هذا الجيل من المرمّزات على فكرة التحليل والتركيب المبينة في الفقرة ٤-٨. ويبيّن الشكل (14-8) المخطط الصندوقي العام لهذا النوع من المرمّزات. ويعتمد على أن إشارة الخطأ بين الإشارة الأصلية والإشارة المتباينة (4-8) تساوي تقريرياً إشارة عشوائية، فبدلاً من إرسال هذه الإشارة كما في النظام DPCM تستخدم مولد إشارة عشوائية أو تخزن نبضات خاصة تشبه في تركيبها هذه الإشارة العشوائية. وبحيث يختار المرمّز إحدى الإشارات المخزنة أو يقوم بتوسيع إشارة عشوائية تحقق أصغر خطأ تنبؤ ممكن.

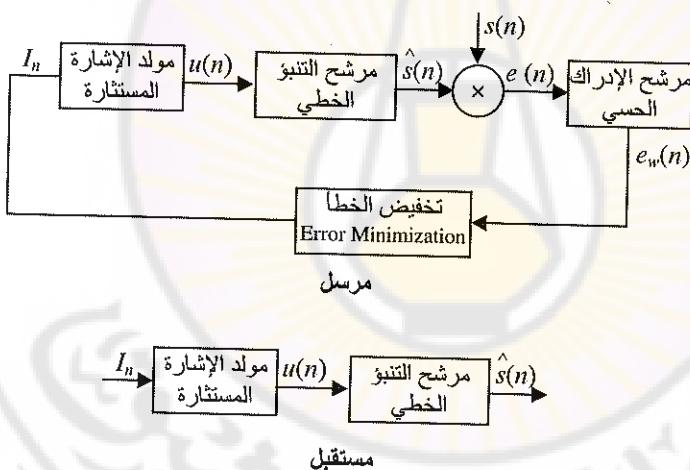
الفكرة في حساب الخطأ في هذا النوع من المرمّزات تعتمد على التركيز على الأخطاء الأكثر إدراكاً حسياً وعدم التركيز على الأخطاء غير المدركة حسياً، ويتم ذلك بتمرير خطأ التنبؤ ( $e(n)$ ) عبر مرشح الإدراك الحسي Perceptual Weighting Filter في المناطق الأكثر إدراكاً حسياً، بينما يقوم المرمّز بتكبير إشارة الخطأ في المناطق الأقل إدراكاً حسياً. تعطى معادلة هذا المرشح بالعلاقة التالية:

$$w_e(z) = \frac{1 - \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=0}^p a_i \gamma^i z^{-i}} \quad (8-59)$$

حيث إن  $a_i$  معاملات التنبؤ الخططي، و  $\gamma$  ثابت المرشح ويحدد درجة تكبير المناطق الأكثر إدراكاً حسياً، وتتراوح قيمته بين 0 و 1. وتبين معظم التجارب أن أفضل القيم للثابت تساوي 0.8 أو 0.9. ويمكن اختصار عمل المرمّز بالخطوات التالية:

1. في البداية يقوم المرمز بتخزين إطار من إشارة الكلام يتراوح بين 10 ms و 30 ms، حسب تصميم هذا المرمز.
2. تحسب معاملات التنبؤ الخطي باستخدام الإطار المخزن وفي بعض الأحيان الأطر السابقة أيضاً، باستخدام أحدى الطرقتين Covariance Method أو Autocorrelation Method.
3. تستخدم معاملات التنبؤ الخطي في كل من مرشح التنبؤ الخطي و مرشح الإدراك الحسي.
4. يقوم المرمز بتوليد الإشارة المستشار الأولي (بطريق مختلفة) ويعطي لها الدليل  $I_n = 0$ .
5. ترشح الإشارة المستشار في مرشح التنبؤ الخطي لتوليد إشارة الكلام المتبع بها  $\hat{s}(n)$ .
6. يحسب خطأ التنبؤ الخطي باستخدام المعادلة (8-4) لكامل الإطار.
7. يرشح خطأ التنبؤ باستخدام مرشح الإدراك الحسي المعطى في العلاقة (8-59).
8. يحسب متوسط مربع الأخطاء Mean Square Error.
9. يقوم المرمز بتوليد الإشارة المستشار الثانية ويعطي لها الدليل  $I_n = 1$ .
10. تكرر الخطوات من 5 إلى 8 لكامل القيم المخزنة أو المولدة للإشارة المستشار.
11. تختار الدليل للإشارة المستشار التي تعطي أصغر خطأ  $I_m$  الذي يتحقق أصغر خطأ ويرسل دليلاً إلى المستقبل بالإضافة إلى معاملات التنبؤ.
12. في المستقبل يستخدم الدليل  $I_m$  في توليد الإشارة المستشار والتي تستخدم في توليد إشارة الكلام المركب بنفس الطريقة السابقة.

المشكلة في هذا النوع من المرمّزات هو الحصول أو تخزين إشارة مستشاره مشابه للإشارة المستشاره الحقيقية بأقل عدد ممكّن من الدليل  $I_n$ ، كما أن حلقة البحث عن أصغر خطأ في التنبؤ تفرض درجة التعقيد كبيرة للرمز. ومن أشهر مرمّزات هذا الصنف من المرمّزات مرمز التنبؤ الخططي ذي الإشارة الترميزية المستشاره CELP ويرمز لها اختصاراً بـ Code Excited Linear Prediction Coder وقد ظهرت في السنوات الأخيرة أعداداً كبيرة من التصميمات المختلفة لهذا المرمز كلها تحاول الوصول إلى خصائص المرمّزات المشروحة سابقاً في الفقرة ٣-٨. ولقد اختار الاتحاد الدولي للاتصالات ITU ونظم الاتصالات الخلوية عدداً كبيراً من مرمّزات هذا الصنف من كرمّزات معيارية كما سنبيّن لاحقاً.



الشكل (14-8): المخطط الصندوقى لمرمّزات التحليل والتركيب.

#### ٤-٣-١-٤.٨ مرمز البتات المستشاره المنتظمة RPE

تعتمد الإشارة المستشاره على مجموعة من نبضات تتكرر بمسافات منتظمة، فإذا افترضنا أن عدد عينات الإشارة المستشاره يساوي  $N_s$  وتحتوي على  $M_R$  نبضة تفصل أصفار

تساوي  $D_R$  حيث إن  $D_R = N_s \text{ DIV } M_R$  تدل على القسمة الصحيحة.  
 يبين الشكل (15-8) إشارة المستشار المستخدمة في هذا المرمز وذلك عند  $N_s = 40$   
 وعدد النبضات  $M_R = 10$  والمسافة  $D_R = 4$ . ويحسب موقع النبضات بالعلاقة:

$$m_R^{(k)}(i) = k_R + i_R D_R \quad k_R = 0, \dots, D_R - 1, \quad i_R = 0, \dots, M_R - 1 \quad (8-59)$$

إضافة مرشح طبقة الصوت إلى الشكل (14-8) يسمى المرمز الناتج **RPE-LTP** حيث اختير مرمز الكلام لنظام الاتصالات العالمية المترددة **Global System for Mobile Telecommunication (GSM)** عند معدل ارسال ببات يساوي  $13 \text{ kb/s}$ . ويستخدم المرمز التبؤ الخطى بطريقة **Autocorrelation Method** ويتم ترميز المعاملات بـ 36Bits وفق الترتيب التالي { 6-5-5-4-4-3-3 }، كما يتم حساب طبقة الصوت باستخدام إطار جزئي من 5 ms ويتم تكميتها بـ 7 bits كل 5 ms، كما يتم تكمية الربع بـ 2 bits كل إطار جزئي، ويتم تكمية موقع البات باستخدام 3 bits لكل نبضة كل 5 ms، وتستخدم 8 bits كمعلومات إضافية كل إطار جزئي. ويعطى معدل إرسال الباتات للمرمز إذاً:

$$\text{Bitrate}\{\text{RPE - LPC}\} = 36 \times 5 + (7 + 2) \times 4 \times 5 + [(3 \times 13) + 8] \times 4 \times 5$$

$$\text{Bitrate}\{\text{RPE - LPC}\} = 1.8[\text{LPC}] + 1.8[\text{Pitch}] + 9.6[\text{CB}] = 13 \text{ kb/s}$$

(60-8)

يعطي هذا المرمز جودة صوت مقبولة  $\text{MOS}=3.6$  عند مختلف ظروف التشغيل إلا أن التأخير الزمني للمرمز كبير ويساوي حوالي  $40 \text{ ms}$ .

$k_1$	000   000   000   000   000   000   000   000   ...
$k_2$	0   000   000   000   000   000   000   000   00
$k_3$	00   000   000   000   000   000   000   000   0
$k_4$	000   000   000   000   000   000   000   000   000

الشكل (15-8): شكل الإشارة المستشار في مرمز RPE عند  $N_s=40$  و عدد البتات  $D_R=4$  والمسافة  $M_R=10$ .

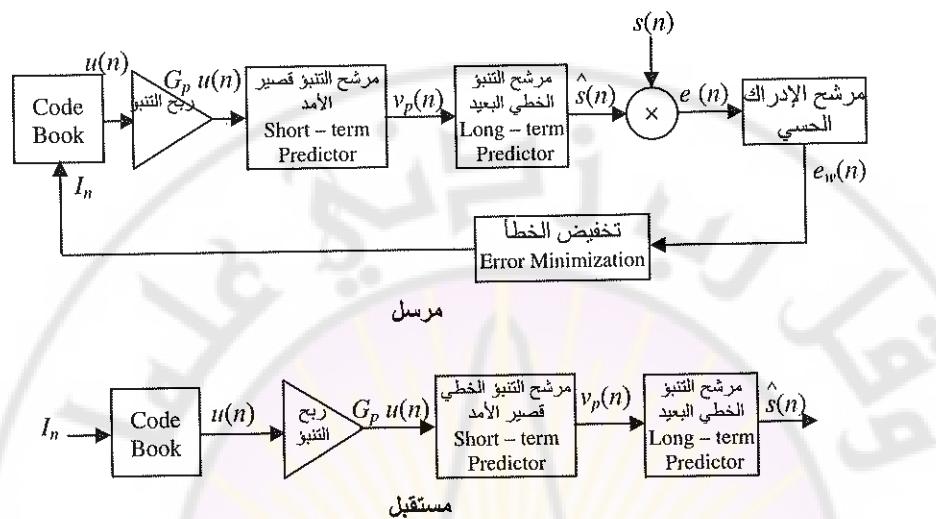
#### ٤-٣-٢- مرمز التبديل الخططي ذي الإشارة الترميزية المستشار CELP

يبين الشكل (16-8) المخطط الصندوقي لرمز CELP. ويعتمد هذا المرمز على أن الإشارة المستشار عبارة عن إشارة شبه عشوائية تخزن ضمن من ذاكرة خاصة تسمى CELP Code Book. ويختلف محتوى Code Book من مرمز إلى آخر، فمثلاً يمكن أن تكون عبارة عن إشارة عشوائية مستقلة ذاتتابع توزيع غوصي، يمكن الحصول عليها من العلاقة التالية:

$$\vartheta_n = \sum_{k=0}^{N_s-1} RA_k \cos\left(\frac{\pi k n}{N_s} + \theta_k\right) \quad n = 0, 1, \dots, 2N_s - 1 \quad (8-61)$$

حيث إن  $N_s=20$  و  $RA_k$  و  $\theta_k$  تابعين عشوائين مستقلين، و  $RA_k$  موزعة توزيع رايلى Rayleigh distributed و  $\theta_k$  موزعة بشكل منتظم Uniform distributed بين 0 و  $2\pi$ . ويمكن أن يحتوي Codebook على إشارات عشوائية مستنيرة من إشارات كلام طبيعية. ولكن أكثر الأشكال انتشاراً هي الكتب الجبرية Algebraic Codebook التي هي عبارة عن أصفار تحتوي في مناطق محددة على قيم +1 أو -1، وهذا الشكل هو المستخدم في كثير من المرمزات المعاصرة الحديثة، وذلك لخفض درجة تعقيد المرمز على نحو كبير. ويبين الجدول (2-8) المستخدم في نظام الترميز المعياري G.729، حيث نلاحظ عدداً

قليلًا من النبضات يمكن أن تكون +1 أو -1 ويتم عندها إرسال فقط قيمةً وموقع هذه النبضات وقيمها إلى المستقبل.



الشكل (16-8): مرمز التنبؤ الخطى ذي الإشارة الترميزية المستثار CELP.

## ٥-٨ المرمّزات المعيارية Speech coder Standards

تقسم المرمّزات المعيارية تبعًا لنظمات الاتصالات المانحة لها إلى ثلاثة أقسامٍ فمنها مرمّزات المعيارية للاتحاد الدولي للاتصالات ITU وتتميز بأنها تحقق جميع خصائص المرمّزات المبينة في الفقرة ٣-٨، أو منظمات معيارية خاصة بالاتصالات الخلوية وهذه المرمّزات تحقق متطلبات الشركة المصممة أو مرمّزات خاصة بمنظمات حكومية. بين الجدول (3-8) مقارنة بين أهم أنواع مرمّزات ITU من حيث: تاريخ الإصدار، معدل إرسال البتات، جودة الكلام، التأخير الزمني و درجة التعقيد، حيث تتميز جميعها بالأداء العالي.

جدول (2-8): تركيب Structure- Algebraic CELP في نظام الترميز المعياري Codebook

النقطة	الإشارة	الموقع
$i_0$	$s_0 = \pm 1$	35, 30, 25, 20, 15, 10, 5, $m_0: 0$
$i_1$	$s_1 = \pm 1$	36, 31, 26, 21, 16, 11, 6, $m_1: 1$
$i_2$	$s_2 = \pm 1$	37, 32, 27, 22, 17, 12, 7, $m_2: 2$
$i_3$	$s_3 = \pm 1$	38, 33, 28, 23, 18, 13, 8, $m_3: 3$
		39, 34, 29, 24, 19, 14, 9, 4

هناك نوعان من نظام الترميز G.711 النوع الأول تستخدموه اليابان وشمال أمريكا ويعتمد على A-Law PCM والنوع الثاني يعتمد على  $\mu$ -Law PCM في بقية أنحاء العالم، نسبة الإشارة للضجيج لكلا النوعين تساوي إلى 35 dB ولهما نفس الجودة، ودرجة تعقيدهما منخفضة، وكلا المرمّزين حساسً لأنحطاء البتات الأكثر أهمية MSB. يستخدم هذا المرمز في معظم التطبيقات الرقمية.

يستخدم نظام الترميز ADPCM المعياري في نظم الاتصالات الهاتفية وفي نظم الاتصالات الهاتفية للأقمار الصناعية، لزيادة المساحة المستخدمة لنقل المكالمات الهاتفية، بالإضافة فإن نظام G.726 يقبل التعامل مع كل من نظامي الترميز A-Law و  $\mu$ -Law PCM و PCM دون أي خفض في جودة الإشارة الكلامية، حيث يمكن لقناة الاتصال أن تحتوي في طرفيها النظامين. في العام 1988 وسع النظام المعياري ليعمل عند معدل إرسال نبضات 24 kb/s و 40 kb/s، وفي العام 1990 عدل لنظام ليعمل عند معدل إرسال نبضات مساوٍ إلى 16 kb/s. ويعد المرمز G.727 مشابهًا للمرمز G.726 ولكن عدل في تصميم المكسي الداخلي لتناسب بعض التطبيقات الخاصة في الاتصالات.

جدول (3-8): مقارنة بين خصائص بعض من مرمّزات ITU للمعيارية.

								الخصائص
ITU	ITU	ITU	ITU	ITU	ITU	ITU	ITU	الجهة المأذنحة للمعيار
G. 723.1	G. 729	G. 728	G. 722	G. 727	G. 726	G. 711		الرمز
1995	1995	1992	1988	1990	1990	1972		تاريخ الإصدار
ACELP	CS- ACELP	LD- CELP	SBC/ ADPCM	ADPCM	ADPCM	Log-PCM		اسم المرمز
5.3 kb/s	8 kb/s	16 kb/s	56.48 46 kb/s	16-40kb/s	16-40kb/s	64kb/s		معدل إرسال البيانات
≤Toll	Toll	Toll	Com.	≤Toll	≤Toll	Toll		الجودة
≤16	≤22	30	10	1	1	≤1		درجة التعقيد: MIPS
2.2 k	2.5 k	2 k	1 k Word	<50 Bytes	<50 Bytes	1 Byte		RAM
37.5ms	15ms	10ms	0.15ms	0.125ms	0.125ms	0.125ms		التأخير الرمزي

إن نظام الترميز G.722 هو عبارة نظام يستخدم لترميز الإشارة الكلامية عريضة المجال Wideband Speech لاستخدامات التي تحتاج إلى نقاء أعلى للكلام، وهو عبارة عن مرمّزين من نظام ADPCM يعملاً ضمن مرمّز المجالات الجزئية SBC والتي ستحدث عنها في الفصل القادم.

يعتمد نظام G.728 في تصميمه على المرمز CELP ولكن عند استخدام إطار صغير يساوي خمس عينات فقط، وذلك للوصول إلى زمن تأخير منخفض. ويستخدم المرمز طرق التنبؤ الخلفي لحساب كل من معاملات التنبؤ الخططي وتردد طبقة الصوت وربيع التنبؤ وذلك لتوفير المعلومات الجانبية المرسلة. ويستخدم المرمز

G.728 في كثير من التطبيقات العالية التقنية إلا أن معظم استخداماته محصورة في الاتصالات عبر الأقمار الصناعية.

بعد نظام الترميز G.729 من أحدث هذه الأنظمة وأكثرها انتشاراً لما له من مزايا عالية ومعدل إرسال منخفض. ويعتمد في تصميمه على مرمز CELP عند استخدام Codebook المبين الجدول (8-2). ويستخدم المرمز في كثير من التطبيقات الحديثة كالاتصالات عبر الأقمار الصناعية الفضائية والاتصالات عبر شبكة الانترنت Internet Telephony، إلى أن أهميته تباع من أن معظم المرمّزات المستخدمة في نظم الاتصالات الخلوية مشتقة من تصميم هذا المرمز. وصمم نظام الترميز G.723.1 ليعمل عند معدل إرسال نبضات 5.6 kb/s بالاعتماد على المرمز G.729 وذلك لاستخدامه في تطوير نظام الهاتف المركي Video Phone المستخدم على الشبكة الهاتفية العامة PSTN.

يبين الجدول (8-4) المواصفات التقنية لبعض المرمّزات الشهيرة المستخدمة في نظم الاتصالات الخلوية، وتحتفي في تصميماها على حسب الجهة المانحة للنظام الاتصالات، فنلاحظ إن هذه المنظمات تقسم إلى ثلاثة: المنظمة الأوروبية لمعايير European Telecommunication Standardization Institutes (ETSI) وهي تقتصر بمنع المعايير لنظم الاتصالات للشركات المصنعة في أوروبا، ومنها الشركات المصنعة لنظم اتصالات المتنقلة GSM. وتقابل هذه المنظمة في دول أمريكا الشمالية منظمة Associations (TIA) والمتبرقة عن منظمة المعايير الأمريكية ANSI. أما في اليابان فتشتمل Research and Development Center System (RCR).

يستخدم نظام الاتصالات الأوروبي GSM نظام الترميز RPE-LPC الذي يعمل عند معدل إرسال نبضات مساوي kb/s 13، بينما يعتمد نظام الترميز المستخدم في الجيل GSM المحسن EGSM أو المستخدم كنصف معدل إرسال البتات على مبدأ مرمز CELP.

جدول (4-8): مقارنة بين خصائص بعض من مرمازات الكلام المستخدمة في نظم الاتصالات المتحركة.

الخصائص							
RCR	RCR	TIA	TIA	ETSI	ETSI	ETSI	الجهة المانحة للمعيار
PDC 1/2	PDC	IS-96	IS-54	GSM 1/2	EGSM	GSM	الرمز
1993	1990	1993	1989	1994	1996	1987	تاريخ الإصدار
PSI- ACELP	VCELP	CELP	VSELP	VSELP	ACELP	RPE- LTP	اسم المرمز
3.45 kb/s	6.7 kb/s	0.8 to 8.5kb/s	7.95kb/s	5.6kb/s	12.2kb/s	13kb/s	معدل إرسال البتات
Com.	Com.	Com.	Com.	Com.	<Toll	<Toll	المجودة
50	20	20	20	30	4.5	4.5	درجة التعقيد: MIPS
4 k	2 k	2 k	2 k	4 k	1 k	1 k	RAM
50ms	25ms	25ms	25ms	25ms	20ms	20ms	التأخير الزمني

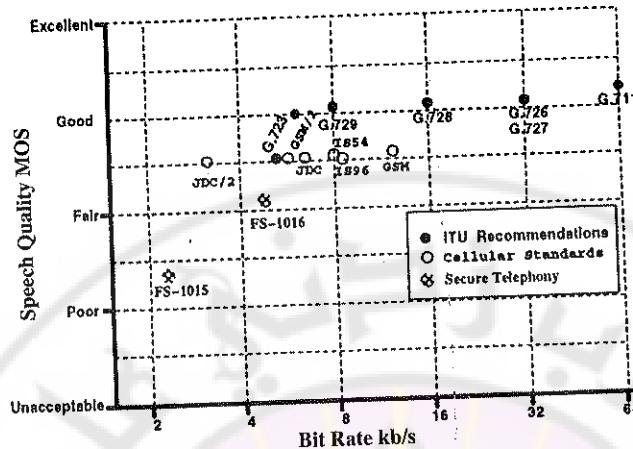
يعتمد نظام الترميز Vector Sum Excited Linear (VSELP) على مبدأ CELP أيضاً ويستخدم في شمال أمريكا في نظم الاتصالات المتنقلة المعتمدة على التجميع بتقسيم الزمن TDMA، بينما يستخدم مرمازات IS-54 و مرمازات IS-96 في نظم الاتصالات التي تعتمد على CDMA. ويتميز المرمز IS-96 بتعديل معدل إرسال البتات حسب طبيعة قناة الاتصال وحالة المتحدث.

يبين الجدول (5-8) السابق مواصفات التقنية لمرمّزي المستخدمين في الاتصالات والمصمم من قبل وزارة الدفاع الأمريكية لاستخدامها في الاتصالات السرية للحكومة الأمريكية ومن ثم تم استخدامهما للاتصالات السرية في حلف شمال الأطلسي NATO. ويعتمد النظام الأول FS-1015 على مبدأ مرّمات التبؤ الخططي، بينما يعتمد المرمز الثاني على مبدأ مرّمات CELP، ويتميز المرمزان بمعدل إرسال نبضات منخفض إلا أن المرمزين هما جودة صوت منخفضة.

جدول (5-8): مقارنة بين خصائص بعض من مرّمات الكلام المستخدمة في نظم الخاصة.

الخصائص		
U.S. DoD	U.S. DoD	المجاهدة المانحة للمعيار
FS-1016	FS-1015	الرمز
1991	1984	تاريخ الإصدار
CELP	LPC Vocoder	اسم المرمز
4.8 kb/s	2.4kb/s	معدل إرسال البتات
Communication	Communication	الجودة
19	20	درجة التعقيد: MIPS
1.5 k	2 k	RAM
37.5 ms	112.5 ms	التأخير الزمني

يبين الشكل (17-8) مقارنة بين جودة الصوت للمرّمات المعيارية حيث نلاحظ أن جودة الصوت لرمّز ITU أعلى من بقية المرّمات عند معدل إرسال نبضات متساوٍ تقريباً.



الشكل (17-8): مقارنة بين جودة مرئيات الكلام القياسية بالنسبة إلى معدل إرسال البيانات.



## الفصل التاسع

### الضغط الرقمي للإشارة السمعية

### Digital Audio Compression

تعد التقنيات الرقمية المستخدمة لضغط الإشارة السمعية من أكثر التطبيقات الحديثة انتشاراً لما لها من مزايا كبيرة عند تخزين أو إرسال الإشارات السمعية عبر قنوات الاتصال. وتختلف هذه التقنيات فيما بينها بدرجة تعقيدها Complexity وبجودة الإشارة السمعية الناتجة Audio Quality وبنسبة ضغط الإشارة السمعية.

سوف نستعرض في هذا الفصل طرق ضغط الإشارة السمعية التي تدعى مرّزات الإشارة السمعية، حيث سنركز على الطرق المعيارية منها والواسعة الانتشار.

#### ١-٩ الإشارة السمعية الرقمية Digital Audio Signal

تقسم الإشارات التي تدخل ضمن مدى الإشارات المسموعة إلى ثلاثة أقسام رئيسية. يتضمن القسم الأول إشارات الكلام ذات المجال الضيق التي تستخدم في معظم مرّزات الكلام، ويتضمن القسم الثاني الإشارات الكلامية ذات المجال العريض Wideband Speech (7kHz) التي تستخدم في بعض التطبيقات الخاصة التي تتطلب جودة أعلى للإشارة الكلامية. ويتضمن القسم الثالث الإشارات السمعية التي تتمدد على مجال ترديي عريض (حتى حوالي 20 kHz). يبين الجدول (1-9) مقارنة بين معدل إرسال البتات لأقسام الإشارات آنفة الذكر.

الجدول (9-1): مقارنة بين المحددات الأساسية للإشارات المسموعة.

معدل إرسال PCM البتاب	مستويات التكميمية	تردد الاعتيان	عرض المجال	
128 kb/s	16 Bits/Sample	8 kHz	300 – 4000 Hz	إشارة كلامية
256 kb/s	16 Bits/Sample	16 kHz	50 – 7000 Hz	إشارة كلامية عريضة
2×768 kb/s	2×16 Bits/Sample	48 kHz	10 – 20000 Hz	إشارات معنية المجال

تتميز المعالجة الرقمية للإشارات السمعية بعديد من المميزات منها: سهولة وإمكانية تحقيق المعالجة رقمياً وعلى نحو يمكن تحقيقه فنياً، والممازنة العالية من أخطاء القناة والضجيج، والوثوقية العالية... الخ، كل هذه المزايا أدت إلى الانتشار الواسع والسرع في هذه المركبات، ولكن يجب أولاً تحويل الإشارة السمعية التماثلية إلى رقمية. وتتم عملية التحويل هذه باعتبار الإشارة التماثلية بتردد اعتيان يساوي إلى ضعف ترددتها الأعظمي. ومن ثم تتم عملية تكميم وترميز الإشارة الناتجة. وتسمى هذه الطريقة - كما رأينا في الفصل السابق - بالتعديل النبضي الترميزي PCM. ومن ثم يتطلب تحويل إشارة سمعية تماثلية إلى إشارة سمعية رقمية إلى:

1. باعتبار أن للإشارة السمعية عرض مجالٍ ترددٍ واسعٍ بين 20 Hz و 20 kHz، وللحصول على جودة عالية للصوت تساوي جودة الإشارة السمعية المسجلة على الأقراص الليزرية CD (تسمى معيار الجودة المثالي CD quality)، يستخدم تردد اعتيان يساوي  $f_s = 44.1 \text{ kHz}$ .
2. باعتبار أن عدد مستويات التكميم (المكسي المتظم Uniform Quantizer) تحدد نسبة الإشارة إلى الضجيج. ومن أجل الحصول على جودة صوت عالية، ونسبة إشارة إلى الضجيج مرتفعة محدودة

96 dB، يستخدم عدد مستويات تكمية يساوي 65536 مستوى تكمية (16 bit لكل عينة).

3. بسبب كون الإشارة السمعية الموسيقية مؤلفة من قناتين (ستيريو)، تكمم كل قناة على نحو منفصل وتعامل معاملة إشارة مستقلة.

لما سبق يمكن الاستنتاج أن معدل إرسال البتات لإشارة سمعية رقمية من نوع PCM ذات جودة مثالية تحسب كما يلي:

$$\begin{aligned} \text{معدل إرسال البتات} &= 44.100 [\text{sample/s}] \times 2 [\text{channel}] \times 16 [\text{bit}] \\ &= 1.41 [\text{Mb/s}] \end{aligned} \quad (9-1)$$

من هنا تبع الحاجة لضغط الإشارات السمعية باستخدام مرّزات الإشارات السمعية Audio Coder. ويجدر التنويه إلى أن بعض التطبيقات الحديثة تتطلب استخدام إشارات سمعية عالية الجودة يفوق معيار الجودة المعياري CD Quality، حيث تستخدم تكمية بمقدار يساوي 24 bits/sample مما يتطلب مساحات تخزين أعلى مما هو متوفّر على القرص المدمج CD حيث يستخدم القرص الشامل الرقمي Digital Versatile Disk (DVD) الذي تفوق سعته التخزينية إلى 4.7 GB.

مثال: يراد تخزين إشارة سمعية ذات جودة معيارية على قرص مدمج CD ذو سعة أعظمية 640 MByte احسب الزمن الاعظمي بالدقة الممكن تسجيله على القرص باعتبار أن كل Bits 16 معلومات تسجل Bits 49 على القرص حيث يضاف مجموعة بитات خاصة بالترامن وبิตات خاصة لتصحيح الأخطاء.

الحل: يعطى معدل إرسال البتات للإشارة السمعية ذات قناتين (ستيريو) وبجودة معيارية  $1.41 \text{ Mb/s}$  حسب المعادلة (9-1). وباعتبار أن كل Bits تسجل على القرص الضوئي 49 فإن معدل إرسال البتات المسجل على القرص يساوي:

$$= \text{معدل إرسال البتات المسجل على القرص} = 1.41 \times 49 / 16 = 4.32 \text{ Mb/s}$$

إن زمن التخزين الأعظمي للقرص يساوي سعة القرص مقسومة على معدل إرسال البتات أي:

$$t_{\max} = \frac{640 \times 1024 \times 1024 \times 8}{4.32 \times 1000 \times 1000} = 1242.7 \text{ Sec} = 20 \text{ Minutes}, 42 \text{ Sec}$$

## ٢-٩ مرمز التعديل النبضي الترميزي اللوغاريتمي السمعي LogPCM

يتميز مرمز التعديل النبضي الترميزي اللوغاريتمي بتحقيقه نسبة ضغط مقبولة نسبياً بالمقارنة بجودة عالية والانخفاض درجة التعقيد، وذلك عند استخدام تقنية ضغط الإشارة Compounding Techniques، فعند استخدام قانون الضغط  $\mu$ -Law compounding يؤدي ذلك إلى إنفاص عدد بذات الازمة لترميز العينة من 11 bits/sample إلى 14 bits/sample. واستخدم هذا المرمز سابقاً في العديد من التطبيقات العملية منها إرسال الصوت في نظام البث التلفزيوني في عدد من المدن الأوروبية.

بالرغم من أن هذه المرمز يتميز بدرجة تعقيد منخفضة وكفاءة عالية فإنه لا يعطي نسبة ضغط عالية بسبب عدم اعتماده على اكتشاف خصائص الإشارة السمعية في خفض معدل إرسال البتات.

### ٣-٩ مرمز التعديل النبضي الترميز التفاضلي المتكيف السمعي ADPCM

يمكن استخدام مرمز ADPCM لترميز الإشارة السمعية في كثير من التطبيقات، حيث يعطي نسبة ضغط مقبولة نسبياً، وذلك باستخدام تقنيات التباين الخطي، وعند استخدام ترددات اعتياد وترميز العينات باستخدام .  
18.9 kHz/ 4bit، 37 kHz/4 bit، 37.8 kHz/8 bit

### ٤-٩ المرمز السمعي الرقمي وفق معيار MPEG

إن الحاجة إلى خفض معدل إرسال البيانات دفعت منظمة العالمية للمقاييس إلى تشكيل مجموعة من الخبراء لتطوير نظام معياري لضغط الإشارات المرئية والإشارات السمعية (إشارة Vedio) دعي المرمز بمرمز مجموعة خبراء الصور المتحركة Moving Pictures Expert Group (MPEG)

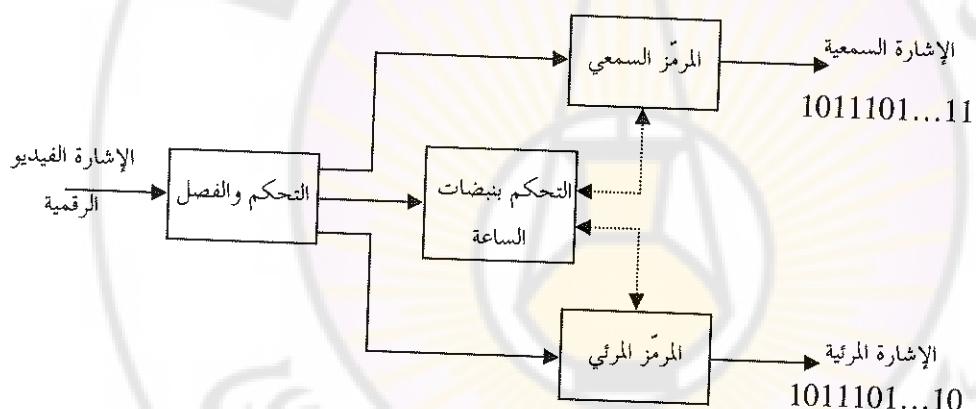
الرمز المعياري الأول هو MPEG-1 ويعطي معدل إرسال البيانات يساوي إلى 1.2 Mb/s لإشارات الفيديو، حيث يعطي جودة إشارة تساوي جودة إشارة نظام الفيديو التماثلي. وتعطي إشارة سمعية ذات قناتين معدل إرسال البيانات يساوي إلى 256 kb/s بجودة إشارة سمعية تساوي إلى جودة المعيارية CD Quality.

الرمز المعياري الثاني هو MPEG-2 ويعطي جودة عالية جداً لإشارات الفيديو، حيث تستخدم في التلفزيون الرقمي. ويعمل إرسال البيانات من 3 Mb/s إلى 15 Mb/s. ويعطي جودة إشارة سمعية عالية باستخدام تعدد القنوات.

الرمز المعياري الثالث هو MPEG-4 ويعطي جودة منخفضة و درجة تعقيد منخفضة لاستخدامه في تطبيقات الهاتف المحمول، كما يمكن أن يعطي جودة عالية جداً بتقنيات متعددة القنوات لاستخدامات متعددة الأغراض.

يتتألف مرمز MPEG عموماً من ثلاثة أقسام: القسم الأول يهتم بضغط إشارة الصوت (الإشارة الموسيقية و الإشارة الكلامية) والقسم الثاني يهتم بضغط الإشارة المرئية (الصورة)، أما القسم الثالث فهو قسم التحكم المسؤول عن التحكم بالنظام بكامله. وبين الشكل (9-1) المخطط الصندوقي لمرمز MPEG. سوف نهتم في هذا المقرر بدراسة مرمز الإشارة السمعية لنظام MPEG وترك شرح عمل النظام بالكامل لمقرر آخر.

قبل البدء بشرح الفصل لرمز الإشارة السمعية في نظام MPEG-1 سنتعرض الخصائص التقنية التي يعتمد عليها مرمز MPEG.



الشكل (9-1): المخطط الصندوقي لنظام MPEG المعياري.

#### ٤-٩ التقنيات اللازمة لرموزات الإشارة السمعية

لقد بينا في الفصل السابق أن مرزمات الكلام تحاول الاستفادة من خصائص جهاز توليد الكلام عند الإنسان لخفض معدل إرسال البيانات، بينما تحاول المرزمات السمعية الاستفادة من خصائص السمع عند الإنسان لتحقيق الهدف نفسه.

## ١-٤-٩ ظاهرة التغطية السمعي Auditory Masking

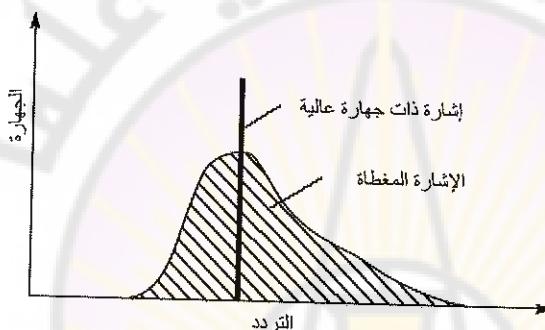
إن تحويل ترددات الإشارة السمعية إلى إشارات عصبية عند الإنسان تتعلق بـ الميكانيكية الخاصة للأذن، وترتبط هذه الميكانيكية بـ ترددات تسمى الترددات التي تحصر بينها مجالات تسمى المجالات الحرجية Critical Band. ويمكن أن نمثل على نحو تقريري نظام السمع عند الإنسان بـ مجموعة مرشحات حزمة BPF لها حزم تمثيل متداخلة، بحيث يكون عرض تمثيل الحزمة للترددات المنخفضة (أقل من 500Hz) يتراوح من 50Hz إلى 100Hz، ويصل عرض الحزمة إلى 5000Hz في الترددات العالية. وتقسم الترددات الحرجية إلى 25 مجال تغطي المجال السمعي المخصوص بين 20Hz إلى 20kHz. ويستخدم لتحديد المجالات الحرجية واحدة خاصة تدعى بالبارك Bark وتحسب وفق ما يلي:

$$1. \text{ إذا كان التردد أقل من } f \leq 500 \text{ Hz} \quad \text{ Bark} = f/100$$

$$2. \text{ إذا كان التردد أعلى من } f > 500 \text{ Hz} \quad \text{ Bark} = 9 + 4 \log(f/100)$$

ظاهرة التغطية هي عبارة عن ظاهرة يلاحظ تأثيرها في المجال الترددية، فالإشارة ذات الجهارة المنخفضة والمجال الترددية الواسع، يمكن أن لا تسمع (تغطى) في حال سماع بنفس الوقت إشارة ذات جهارة أعلى (الإشارة المقنعة Masker) ذات مجال ضيق يقعان في نفس المجال الخرج، ويكون تأثير القناع على الإشارة المقنعة كبيراً إذا وقعا ضمن نفس المجال الخرج، بينما يكون تأثيره ضعيفاً على المجالات الحرجية المتجاورة (أنظر الشكل (2-9)). ويمكن أن تكون الإشارة المقنعة عبارة عن إشارة سمعية ذات جهارة منخفضة أو ضجيج ناتج عن عملية التكميم أو أخطاء القناة.

يمكن أن يظهر ذلك بوضوح عند تطبيق هذه الظاهرة على منحنيات الجهاز  
إذا كان لدينا نغمة ذات تردد  $1 \text{ kHz}$  وجهاز  $60 \text{ dB}$ ، نجد أن هذه النغمة تشكل  
قناع النغمات الأربع المجاورة لها وذات الجهاز الأقل (انظر الشكل (9-3))، تدعى  
القمة التي تشكلها هذه النغمة بالقناع. ونلاحظ من الشكل أن ميلان عتبة القناع أكبر  
من ناحية الترددات المنخفضة عنه في الترددات العالية، أي النغمات ذات الترددات  
العالية تغطي على نحو أسهل من النغمات ذات الترددات المنخفضة.



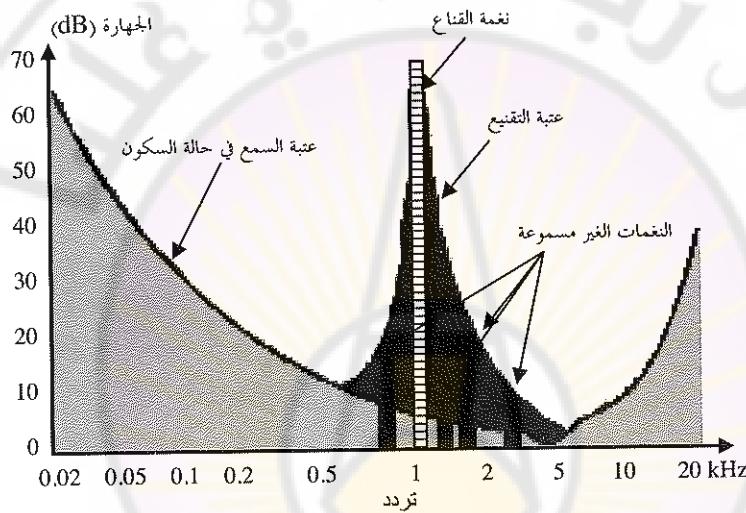
الشكل (9-2): ظاهرة التقليع في السمع عند الإنسان.

يبين الشكل (4-9) العلاقة بين عتبة التقليع، ونغمة النغمة المقمعة، والمحالات  
الخارجية. ويطلق على المسافة بين القناع وبين عتبة القناع نسبة الإشارة إلى القناع  
 $\text{Signal-to-Mask Ratio (SMR)}$ . وتحسب القيمة الصغرى لعتبة القناع من  
تقاطع الطرف الأيسر للعتبة مع المجال الحرج الأصغر (كما هو مبين في النقطة A في  
الشكل (9-4)).

وتعرف نسبة الضجيج إلى القناع  $\text{Mask-to-Noise Ratio (MNR)}$  بالعلاقة  
التالية:

$$NMR (\text{dB}) = SMR (\text{dB}) - SNR (\text{dB}) \quad (9-2)$$

حيث  $SNR$  هي نسبة الإشارة إلى الضجيج الناتجة عن استخدام مكمية من  $m$ -bit. و تتميز الأذن البشرية إضافة إلى هذه الظاهرة بمحنة مرتبطة بالزمن وتدعى التقنيع بالمؤقت Temporal Masking، وتحدث عند سماع نغمتين متتاليتين بفواصل زمنية صغيرة، فإن النغمة ذات الجهارة الأعلى تغطي النغمة ذات الجهارة الأقل مهما اختلف ورود النغمتين (الأقوى ثم الأضعف أو بالعكس والذي يسمى بالتقنيع المسبق Post-masking أو اللاحق Pre-masking).



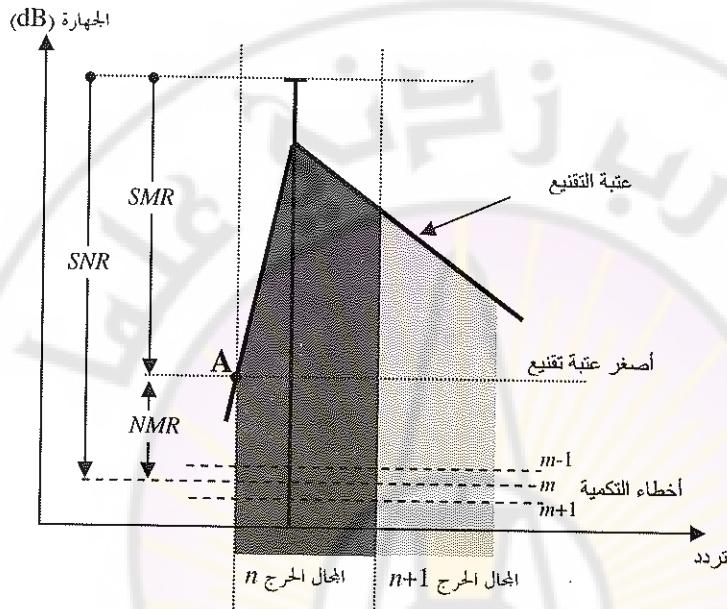
الشكل (9-3): ظاهرة التقنيع باستخدام نغمة بتردد 1 kHz.

إن ظاهرة التقنيع سواءً في التردد أو في الزمن يستفاد منها على نحو كبير في مرمّزات MPEG وذلك لخفض معدل إرسال البيانات كما سنرى لاحقاً.

#### ٤-١-٢ مرمّزات الإدراك الحسي Perceptual Coding

تتميز المرمّزات الموجية Waveform Coders التي درسناها سابقاً بأنها تحاول أن تخفظ بشكل الإشارة بحيث ترمز جزءاً من معلومات الإشارة وذلك لخفض معدل

إرسال البتات (مثلاً تكمية إشارة الفرق في مرمّزات ADPCM)، ولكن يتطلب حفظ معدل إرسال البتات على نحو أكبر الاستفادة من طبيعة الإشارة السمعية ومن خصائص سماع هذه الإشارة. فالمرمّزات الحديثة تحاول:

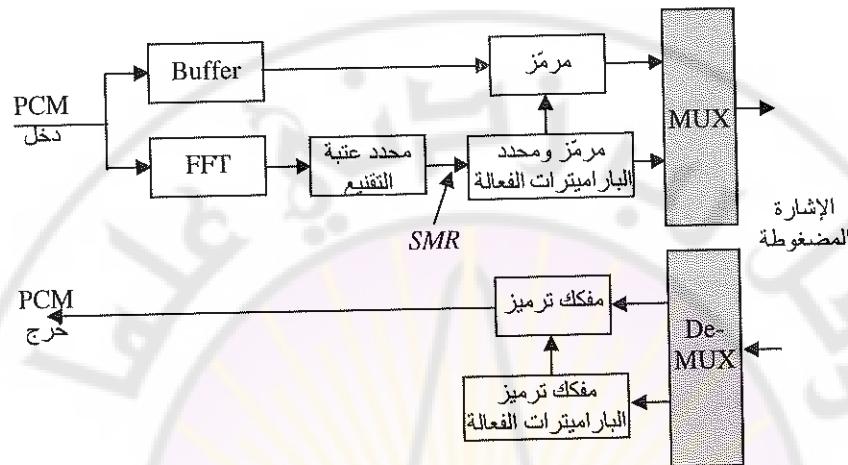


الشكل (4-9): العلاقة بين عتبة التقنيع، نغمة التقنيع، والحالات الخدية.

1. اكتشاف وإزالة التكرار ضمن الإشارة وذلك باكتشاف الترابط بين عينتها.
2. اكتشاف وإزالة أجزاء من مطالات وترددات الإشارة التي لا تسمعها الأذن البشرية (أي الأجزاء المغطاة) لتعطي وفرًا في معدل إرسال البتات.

يبين الشكل (5-9) المخطط الصندوقي لمرمّزات الإدراك الحسي، ويقوم المرمز بتقسيم إشارة الدخول إلى مجالات جزئية باستخدام مصفوفة مرشحات ومن ثم يتم تكمية كل مجال جزئي باستخدام مرمز يتم التحكم به باستخدام نسبة الإشارة إلى القناع  $SMR$  بحيث تحدد هذه النسبة عدد مستويات التكمية لكل مجال ترددی ومن

ثم يتحدد معدل إرسال البتات للنظام. المشكلة هنا تكمن في التحديد الدقيق لعتبة التقسيع في كل مجال حرج، وتدخل تأثير الأقنية بين المجالات المتجاورة.



الشكل (9-5): المخطط الصندوقى العام لمرمّزات الإدراك الحسى.

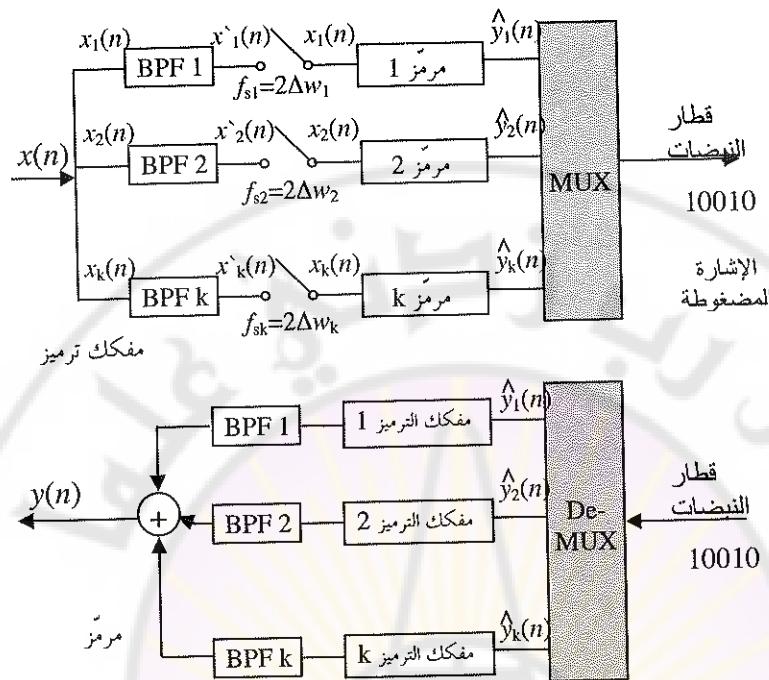
### ٣-٤-٩ المرمّزات التردديّة Frequency Domain Coders

تعتمد المرمّزات التردديّة على فكرة تقسيم المجال الترددي لإشارة الدخول إلى مجموعة مجالات تردديّة جزئيّة بحيث يتم الحصول على مجموعة إشارات غير مترابطة تقريرياً ومن ثم معاملة وترميز كل حيز ترددي على حدة. ومن أشهر أنواع المرمّزات التردديّة هي مرمّزات التحويل (TC) و مرمّزات المجالات الجزئيّة (SBC) Sub Band Coder، باعتبار أن المرمّزين يتبعان نفس مبدأ العمل تقريرياً. ويبين الشكل (6-9) المخطط الصندوقى لمرمّز المجالات الجزئيّة SBC، حيث يمكن تلخيص عمل هذا المرمّز بما يلي:

1. يتم أولاً تصنيف الإشارة السمعية الرقمية (إشارة الدخل) إلى مجموعة مجالات تردديّة جزئيّة عدد هذه المجالات وعرض المجال الترددي لكل مجال جزئي، يتحدد وفق نوع التطبيق ودرجة تعقيد المرمز ومعدل إرسال البيانات المطلوب. ويمكن أن تكون المجالات التردديّة الجزئيّة ذات عرض متساوٍ، انظر الشكل (9-7)(أ)، أو يمكن أن تكون عرض المجالات غير متساوٍ انظر الشكل (9-7)(ب)، أي يمكن أن يتم التقسيم بحيث تتطابق المجالات الجزئيّة مع المجالات الحرجة Critical Bands للأذن البشرية. وتشمل عملية التقسيم باستخدام مجموعة من مرشحات تمرير مجال BPF بحيث نحصل في خرجها على مجالاً محدداً  $\Delta W$  كما هو مبين في الشكل (9-6).

2. تم بعد ذلك إزاحة المجال الترددي إلى التردد الصفرى للقيام بعملية الاعتيان.

3. يتم معاملة كل مجال على أنه إشارة مستقلة بحيث يتم اعتيان الإشارة الجزئية بتردد يساوي إلى ضعف التردد الأعظمي لكل مجال جزئي ومن ثم يتم ترميز كل إشارة على حده باستخدام مرمّزات يتم اختيارها حسب التصميم، على سبيل المثال مرمز التعديل النبضي الترميزى PCM أو مرمز التعديل النبضي الترميزى التفاضلى المتكيف ADPCM أو أي مرمز آخر يتم اختياره، وبالاعتماد على الخصائص التصميمية الخاصة والخصائص المطلوبة من المرمز السمعي لتحقيقها مثل درجة التعقيد وجودة الإشارة الناتجة، يمكن استخدام نوع أو أكثر لكل مجال ترددي بحيث يختار المرمز الأفضل في المجالات التردديّة المنخفضة نظراً لأهميتها.



الشكل (6-9): المخطط الصندوقي لمرمز الحالات الجزئية Sub Band Coder

4. يتم تجميع البتات الرقمية الناتجة عن كل مرمز مع بقية الحالات الأخرى باستخدام MUX للحصول على قطار نبضات يمثل الإشارة المضغوطة للإشارة السمعية.

5. في طرف المستقبل يتم فك ضغط الإشارة بطريقة معاكسة تماماً لما سبق. ويمكن نظرياً الحصول على نفس الإشارة السمعية في دخل النظام إذا تمت عملية التقسيم الترددي والتكمية الجزئية بدون أخطاء.

ويحسب معدل إرسال البتات SBC باستخدام العلاقة التالية:

$$I = \sum_{i=1}^k f_{si} R_i \quad \text{bit / sample} \quad (9-3)$$

حيث  $I$  معدل إرسال البتات، و  $f_{si}$  تردد الاعتيان في المجال الجزئي  $i$  و  $R_i$  عدد البتات المستخدمة في تمييز المجال الجزئي  $i$ . وفي الحالة الخاصة التي تكون فيها المجالات الجزئية ذات عرض مجال متساوي نجد أن:

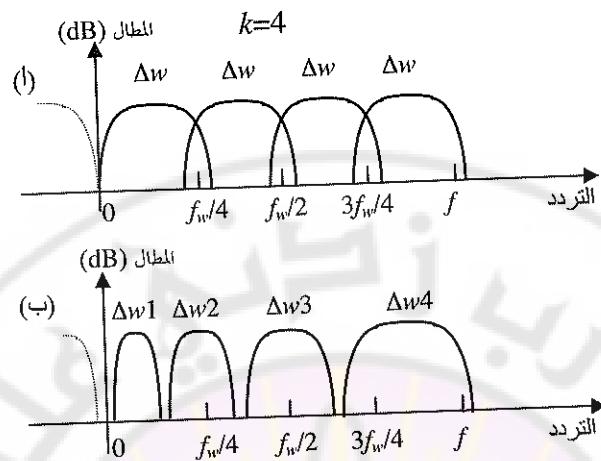
$$\Delta w_i = w/k \quad f_{si} = 2\Delta w_i = 2w/k \quad (9-4)$$

بالتعمويض بالعلاقة السابقة نجد أن معدل إرسال البتات لنظام SBC ذي المجالات الجزئية المتساوية يعطى بالعلاقة:

$$I = \frac{2w}{k} \sum_{i=1}^k R_i \quad \text{bit / sample} \quad (9-5)$$

تكمن المشكلة في عملية تصميم مرشحات تمرير الحزمة بحيث لا تتدخل الجذم الترددية المترادفة فيما بينها كما هو مبين الشكل (9-9)(أ)، وبنفس الوقت يجب أن لا تكون المجالات الترددية متبااعدة فيما بينها بحيث أن جزءاً من الإشارة يمكن أن يضيع ولا يرمّز، كما هو مبين الشكل (9-9)(ب)، حيث إن تصميم مرشحات متماثلة لا يمكن تحقيقه عملياً.

هناك عدة طرق لتصميم المرشحات المترآتية الترابعية Quadrature-Mirror Filter Banks (QMF) أو طريقة مصفوفة المرشحات متعدد الطور Polyphase filter Band.



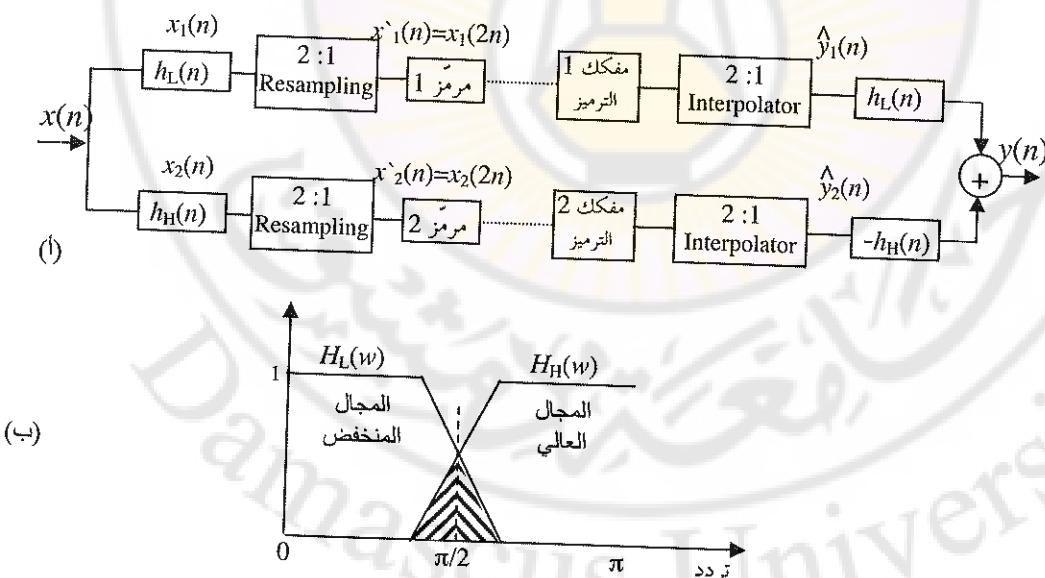
الشكل (7-9): مصفوفة مرشحات تمرير حزمة BPF (أربع حزم). (أ) الحزم متداخلة ومتتساوية عرض المجال، (ب) الحزم متباينة وغير متتساوية عرض المجال.

تعتمد طريقة QMF على استخدام زوج من المرشحات المتماثلة بحيث يتم تقسيم المجال الترددية للإشارة أولاً باستخدام مرشحات تمرير منخفض LPF ومرشح تمرير مرتفع HPF، ومن ثم تقسيم كل حزمة إلى حزمتين باستخدام أيضاً LPF و HPF، وهكذا بحيث يصبح عدد الحزم الناتجة مساوياً إلى  $k=2^N$ ، فمثلاً للحصول على ثمانية مجالات متتساوية، يتم استخدام مجموعة مرشحات على ثلاثة مراحل، ويتم الحصول على حزم غير متتساوية بعد ترشيح أحد الفروع الجزئية. يبين الشكل (8-9) بين المخطط الصندوقى لطريقة QMF المستخدمة في مرمز SBC حيث يبين استخدام مجالين تردديتين فقط.

إن عملية الترشيح هذه تؤدي إلى تداخل في المجال الترددية بين المرشحات المتجاورة Aliasing، كما هو مبين في الشكل (8-9)(ب)، على سبيل المثال الجزء الأعلى من المجال الترددية المخصوص بين  $0$  و  $\pi/2$ ، يدخل كإشارة ضجيج ضمن المجال الترددية المخصوص بين  $\pi/2$  و  $\pi$  (الم منطقة المهشرة في الشكل (8-9)(ب)). ويعتمد هذا

التدخل أو التسريب بين المجالات المتجاورة Interband Leakage على مدى درجة مثالية تصميم المرشحات المستخدمة.

إن إعادة اعتبار الإشارة Resampling بنسبة 2:1 تتم رقمياً بإهمال العينات الروجية أو الفردية من إشارة الدخل والذي يقابل في المجال الترددية إلى اعتبار الإشارة بتردد يساوي ضعف التردد الأعظمي لها. بينما عملية الإستيفاء Interpolator تتم بإيجاد عينات صفرية بين كل عينتين من عينات الإشارة الرقمية، ويقابل بتكرار المجال الترددية، فعلى سبيل المثال إقحام إشارة مخصوصة ضمن المجال الترددية 0 إلى  $\pi/2$  يؤدي إلى تكرار المجال الترددية حول  $\pi/2$ ، هذه الإشارة (الصورة) غير مرغوب بها وتزاح باستخدام مرشح LPF. إن عملية إلغاء الجزء المتسرب من الإشارة تتم بعد جمع Symmetric الإشارة  $y_L(n)$  و  $y_H(n)$  وذلك عند استخدام مرشحات متاظرة Symmetric وغير متاظرة Anti-Symmetric في كل من المرمز وفك الترميز.

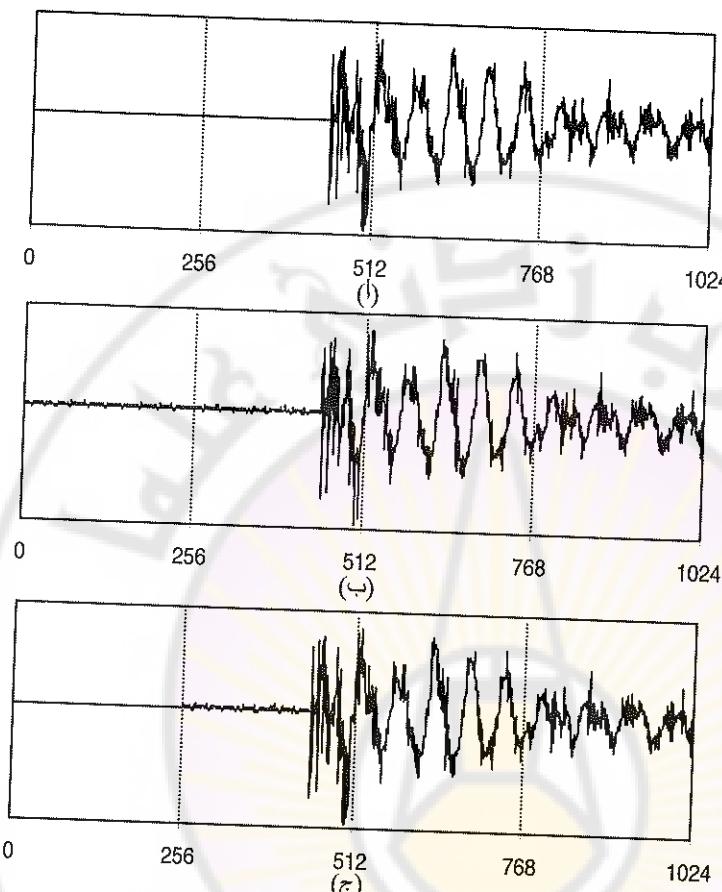


الشكل (8-9): طريقة QMF لتقسيم المجال الترددية إلى مجالات جزئية.

#### ٤-١-٤ ظاهرة الصدى المسبق Pre-Echoes

يمكن ظاهرة أخرى مهمة في المرمّزات السمعية تسمى بظاهرة الصدى المسبق Pre-Echoes، وتحلّى هذه الظاهرة بسماع صوت قبل ظهور الصوت الأصلي، كما يحصل أحياناً في التسجيل التماثلي. وتحدث هذه الظاهرة عند ظهور إشارة سمعية قوية (ذات مطال عالٍ) بعد مدة صمت، مما يؤدي إلى نشوء خطأ تكمية عالٌ، هذا الخطأ يوزع بسبب عملية التكمية على كامل الإطار مما يؤدي إلى نشوء صوت ضجيجي مسموع وملاحظ على نحو جيد. ويمكن الغاء هذه الظاهرة أو تخفيفها باستخدام التقنيّة السابق Pre-masking إذا كان زمن توزيع الضجيج صغيراً، لذلك يجب استخدام إطار Frames صغيراً، ولكن عند استخدام إطار صغير يؤدي إلى زيادة في معدل إرسال البتات للنظام.

يستخدم التبديل بين نوعين من الأطر لحل هذه المشكلة حيث يستخدم: إطار صغير بقياس  $N=64$  عينة، وإطار كبير بقياس  $N=1024$ . ويستخدم الإطار الصغير فقط عند توقع حدوث ظاهرة الصدى الأمامي، أي عند ظهور إشارة سمعية قوية (ذات مطال عالٍ) بعد مدة صمت أما في الحالة العامة فيستخدم الإطار الكبير، وتدعى بطريقة تبديل النوافذ Windows Switching. يبيّن الشكل (9-9) يظهر تأثير ظاهرة الصدى الأمامي على إشارات الخرج عند ضغط الإشارة باستخدام مرمز SBC، حيث يبيّن الشكل (9-9)(أ) إشارة سمعية بطول 1024 عينة وتظهر إشارة ذات مطال كبير بعد مدة صمت. ويبيّن الشكل (9-9)(ب) نفس الإشارة بعد خرج SBC معالجة باستخدام إطار عرض 1024 عينة. ويبيّن الشكل (9-9)(ج) نفس الإشارة بعد خرج SBC معالجة باستخدام إطار عرض 256 عينة تقدّل، حيث يلاحظ ظهور الضجيج في الإطار الثاني فقط.



الشكل (9-9): ظاهرة الصدى الأمامي (أ) إشارة الدخول، (ب) إشارة الخرج عند استخدام إطار بقياس  $N=1024$  عينة، (ج) إشارة الخرج عند استخدام إطار بقياس  $N=256$  عينة.

#### ٢-٤-٩ المرمز السمعي الرقمي MPEG-1

يعد المرمز MPEG-1 المرمز السمعي المعياري المستخدم في تطبيقات مختلفة مثل الأجهزة الصوتية الإلكترونية، الأجهزة الصوتية الاحترافية، الاتصالات و البث الإذاعي والتلفزيوني. ويعطي هذا المرمز كفاءة صوت عالي مساوية إلى معيار الجودة المعيارية للإشارة السمعية CD Quality لإشارة PCM مكمية بـ 16bits. وهناك المرمز المعياري وفق ثلاثة تصاميم Layer III، Layer II، Layer I.

الجدول (9-2) يبين معدل إرسال البتات لإشارة ذات قناتين ستيريو Stereo، للطبقات الثلاث للرمز المعياري MPEG-1 ونسبة ضغط الإشارة مقارنةً لإشارة PCM 16bits.

الجدول (9-2): معدل إرسال البتات للرمز السمعي المعياري MPEG-1.

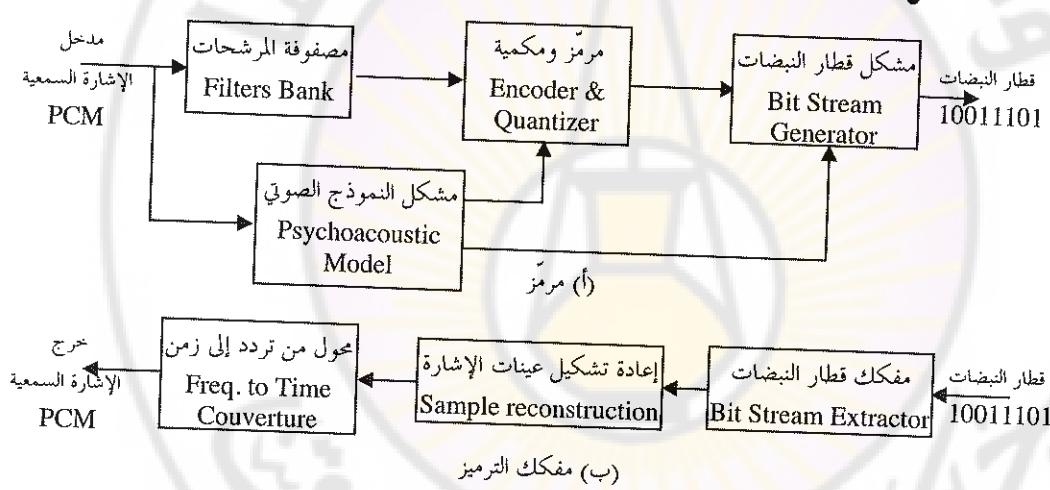
الرمز السمعي MPEG-1	معدل إرسال البتات التقريبي Bit rate	درجة التعقيد	نسبة الضغط
Layer I	384 kbits/s	منخفضة	4
Layer II	192 kbits/s	متوسطة	8
Layer III	128 kbits/s	مرتفعة	12

#### ١-٢-٤-٩ المبدأ العام

يبين الشكل (9-9)(أ) المخطط الصندوقي العام لرمّزات الإشارة السمعية في نظام الترميز MPEG، حيث تقسم إشارة الدخول إلى مجموعة من الحالات الجزئية باستخدام مصفوفة من مرشحات مثل QMF، تعامل كل إشارة طيفية جزئية كإشارة مستقلة، حيث تكمم وتترمّز بعدد محدد من مستويات التكميم بحيث يظل خطأ التكميم أقل من عتبة القناع Masking Threshold ، ، يعنى آخر بحيث يبقى خطأ التكميم غير مسموع. ويتم تحديد عدد مستويات التكميم في كل مجال جزئي على نحوٍ متكيف مع الزمن، حيث يساوي على سبيل المثال إلى 12bit في نظام الترميز I Layer I MPEG-1 أو 36 bit في نظام الترميز II Layer II MPEG-1 أو 36 bit في نظام الترميز III Layer III MPEG-1 . ويتم تحديد المحددات بواسطة مشكل النموذج الصوتي Psychoacoustic Model . ومن ثم يتم تجميع جميع هذه المحددات (عدد البتات عامل نسبة التكميم) بالإضافة إلى الإشارات الجزئية المكممة في كل مجال جزئي بوسطة مجمع Multiplexer لتشكيل قطار البتات Bitstream، حيث يضاف لها

معلومات مساعدة. ويتم في مفكك الترميز الشكل (9-10)(ب) إعادة تركيب الإشارة من المعلومات المتوفرة في قطار النبضات ثم يعاد تشكيل الإشارة مرة أخرى بتحويلها من التردد إلى الزمن.

يعطي مرمز MPEG-1 معدل إرسال بثات لإشارات معتمنة باستخدام ترددات اعتيادية 32، أو 44.1، أو 48kHz، أو 32kb/s لإشارة من قناة واحدة Mono إلى 384 kb/s، 448 kb/s، و 320 kb/s لإشارة من قناتين Stereo.



الشكل (9-10): المخطط الصندوقي العام لرمز السمعي MPEG-1. (أ) المرمز. (ب) مفكك الترميز.

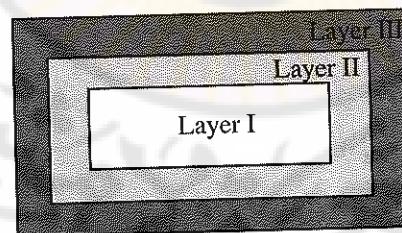
يعمل المرمز MPEG-1 بأربع حالات:

- إشارة سمعية بقناة واحدة Mono.
- إشارة سمعية بقناتين Stereo.
- إشارة سمعية بقناتين منفصلتين تماماً Dual حيث يمكن استخدامها مثلاً لبث أو تسجيل برنامج تلفزيوني بلغتين.

## إشارة سمعية بقناتين سمعيتين مشتركتين .Joint Stereo

يستفاد من التشابه بين القناة اليسرى واليمى في حال Joint Stereo لخفض معدل إرسال البتات باستخدام طريقة تدعى كثافة الستيريو Intensity Stereo، وتعتمد على أن الأذن البشرية ضمن الحالات الحرجية عند الترددات الأعلى من 2 kHz لا تتحسس على نحوٍ كبير لفارق بين القناتين، لذلك فإن القناتين اليمى (R) واليسرى (L) في الترددات العالية تجتمعان (L+R) كقناة واحدة وترمز وترسل. وفي المستقبل يقوم مفكك الترميز بإعادة تشكيل كل من L و R تبعاً لمطال كل منهما. وتستخدم هذه الطريقة عندما يكون معدل إرسال البتات للإشارة يزيد عن معدل إرسال البتات المفروض (او المخصص) للنظام السمعي.

صمم المرمز MPEG-1 بحيث يرمز الإشارة بثلاثة مستويات Layers تتوزع من حيث درجة التعقيد، وزمن التأخير، وجودة الإشارة، فمن وجهة النظر العملية والتصميمية المستوى الأعلى يمكن أن يعمل بالمستويات الأدنى، (أنظر الشكل (9-9))، وبحيث يمكن لمفكك الترميز أن يفك إشارات من مستويات أدنى ولا يفك ترميز مستويات أدنى ولا يفك ترميز مستويات أعلى.



الشكل (9-9): الترتيب الهرمي لمستويات المرمز السمعي - MPEG

## ٤-٢-٢ مشكل النموذج الصوتي Psychoacoustic Model

يقوم مشكل النموذج الصوتي Psychoacoustic Models المبين في الشكل (10-9) بتحليل الإشارة السمعية حيث يقوم بحساب كمية مستوى التقنيع لل المجال الترددية السمعي للإشارة بالاعتماد على جهارة هذه الإشارة، ويقوم أيضاً بالتحكم بمستويات التكمية (معدل إرسال البتات لكل مجال)، ويتم ذلك بالاعتماد على نسبة الإشارة إلى القناع  $SMR$  لكل مجال.

ثمة نوعان من مشكل النموذج الصوتي، النموذج الأول Model 1 وهو النموذج الأقل تعقيداً مقارنةً بالنموذج الثاني Model 2. ويمكن استخدام أي من النموذجين وذلك تبعاً لجودة الإشارة ومعدل إرسال البتات المطلوبين. ويمكن أن نلخص عمل مشكل النموذج الصوتي وبالتالي:

أ- **رصف الإشارة:** يقوم مشكل النموذج الصوتي بتوسيط الإشارة السمعية ضمن نوافذ خاصة تسمى نوافذ التحليل Windows Analysis معها لاحقاً.

ب- **التحويل إلى تردد:** يقوم مشكل النموذج الصوتي بتحويل إشارة الدخل إلى المجال الترددية بشكل مستقل عن مصفوفة المرشحات، وذلك للحصول على استبانة عالية للتردد لحساب عتبة التقنيع Masking Threshold بشكل مستقل. ويستخدم النموذج الأول نافذة تحليل من 512 عينة في Layer 1 و 1024 عينة في Layer 2، ويستخدم النموذج الثاني نافذة تحليل 1024 عينة في جميع المستويات.

ت- **فصل النغمات:** يقوم مشكل النموذج الصوتي بفصل ترددات إشارة النغمات Tonal من الإشارة السمعية. ويتم في 1 فصل النغمات

ملاحظة استطاعتها العالية، بينما لا يفصل النموذج 2 Model 2 النغمات وإنما يقوم بتحديد موقعها فقط.

ث- تحديد عتبة التقنيع: يقوم مشكل النموذج الصوتي بحساب عتبة التقنيع لكل مجال جزئي ففي Model 1 يتم تحديد عتبة التقنيع بأدناه أصغر عتبة من عتبات الحالات الجزئية، بينما في Model 2 يتم تحديد عتبة التقنيع بحساب متوسط عتبات الحالات الجزئية.

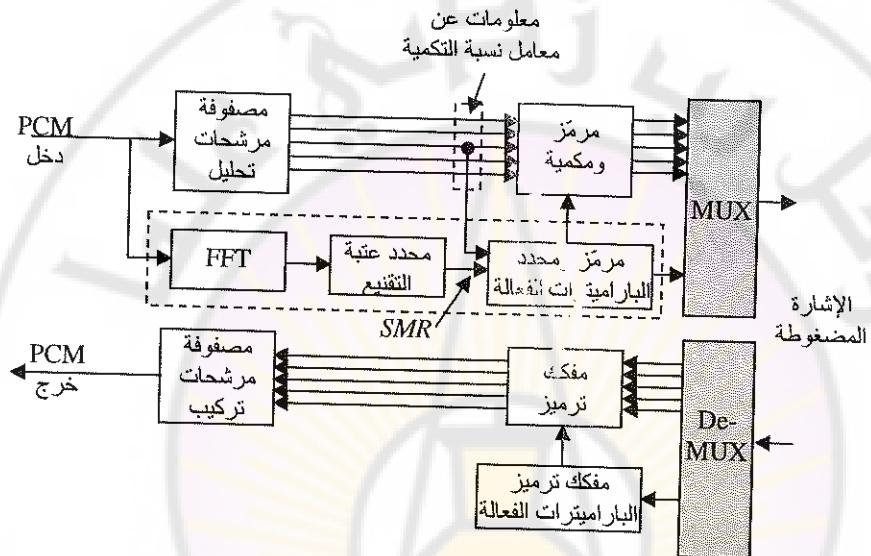
ج- حساب نسبة الضجيج إلى القناع: يقوم مشكل النموذج الصوتي بحساب نسبة الضجيج إلى القناع  $SMR$  لكل مجال جزئي، وهي النسبة بين طاقة الإشارة Signal Energy للمجال جزئي إلى أصغر قيمة لعتبة التقنيع ضمن نفس المجال.

#### ٤-٣-٢ ترميز المعلومات في نظام MPEG-1

تختلف طرق ترميز المعلومات في نظام MPEG-1 تبعاً لمستويات النظام، فلا يختلف مبدأ عمل Layer I و Layer II. ويبيّن الشكل (9-12) المخطط الصندوقي لمرمز Layer I، تقسم إشارة الدخول إلى 32 مجال جزئي بعرض متساوٍ وذلك باستخدام مصفوفة مرسحات متعدد الطور Polyphase Filters ويساوي 750Hz. (إذا افترضنا أن تردد اعتمان إشارة الدخول يساوي 48kHz فإن عرض المجال الجزئي يساوي  $750 \text{ Hz} = 24000/32$ )، أي أن المجالات الخرجية لا تؤخذ بعين الاعتبار. ويعطيتابع الاستجابة البصري لمصفوفة المرسحات وفق العلاقة التالية:

$$h_{sub(i)}(n) = h(n) \cos \left[ \frac{(2i+1)\pi n}{2k} + \varphi(i) \right] \quad k = 32, i = 0, 1, \dots, 31 \\ n = 0, 1, \dots, 511 \quad (9-6)$$

حيث ( $h(n)$ ) النموذج البدائي Prototype لتابع الاستجابة الزمنية المرشح قرير منخفض ويمثل ( $\cos(x)$ ) عملية تعديل لتابع الاستجابة النبضي لإزاحته إلى الترددات المرغوبة. ويمثل  $k$  عدد الحالات الجزرية، كما يمثل  $n$  رتبة المرشح أو ترتيبه، وتمثل  $n$  عدد معاملات المرشح والتي تساوي هنا 512 معامل.



.MPEG-1 Layer I, Layer II الشكل (9-12): المخطط الصنوري لمرمز

يقوم بعد ذلك مشكل النموذج الصوتي Psychoacoustic Models بتحديد عدد مستويات التكميم لكل مجال تردد جزئي، حيث يقوم باختيار مكممة منتظمة Uniform Quantizer ضمن مجموعة محددة مسبقاً وبحيث يكون معدل إرسال البتات وخصائص التقسيم مناسبة. يتم ذلك بشكل تكراري للحصول على أصغر قيمة لنسبة الضجيج إلى القناع  $NMR$  وفق الخوارزمية البسيطة التالية:

1- اختيار معامل التكميم Scalefactor مساوياً للصفر وعدد بتات لكل

مجال جزئي بحيث يعطي أكبر قيمة لنسبة الضجيج إلى القناع  $NMR$ .

2- يجعل  $i=1$ .

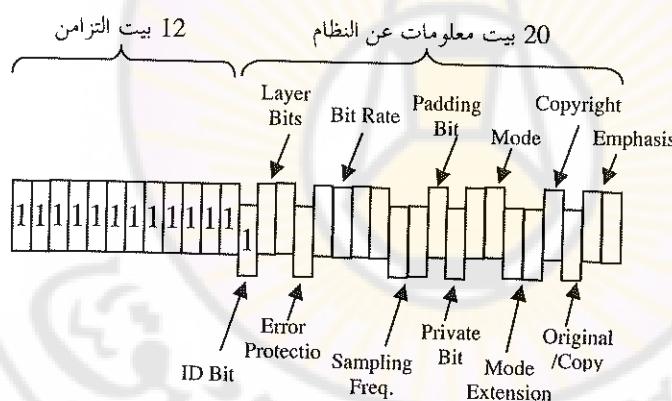
- 3- زيادة عدد البتات للمجال الجزئي  $\neq$  بتاً واحداً فقط.
- 4- يتم حساب نسبة  $NMR(\text{dB})$  وفق العلاقة (2-9) بين  $SMR(\text{dB})$  لكل مجال جزئي وبين  $SNR(\text{dB})$  لكامل النظام.
- 5- يتم مقارنة مجموع عدد البتات اللازمة لتكمية كل مجال جزئي مع عدد برات المطلوب تحقيقه، بحيث لا يجب تجاوزه.
- 6- يتم مقارنة نسبة  $NMR(\text{dB})$  مع النسبة الصغرى الواجب الحصول عليها.
- 7- يجعل  $i=i+1$ .
- 8- العودة إلى الخطوة 3.

تم عملية التكمية باستخدام عملية ضغط Companding على نحو مشابه لنظام LogPCM عند استخدام معامل Scalarfactor نسبة إلى مطالات عينات الإطار. تم تعديل MPEG-1 Layer III لتحسين أداء المرمز، حيث تم تقسيم كل مجال جزئي ليصبح قريباً من الحالات الحرجة، ويتم تكمية كل مجال جزئي باستخدام مكمية غير منتظمة Non-Uniform Quantizer وذلك لتحقيق أصغر متوسط مربعات الأخطاء Mean Square Error وأصغر خطأ تعطية، حيث تستخدم طريقة التحليل والتركيب Analysis-by-Synthesis على نحو متتابع.

#### ٤-٤-٤ تركيب الإطار في نظام ١-MPEG

يبين الشكل (9-13) توزيع البتات في القسم الرئيسي لإطار المعلومات في نظام الترميز MPEG-1 لكل من Layer I و Layer II. و يحتوي هذا القسم على 12 bits مخصصة للتزامن، و 20 bits مخصصة لمعلومات النظام System Information، ويمكن أن يحتوي هذا القسم على 16 bits إضافية مخصصة لترميز القناة وتصحيح الأخطاء.

يبين الشكل (9-14) ترتيب المعلومات في إطار نظام الترميز MPEG-1 Layer I، وعلاقة هذه المعلومات مع بقية المعلومات الأخرى كإشارة الصورة في رزمة نظام الترميز 1. ويحتوي الإطار على جزء خاص بالمعلومات الجانبية Side Information الخاصة بتحديد موقع البتات ومعامل التكمية Scalefactor. ويتبع هذا الجزء القسم الخاص بترميز معلومات الإشارة السمعية المضغوطة أي  $32 \times 12$  bit والمكافئ لترميز 8 ms لنظام الترميز MPEG-1 Layer II من الإشارة السمعية عند تردد اعتيان  $48\text{ kHz}$ . وباعتبار أن المعلومات الجانبية غير ثابتة ومتغيرة مع تغير المعلومات المرسلة فان طول الإطار أيضاً غير ثابت. ينتهي الإطار بقسم خاص يسمى بالمعلومات المساعدة لاستخدامها في التطورات المستقبلية للمرمز.

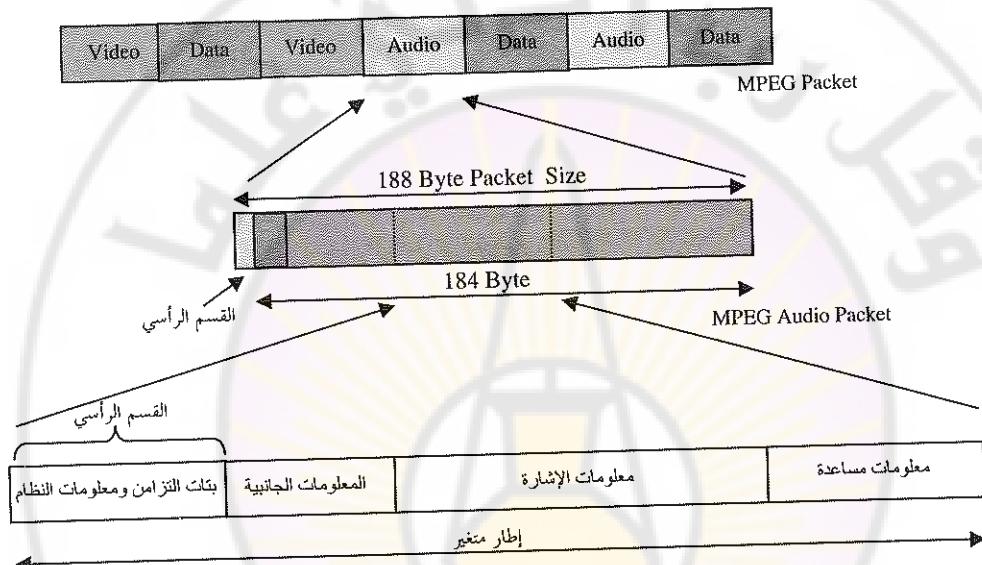


الشكل (9-13): توزيع البيتات في القسم الأول الرأسى للإطار.

#### ٩-٤-٣- المِرْمَزُ السَّمْعِيُّ الرَّقْمِيُّ 2 مُتَعَدِّدُ الْقُنُوَّاتِ

خطوة أخرى أضيفت إلى الأنظمة الرقمية السمعية لجعل عملية سماع الإشارة الصوتية مشابهة للواقع، بإضافة قنوات سمعية أخرى بالإضافة إلى قناتي اليمنى واليسرى لنظام الترميز MPEG-1 ليصبح النظام السمعي متعدد القنوات، وذلك لاستخدامه في

أنظمة حديثة مثل أنظمة المؤتمر المرئي Video Conferencing، الخدمات متعددة الوسائط Multimedia Services، الهاتف المرئي Videophone، السينما الإلكترونية Electronic Cinema. بالإضافة إلى ذلك يمكن لنظام متعدد القنوات أن يحتوي على قنوات خاصة متعددة اللغات Multilingual Channels أو قنوات خاصة بالترجمة المرئية.



الشكل (9-14): تجميع البيانات في رزمة Packet نظام MPEG-1.

الاتصالات الدولية المنظمة اختارات رقم ITU-R 775 المزود بخمس قنوات صوتية Stereo 3/2. ويتكون من القناتين اليسرى (L) واليمنى (R) بالإضافة إلى قناة مركبة Center Channel ويرمز لها — (C)، وقناتين معززتين للقناتين اليمنى واليسرى وتسميان القناتين المحيطتين Surround Channels ويرمز لهما (LS) و (LR). يبين الشكل (9-15) توضع

الصحيح للقنوات الخمس (المجاهر) بالنسبة إلى المستمع وشاشة العرض وذلك لإعطاء المستمع الإحساس الحقيقى للصوت.



الشكل (15-9): توزيع المجاهير في النظام السعى متعدد القنوات.

يسمح النظام متعدد القنوات بعدد من تشكييلات الاستماع تبعاً للحاجة ولمعدل إرسال البيانات المطلوب. وبين الجدول (3-9) تلك التشكييلات والرمز المستخدم لكل تشكيل منها. كما يزود النظام ITU-R 775 طرق خاصة لمرج القنوات في حال عدم توفر المجاهير الالزمة (Downward Compatibility) بالإضافة إلى إمكانية إضافة قناة منخفضة التردد LFE-Subwoofer لتحسين الأداء وخصوصاً في النظام التلفزيوني عالي الوضوح (High Definition TV (HDTV)).

ينقسم نظام الترميز MPEG-2 إلى نظامين معياريين على النحو التالي:

- النظام الأول: يسمى النظام المتاغم الأمامي والخلفي Forward-and Backward Compatible، التاغم الأمامي FC يعني بان مفكك ترميز نظام MPEG-1

MPEG-2 المتعدد القنوات قادر على تشكيل الإشارة السمعية بقناتين أو قناة واحدة من قطار البث المولد باستخدام نظام الترميز MPEG-1. والتناغم الخلفي BC يعني بان مفكك الترميز لنظام الترميز MPEG-1 قادر على تشكيل إشارة سمعية من قناتين من قطار نبضات مولد بنظام الترميز MPEG-2 متعدد القنوات. ويمكن الاستفادة من هذه الخاصية في تطوير الأنظمة السمعية الرقمية وأنظمة البث التلفزيوني الرقمي بحيث تنتقل لهذه الأنظمة من النظام الترميز MPEG-1 إلى النظام الترميز MPEG-2 دون الحاجة إلى تغيير أجهزة المستخدم.

الجدول (9-3): تشكيلات المحتملة لنظام السمعي الرقمي متعدد القنوات المعياري.

القنوات المستخدمة	الرمز	عدد القنوات
Center (Mono)	1/0	1
Right (Stereo), Left	2/0	2
Center, Right, Left	3/0	3
Mono-surround, Center, Right, Left	3/1	4
Surround-, Surround-left, Center, Right, Left right	3/2	5

- النظام الثاني: يسمى النظام اللامتناغم الخلفي Non-Backward Compatible (NBC) الترميز لنظام الترميز MPEG-1 غير قادر على تشكيل إشارة سمعية من قناتين من قطار نبضات مولد بنظام الترميز MPEG-2، إلا أن هذا النظام يحقق جودة أعلى للإشارة السمعية، لأنه يتمتع بحرية أكبر في التصميم حيث يعتمد على تصميم النظام MPEG-1.

#### ٤-٤-٩ النظام المتزامن الخلقي BC في المرمز السمعي الرقمي MPEG-2

وهو نظام قادر على تشكيل قناتي ستريو 2/0 من خمس قنوات 3/2، فإذا رمنا بإشارتي القناتين اليسرى واليمين بـ LO و RO على الترتيب في نظام الترميز MPEG-1، تعطى معادلي التحويل:

$$LO = \alpha(L + \beta C + \delta LS) \quad (9-7)$$

$$RO = \alpha(R + \beta C + \delta RS) \quad (9-8)$$

حيث إن:

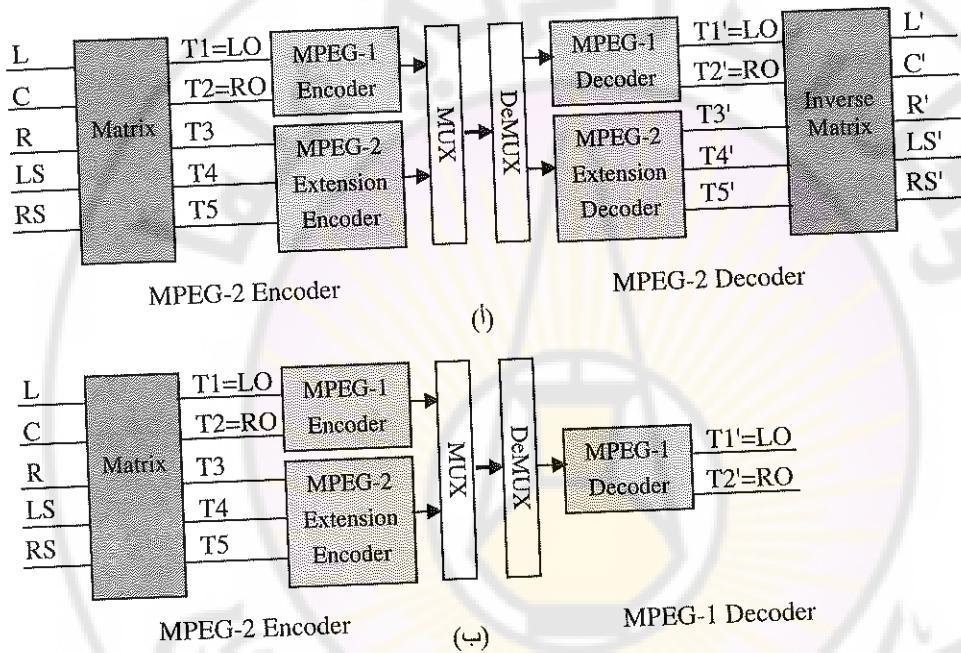
$$\alpha = \frac{1}{1+\sqrt{2}}, \beta = \delta = \sqrt{2} \quad (9-9)$$

إن المعاملات  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  تخدم الإشارات في القنوات المتعددة عند حساب كل من إشارتي القناتين LO و RO وذلك لتجنب حصول تحميل زائد على القناتين اليمين واليسرى. يمكن في بعض الحالات الخاصة أن نجعل:

$$RO = R, \quad LO = L \quad (9-10)$$

إن إشارتي القناتين LO و RO ترسلان في نظام الترميز MPEG-2 ضمن القناتين الأساسيتين  $T1$  و  $T2$  ضمن المنطقة التي ترسل فيها معلومات الإشارة السمعية المضغوطة  $32 \times 12$  bit في نظام الترميز MPEG-1. وترسل إشارات القنوات الإضافية  $T3$  و  $T4$  و  $T5$  ضمن الجزء الخاص بالمعلومات المساعدة بحيث يمكن بمحالة خاصة أن تكون  $T3=C$  و  $T4=LS$  و  $T5=RS$  حيث يمكن أن تتم في نظام MPEG-1. وبين الشكل (9-16)(أ) طريقة إرسال المعلومات في نظام الترميز MPEG-2 بحيث يتحقق التزامن الخلقي BC. وبين الشكل (9-16)(ب) طريقة توليد إشارتي القناتين اليسرى واليمين في حال كون مفكك الترميز المستخدم نظام

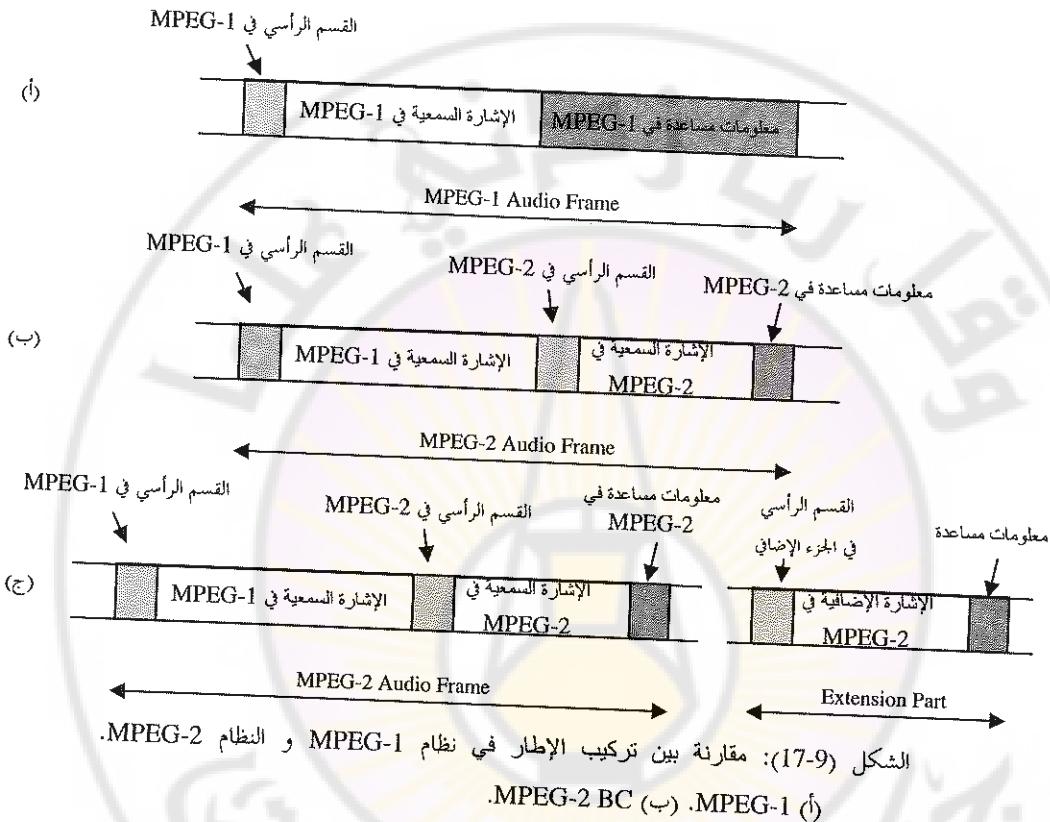
MPEG-1، كما يبين المصفوفة Matrix التي تقوم بحساب المعادلات (9-7) و (9-8) و (9-9) وبين الشكل (9-17) مقارنة بين شكل الإطار في نظام ترميز MPEG-1 ونظام الترميز MPEG-2، حيث نلاحظ أن الجزء الخاص بالمعلومات المساعدة في إطار نظام الترميز MPEG-1 يستخدم لنقل معلومات القنوات المساعدة في نظام الترميز MPEG-2.



الشكل (9-16): طريقة إرسال المعلومات في نظام الترميز MPEG-2. (أ) عند استخدام مفكك ترميز نظام MPEG-2. (ب) عند استخدام مفكك ترميز نظام MPEG-1.

النظام المعياري الثاني يسمى بالنظام الامتناعم الخلفي Non-Backward Compatible (NBC) أو النظام MPEG-2 عالي الجودة Advanced /MPEG-2/ Audio Coding (ACC)، حيث لا يوجد في هذا النظام أي تناغم مع نظام الترميز MPEG-1، ويتمكن باستقلالية تامة عن نظام الترميز MPEG-1 من حيث عدد القنوات الجزئية، طرق

التكمية في كل نظام جزئي، تشكيل الإطار .. الخ. ويعمل هذا المرمز عند معدل إرسال باتات يبدأ من 32 kb/s إلى معدل إرسال يحقق جودة عالية في الإشارة السمعية.



يعتمد نظام الترميز MPEG-2 ACC على مجموعة من التقنيات الحديثة التي تم تعديلها عن نظم السابقة أو مجموعة من التقنيات التي استخدمت لتحقيق أفضل أداء يمكن مع تحقيق أقل معدل إرسال باتات وبنفس الوقت تحقيق أقل تعقيد للمرمز. من هذه التقنيات:

- Time-to-Frequency Mapping
- مصفوفة المرشحات
- Psychoacoustic Modeling
- النموذج الصوت

- التنبؤ الخطي Linear Prediction
- الترميز والتکوید Quantization and Coding

اعتمد النظام MPEG-2 ACC نظاماً معيارياً عام 1997 حيث يعطي هذا النظام جودة إشارة ص��ية عالیة عند معدل إرسال بیات مھصوہ بین 320 إلی 384 kb/s للقنوات الخمس.

#### ٥-٤-٩ المرمز السمعي الرقمي MPEG-4

بعد نظام الترميز MPEG-4 نظام المعياري الأحدث والأكثر تطويراً حيث اعتمد النظام MPEG-4 كنظام معياري عام 1998. يتميز النظام بمعدل إرسال منخفض جداً وجودة تتراوح من جودة إشارة صناعية Synthesis Speech and Synthesis Audio متطلبات المستخدم. و يتراوح معدل إرسال البتات للمرمز من kb/s 2 إلى 64 kb/s حيث تم استخدام عدد من التطبيقات التالية:

- استخدام مرمازات التنبؤ الخطي Parametric Coders للوصول إلى معدل إرسال منخفض.
- استخدام مرمازات التحليل والتركيب Analysis By Synthesis Coders للوصول إلى معدل إرسال متوسط.
- استخدام مرمازات المجالات الجزئية Subband Coders للحصول إلى معدل إرسال عالٍ.
- النموذج الصوتي Psychoacoustic Modeling باستخدام نظام CELP.
- استغلال التشابه بين القناتين اليمين واليسرى Stereo Redundancy.

- التحكم بطبيعة الصوت .Pitch Control
- التحكم الفعال بالرمز للوصول إلى معدل إرسال المطلوب أو إلى الدرجة المطلوبة لتعقيد نظام الترميز.

Structured Audio ضغط الإشارة السمعية باستخدام تقنية البنية السمعية وهي تتيح إمكانية اكتشاف وإزالة تأثير النغمات في الأذن البشرية والتي تتكرر على نحو متشابه. وتعتمد هذه التقنية على خمسة عناصر:

1. البنية السمعية للغة الاوركسترا .(SAOL) Orchestra Language

2. البنية السمعية للغة الموسيقية .(SASL) Language

3. البنية السمعية البسيطة .(SASBF) Format

4. علم دلالات الألفاظ .MIDI Semantics

و. طرق التحكم بكل من SAOL و SASL و MIDI.

اعتمدت أيضاً نظم أخرى منها 3 MPEG-4 Version 4، منها أيضاً نظام MPEG-21 و نظام MPEG-7 وذلك لبعض التطبيقات الخاصة منها تطبيقات الوسائط المتعددة .Multimedia Application

## ٥-٩ التطبيقات العملية لنظام السمعي الرقمي **MPEG**

إن نظام الترميز السمعي الرقمي يسهم إسهاماً مهماً في النظم الرقمية الإلكترونية، الاتصالات، الأنظمة السمعية الرقمية وأنظمة البث التلفزيونية المسمية، وأنظمة الوسائط المتعددة. سوف نذكر هنا بعض التطبيقات العملية التي تستخدم نظام

.MPEG

التطبيق الأهم في مجال الاتصالات هو القدرة على إرسال إشارة سمعية رقمية عبر أنظمة البث الأرضي أو البث عن طريق الأقمار الصناعية، كذلك نقل الإشارات السمعية في الجيل الثالث للهواتف الخلوية، النقل في الشبكات الاتصالات المحلية Local Area Network .. الخ. على سبيل المثال في شبكات Integrated Service Digital Network (ISDN) بالاتصال باستخدام قناة أو قناتين بمعدل إرسال البيانات 64kb/s وقناة B Channel وقناة واحدة 16 kb/s D Channel (والتي تستخدم عادةً لإشارة التحكم ولكن يمكن استخدامها لنقل المعلومات).

الاستخدام والانتشار الأوسع في استخدام نظام الترميز MPEG (والذي يُعرف تجاريًا بنظام mp3) في ضغط الإشارات الموسيقية لتخزينها على نحو أكبر على الأقراص الليزرية CD، وفي وسائل التخزين الرقمية مثل Flash Disk و Digital Taps والتي أصبحت أكثر انتشاراً هذه الأيام. بالإضافة إلى ذلك أصبح بالإمكان نقل وسماع الإشارات السمعية بجودة و كفاءة عالية باستخدام شبكة الانترنت وخصوصاً بعد دخول استخدام السرعات العالية في الاتصالات ضمن الشبكة مثل نظم Digital Subscriber Line (DSL).

التطبيق المهم أيضاً في هو استخدام نظام MPEG متعدد القنوات في صالات السينما لإعطاء انطباع حقيقى للمشاهد السينمائية، هذا التطبيق استخدام أيضاً في تسجيل الأفلام السينمائية على أقراص الـ DVD حيث يتم استخدام حالياً نظام MPEG-2 لهذا الغرض للحصول على كفاءة صوت وصورة عاليين للفلم السينمائى (إلى 3 ساعات) ضمن مساحة تخزين لا تتجاوز 4.7 GB.

نظام البث التلفزيوني الرقمي HDTV يستخدم نظم MPEG-2 في ضغط إشارتي الصورة والصوت المتعدد القنوات ليتم إلى المستخدم بكفاءة عالية وذلك بعرض مجال متساوٍ أو أصغر من عرض مجال المستخدم في نظام البث التلفزيوني التماثلي MPEG-2 Analog Broadcasting Systems. بالإضافة يتم استخدام نظام MPEG-4 لبث القنوات الفضائية التلفزيونية رقمياً عبر الأقمار الصناعية.

#### ٦-٩ مقارنة بين نظم MPEG

يبين الجدول (4-9) المقارنة بين نظم الثلاثة الأوائل من حيث معدل إرسال البتات جودة الإشارة ودرجة التعقيد والتأخير الزمني. ونلاحظ أن نظام MPEG-2 يتمتع بجودة كلام أعلى من نظام MPEG-1 مع أن له معدل إرسال بثات أقل (حيث إن النسبة التي تمثل الصوت المنشود تكون مقصورة بين 4-5%). ونلاحظ أيضاً أن درجة التعقيد تزداد بالانخفاض معدل إرسال البتات.

الجدول (4-9): مقارنة بين الأنواع الثلاث الأولى لنظام MPEG.

نظام	معدل إرسال البتات	نسبة الضغط	الجودة	التأخير الزمني	درجة التعقيد
MPEG-1	384 kb/s	4:1	-	19 ms	منخفض
MPEG-2	128 kb/s	6:1	2.6 إلى 2.1	35 ms	متوسط
MPEG-4	64 kb/s	24:1	3.8 إلى 3.6	59 ms	عال

## الفصل العاشر

### التسجيل المغناطيسي

### Magnetic Recording

هناك طرق عديدة لتسجيل إشارة الصوت أو غيرها من المعلومات، ومن أهمها طرق التسجيل الميكانيكي والصوتي والمغناطيسي. ويتم التسجيل الميكانيكي للصوت عادة بحفر مسارات (أحاديد) حلوانية على قرص خاص مصنوع من الشمع. ويدور هذا القرص دوراناً منتظماً بسرعة محددة (مثلاً 33 دورة في الدقيقة)، بينما يتم حفر المسار (الأخدود) الحلواني بأبرة معدنية قاسية مرتبطة بقلب حديدي ذي ملف يمر به تيار إشارة الصوت. ويكون القلب الحديدي موضوعاً في حقل مغناطيسي منتظم، ويهتز حسب إشارة الصوت، كما هنتر معه إبرة التسجيل، ومن ثم يتعرج المسار (الأخدود) الحلواني تبعاً للإشارة، وبعد ذلك يندر على الوجه المحفور للقرص المذكور هباب الفحم، ثم يوضع في إناء تحليل لكي يصنع له قالب النيكل. وظهور في هذا القالب نتوءات بارزة مقابلة للأحاديد الحلوانية في القرص. ويستخدم القالب للحصول على عدد كبير من النسخ بطريقة الضغط على أقراص (أسطوانات) مصنوعة من اللدائن (تلين بالحرارة وتقسوا بالبرودة).

تم استعادة الصوت من الأقراص يجعلها تدور دوراناً منتظماً بنفس سرعة التسجيل. وتنساق في الأخدود الحلواني لكل قرص إبرة شبيهة بأبرة التسجيل فتهنتر تبعاً لتعريجاته. ويتحرك معها الملف المرتبط بها داخل حقل مغناطيسي منتظم (كما يحصل مثلاً أحياناً عنصر بيزو كهربائي)، فيتولد بنتيجة ذلك جهد متناسب مع إشارة الصوت المسجل، ويكبر هذا الجهد ويعطى إلى المحوار. وتستخدم هذه الطريقة في أجهزة

الغرامفون (البيكاب)، وهي تمتاز بسهولة الحصول على عدد كبير من النسخ للقرص المسجل، و يمكنها أن تؤمن نوعية جيدة لتسجيل الصوت واستعادته ولكنها لا تسمح بإجراء عملية محو للتسجيل، خلافاً لطريقة التسجيل المغناطيسي أو التسجيل الضوئي المشروحتين فيما بعد.

تمتاز طريقة التسجيل المغناطيسي بإمكانية استعادة الإشارة المسجلة فوراً وإنجاز عملية محو التسجيل (أو إزالة المغناطيس) بحيث يمكن استخدام الشريط لتسجيلات جديدة. ويسمح التسجيل المغناطيسي أيضاً بالحصول على مواصفات فنية أفضل من طريقة التسجيل الضوئي حيث الاستجابة الترددية ونسبة الإشارة إلى الضجيج من التسجيل الميكانيكي.

## ١-١٠ عملية التسجيل المغناطيسي التماثلي Analog Magnetic Recording

تعد طريقة التسجيل المغناطيسي من أحد الطرق الأكثر انتشاراً وهي تتم باستخدام رأس مغناطيسي خاص يعطي حقلًّا مغناطيسيًّا متناسباً مع إشارة الصوت وتمرر عبر هذا الحقل شريط مغناطيسي تتمغنه نقاشه بدرجات متفاوتة تبعاً لقيمة الإشارة. وتستعاد الإشارة المسجلة برأس مغناطيسي مناظر يعطي جهداً متناسباً مع درجة تغذى القاطع المختلفة للشريط.

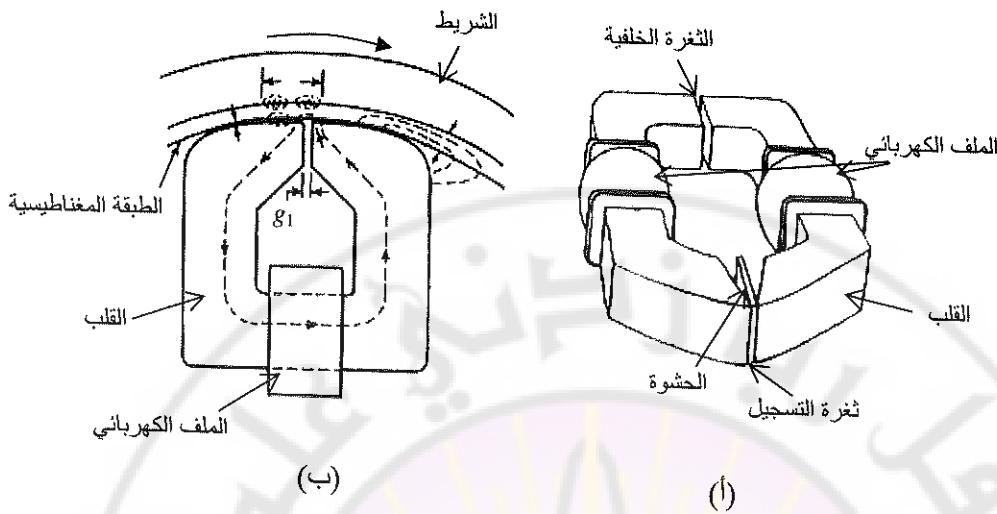
### ١-١-١ مواد الأشرطة المغناطيسية Tape Materials

تعتمد عملية التسجيل المغناطيسي على مقدرة المواد الفيزيومغناطيسية (المغناطيسية الحديدية) على الاحتفاظ بالمغناطيسية بعد إزالة الحقل المغناطيس. ويستخدم من أجل ذلك شريط مغناطيسي يصنع من شريط لدن غير مغناطيسي تقدر سماكته بعشرات микرون.

لتحقيق أكبر قدر ممكن من الاتصال الميكانيكي بأقل قدر ممكن من الاحتكاك يجب أن يكون سطح الشريط ناعماً قدر الإمكان. يطلّى هذا الشريط بطبقة (مسحوق) من مادة مغناطيسية سماكتها  $\mu\text{m}$  25-100، وهي تتالف من دقائق من أكسيد الحديد Gamma Ferric Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) أو فيريت الكوبالت  $\text{CoFe}_2\text{O}_3$ ، ويكون طولها بمحدود  $0.2\text{-}0.7 \mu\text{m}$  وقطرها حوالي سدس طولها، وهي تلتصق على وجه واحد من الشريط المرن بعادة لاصقة غير مغناطيسية، يمرر بعد ذلك تحت حقل مغناطيسي يجعل اتجاه الدقائق باتجاه واحد قبل أن يجف اللاصق، ثم يضاف طبقة من السيليكون Silicone لصقل سطح الشريط لتقليل الاحتكاك مع رأس التسجيل أو القراءة.

#### ٢-١-١٠ رأس التسجيل Recording Head

تم عملية التسجيل على الشريط المغناطيسي Magnetic Tape برأس التسجيل Recording Head. وهو عبارة عن ملف ملفوف على قلب مغناطيسي حلقي ذي ثغرة ضيقة مملوقة بخشوة من مادة غير مغناطيسية، كما هو مبين في الشكل (10-1)(أ). و يصنع القلب من مادة لينة مغناطيسيا ذات نفاذية عالية (من سبائك الحديد و النikel)، بينما تملأ الثغرة عادة بخشوة رقيقة من البلاتين أو أكسيد السيليكون. و يمرر تيار إشارة الصوت المطلوب تسجيلها عبر ملف رأس التسجيل فيفتح في الشق أو الثغرة Gap حقل مغناطيسي متناسب مع الإشارة، يقوم هذا الحقل بمحنطة دقائق أكسيد الحديد في الشريط المار أمام الثغرة.



الشكل (10-1): بنية رأس التسجيل المغناطيسي.

تعتمد عملية التسجيل المغناطيسي الجديدة على تحقيق ثلاثة شروط أساسية وهي: استخدام حقل مغناطيسي قوي بالدرجة الكافية ليترك مغناطيسية دائمة على الشريط المغناطيسي، مرکزة على أصغر مساحة ممكنة على الشريط، ومتناهية تماماً مع إشارة الصوتية. وإن الشرط الأول والثاني يمكن تحقيقهما بسهولة بالتصميم الجديد لرأس التسجيل كما سنرى لاحقاً، بينما يصعب تحقيق الشرط الثالث بسبب أن المواد الفيرومغناطيسية لها خواص غير خطية أصلًا. ويتحدد التدفق المغناطيسي الناتج في قلب رأس التسجيل بالعلاقة:

$$\Phi = \frac{N i}{R_{Mag}} \quad (10-1)$$

حيث  $N$  القوة المحركة المغناطيسية (عدد الأمير لفة)،  $i$  التيار المتناوب المار بالملف،  $R_{Mag}$  عدد لفات الملف.  $R_{Mag}$  المقاومة المغناطيسية الكلية للدارة المغناطيسية لرأس التسجيل، وتساوي إلى:

$$R_{Mag} = R_{Gap} + R_{Core} \quad (10-2)$$

حيث  $R_{Gap}$  المقاومة المغناطيسية للثغرة، و  $R_{Core}$  المقاومة المغناطيسية للقلب المغناطيسي. ولكي تكون العلاقة خطية بين التدفق  $\Phi$  وبين التيار  $i$  خطية بدقة كافية، يفضل أن تكون المقاومة المغناطيسية للقلب المغناطيسي  $R_{Core}$  مهملة بالمقارنة مع المقاومة المغناطيسية للثغرة  $R_{Gap}$ , أي  $R_{Gap} \gg R_{Core}$ . وهذا لا يتحقق إلا إذا كانت الفجوة كبيرة. ومن جهة أخرى ينبغي أن تكون ثغرة التسجيل ضيقه لدرجة كافية. ولذلك تحدث عادة ثغرة غير مغناطيسية أخرى في الجهة الخلفية للرأس (كما موضح في الشكل (10-2)) و يختار عرضها من مرتبة  $\mu\text{m}$  100، بينما تكون ثغرة التسجيل  $\mu\text{m}$  10-1، وعندئذ تتحدد  $R_{Mag}$  أساساً بالمقاومة المغناطيسية للثغرتين، وهي وبالتالي تكون ثابتة تقريباً ولا تعتمد على تيار التسجيل.

تحدد شدة الحقل المغناطيسي في الثغرة بالعلاقة:

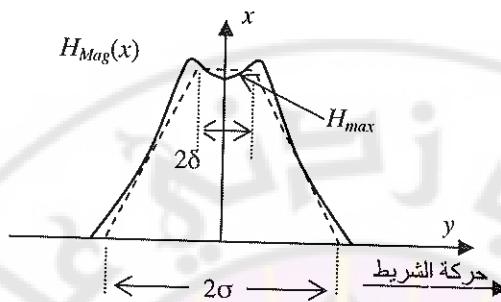
$$H_{Gap} = \frac{\Phi}{\mu_0 S_{Gap}} \quad (10-3)$$

حيث  $S_{Gap}$  سطح مقطع القلب. وبتعويض العلاقة (10-1) وقيمة المقاومة المغناطيسية، في العلاقة (10-3) نجد أن شدة الحقل تساوي:

$$H_{Gap} = \frac{N i}{g_{Gap}} = \frac{N i}{g_1 + g_2} \quad (10-4)$$

حيث  $g_1$  طول الثغرة الأمامية، و  $g_2$  طول الثغرة الخلفية. وتغير العلاقة الأخيرة عن شدة الحقل المنتظم تقريباً داخل الثغرة. أما شدة الحقل الممغنط للشريط فهي تمثل بشدة حقل التسريب بجوار الثغرة، وبالتالي تتغير بمقدار تبعاً للإحداثيات الفراغية ل نقاط الشريط. وبين الشكل (10-2) تغير كثافة خطوط الحقل بتغير الإحداثيين  $x$  و  $y$

(منسوبين إلى نصف طول الثغرة  $\delta$ )، حيث يمثل  $x$  المحور الموازي لطول الثغرة، و  $y$  يمثل المحور العامودي على طول الثغرة.



الشكل (10-2): الحقل المغناطيسي أمام الثغرة.

يختلف شكل تبعية شدة الحقل  $H_{\text{Gap}}(x)$  حسب درجة ضغط الشريط على الرأس، و هو يكون كما في الشكل (10-2) من أجل  $2\delta \approx y$ . و يتضح من الشكل انه يمكن تقرير المنحنى  $H_{\text{Gap}}(x)$  بشبه منحرف قاعدته السفلي  $2\sigma$  (بالقرب من شريط التسجيل) و قاعدته العليا حوالي  $2\delta$  (بالقرب من رأس التسجيل)، أي تمثل قاعدته السفلي بطول الثغرة الفعال Effective Gap Length و قاعدته العليا بطول الثغرة  $g_1$ ، بحيث تكون القاعدة السفلى أكبر من القاعدة العليا. و تتحدد النسبة بين القاعدة العليا والسفلى لشبة المنحرف عملياً بين 1.2 إلى 2.

عند تحرير الشريط أمام رأس التسجيل بسرعة منتظمة  $v$ ، وبافتراض أن العنصر الواقع في بداية الشريط (أي قبل مروره بالمنطقة أمام الثغرة)، سوف يقطع مسافة قدرها  $\sigma$  بزمن وقدره  $\Delta t/2$  ليصبح في منتصف الثغرة وذلك في اللحظة  $t=t_0$ ، أي يبدأ العنصر بدخول حقل التسجيل في اللحظة  $t_0 - \Delta t/2$  و يخرج منه في اللحظة

$$x = v(t - t_0) \quad (10-5)$$

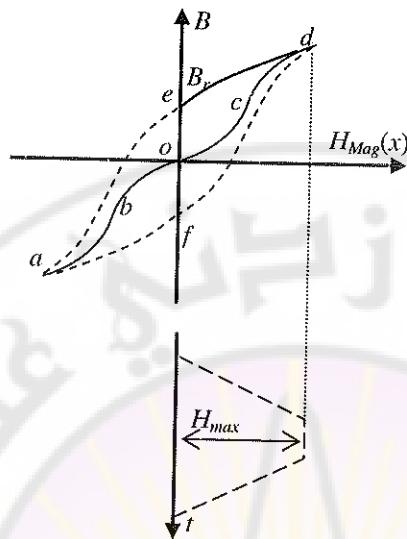
وبالتالي تحول التغيرات الفراغية لشدة الحقل ( $x$ )  $H_{\text{Gap}}(x)$  إلى تغيرات زمنية ( $t$ )  $H_{\text{Gap}}(t)$  لها نفس الشكل.

تحدد المغناطيسية المتبقية Remanent بالشرط حسب منحني المغناطة الأولى (المنحني  $abocd$  في الشكل (3-10)), وهو يبين العلاقة بين المغناطيسية المتبقية في الشرط وبين المغناطيسية المطبقة (منحني التخلف المغناطيسي) وذلك عند تطبيق النسبة المبينة في الشكل (10-2).

يبين الشكل (3-10) المنحني ( $edfa$ ) منحني التخلف المغناطيسي Hysteresis Curve، وتحدد المغناطيسية المتبقية  $B_r$  بنقطة تقاطع منحني التخلف المغناطيسي مع المحور  $B$  (المنحني  $ed$  في الشكل)، وذلك من أجل أي قيمة ما لتيار التسجيل. وعند إمداد تيار إشارة الصوت بملف رأس التسجيل تختفظ عناصر الشرط المار أمامه بقيم مختلفة للتحريض المغناطيسي  $B_r$  تعتمد على تيار الإشارة في لحظة مرور العنصر المعنى أمام ثغرة رأس التسجيل. وعلى هذا النحو تغير قيمة  $B_r$  تبعاً للأحداثي  $x$  (المحسوب عبر طول الشرط اعتباراً من بدايته مثلاً) بنتيجة تغير تيار إشارة الصوت  $i$  مع الزمن.

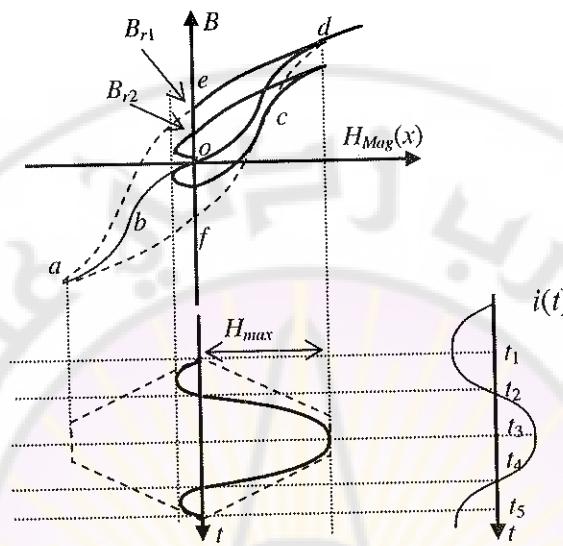
يمكن تحديد التابع ( $x$ ) المقابل للتابع ( $t$ ) $\approx \text{const}$  بالاعتماد على الشكل (3-10) فيما إذا كان بالإمكان اعتبار  $i(t) \approx \text{const}$  عند مرور كل عنصر من الشرط أمام ثغرة رأس التسجيل. ومن أجل ذلك ينبغي أن يكون دور الإشارة المراد تسجيلها  $T$  أكبر بكثير من زمن مرور العنصر أمام الثغرة  $\Delta t$ . وذلك يتحقق عندما يكون طول الثغرة صغير جداً وسرعة التسجيل عالية حيث إن:

$$\Delta t = \frac{2\sigma}{v} \quad (10-6)$$



الشكل (10-3): المغناطيسية المتبقية ومنحني التخلف المغناطيسي.

على سبيل المثال فان معطيات بعض اجهزة التسجيل المهنية المستخدمة في محطات الإذاعة تساوي:  $v=38.1 \text{ cm/sec}$  و  $\sigma=20 \mu\text{m}$  وفي هذه الحال تكون  $(T=2.10^{-2} \text{ Sec})$ ،  $\Delta t \approx 5.10^{-5}$ ، وبالنسبة للترددات المنخفضة مثلاً  $50 \text{ Hz}$  نجد  $\Delta t < T$  و هذا يعني أنه خلال مدة مرور عنصر الشريط في حقل التسجيل لن يتغير تيار التسجيل تغيراً محسوساً من حيث القيمة و من ثم تكون النبضة الممغنطة عندئذ بشكل شبة منحرف متناهراً عملياً كما هي في حال التيار المستمر المبينة في الشكل (10-2). وأما في حال الترددات العالية فان المترادحة  $\Delta t > T$ ، لا تتحقق يتغير تيار التسجيل تغيراً ملحوظاً خلال الفترة  $\Delta t$ ، ونجد أن شكل النبضة الممغنطة يختلف عن شبه المنحرف بدرجة أكبر كلما ارتفع التردد. ومن أجل قيم مرتفعة للتردد أي  $15 \text{ kHz}$  مثلاً، تتميز كل نبضة ممغنطة لأي عنصر من عناصر الشريط بوجود قيم عظمى موجة و سالبة كما في الشكل (10-4).



الشكل (10-4): المغناطيسية المتبقية و منحني التخلف المغناطيسي عند تغير تيار التسجيل بتردد عالي.

نرى من الشكل (10-3) أن النبضة المغناطيسية تكون مخصوصة بين أشباه المنحرف الموجة والسلبية المقابلة لقيمة العظمى الموجة والسلبية للتيار. وإذا أفرضنا أن العنصر يدخل حقل التسجيل في اللحظة  $t_1$  ويعرض لأقصى مغناطيسية في اللحظة  $t_3$  المقابلة لأقصى قيمة موجة للتيار، وينعدم الحقل المغناطيسي في اللحظة  $t_2$ . وبحيث يتعرض العنصر لحقل معاكس تتناقض قيمته على حافة شبة المنحرف المقابل لقيمة التيار في لحظة دخوله وخروج العنصر من الحقل أي  $t_1$  و  $t_5$ .

و في الحال المعنية لا يمكن تحديد المغناطيسية المتبقية لعناصر الشريط بمنحني المغناطيسية الأولي (المنحني  $abocd$  في الشكل (10-3)), وإنما لا بد من أجل ذلك من العودة إلى عروات التخلف على النحو المبين في الشكل. ومن الواضح أن المغناطيسية

المتبقية قد تناقصت من القيمة  $B_{r1}$  إلى القيمة  $B_{r2}$ ، وهكذا تتناقص قيمة المغناطيسية المتبقية مع ارتفاع التردد. ويتحدد التردد الأعظمي لعملية التسجيل تقريريا باعتبار أن  $\Delta t \approx 0.7 T$

$$f_{\max} \approx \frac{0.7}{\Delta t} \approx 0.7 \frac{v}{2\sigma} \quad (10-7)$$

تحدد طول موجة التسجيل بالعلاقة بين تردد إشارة التسجيل وسرعة الشريط  $v$ ، كما بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (10-8)$$

بالتالي يكون الطول الموجي المقابل للتردد الأعظمي لعملية التسجيل يساوي:

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{f_{\max}} \approx \frac{2\sigma f_{\max}}{0.7 f_{\max}} \approx 1.4\sigma \quad (9-10)$$

يعتبر عملياً أن  $\lambda_{\min} \approx 2g_1$  طول الشغرة.

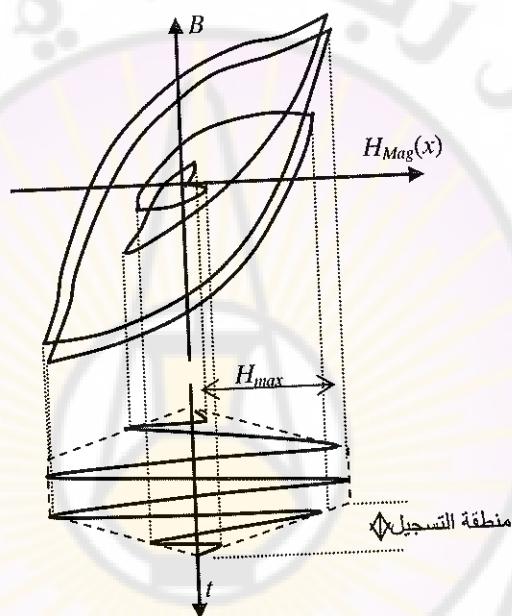
### ٣-١٩. التسجيل باستخدام الانحياز عالي التردد

#### Recording

إن عملية التسجيل المغناطيسي لإشارة الصوت تعطي تشوهات لا خطية كبيرة بسبب لا خطية منحني المغناطة الأولي (المنحني *abcd* في الشكل (10-3)). ويمكن تقليل هذه التشوهات وزيادة قيمة المغناطيسية المتبقية على نحو فعال بإضافة تيار ذي تردد فوق سمعي (حدود 50-150 kHz) إلى تيار إشارة الصوت المطلوب تسجيلها. ويسمى التيار فوق السمعي بتيار الانحياز أو الاستقطاب العالي التردد

High Frequency Bias (HF Bias)

عند إمرار هذا التيار عبر ملف رأس التسجيل دون إشارة الصوت، لا تنتفع عنه مغناطيسية محسوسة نتيجة لارتفاع تردداته، فهي لا تسمع عملياً عند الاستعادة بفضل اختيار التردد في الحال فوق السمعي. وعندما يكون تردد تيار التسجيل مرتفعاً يزداد عدد القمم الموجة والمنفعة للنبضة المغناطيسية ويزداد كما في الشكل (10-5) حالة



الشكل (10-5): المغناطيسية المتبقية ومنحني التخلف المغناطيسي عند الانحياز العالي التردد.

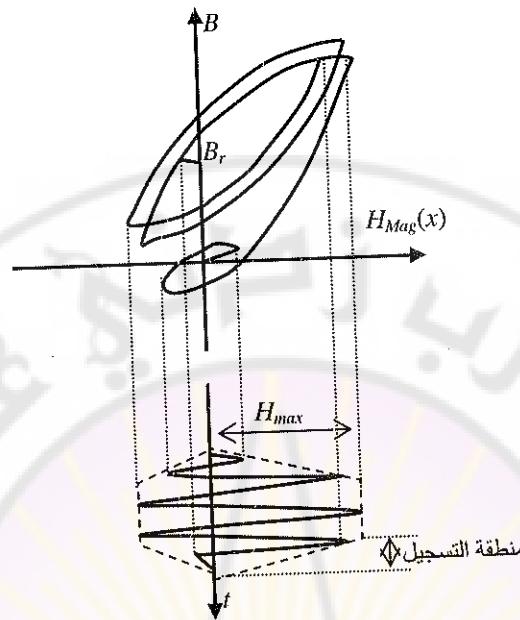
عدم وجود إشارة صوتية. ويمكن اعتبار المقل المعنط لعناصر الشريط في هذه الحالة "معدلاً" من حيث المطال على شكل شبة منحرف، أي له غلاف موجب وغلاف سالب شبة منحرف تقريباً. وبفضل التردد المرتفع والتناظر بين القمم الموجة والمنفعة تغير الحال المغناطيسية لعناصر الشريط بعروات تختلفية متباينة تتسع أكثر فأكثر. و

تصبح عروة تخلفية أعظمية من أجل أعظم قسم موجبة وسالبة ثم تتقلص تدريجياً بعروات متاظرة أيضاً كما موضح في الشكل (10-5). وتكون المغناطيسية المتبقية عندئذ ضئيلة جداً (شبكة معادومة كما في حال حشو التسجيل الموضحة فيما بعد).

عندما تضاف إلى الانحياز العالي التردد إشارة الصوت ذات التردد المنخفض (مثلاً 50 Hz)، تصبح القمم الموجبة و السالبة للنبضة المغناطيسية غير متاظرة كما في الشكل (10-6) لأن النبضة المغناطيسية تكون عندئذ عبارة عن مجموع "النبضة" الممثلة في الشكل (10-5) والنقطة في الشكل (10-4). وبين الشكل (10-6) عملية التماغنط في الحال المذكورة وتتحدد القيمة النهائية  $B_r$  أساساً بقيمة تيار التردد المنخفض.

#### ٤-١-١. عملية إستعادة الصوت المسجل مغناطيسياً **Playback Process**

يستخدم لاستعادة الصوت في المسجلات المهنية (العلمية الجودة) رأس مغناطيسي خاص يسمى رأس الاستعادة بينما يقوم بعمله في المسجلات المترالية (العادية) رأس التسجيل نفسه. وتم عملية الاستعادة بتحريك الشريط المغناطيس أمام الرأس المغناطيسي في الاتجاه نفسه و السرعة نفسها التي ثُمت بهما عملية التسجيل على أن يبقى ملامساً لثغرة (شق) الرأس. و بذلك تنفذ خطوط الحقل المغناطيسي للشريط عبر قلب الرأس. فيتحرض في ملفه جهد متناسب مع سرعة تغير التدفق المغناطيسي الناتج عن الشريط (أنظر الشكل (10-1)(ب)).



الشكل (10-6): المغناطيسية المتبقية ومنحني التخلف المغناطيسي عند تغير تيار التسجيل عند الانهيار على التردد.

يعطى هذا الجهد بالعلاقة التالية:

$$E = N \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (10-10)$$

حيث  $N$  عدد لفات الملف الكهربائي، و  $\Phi_r$  التدفق المغناطيسي الناتج من الشريط المسجل. ويتعلق التدفق المغناطيسي على طول الشغرة، المقاومة المغناطيسية للشغرة، سرعة الشريط، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\Phi_r = \Phi_m \sin \omega(t + \frac{\sigma}{v}) \quad (10-11)$$

حيث  $0 = \frac{\sigma}{V} t + \frac{\omega\sigma}{V}$  لحظة مرور العنصر المغناطيسي بمتصف الشغرة. وتكون قيمة مطال

التدفق المغناطيسي تساوي:

$$\Phi_m = \Phi_0 \frac{\sin \frac{\omega\sigma}{V}}{\frac{\omega\sigma}{V}} \text{ where } \Phi_0 = H'_{\max} \left( \frac{2\sigma}{R_M} \right) \quad (10-12)$$

حيث  $H'_{\max}$  شدة الحقل المغناطيسي الأعظمي لعناصر الشريط، وحيث  $R_M$  المقاومة المغناطيسية للشغرة. وبتعويض العلاقات (10-10) و (10-12) في (10-11) نجد أن القيمة المطلقة لمطال الجهد الكهربائي يساوي:

$$|E_m| = \omega N \Phi_m = \omega N \Phi_0 A_{Factor} \quad (10-10)$$

حيث:

$$A_{Factor} = \frac{\sin u}{u} \text{ where } u = \frac{\omega\sigma}{V} \quad (10-14)$$

يعبر المدار  $A_{Factor}$  عن درجة اختلاف الاستجابة الترددية لرأس الاستعادة. ويتم تعويض هذا الاختلاف في الاستجابة الترددية عملياً باستخدام مكير ذي استجابة ترددية متناسب عكساً مع التردد، فتبقى فقط التشوّهات الترددية المحددة بالمقدار المذكور. وعندما يكون  $\frac{\omega\sigma}{V} < 0.2$  نجد  $A_{Factor} \approx 1$ ، أي يتتناسب جهد خرج رأس الاستعادة طردياً مع التردد، ويغير بمقدار  $6 \text{ dB/Octave}$ . بالإضافة إلى التشوّهات الترددية الناتجة عن المدار  $A_{Factor}$  تنتج تشوّهات ترددية أخرى بتأثير ظاهرة الإزالة الذاتية للمغناطيسة Self Demagnetization Loss وتفسر هذه الظاهرة بأن التحرير المغناطيسي المتبقّي في أي قضيب من مادة مغناطيسية معينة يكون أقل من التحرير المتبقّي في دارة (حلقة) مغناطيسية من نفس المادة.

## ٥-١-١٠ عملية محو التسجيل Erasing

يتم محو التسجيل عادة بإزالة مغناطيسة الشريط قبل دخوله إلى حقل رأس التسجيل، وذلك بإمراره أمام رأس مغناطيسي خاص يسمى رأس المحو Erase Head وتكون ثغرة هذا الرأس عريضة نسبياً حوالي  $100 \mu\text{m}$ ، ويغذى ملفه بتيار مرتفع التردد يُؤخذ عادة من نفس المذبذب الذي يولد تيار الانكماش عالي التردد، اللازم لعملية التسجيل، ويكون تردداته كما ذكرنا سابقاً بحدود  $50-150 \text{ kHz}$ . وفي هذه الحالة تتعرض عناصر الشريط عند مرورها أمام رأس المحو إلى الحقل متزاوب التردد ومرتفع يتزايد مطاله ثم يتناقص تدريجياً بحيث يكون غالفاً الموجب غالفاً السالب بشكل شبه منحرف كما في الشكل (2-10)، وبالتالي التزايد التدريجي لمطال القمم الوجبة والسالبة للحقل، تتغير الحالة المغناطيسية لكل عنصر من عناصر الشريط وفق عروات تختلفية متعاظمة حتى تصل إلى عروة التشيع (عروة الاعظمية).

في بعض الحالات يتم محو التسجيل بمغناطيسة الشريط حتى التشيع بواسطة حقل مغناطيسي دائم، وذلك بإمرار تيار مستمر مثلاً عبر رأس المحو، وعندئذ تختفظ عناصر الشريط عند خروجها من رأس المحو بمغناطيسة متبقية أعظمية، وبالتالي تصبح جميع عناصر الشريط بحالة مغناطيسية واحدة، وهذا يكافيء محو المعلومات المسجلة عليه.

## ٦-١-١٠ خصائص الشريط ومقاساته Tape Dimension and Properties

يتم الحصول على نوعية عالية لتسجيل الصوت واستعادته مغناطيسياً بأجهزة التسجيل المهنية المستخدمة في محطات الإذاعة. وتتضمن هذه الأجهزة ثلاثة محركات يستخدم أحدها لتأمين الحركة، والآخر للف الشريط، ويستخدم الثالث لفرملة البكرة العاطية.

في أجهزة التسجيل المهنية يكون عرض شريط التسجيل حوالي 6.35 mm (0.25 in) وبسماكه لا تزيد عن 0.055 mm، ويتم تحريكه بسرعة 38cm/sec أو سرعة 19 cm/sec. وفي أجهزة التسجيل المترية الكاسيت، يستخدم فيها شريط عرض 3.81 mm (0.15 in) وبسماكه لا تزيد عن 0.0203 mm، ويتم تحريكه بسرعة 4.76 cm/s الشريط بسرعة منخفضة قدرها 4.76 cm/s باستخدام محرك واحد.

يبين الشكل (10-7)(أ-ب) ترتيب مسارى التسجيل على الشريط المهني  $\frac{1}{4}$  in في تسجيل بقناة واحدة أو قناتين. ويبين الشكل (10-7)(ج-د) مسارات التسجيل في شريط الكاسيت بقناة واحدة أو قناتين، حيث يستخدم رأس لتسجيل إشارتي الميكروفون الأيمن والأيسر برأس تسجيل مزود برأسين. ويبين الجدول (1-1) مقارنة للقيم العملية المستخدمة في كل من نوعي الشريطين المهني ( $\frac{1}{4}$  in) وشريط الكاسيت (0.14 in).

## ٢-١٠ عملية التسجيل المغناطيسي الرقمي

بالرغم من التطور الكبير والانتشار الواسع لطرق التسجيل المغناطيسي التماثلي إلا أن جودة التسجيل تبقى منخفضة نسبياً فهي لا يمكن أن تفطى الحال الديناميكى الواسع للأجهزة الموسيقية (مثلاً من قيمة منخفضة جداً 42 dB لآلة موسيقية منخفضة الطاقة الصوتية كالفلوت Flute وبين الآلة موسيقية عالية الطاقة الصوتية 120 dB كالطبل Drum). وكذلك يتميز التسجيل المغناطيسي التماثلي بنسبة إشارة إلى الضجيج منخفضة، بالإضافة إلى الالاحطية والتشويه الترددى والأخطاء الناتجة عن عملية التسجيل المغناطيسي نفسها، لذلك كان الانتقال إلى التسجيل المغناطيسي الرقمي وخصوصاً في أجهزة التسجيل المهنية المستخدمة في محطات الإذاعة لما يتميز به التسجيل المغناطيسي من مميزات منها التحكم بجودة الإشارة Quality Control،

خفض الضجيج الناتج عن أخطاء التسجيل أو التداخل بين القنوات والتشویهات المحيطة.

في هذا القسم سوف نستعرض فكرة مختصرة عن الشريط المغناطيسي السمعي الرقمي (Digital Audio Tape Recording (DAT)، وبدأ الكاسيت الرقمي Digital Compact Cassette (DCC)، وسفرد للتسجيل الصوتي كالقرص المدمج Optical Recording Compact Disk (CD) والقرص الشامل الرقمي Digital Versatile Disk (DVD).

الجدول (10-1): المقارنة بين نوعي الشريط المغناطيسي التمثيلي.

شريط الكاسيت	الشريط المهني	
مغلفة داخل كاسيت	بكرة مفتوحة	طبيعة البكرة
2	2	عدد قنوات التسجيل الأعظمي
4	4	عدد المسارات
0.15in (3.765mm)	0.246in (6.1746mm)	عرض الشريط
4.76cm/s	38cm/sec - 19cm/sec	سرعة الشريط
0.4%	0.2%	الدقة في السرعة
66dB	66dB	نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR
76dB	70dB	محو التسجيل
50B	65dB	التداخل بين القنوات Crosstalk
1	2-3	عدد المحرّكات
20Hz-20kHz	20Hz-20kHz	المجال الترددي

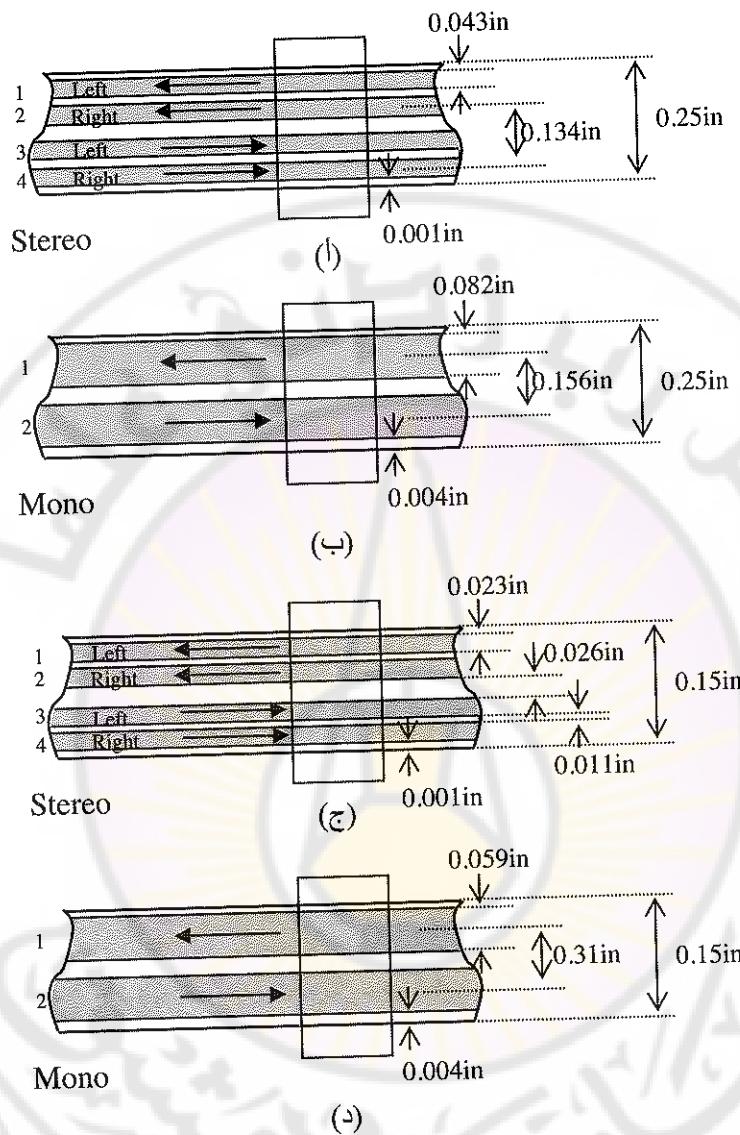
## ١-٢-١٠ المبدأ العام General Principle

يعتمد المبدأ العام في التسجيل الرقمي للإشارة السمعية على تحويل الإشارة السمعية التماثلية إلى إشارة سمعية رقمية بالطرق التحويل المعتادة وأشهرها طريقة نظام الترميز البصري المرمز PCM. وتستخدم في عملية التسجيل ثلاثة ترددات اعتیان: التردد الأول: 32 kHz ويستخدم في بعض التطبيقات الخاصة بمؤسسات الإرسال الإذاعي أو التلفزيوني، والثاني 48 kHz للتطبيقات الخاصة بتبادل البث بين المحطات الإذاعية، و الثالث 44.1 kHz للتطبيقات الخاصة بالمستهلكين. ويتم تكمية عينات الإشارة بـ 16 bits/Samples لخطية مجال واسع من الإشارات السمعية تتراوح نسبة الإشارة

إلى الضجيج بين 16 dB و 96 dB.

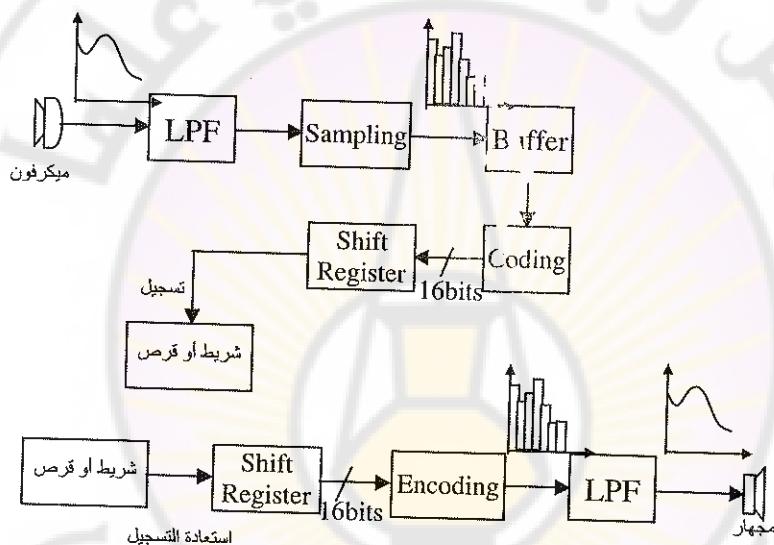
يبين الشكل (10-8) المبدأ العام المستخدم في التسجيل الرقمي السمعي، حيث تحول الإشارة السمعية إلى إشارة رقمية أولاً ومن ثم يتم تسجيلها رقمياً على الشريط المغناطيسي. ولتحقيق التوافق بين عملية القراءة والتسجيل يتم إضافة مجموعة من المعلومات الثانوية ومعلومات خاصة بالتزامن إلى معلومات الإشارة السمعية، وتضيف بعض الأنظمة معلومات خاصة بتشغير القناة وذلك لحماية الإشارة السمعية من الأخطاء وتصنيفها عند اللزوم.

لقد حددت المنظمات العالمية مواصفات خاصة للإشارة السمعية المسجلة مغناطيسيًا أو ضوئيًا وفق مقاييس خاصة لتمكن معظم الأجهزة من استعادة الإشارة، حيث تسجل الإشارة السمعية باستخدام إطار من 32 Bits لكل قناة سمعية، أي يتم



الشكل (7-10): ترتيب مسارات التسجيل في الشريط المغناطيسي (أ) شريط  $\frac{1}{4}$  بقناة واحدة. (ب) شريط  $\frac{1}{2}$  بقناة. (ج) شريط كاسيت بقناة واحدة. (د) شريط كاسيت بقناة. ( $1\text{in}=25.4\text{mm}$ ).

تسجيل إطارين من المعلومات لإشارة الستيريو. ويبدأ الإطار بأربعة بитات خاصة للتزامن وذلك لتأمين تزامن المبدل التماثلي الرقمي، تليها أربعة بิตات تخصص لإرسال معلومات عن الإشارة السمعية أو تحديد نوع القناة، أو يمكن استخدامها لإرسال جزء من الإشارة السمعية. ويتخصص 24 bits لإرسال معلومات عن الإشارة السمعية، وتليها أربعة بิตات خاصة بتعريف النظام وكشف الأخطاء. ويبين الشكل (9-10) تشكيل الإطار المستخدم في تسجيل المعلومات السمعية رقمياً.

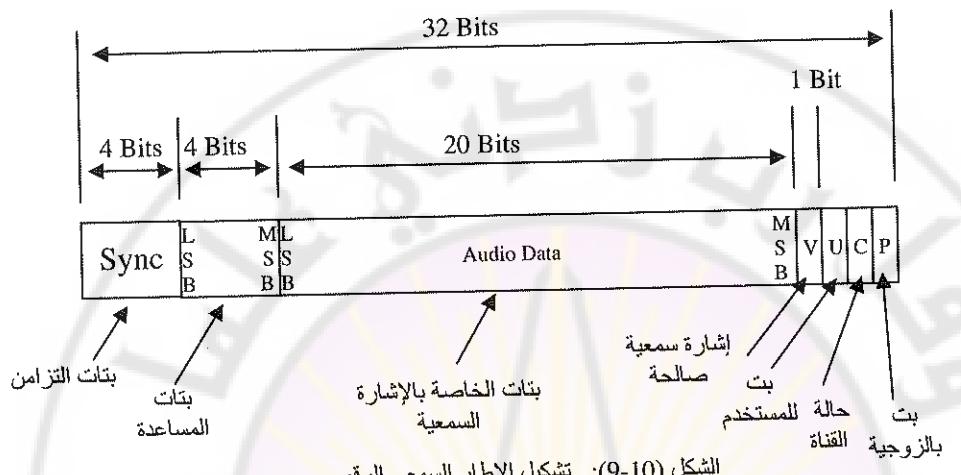


الشكل (10-8): المبدأ العام للتسجيل السمعي الرقمي.

## ٢-٢-١٠ الشريط المغناطيسي السمعي الرقمي (DAT)

إن انتشار الشريط المغناطيسي المستخدم في تسجيل إشارات الفيديو أدى إلى نشوء الشريط المغناطيسي الرقمي DAT، حيث استخدمت التقنية الرقمية لتسجيل الإشارة السمعية الرقمية على شريط الفيديو. ونتيجة لانتشار الواسع للشريط المغناطيسي أدى

إلى نشوء الشريط المغناطيسي الرقمي الخاص بالإشارة السمعية، وإلى نشوء المسجلات الرقمية وذلك لاستخدامها في تطبيقات المهنية، وستديوهات التسجيل، وشركات التسجيل.



الشكل (9-10): تشكيل الإطار السمعي الرقمي.

يوجد نوعان من طرق التسجيل، التسجيل الحلزوني Helical وطريقة التسجيل متعدد المسارات باستخدام الرأس الدوار (كالرأس المستخدم في أجهزة الفيديو). ويبين الجدول (10-2) مواصفات الشريط المغناطيسي الرقمي.

الجدول (10-2): مواصفات الشريط المغناطيسي الرقمي.

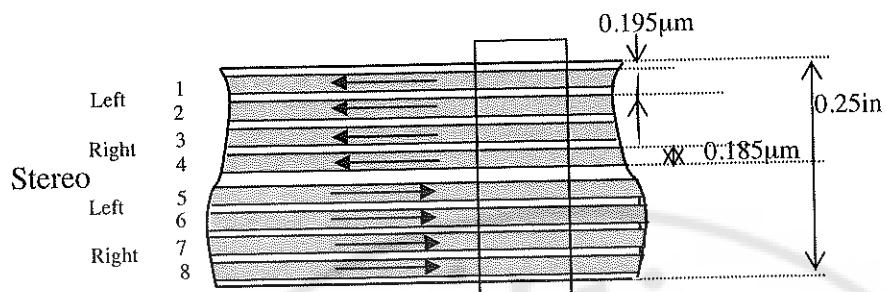
الشريط الرقمي لإشارة PCM	
قناة واحدة لكل مسار تسجيل	عدد قنوات التسجيل الأعظمي
0.5in (12.7mm)	عرض الشريط
70.01cm/sec – 44.1 kHz 76.20cm/sec – 48.0 kHz	سرعة الشريط
16bits/Sample	الترميز
90dB	مجال الإشارة الأعظمي
0.05%	التشويه أقل من:
20Hz-20kHz	المجال الترددية

## ٣-٢-١٠ الكاسيت المغناطيسي الرقمي (DCC)

لحماية الشريط المغناطيسي من المخدوش والتلف الميكانيكي تم تصميم الكاسيت المغناطيسي الرقمي DCC. وصمم الكاسيت بشكل يشابه الكاسيت التماثلي لتمكن آلة التسجيل والاستعادة من قراءة أو تسجيل إشارة رقمية أو إشارة ثنائية معاً. و تم استخدام مرمز إشارة سمعية خاص لضغط الإشارة السمعية قبل تسجيلها رقميا على الشريط المغناطيسي. لتحقيق جودة مساوية إلى جودة CD Quality بنفس سرعة العرض المستخدمة في الشريط التماثلي أي للحصول على نفس زمن العرض. استخدم Precession Adaptive Sub- لذلك الغرض مرمز الحالات الجزئية المتكيف SBC، وهو يستخدم نفس مبدأ مرمز الحالات الجزئية Band Coding (PASC) ولكن بتكييف مستويات التكميمية.

يمكن تسجيل إشارة سمعية على DCC واستعادتها باستخدام إشارات سمعية معتنقة بترددات 32 kHz أو 44.1 kHz أو 48 kHz، عرض حزمة جزئية مساوية 8ms أو 8.7 ms أو 500 Hz أو 690 Hz أو 750 Hz وباطار يساوي 12 ms على الترتيب.

يتم تقسيم الشريط المغناطيسي في DCC إلى ثمانية مسارات أربعة مسارات منها للاتجاه الأمامي والأربعة الأخرى للاتجاه الخلفي. وبين الشكل (10-10) تقسيم المسارات في الشريط المغناطيسي لنظام DCC.



الشكل (10-10): ترتيب مسارات التسجيل في الشريط المغناطيسي الرقمي DCC .



# الفصل الحادي عشر

## التسجيل الضوئي

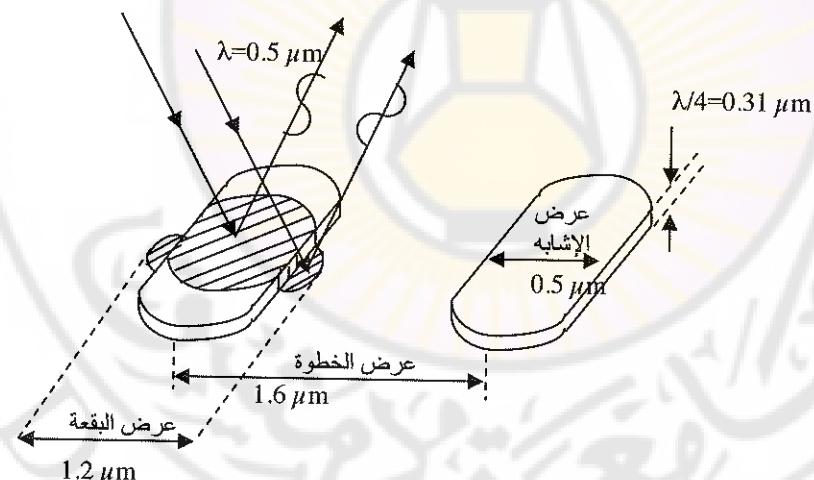
### Optical Recording

#### ١-١١ القرص المدمج Compact Disk

تستخدم حالياً طريقة حديثة في التسجيل باستخدام الأشعة الضوئية بدلاً من الموجات المغناطيسية، حيث يتميز هذا النوع بالوثوقية العالية والقدرة العالية على تخزين كميات هائلة من المعلومات مما أدى إلى انتشار هذه الطريقة انتشاراً واسعاً في تسجيل الاشارات السمعية وإشارات الوسائط المتعددة. وتعتمد هذه الطريقة على أن الشعاع الضوئي (الشعاع الليزري بالتحديد) يمكن تركيزه في نقطة صغيرة جداً و عن بعد، أي أنه لا حاجة للاتصال الفيزيائي بين رأس التسجيل والوسط المسجل عليه، حيث وجدنا سابقاً أن كثافة التسجيل في طريقة التسجيل المغناطيسي تتعلق بعرض فرجة الرأس المغناطيسي وعلى نحو انتشار الموجات المغناطيسية التي لا يمكن التحكم بدقتها بدرجة كافية بينما تتعلق مساحة بقعة الضوء بالتحكم بطول موجة الشعاع الليزري المستخدم أو باستخدام تقنيات أخرى رخيصة الثمن كالعدسات.

يبين الشكل (1-11) طريقة القراءة من القرص المدمج (CD) والمسجل مسبقاً باستخدام الشعاع الليزري. وت تكون المعلومات المسجلة على القرص من مجموعة إشبادات ناتئة تتوضع ضمن مسارات حلزونية ثابتة ويفصل بين هذه المسارات مناطق فصل تسمى المناطق المسطحة، و يجعل سماكة المنطقة المشابه مساوياً إلى ربع طول موجة الشعاع الليزري المستخدم في عملية

القراءة. وتصمم سواقة القراءة بحيث تقوم بتركيز البقعة الضوئية نصفها على المنطقة الناتئة (منطقة المعلومة) والنصف الآخر على المنطقة المسطحة، مما يؤدي إلى انعكاس الضوء عن منطقة المعلومة يسير مسافة أقصر من الضوء المنعكس عن المنطقة المسطحة بمسافة وقدرها نصف طول الموجة. أي أن الموجات الضوئية المنعكسة سوف تتمايز فيما بينها بزاوية متزامنة، ومنه فإن الضوء المنعكس عن المنطقة التي تحتوي على نتوء سوف ينعكس بشدة ضعيفة نتيجة اختلاف في طور الضوء المنعكس، بينما الضوء المنعكس عن المنطقة التي لا تحتوي على نتوء سوف ينعكس بشدة قوية نتيجة تطابق طور الضوء المنعكس. وعند وضع حساس يتحسس لشدة الشعاع الضوئي المنعكس يمكن أن نحصل في خرجه على إشارة ثنائية القطبية تعكس طبيعة المعلومة المسجلة على القرص.



الشكل (1-11): مبدأ القراءة المستخدم في القرص المدمج Compact Disk (CD) والمصنوع باعتبار أنه قرص خاص للقراءة فقط.

تسمى الطبقة التي تحتوي على التنويعات بطبقة المعلومات وتحمي هذه الطبقة بطبقة شفافة عازلة سميكة نسبياً Thick transparent coating وبحيث تقوم أيضاً المساعدة على تركيز البقعة الضوئية القادمة من المنبع على طبقة المعلومات، وبحيث تساعد أيضاً على تخفيف تشتت الشعاع الضوئي نتيجة الغبار الممكن تواجده على القرص.

يمكن تقسيم أنواع الأقراص بشكل عام إلى ثلاثة أنواع:

• النوع الأول: الأقراص الضوئية مسبقة التسجيل، بحيث تصنع نسخة أساسية تسمى النسخة الأم تتم بعمليات الإشارة، ويتم بعد ذلك صناعة قالب خاص بالنسخة الأم يستخدم لصناعة أعداد كبيرة من الأقراص المسبقة التسجيل بواسطة الإذابة والضغط.

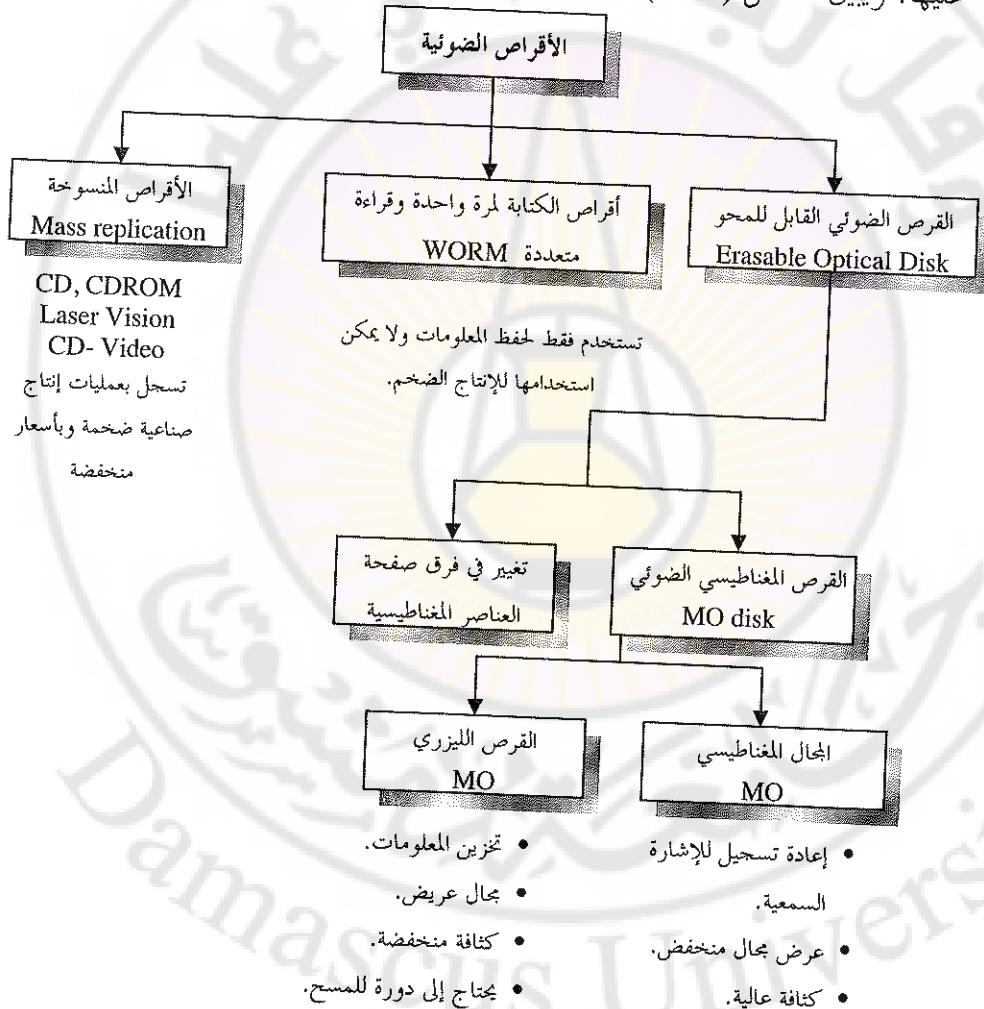
• النوع الثاني: وهي الأقراص الضوئية القابلة للتسجيل لمرة واحدة فقط ولا يمكن مسحها بعد ذلك وتسمى WORM (Write Once Read). وتألف طبقة المعلومات من طبقة معدنية رقيقة جداً يمكن ثقبها أو إذابتها باستخدام التسخين بشعاع ليزري قوي Laser. وتألف طبقة المعلومات في الأنواع الأخرى من طبقة كيميائية خاصة تتأثر بالليزر المسلط عليها في أثناء التسجيل بحيث تصبح سوداء اللون عند تطبيق شعاع قوي عليها.

• النوع الثالث: وهي الأقراص الضوئية القابلة للتسجيل والمحو عدة مرات وتسمى Read/Write Compact Disk وتعتمد في طريقة التسجيل والمحو على استخدام طريقة التسجيل المغناطيسي باستخدام

الشعاع الليزري ويدعى هذا القرص بالقرص المغناطيسي الضوئي Magno-Optical Disk.

## ٢-١١ أنواع الأقراص الضوئية Optical Disks Types

يمكن عموماً تقسيم الأقراص الضوئية إلى ثلاثة أنواع تبعاً لطريقة تسجيل المعلومات عليها. وبين الشكل (2-11) مقارنة بين الأنواع الثلاثة الأساسية.

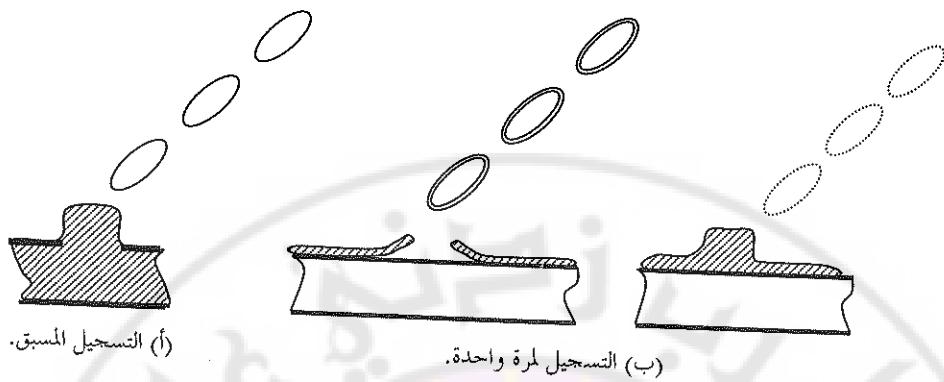


الشكل (2-11): أنواع القرص الضوئي.

النوع الأول: القرص المدمج (CD) Compact disk والقرص المصغر (MD) Mini Disk المسبق التسجيل وهي عبارة عن أقراص تستخدم للقراءة فقط باستخدام الليزر. وتستخدم في الإنتاج الضخم بمعامل خاصة وبأسعار منخفضة جداً.

النوع الثاني: وهو عبارة عن أقراص ليزرية يمكن التسجيل عليها لمرة واحدة فقط، ولكن لا يمكن محوها أو إعادة تسجيلها ويطلق عليها أقراص كتابة واحدة ومتعددة القراءة (WORM). Write Once Read Many.

يبين الشكل (11-3)(أ) طبقة المعلومات في القرص المدمج CD المسبق التسجيل، وهي عبارة عن مرآة ضوئية تحتوي على نتوءات تمثل مناطق المعلومة، كما يبين الشكل (11-3)(ب) طبقة المعلومات في القرص المدمج CD القابل للتسجيل لمرة واحدة وتستخدم طبقة معدنية رقيقة. وعند التسجيل يسلط شعاع ليزري قوي يذيب الطبقة مما يؤدي إلى نشوء ثقب أو نتوء في منطقة تطبيق تشكيل الشعاع الليزري، ويستخدم للقراءة شعاع ليزري ذو طاقة ضعيفة جداً حتى لا يؤثر على هذه الطبقة. وعندما يمر الشعاع الليزري المخصص للقراءة فوق منطقة مسطحة فإن الشعاع الليزري ينعكس إلى الحساس الضوئي، وعندما يمر الشعاع فوق الثقب لا ينعكس، فنحصل على طريقة مشابه لحالة الأقراص CD المسبقة التسجيل. وتعتمد الأقراص WORM المستخدمة في أجهزة الحواسيب نفس هذا المبدأ.



الشكل (11-3): طبقة المعلومات في القرص المدمج المسبق التسجيل والقابل للتسجيل لمرة واحدة.

**النوع الثالث:** القرص القابل للتسجيل عدة مرات و القابل للمسح أو Recordable Optical Disk Erasable Magno-Optics و يطلق عليها أيضاً الطريقة الحرارية المغناطيسية الضوئية Optics - Thermo-Magnetic، حيث يستفاد من الخواص الحرارية المغناطيسية لطبقة المعلومات بنفس المبدأ المستخدم في القرص المصغر. وتستخدم الطبقة المعدنية مواد معدنية خاصة لها درجة حرارة كوري Curi منخفضة ومن هذه المواد Gadolinium و Terbium.

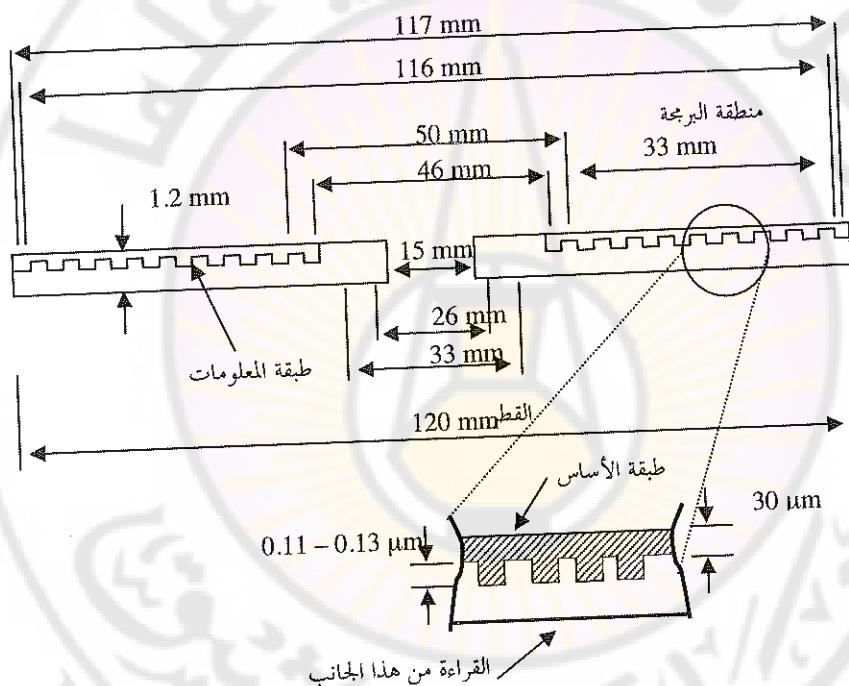
### ٣-١١ التركيب الداخلي للقرص المدمج Compact Disk والقرص المصغر

#### Minidisk

إن القرص المدمج CD والقرص المصغر MD هما نفس التركيب وطريقة التسجيل ونفس سرعة القراءة والكتابة، ويمكن لهذه الأنواع من الأقراص أن تسجّل إشارة ص��ية و انتظامية مرمزة بنظام التعديل النبضي الترميزي PCM بـ استخدام بتردد اعتياب 44.1 kHz وبعدد عينات يساوي إلى 16 bits لكل عينة.

يبين الشكل (4-11) التركيب الهندسي للقرص المدمج، حيث نلاحظ أن قطره الكلي يساوي 120 mm، وتأخذ المنطقة الحاوية على المعلومات أو المنطقة المبرجة مجال 33 mm فقط، وهي محصورة بين القطر 50 mm والقطر 116 mm وبإضافة مناطق الدخول والخروج تصبح عرض هذه المنطقة حوالي 35.5 mm. وباعتبار أن خطوة المسار Track ثابتة وبحدود  $1.6 \mu\text{m}$  فإن عدد المسارات يساوي:

$$\text{مسار} = \frac{35.5 \times 1000}{22188} = 1.6 \mu\text{m}$$



الشكل (4-11): البنية الفيزيائي للقرص المدمج (CD). Compact Disk (CD)

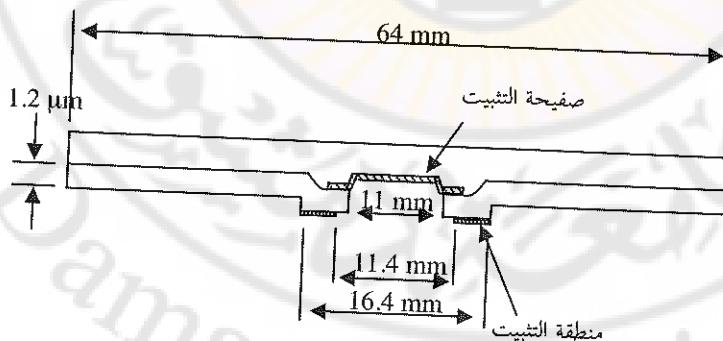
وباعتبار أن قطر هذه المسارات يزداد كلما ابتعدنا عن المركز فان مجموع أطوال المسارات يمكن حسابها إذا أخذنا بعين الاعتبار متوسط قطر المسارات:

$$\text{مجموع طول المسارات} = 2\pi \times \frac{58.5 \times 23}{2} \times 22188 = 5.7 \text{ km}$$

هذه الأرقام تدل على نحو واضح على الدقة في التصنيع.

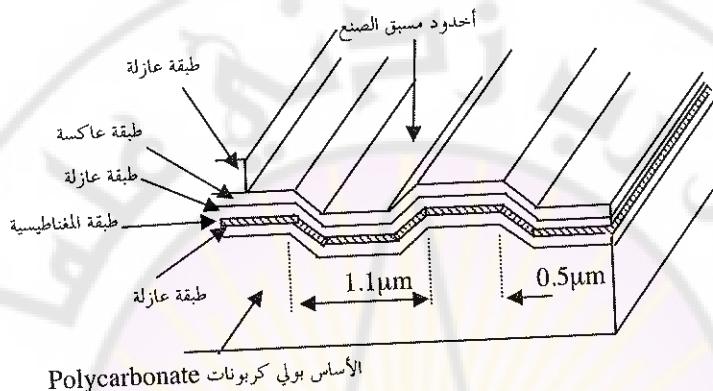
يستخدم في القرص المصغر MD كاسيت خاص لحماية القرص من العوامل الخارجية بحيث يوضع الكاسيت داخل السوقة. و يبين الشكل (5-11) البنية الفيزيائية للقرص المصغر MD، حيث نلاحظ أن القطر الكلي للقرص المصغر 64 mm و تبدأ منطقة الدخول عند القطر 29mm ومنطقة البرمجة عند القطر 32 mm. وباعتبار أن خطوة المسار Pitch Track تساوي الخطوة في القرص المدمج أي  $1.6 \mu\text{m}$ ، فان المساحة المخصصة للتخزين في القرص المصغر أصغر من المساحة المخصصة للتخزين في القرص المدمج.

يوضع القرص المصغر ضمن غلاف بلاستيكي (كاسيت) لحمايته Cartridge له القياسات  $72 \times 68 \times 5 \text{ mm}$  حيث يشبه القرص المرن "Flopydisk 3.5". إن القرص القابل للتسجيل والمسجل مسبقاً لهما نفس القطر ولكن يحتاج القرص القابل للتسجيل إلى الوصول إليه من كلا الطرفين وذلك للتأثير على القرص من الوجه الأمامي بالحقل المغناطيسي ومن الطرف الخلفي بالشعاع الليزري، ومن ثم فإن القرص المصغر يزود بمصراع Shutter يفتح من الطرفين كما هو المستخدم في القرص المرن.



.(MD) MiniDisk الشكل (5-11): البنية الفيزيائية للقرص المصغر

يبين الشكل (6-11) التركيب الفيزيائي للقرص القابل للتسجيل لعدت مرات، ويبين الشكل أحاديد خاصة المسق الصناعي  $1.1 \mu\text{m}$  تستخدم في توجيه شعاع القراءة و الكتابة، كما يبين الشكل الطبقة المغناطيسية MO المخصوصة بين طبقي حماية.



الشكل (6-6): يبين التركيب الفيزيائي للقرص المصغر المغناطيسي.

إن عملية التسجيل على القرص المدمج CD ومن ثم عملية القراءة لا تؤدي إلى انخفاض في مستوى السمعي للإشارة، ويلاحظ أيضاً أن الإشارة الناتجة عن الأقراص المستنسخة هي نفسها الإشارة الناتجة عن القرص الأصلي. المشكلة الأساسية في انخفاض طبيعة الإشارة المسنومة عن الإشارة الأصلية نتيجة عملية التحويل من الإشارة السمعية التماثلية إلى إشارة رقمية بنظام PCM، وبالرغم من حدوث الأخطاء في عملية القراءة من القرص CD إلا أن معظم سوافات القراءة تقوم بتصحيح هذه الأخطاء ومن ثم يصبح تأثير هذه الأخطاء على انخفاض مستوى الإشارة السمعية غير ملحوظ.

باعتبار أن المساحة المخصصة للتخزين في القرص المصغر أصغر من المساحة المخصصة في القرص المدمج، وللحفاظ على نفس زمن وطريقة التخزين والقراءة،

يستخدم تقنيات ضغط الإشارة السمعية، في القرص المصغر سواءً للقراءة أم الكتابة ويسمى المرمز برمز ATRAC حيث يقوم بضغط الإشارة بنسبة ضغط تساوي 4.445.

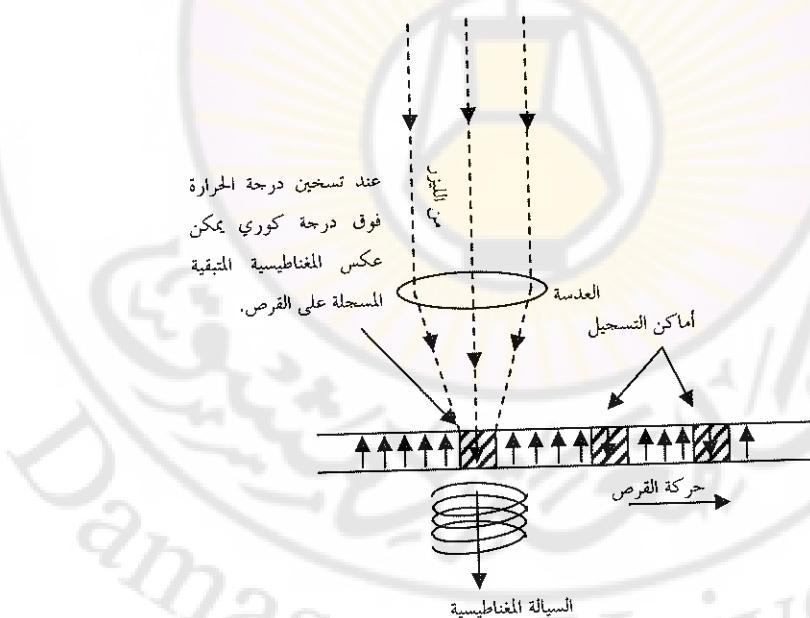
إن عملية ضغط الإشارة السمعية لتسجيلها على القرص المصغر ومن ثم استعادتها من القرص تحتاج إلى تخزين الإشارة في ذاكرة خاصة RAM. حيث تستخدم الذاكرة RAM كغازل Buffer لتخزين 3 ثوان من الإشارة. وعند امتلاء الذاكرة فإن السوقة تتوقف عن نقل المعلومات ولكن تبقى في حالة الدوران. وإن استخدام الذاكرة عازلاً تفيد في حال توقف القراءة من أحد القطاعات بسبب اهتزاز الميكانيكي خارجي فإن الذاكرة تستمر بتغذية المعلومات إلى مفك الترميز أي لا تتوقف الإشارة السمعية، وبنفس الوقت يعود القارئ إلى القطاع الصحيح للقراءة من جديد حيث تستخدم نفس الطريقة في عملية التسجيل. إن انخفاض طبيعة الإشارة المسنوعة عن الإشارة الأصلية المسجلة على القرص المصغر نتيجة لاستخدام مرمز الإشارة السمعية بالإضافة إلى عملية التحويل من الإشارة السمعية تماثلية إلى إشارة رقمية بنظام PCM، أدى لاحقاً إلى عدم انتشار القرص المصغر تجاريًا بكل كبير ومن ثم اتفاقيه.

#### ١١- القرص المغناطيسي الضوئي

عندما تسخن المادة المغناطيسية فوق درجة حرارة كوري Curie تصبح المادة غير مغناطيسية وقابلة للمغناطة وعند تبريدها فإن مغناطيسية المادة تأخذ حالتها الجديدة، هذا المبدأ هو الذي يعتمد عليه نظام التسجيل والمسح في الأقراص الضوئية، حيث يتم تسخين منطقة التسجيل باستخدام شعاع ليزري مركز وقوى على طبقة المعلومات في البقعة المراد تسجيلها، ومن ثم يتم توليد حقل مغناطيسي باستخدام ملف كهربائي للتحكم بقطبية المنطقة المراد تسجيلها.

يبين الشكل (7-11) التركيب الفيزيائي للقرص المغнет الضوئي. ونلاحظ أن الوحدات المغناطيسية للقرص غير المسجل تتجه باتجاه واحد، تسخن هذه الوحدات باستخدام شعاع ليزري إلى درجة حرارة فوق درجة حرارة كوري. ولتسجيل معلومة ما يمرر حقل مغناطيسي باتجاه معاكس لاتجاه مغناطيسية الوحدات المغناطيسية لطبيعة المعلومات، وبحيث يوثر هذا الحقل على المنطقة المسخنة باستخدام الشعاع الليزري ولا يؤثر على المناطق المجاورة، لذلك فان جزءاً صغيراً محدوداً بقطر الشعاع الليزري سوف يعكس قطبيته.

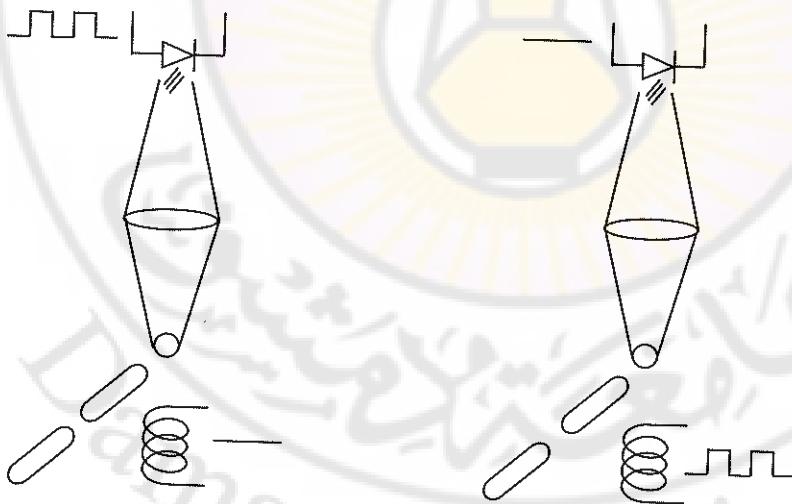
بالرغم من أن الطريقة المغناطيسية هي المستخدمة في التسجيل إلا أن مساحة منطقة التسجيل تتحدد بقطر الشعاع الليزري باعتبار أن قطر البقعة الضوئية للشعاع الليزري صغيرة جداً من مرتبة микرون فإن كثافة التسجيل تصبح عالية جداً.



الشكل (7-11): يبين التركيب الفيزيائي للقرص المغنت الضوئي.

تعتمد عملية القراءة من القرص على خاصية Kerr أو تأثير فارادي Faraday effect، وتعتمد على أن الحقل المغناطيسي المسجل على القرص يؤدي إلى تغيير قطبية الشعاع الضوئي والمنعكس منه. وباعتبار أن تأثير المغناطيسية المتبقية على القرص صغيرة فإن زاوية دوران الشعاع الضوئي صغيرة جداً لذلك فإن حساسية سوقة القراءة عالية جداً. وتستخدم سوقة القراءة مرشح قطبية ضوئي يوضع قبل العدسة بحيث يمنع الضوء المنعكس عن المنطقة المسجلة من الوصول إلى المنبع الليزرية نفسه.

يبين الشكل (11-8) الطريقتين المستخدمتين للتسجيل الضوئي المغناطيسي Magno-Optics. ويبيّن الشكل (11-8)(أ) الطريقة الأولى في التسجيل وتعتمد على تغيير كثافة الشعاع الليزرى المطبق بينما يثبت الحقل المغناطيسي باتجاه معاكس لاتجاه قطبية الوحدات المغناطيسية، كما يبيّن الشكل (11-8)(ب) الطريقة الثانية على تغيير قطبية الحقل المغناطيسي ويثبت الشعاع الليزرى.



(أ) حقل مغناطيسي ثابت وشعاع ليزرى ثابت. (ب) شعاع ليزرى ثابت وحقل مغناطيسي ثابت.

الشكل (11-8): طرق التسجيل في القرص القابل للمسح وللتسجيل.

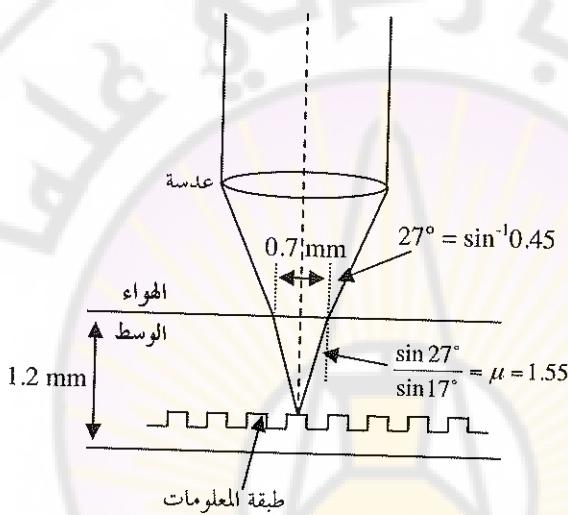
يمكن مسح محتويات القرص المغناطيسي الضوئي بوسطة عكس قطبية التيار الكهربائي المار بالملف، ومن ثم تتعكس قطبية السيالة المغناطيسية المطبقة على القرص، وبنفس الوقت يطبق شعاع ليزري مستمر على كامل أجزاء القرص، أي يتم تثبيت القطبية القديمة لجميع قطاعات القرص. وبالتالي يعاد القرص إلى وضعه الأصلي وعندما يمكن التسجيل عليه من جديد.

السيئة الأساسية للقرص المغناطيسي الضوئي Magno-optical disk هي الحساسية العالية للمواد المصنوع منها طبقة المعلومات، حيث يمكن أن تتأذى على نحو كبير بالاتصال المباشر بالهواء ولذلك تغطى هذه الطبقة تماماً بطبقة أخرى لحمايتها من الاتصال مع الهواء.

#### ٥-١١ تركيز الشعاع الضوئي

كما بينا سابقاً لتحقيق قدرة تخزين عالية مع المحفظة على الوثوقية العالية وسهولة الاستخدام كان لابد من استخدام شعاع ليزري للتسجيل والاستعادة للحصول على أصغر منطقة تسجيل ممكنة، إن تحقيق ذلك عملياً ليس بالأمر البسيط تقنياً وخصوصاً أن سماكة القرص وسماكة الطبقة العازلة الشفافة مهمة في التأثير على قياس البقعة المطبقة على طبقة المعلومات. وبين الشكل (9-11) الطريقة المستخدمة في تركيز البقعة الضوئية للشعاع الليزري على طبقة المعلومات، حيث تستخدم عدسة محدبة و يجعل حرقها منطبقاً على طبقة المعلومات. ويستخدم في القرص MD أو CD عدسات بمعامل يساوي إلى 0.5 حيث يصل قطر البقعة الضوئية عند سطح القرص أكبر بحوالى ثلاثة مرات من قطر البقعة الضوئية عند طبقة المعلومات. ونعرف هنا بقوانين انكسار الضوء عند عبوره لنقطتين مختلفتين في كثافة المادة بحد أيضاً أن نوع الطبقة الشفافة العازلة وسماكة هذه الطبقة يلعب دوراً مهمـاً في تحديد موقع حرق العدسة،

حيث نلاحظ أن سقوط ضوء قادم من وسط كالهوا مثلاً على وسط ذي كثافة أعلى يؤدي إلى انكسار الضوء بزاوية تتعلق بعامل انكسار الوسط كما هو مبين في الشكل (10-11)، ونلاحظ هنا أن قطر البقعة الضوئية الساقطة عند بقعة المعلومات يتصل بعدة عوامل: عامل الانكسار للطبقة الشفافة، طبيعة العدسة أو رقم العدسة وسماكة الطبقة الشفافة.

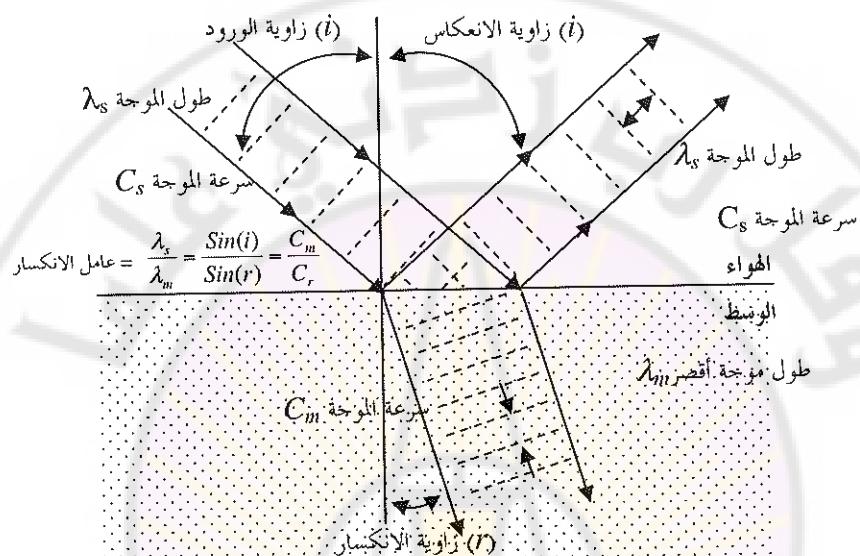


الشكل (9-11): عملية القراءة من القرص الضوئي.

تحمل في الأقراص CD و MD طبقة المعلومات أقرب إلى الوجه السفلي للقرص (الوجه الذي يكتب عليه يلصق أو يطبع عليه) وذلك لزيادة حماية طبقة المعلومات من الخدوش أو الجروح التي يمكن أن تؤدي إلى إعطال القرص. كما يفيد ذلك في زيادة تأثير الحقل المغناطيسي في القرص MO حيث يطبق من جهة الوجه السفلي.

ونلاحظ من الشكل أن سماكة القرص مهمة في تركيز البقعة على نحو صحيح فوق طبقة المعلومات.

باعتبار أن الضوء الأبيض يمكن أن يتحلل إلى الطيف الضوئي عند دخوله منطقة شفافة لذلك يستخدم شعاع ليزري وحيد اللون بطول موجة ثابت، لتركيز الشعاع على البقعة ولتخفيض من تكاليف العدسات والعناصر الضوئية المستخدمة في النظام.



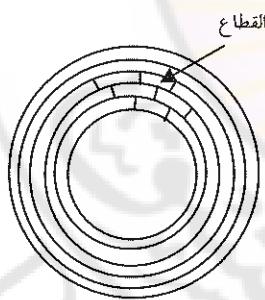
الشكل (10-11): زاوية الانكسار والانعكاس للشعاع الليزري الساقط على القرص.

ومن الملاحظ أنه عند اصابة سطح القرص بالخدوش فإنه يمكن في كثير من الأحيان أن تؤدي هذه الخدوش إلى تشتت الشعاع الضوئي وعدم وصوله إلى طبقة المعلومات وبالتالي حدوث عطب في القرص. ويمكن إزالة تأثير هذه الخدوش باستخدام ملمع معدني Polish metal وذلك لازالة سطح رقيق من الطبقة الشفافة، مع الملاحظة أن الوجه الآخر من القرص أو الجهة المطبوعة Label side، يكون أكثر تأثراً بالخدوش وخصوصاً أن سمكاً طبقة الحماية صغير جداً حوالي  $30 \mu\text{m}$ ، فالكتابة على هذا السطح بالأقلام الحادة يؤدي إلى تدمير منطقة الحماية ومنه يصل الخدش إلى

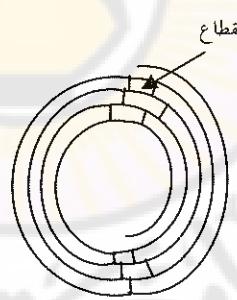
طبقة المعلومات وتدميرها، كما أن الكتابة على السطح بالأقلام الكيميائية Marker يؤدي إلى تحمل المادة الكيميائية ووصولها إلى طبقة المعلومات ودميرها أيضاً pens.

## ٦-١١ السوافة الليزرية Optical disk drive

تشبه السوافة الليزرية في تركيبها سوافة الأقراص المرن حيث تتألف على نحو رئيسي من محور دوران ميكانيكي Spindle متصل بمحرك دوران خطوي دقيق وسريع جداً، وتحتوي أيضاً على جهاز لتحديد الموقع ممتد على طول نصف القطر وذلك لجمع الأشعة الليزرية الخاصة بتحديد المسار. وباعتبار أن المسافة بين المسارات صغيرة جداً، فإن السوافة تحتاج إلى نظام ملاحة دقيق جداً. ولتحديد هذه المسارات تصنع أحاديد مسبقة التصنيع كما هو الشكل (11-6) وتحدد هذه المسارات بحيث تكون جميعها على شكل خط متصل حلزوني الشكل يبدأ من منتصف القرص، وينتهي في حبيطه، وتختلف هذه الطريقة عن الطريقة المتبعة في الأقراص المرن حيث تقسم مناطق التسجيل إلى مسارات وقطاعات كما هو مبين في الشكل (11-11).



القطاعات في القرص المغناطيسي



القطاعات في القرص الضوئي

الشكل (11-11): الفرق بين نوعي المسارات في القرص المدمج والقرص المرن.

ويستخدم في سوافة القراءة منبع ضوئي وحيد اللون قليل الضجيج باستخدام منبع ليزري مصنوع من أنصاف النواقل ويعتمد طول موجة الشعاع المستخدم على طبيعة المادة المستخدمة في تصنيع الثنائي الباعث للضوء الليزري LED ويعطى وفق قانون بلانك Plank's Law

$$E = H \times f \quad (11-11)$$

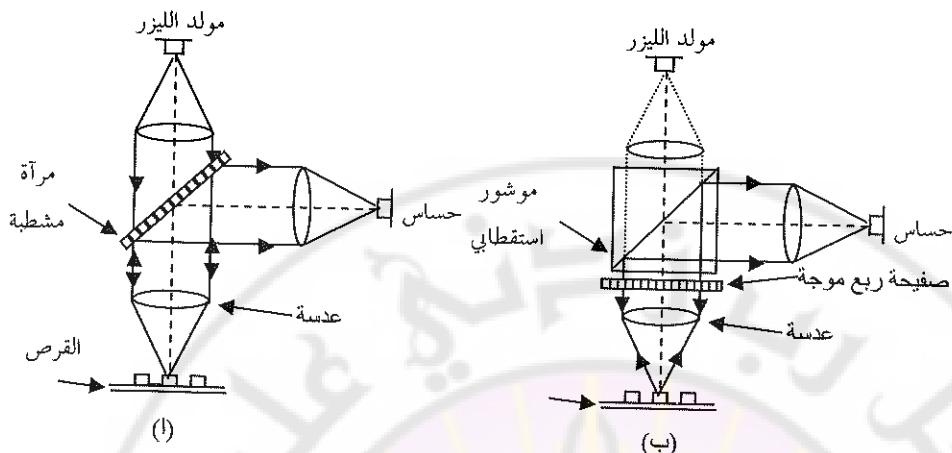
حيث  $f$  تردد الإشارة المصدرة و  $H$  ثابت بلانك ويساوي إلى  $6.6262 \times 10^{-34}$  Joule/Henry Gallium Arsenide (Gas) فان فرق الطاقة يساوي 1.6 ev، حيث 1 ev يساوي  $1.6 \times 10^{-19}$  Joule وبالتالي فانه حسب قانون بلانك يعطى تردد إشارة المصدرة:

$$f = \frac{1.6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.6262 \times 10^{-34}} \text{ Hz}$$

وطول الموجة يساوي:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \times 6.6262 \times 10^{-34}}{2.56 \times 10^{-19}} \text{ m} = 780 \text{ nanometer}$$

ولتسهيل عمليات التصنيع والملاحقة يطبق الشعاع الليزري عامودياً على القرص، لذلك فان الشعاع المنعكس يمكن أن يعود إلى المنبع الليزري لذلك يجب فصل الشعاع المنعكس وتحول اتجاهه إلى الحساس الضوئي Photo sensor دون التأثير على الشعاع القادم من المنبع. وبين الشكل (11-12) الطريقتين المستخدمتين في عملية الفصل. الطريقة المبينة في الشكل (11-12)(أ) يفصل الشعاع الليزري باستخدام مرآة خاصة مشطبة تسمح بعكس نصف الشعاع الليزري المنعكس إلى الحساس.

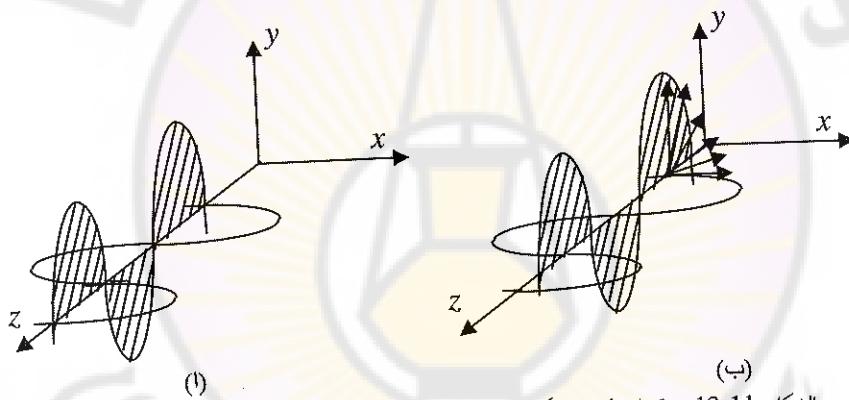


الشكل (11-12): طريقة القراءة من القرص الضوئي وفق نظامين مختلفين: (أ) عملية القراءة باستخدام مرآة خاصة. (ب) عملية القراءة باستخدام موشور استقطابي.

الطريقة المبينة في الشكل (11-12)(ب) يستخدم موشور استقطابي (ايزوتروبي) يسمح بفصل الشعاع المنعكس من القرص على نحو كامل. ولإنتاج مواد مستقطبة (مواد ايزوتروبية)، تستخدم مادة كالفيينيل Vinil وتحل ايزوتروبية بوسطة شدّها عند رفع درجة حرارتها مما يؤدي إلى وضع ذراها على شكل خطوط متوازية مع محور الشد، وبعد غمرها في مادة اليود تذوب الذرات وتتصبح موصولة، مما يؤدي ذلك إلى قصر أي حقل كهربائي يمر من خلالها بزاوية سقوط تساوي زاوية الشد، بينما الحقل الكهربائي بزاوية مختلفة لا يتأثر، وباعتبار أن الضوء هو عبارة عن موجة كهرمغناطيسية (مغناطيسية – كهربائية) وعندما تكون الموجتان المغناطيسية والكهربائية متocompated وبنفس الطور يقال عن الموجة الكهرمغناطيسية مقيدة كما هو مبين في الشكل (11-13)(أ). وعندما يكون هناك فرق في الطور بين الموجتين مع وجود تعامد بينهما يقال عن الموجة الكهرمغناطيسية بأنها دائيرية كما هو مبين في الشكل (11-13)(ب). فإذا أدخلت

موجة ضوئية في صفيحة مستقطبة فإن الموجتين المتعامدتين تنتشران بسرعتين مختلفتين مما يؤدي إلى نشوء فرق في الطور بينهما، فإذا كانت سماكة الصفيحة تؤدي إلى نشوء فرق في الطور يساوي  $45^\circ$  فإن الصفيحة تدعى بصفحة ربع الموجة Quarter-wave plate.

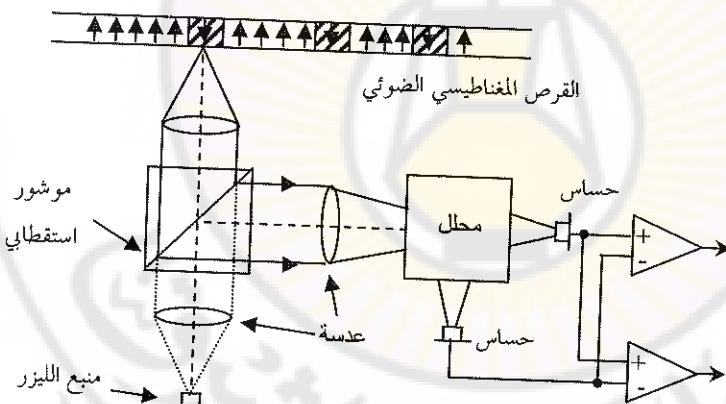
تستخدم صفيحة ربع الموجة لجعل استقطاب الشعاع الليزري القادم من المنبع إلى القرص يساوي  $45^\circ$  وعندما يعود الشعاع المنعكس فإنه سوف يتأنّر أيضاً بمقدار  $45^\circ$  إضافي، ومن ثم يمكن عزل الشعاعين القادم والمنعكس طالما أن فرق الطور بينهما يساوي إلى  $90^\circ$  درجة باستخدام موشور مستقطب.



الشكل (13-11): تمثيل الموجة الكهرومغناطيسية: (أ) الموجة المتعامدة، (ب) الموجة الدائرية.

تصلح هذه الطريقة فقط في القراءة من القرص المدمج CD والقرص MD حيث أن الحساس الضوئي يتأثر بشدة الشعاع الضوئي الساقط عليه، بينما لا تصلح للقراءة من القرص المغناطيسي - الضوئي MO حيث إن استقطاب الشعاع الضوئي يتغير أيضاً عند سقوطه على طبقة المعلومات. وتعتمد الطريقة المستخدمة في القراءة من القرص MO على استخدام محلل استقطاب بدلاً من صفيحة ربع الموجة حيث يركب قبل الحساس الضوئي كما هو مبين في الشكل (11-14). وعلى اعتبار أن الإشارة

المعكسة من القرص تدور بزاوية صغيرة جداً ( حوالي  $\pm 1^\circ$  ) تحت تأثير الحقل المغناطيسي المسجل على طبقة المعلومات، فان مهمة محلل الاستقطاب فصل إشارة الدخل إلى إشارتين بفرق طور بينهم يساوي إلى  $45^\circ$  درجة. فإذا أدت الإشارة المسجلة على القرص إلى تدوير الشعاع الضوئي بزاوية ما فان الإشارة المارة عبر محلل المدخل على القرص تصبح أكبر من الإشارة المعكسة منه، وإذا أدت المعلومات المسجلة على القرص إلى تدوير الشعاع الضوئي باتجاه معاكس فان الإشارة المارة عبر محلل أصغر من الإشارة المعكسة منه. وعند استخدام حساسين واحد يستخدم للإشارة المارة والإشارة المعكسة فان الفرق بين خرج الحساسين يمثل الفرق بين استقطاب المسجل على القرص ومن ثم نحصل على قراءة لقيمة المسجلة على القرص. وتستخدم هذه الطريقة أيضاً للقراءة من القرص CD و ذلك بإهمال إشارة أحد الحساسين.



الشكل (14-11): طريقة القراءة من القرص الضوئي المغناطيسي.

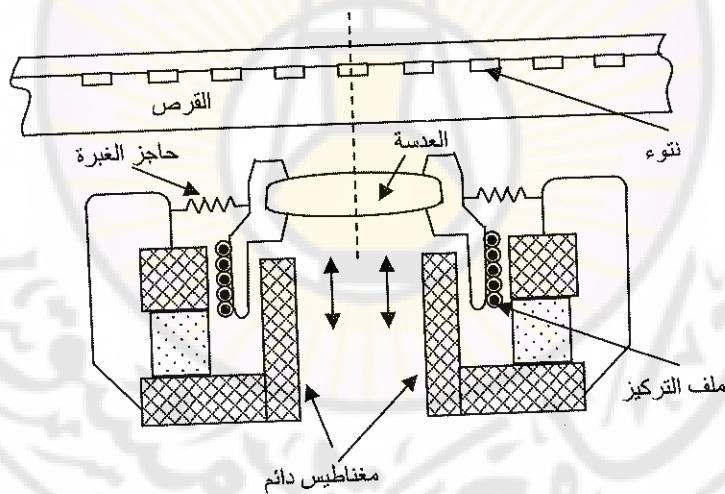
## ٧-١١ نظام التركيز Focusing System

باعتبار أن استجابة النظام وحجم المعلومات تابعان لقطر البقعة الضوئية وقدرة السواقة على تركيز الشعاع الليزري بدقة على طبقة المعلومات، فإذا أصبحت البقعة على

القرص كبيرة فإنها لن تعكس المعلومات المسجلة على القرص على نحو صحيح، ومن الممكن أيضاً أن تغطي البقعة مسارين متباينين.

اختلاف سماكة القرص أو ميلان القرص (ولو بدرجات صغيرة جداً) أو عدم انتظام السماكة يؤدي إلى ضعف في تركيز البقعة طبقة المعلومات بشكل صحيح، لذلك تستخدم في السواقات الليزرية نظام خاص يسمى نظام التركيز الآلي الذي يحيط به حيث يكون قادراً على تركيز البقعة بدقة تصل إلى  $\pm 1 \mu\text{m}$ .

تعتمد فكرة النظام على تحريك العدسة أفقياً لتركيز حرق العدسة على طبقة المعلومات على نحو صحيح. وبسبب أن ميلان القرص ودوران القرص سريع جداً فإن استجابة النظام يجب أن يكون عالياً ومتناهياً مع سرعة دوران القرص.

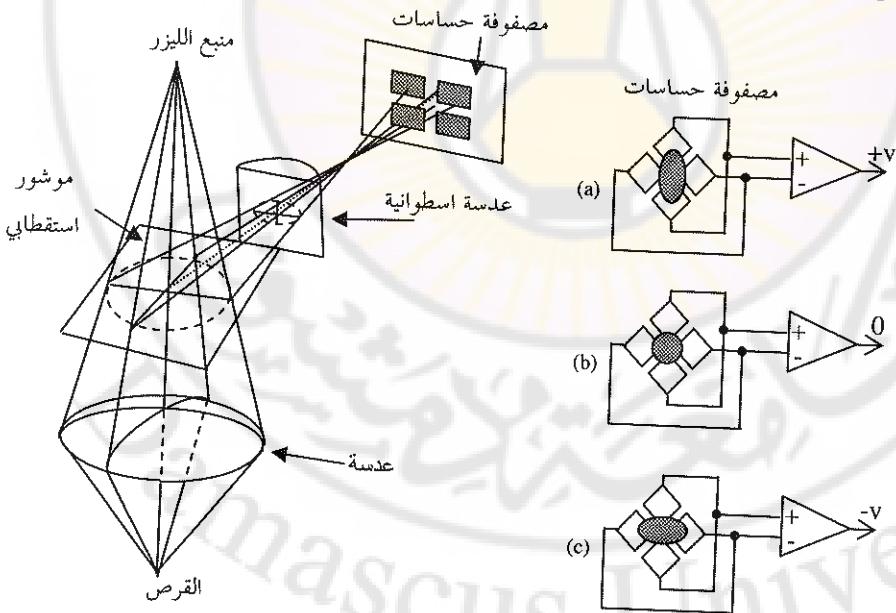


الشكل (11-15): نظام تركيز القراءة في السوقة الليزرية.

يبيّن الشكل (11-15) السابقة الطريقة المتبعة في نظام القراءة حيث يتكون النظام من ملف كهربائي خفيف موضوع ضمن حقل مغناطيسي ثابت ومثبت على الملف العدسة بحيث تتحرك العدسة أفقياً تحت تأثير التيار الكهربائي المار في الملف.

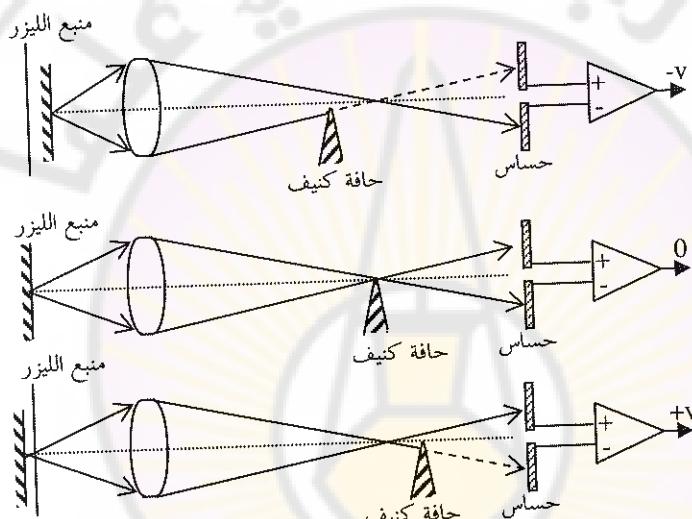
ونلاحظ أن التركيب الميكانيكي لنظام التركيز يشابه تقريرياً التركيب الميكانيكي لمحوار الكهروдинاميكي ذي الملف المتحرك.

لتحديد قيمة التيار الكهربائي المار في الملف لتحريكه إلى الأعلى أو الأسفل يستخدم عدسة أسطوانية ترکب أمام الموشور المستقطب كما هو مبين في الشكل (16-11) بحيث تقوم هذه العدسة بتحويل شكل البقعة الضوئية الناتجة عن الانعكاس من طبقة المعلومات من شكل دائري إلى شكل قطع ناقص يتغير تبعاً بعد مرور العدسة المركبة عن طبقة المعلومات كما هو مبين في الشكل (16-11)(ب)، فعند استخدام مصفوفة من أربع حساسات توصل بمكبر العمليات بشكل متزايد، فإن تغيير شكل البقعة الضوئية بشكل قطع ناقص يؤدي إلى تغير فرق الجهد بين دخلي مكبر العمليات بشكل متناسب طرداً مع شكل البقعة، أي بعد النقطة عن طبقة المعلومات.



الشكل (16-11): طرق توليد تيار التحكم بالتركيز باستخدام مصفوفة حساسات.

يستخدم لتوليد جهد التركيز في السوارات الليزرية حساسين بدلاً من أربعة وذلك باستخدام تقنية حافة كيف Knife edge المبينة في الشكل (11-17). وتعتمد هذه التقنية على وضع حاجز (الحافة) في محرق العدسة تماماً بحيث تقوم هذه الحافة بحذف جزء من الشعاع الضوئي، وذلك عندما يختلف محرق العدسة عن موقع الحافة أي عندما تبتعد أو تقترب البقعة عن طبقة المعلومات.



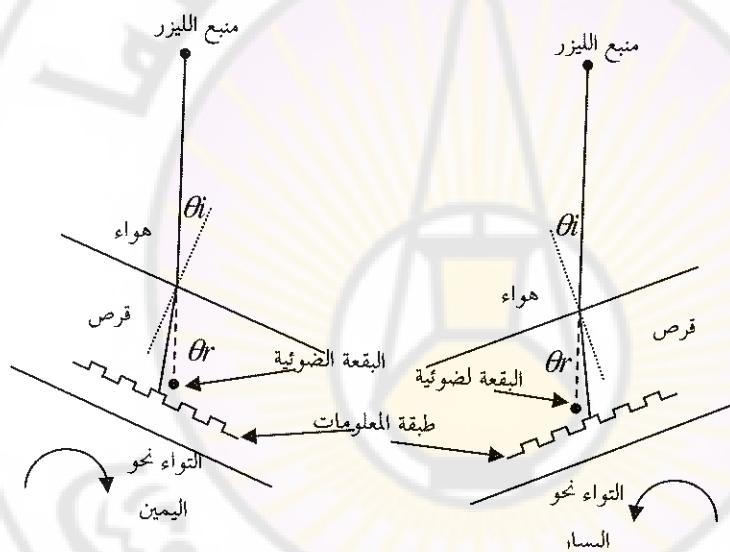
الشكل (11-17): طريقةKnife لقياس جهد التركيز باستخدام حساسين فقط.

## ٨-١١ نظام الملاحقة Tracking System

يستخدم نظام الملاحقة Tracking Systems لمتابعة مسار المعلومات اللولبي على نحو دقيق فمثلاً يمكن لجهاز التثبيت أن يقوم بتركيب القرص على محور الدوران بموضع مختلفة في كل مرة يوضع فيها القرص ضمن السوقة، ويمكن أن يؤدي التثبيت أيضاً إلى ميلان القرص ويؤدي بدوره إلى انتقال الشعاع الليزري من مسار إلى آخر

نهايك عن ابعاد البقعة أو اقتراها عن طبقة المعلومات، كما هو مبين في الشكل (18-11).

لتؤمن عملية الملاحة يتم استخدام شعاعين ليزريين إضافيين يرتكزان على مبين الشعاع الأساسي ويساره، فعند ابعاد الشعاع الأساسي عن المسار الصحيح يتغير جهد الملاحة في الحساسين الخاصلين لعملية الملاحة بقيمة تتناسب طرداً مع بعد الشعاع الأساسي عن المسار الصحيح مما يؤدي إلى تغير جهد التحكم لنظام الملاحة المستخدم.



الشكل (18-11): تأثير ميلان القرص على عملية القراءة.

## ٩-١١ القرص الشامل الرقمي (DVD)

يعتبر القرص الشامل الرقمي DVD من أحدث طرق التسجيل الضوئي، ويعتمد مبدأ عمل هذا القرص على نفس مبدأ القرص المدمج CD. ويتميز القرص DVD بسعة تخزين عالية حوالي تسعة أضعاف القرص المدمج، فالقرص الشامل الرقمي قادر على

تخزين 4.7 GBytes أو 3.95 GBytes على أحد وجوهه. كما هو الحال في القرص المدمج تقسم أقراص DVD إلى ثلاثة أصناف أساسية:

**الصنف الأول:** القرص الشامل الرقمي المسبق التصنيع، وهو عبارة عن أقراص تستخدم للقراءة فقط باستخدام الليزر. وتستخدم للإنتاج الضخم بمعامل خاصة وبأسعار منخفضة جداً.

**الصنف الثاني:** وهي عبارة عن أقراص الشاملة الرقمية يمكن التسجيل عليها لمرة واحدة فقط، ولكن لا يمكن محوها أو إعادة تسجيلها ويطلق على هذا الصنف بأقراص الكتابة لمرة واحدة وقراءة متعددة (DVD Recordable).

**الصنف الثالث:** وهي عبارة عن أقراص الشاملة الرقمية قابلة للمسح، وله نفس خواص القرص المغناطيسي الضوئي المبين سابقاً ويرمز لها .DVD-Rewritable (DVD-RW)

يشابه DVD-R عمداً عمله CD-R، حيث يستخدم سرعة دوران خطيه للتسميل، وتتغير سرعة الدوران من 1.475 RPM إلى 575 RPM (دورة في الدقيقة) وذلك تبعاً لموقع رأس التسجيل أو القراءة على القرص. ويدأ التسجيل في المنطقة القريبة لacentre القرص، وتنتهي في محيطه مما يستدعي تغييراً لسرعة الدوران وذلك للحصول على خطوة تسجيل أو قراءة ثابتة على القرص.

يستخدم في القرص DVD خطوة مسار Pitch Track تساوي  $0.74 \mu\text{m}$  بدلاً من  $1.6 \mu\text{m}$  المستخدم في القرص CD وذلك لتحقيق الزيادة الكبيرة في حجم التخزين مقارنة بالقرص المدمج بنفس المساحة الفيزيائية المخصصة للتسميل، حيث يستخدم الطريقتين التاليتين: التقنية الأولى تعتمد على تغيير طول موجة للشعاع الليزري الأحمر حيث أصبحت  $650 \text{ nm}$  بدلاً من  $780 \text{ nm}$ ، التقنية الثانية تعتمد

على تغيير درجة تركيز العدسة من 0.5 إلى 0.6. وتسمح هاتين الطريقتين بجعل قطر البقعة الضوئية يساوي  $0.4 \mu\text{m}$  بدلاً من  $0.834 \mu\text{m}$  في القرص المدمج. يبين الجدول (1-11) مقارنة بين القيم المميزة للقرص CD و القرص DVD.

الجدول (1-11): مقارنة بين القرص CD والقرص DVD.

DVD-R	CD-R	
كتابية لمرة واحدة	كتابية لمرة واحدة	طريقة التسجيل
650nm	780nm	طول موجة التسجيل
650nm	770 - 830nm	طول موجة القراءة
6 - 11 mW	4 - 8 mW	استطاعة شعاع التسجيل
4.7 GBytes	700 MBytes	حجم التخزين
0.70 Deg	1.0 Deg	زاوية الميلان المسنوحه Tilt
0.60	0.50	معامل الانكسار في التسجيل
0.60	0.45	معامل الانكسار في القراءة

تم عملية التسجيل على القرص DVD بنفس الطريقة المستخدمة في القرص المدمج، حيث يتم تغيير مواصفات طبقة المعلومات باستخدام شعاع الليزر الأحمر. وتشير هذه الطبقة فوق طبقة الأساس من البوليکربونات Polycarbonates، وتتشير طبقة المعلومات بحيث تحتوي على أحاديد ميكروسكوبية مسبقة الصنع وتصنع طبقة المعلومات بحيث تحتوي على أحاديد ميكروسكوبية مسبقة الصنع pre-grooved. هذه الأحاديد تقود الشعاع الليزري إلى الأماكن المفترضة للتسجيل، بالإضافة لذلك تحتوي الأحاديد على مناطق نتوء Wobble لتزامن محرك السوافة الليزرية أثناء عملية القراءة.

يمكن للقرص DVD أن يحتوي على طبقي معلومات بحيث يتم القراءة أو التسجيل على كل وجه من وجوه القرص، حيث يتم قلب القرص الليزري في السوق. يبين الشكل (19-11) طريقة توضع الطبقات في القرص DVD-DS

ثنائي الأوجه. تتضاعف سعة التخزين في القرص ثنائي الأوجه Double face لتصبح 9.4 GByte. ومن سماته ارتفاع ثنه بالإضافة إلى أن المستخدم مرغم على قلب القرص في أثناء القراءة أو التسجيل لعدم يتوفر سوقة ليزرية تقرأ من الطرفين.

لزيادة سعة التخزين للقرص DVD بطريقة أخرى والتخلص من مشكلة قلب القرص في أثناء الاستماع أو مشاهدة المعلومات المصورة، يمكن أيضاً استخدام طبقتين من المعلومات إحداها فوق الأخرى بحيث تسجل الطبقتين العليا والسفلى المعلومات لمرة واحدة بواسطة شعاعين ليزريين أو شعاع واحد باستخدام عدسي تركيز مختلفين. يدعى القرص الناتج بالقرص DVD مضاعف الطبقة DVD Double Layer (DVD-DL). وبين الشكل (20-11) مقطعاً عرضياً للقرص DVD-DL. طبقة المعلومات الأولى L0 تعد طبقة نصف شفافة، بحيث تؤمن الانعكاس اللازم للقراءة أو التسجيل للطبقة الأولى، وبنفس الوقت تسمح لشعاع الليزر بالنفاذ إلى الطبقة الثانية L1 بطاقة كافية ليتمكن من التسجيل والقراءة على هذه الطبقة. ولتحقيق ذلك يستخدم مادة معدنية نتروجينية. ولتأمين وصول شعاع ليزري بطاقة كافية إلى الطبقة الثانية يتم استخدام شعاع ليزري بطاقة عالية تصل إلى 30 mW لعمليات التسجيل.



الشكل (20-11): توضع الطبقات في القرص DVD ثنائي الطبقات.

تصل سعة التخزين القرص DVD-DL إلى 8.5 GBytes على وجه واحد فقط من القرص. إلى أن السيارة الأساسية للقرص بالإضافة إلى غلاء ثمنه، فإنه يحتاج إلى سواعة ليزرية خاصة لعملية القراءة والكتابة.

## ١٠-١١ قرص الشعاع الأزرق Blu-ray Disc

يعتبر قرص الشعاع الأزرق (BD) Blu-ray Disc من أحدث ما توصل له العلم في تقنيات التسجيل الضوئي، حيث ترکز التصميم على زيادة سعة التخزين للقرص. وباعتبار أن قدرة التخزين تعتمد على مساحة البقعة التي يؤثر بها الشعاع الليزري، حيث يتناصف عكساً قدرة التخزين مع مساحة البقعة. ولتحقيق قدرة تخزين أعلى أي حجم تخزين أعلى للقرص (ضوئي)، تم التركيز على تقنيتين أساسيتين: التقنية الأولى تعتمد على إنقاص طول موجة الشعاع الليزري، حيث تتناصف مساحة البقعة مع طول الموجة. التقنية الثانية تعتمد على زيادة تركيز العدسة، حيث تتناصف سعة التخزين مع طول موجة الشعاع الليزري و درجة الانكسار وفق العلاقة التالية:

$$\text{Capacity} \propto (\text{NA}/\lambda)^2 \quad (11-2)$$

لتحقيق أصغر طول موجة ممكن استخدام ديدن ليزري من نوع GaN والذي يصدر شعاع ليزري بطول موجة قصيرة تساوي إلى 405 nm. بالإضافة إلى ذلك تم استخدام عدسة ذات عامل انكسار عالٍ ويساوي 0.85. ومن ثم فإن القرص DVD الذي يحقق قدرة تخزين تساوي 4.7 GBytes باستخدام شعاع ليزري بطول موجة 650 nm وبعدسة ذات عامل انكسار يساوي 0.6 تضاعف قدرة تخزينه بمقدار 2.5 مره في حال استخدام شعاع بطول موجة 405 nm وتضاعف بمقدار 5 مرات في حال استخدام عدسة بعامل انكسار 0.85، أي أن القرص BD قادر على تخزين

حوالي 25 GBytes، لذلك فان القرص BD يعد الجيل الجديد من الأقراص الضوئية. يبين الجدول (2-11) مقارنة بين القرص DVD والقرص BD.

الجدول (2-11): مقارنة بين القرص DVD والقرص BD.

Blu-ray	DVD	طريقة التسجيل
كتابية لمرة واحدة	كتابية لمرة واحدة	طولي موجة التسجيل
405nm	650nm	سماكة الطبقة العازلة الشفافة
0.1μm	0.6μm	زاوية الميلان المسموحة Tilt
0.64 Deg	0.70 Deg	الخطأ في السماكة المسموح بها
±3.0μm	±30μm	استطاعة شعاع التسجيل
6 – 12 mW	6 – 12 mW	معامل الانكسار في التسجيل
0.85	0.60	معامل الانكسار في القراءة
0.85	0.60	

من ناحية أخرى إن إنقاص طول موجة الشعاع الليزري و درجة انكسار العدسة، يؤدي إلى انخفاض الدقة في عملية التسجيل والقراءة. انخفض الدقة تتم نتيجة صعوبة تركيز البقعة الليزرية على طبقة المعلومات وذلك نتيجة لزاوية الميلان القرص والأخطاء الناتجة عن عملية تصنيع الطبقة العازلة الشفافة. ويتم زيادة دقة نظام الملاحة الآلي Servo، في سوافة BD لخفض المشاكل الناتجة عن التركيز بحيث تصمم سوافة الخاصة بالقرص BD ذات دقة عالية، بالإضافة إلى إنقاص سماكة الطبقة العازلة الشفافة إلى  $0.1 \mu\text{m}$  للسماح بزاوية ميلان 0.64 Deg قريبة من القيمة المسموحة في القرص DVD.



## قائمة بالمصطلحات

### A

المدى الترددية المسموع	Audible Range
عامل امتصاص الجدار	Absorption Coefficient
العناصر الصوتية	Acoustic Elements
التغذية الخلفية الصوتية	Acoustic feedback
الكسب الصوتي	Acoustic Gain
الممانعة الصوتية	Acoustic Impendence
قصر دارة صوتي	Acoustic Short-Circuit
المحول الصوتي	Acoustic Transformer
الكميات الصوتية	Acoustical Quantities
الصوتيات	Acoustics
رمز تعديل دلتا المتكيف	Adaptive Delta Modulation
رمز التعديل النبضي المرمز التفاضلي	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
المتكيف	Adaptive Quantization
تكييف خطوة التكميمية	Adiabatic
عملية أدياباتية	Adiabatic Bulk Modulus
معامل المرونة الحجمي الأدياباتي	Analog Broadcasting Systems
نظام البث التلفزيوني التماثلي	Analog Magnetic Recording
التسجيل المغناطيسي التماثلي	Analysis by synthesis speech coders
رموزات التحليل والتركيب	

التحليل والتركيب	Analysis-by-Synthesis
بطون أو النهايات العظمى	Antinodes
الذراع	Armature
وضوح النطق	Articulation
الغضروف الأريتنويド	Arytenoid Cartilage
منطقة الاستماع	Audience area
مكبرات سمعية	Audio Amplifier
رموز الإشارات السمعية	Audio Coder
الإدراك الحسي السمعي	Audio Perception
جودة الإشارة السمعية	Audio Quality
قاعات الاستماع	Auditorium Rooms
التقنيع السمعي	Auditory Masking
الترابط الذاتي	Autocorrelation

## B

التبؤ الخلفي	Backward Prediction
بافل	Baffle
بافل انعكاس الصوت الجهير	Bass-Reflex Baffle
الميكروفون المحدودي	Boundary Microphone
معامل المرونة الحجمي	Bulk Modulus
رشقات	Bursts

# C

الميكروفون الكربوني

Carbon Microphone

سوبر كارديود

Cardiod Super-

قناة مرکزية

Center Channel

المانعة المميزة

Characteristic Impedance

ميكروفون ذو ملقط

Clip-on Microphone

الكتاب الكودي

Code Book

الميكروفون تركيبي

Combination Microphone

جودة الاتصالات

Communication Quality

القرص المدمج

Compact Disk (CD)

تابع الضغط

Companding

التعقيد

Complexity

المطاوعة

Compliance

موجات تصاغطية

Compressional Waves

تضاغط

Compressions

الميكروفون الكهروستاتيكي أو المكثفي

Condenser Microphone

محولات الطاقة المكثفية

Condenser Transducers

مخروط

Cone

الاستطاعة المستمرة

Continues Power

تابع الترابط

Correlation Function

مصفوفة الترابط

Correlation Matrix

طريقة التغاير المشتركة

Covariance Method

الغضروف الخلقي	Cricoid Cartilage
الحالات الحرجة	Critical Bands
المسافة الحرجة	Critical Distance
تردد التقاطع	Crossover Frequency
<b>D</b>	
الغرف الميتة	Dead Rooms
التأخير	Delay
مرمز تعديل دلتا	Delta Modulation
الأغشية	Diaphragms
مرمز التعديل النبضي المرمز التفاضلي	Differential Pulse Code Modulation
الانبعاث	Diffraction
الإشارة السمعية الرقمية	Digital Audio Signal
الشريط المغناطيسي الرقمي	Digital Audio Tape
الكاسيت المغناطيسي الرقمي	Digital Compact Cassette (DCC)
عملية التسجيل المغناطيسي الرقمي	Digital Magnetic Recording
معالج معالجة الإشارة	Digital Signal Processors (DSP)
القرص المتعدد الرقمي	Digital Versatile Disk
القرص متعدد الاستخدام	Digital Versatile Disk (DVD)
ميكروفون اتجاهي	Directional Microphone
الميكروفون اتجاهياً	Directional Microphone

الخصائص الاتجاهية	Directivity
الاتجاهية	Directivity
قبة	Dome
الميكروفون الديناميكي	Dynamic Microphone
المجال الديناميكي	Dynamic Range
مستوى المدى الديناميكي	Dynamic Range
ظاهره الصدى	E
القيمة الفعالة	Echo Effect
الميكروفون المركب كهربائيًا	Effective Value
الممانعة الكهربائية	Electrical Combination
الكهربوتية	Microphone
المماثلة الكهربوتية	Electrical Impedance
محولات الطاقة الكهربوديناميكية	Electroacoustic
محولات الطاقة الكهرومغناطيسية	Electroacoustic Analogy
المماثلة الكهروميكانيكية	Electrodynamics Transducers
محولات الطاقة الكهروستاتيكية	Electromagnetic Transducers
الغلاف الخارجي	Electro-Mechanical Analogy
كثافة الطاقة	Electrostatic Transducers
لسان المزمار	Enclosure
دارة تسوية	Energy Density
	Epiglottis
	Equalizer

منحنيات تساوي الجهارة  
الكتافة الاستاتيكية أو التوازنية  
المسافة الصوتية المكافئة  
رأس المحو  
إشارة الاستشارة

Equal-Loudness Curves  
Equilibrium Density  
Equivalent Acoustic Distance  
Erase Head  
Excitation Signal

هامش استقرارية التغذية الخلفية  
ال حاجز المستوي  
الغرف المسطحة  
نظام التركيز  
مرشح البوان  
مرشح البوان  
ترددات البوان  
المزمزات الترددية  
الفاصل الترددية  
الاستجابة الترددية

Feedback Stability Margin  
Flat Baffle  
Flat Rooms  
Focusing System  
Formant Filter  
Formant Filter  
Formant Frequencies  
Frequency Domain Coders  
Frequency Internal  
Frequency Response

الثغرة

G

Gap

## H

السمع	Hearing
رنانة (هيلمھولتس)	Helmholtz Resonance
التسجيل باستخدام الانخیاز عالی التردد	High Frequency Bias Recording
الغرف عالية الضجيج	High Noisy Rooms
الأبواق	Horn Loudspeaker
عواء	Howling
(هايبر کارديود)	Hyper-cardiod
منحني التخلص المغناطیسي	Hysteresis Curve

## I

الممانعة	Impedence
النظم الداخلية	Indoor System
الكتلة الصوتية أو المعاطلة	Inertness
الموحات تحت السمعية	Infrasonic
وضوح النطق أو المفهومية	Intelligibility
كثافة الستيريو	Intensity Stereo
الضجيج الذاتي للمیکروفون	Internal Noise
الإقحام	Interpolator

## K

خاصية كیر	Kerr effect
-----------	-------------

حافة كنيف

Knife edge

L

الجهة المطبوعة

Label side

تجويف البلعوم الحلقي

Laryngeal pharynx

ميكروفون لافالير

Lavalier Microphone

التنبؤ الخططي

Linear Prediction

معاملات التنبؤ الخططي

Linear Prediction Coefficients

الشفتين

Lips

الغرف الحية

Live Rooms

التنبؤ بعيد الخطوة

Long Term Prediction

المجهر

Loudspeaker

مصفوفات المحاهير

Loudspeaker Arrays

صناديق محاهير

Loudspeaker Enclosure

حساسية المجهار

Loudspeaker Sensitivity

الفك السفلي

Lower jaw

مرّزات التنبؤ الخططي

LPC coder

متكتلة

Lumped

M

التس جيل المغناطيسي

Magnetic Recording

الشريط المغناطيسي

Magnetic Tape

القرص المغناطيسي الضوئي	Magno-Optical Disk
ظاهرة التقينع	Masking Effect
عتبة القناع	Masking Threshold
الكتلة	Mass
الاستطلاعة "المقتنة" العظمى	Maximum Power Rating
اختبار متوسط الرأي	Mean Opinion Square (MOS)
متوسط مربع الخطأ	Mean Square Error
الممانعة الميكانيكية	Mechanical Impedance
الأغشية المشدودة	Membranes
الميكروفون	Microphone
خصائص الميكروفونات	Microphones Characteristics
القرص المصغر	Mini Disk (MD)
الجزيئات	Molecules
الميكروفون الكهربوديناميكي ذو الملف	Moving Coil Microphone
المتحرك	Moving Conductor Transducer
محولات الطاقة ذات الناقل المتحرك	Moving-Iron Transducer
محولات الطاقة ذات الصفيحة الجديدة	Multimedia Services
المتحركة	N
الخدمات متعددة الوسائط	Narrowband Speech Coder
مرمزات الكلام ضيقة المجال	

التجويف الأنفي	Nasal Cavity
تجويف البلعوم الأنفي	Nasal pharynx
مصادر الصوت الطبيعية	Natural Sound Source
موجة مسافرة بالاتجاه السالب	Negative-travelling wave
العقد	Nodes
مانعة إسمية	Nominal Impedance
الاستطاعة الإسمية	Nominal Power
عدم الاتجاهية	non- directional

## O

الأوكتاف	Octave
الشامل لكل الاتجاهات	Omni-directional Microphone
مناطق الهواء الطلق	Open air areas
جهد الدارة المفتوحة	Open-Circuit Voltage
السوقة الليزرية	Optical disk drive
التسجيل الصوتي	Optical Recording
التجويف الفموي	Oral Cavity
تجويف البلعوم الفموي	Oral pharynx
جهاز توليد الكلام	Organs of Speech
تطبيقات النظم الصوتية الخارجية	Outdoor Sound Systems
النظم الخارجية	Outdoor System

**P**

جسيمات الوسط المهتر	Particle Speed
الجسيمات	Particles
الإدراك الحسي	Perception
مرمزات الإدراك الحسي	Perceptual Coding
مرشح الإدراك الحسي	Perceptual Weighting Filter
الدور	Period
الحساس الضوئي	Photo sensor
الميكروفون البيزو كهربائي أو الكريستالي	Piezoelectric Microphone
محولات الطاقة البيزو كهربائية أو	Piezo-Electric Transducer
الاجهادية الكهربائية	Pitch
طبقة الكلام	Pitch Filter
مرشح طبقة الصوت	Plane Wave
الوحة الصوتية المستوية	Plate
الفك العلوي	Polar Response
الاستجابة القطبية	Polarity Response
الاستجابة القطبية	Polarized
مستقطب	Polarizing Voltage
جهد استقطاب	Polyphase filter Band
المرشحات متعدد الطور	Positive Feedback
التغذية الخلفية موجبة	Positive-travelling wave
مسافرة بالاتجاه الموجب	

الكسب الصوتي الأقصى أو الكامن	Potential Acoustic Gain
الاستطاعة القصوى	Power Handling
التمثيل الترددى	Power Spectrum
الصدى الأمامي	Pre-Echoes
التقينع السابق	Pre-masking
الميكروفونات المستجيبة لدرج الضغط	Pressure Gradient Microphones
الضغط الصوتي	Pressure Level
الميكروفونات المستجيبة للضغط	Pressure Microphones
الشكل الموجي للضغط	Pressure waveform
المحور الرئيسي	Principal axis
تابع توزيع كثافة احتمالي	Probability distribution function
موجة مستوية متقدمة	Progressive Plane Wave
مشكل النموذج الصوتي	Psychoacoustic Models
مرمز التعديل النبضي الترميزى	Pulse Code Modulation (PCM)

## Q

مرشحات المرايا الترابعية	Quadrature-Mirror Filter Banks
شبه دورية	Quazi-periodic

## R

Radiation Resistance
Rarefactions

الزمن الحقيقي	Real Time
رأس التسجيل	Recording Head
معاملات الانعكاس	Reflection Coefficients
المقاومة المغناطيسية	Reluctance
إعادة اعتيان الإشارة	Resampling
التردد	Reverberation
زمن التردد	Reverberation Time
العكوسية	Reversibility
الميكروفون لشرطي	Ribbon Microphone
نهاية صلدة	Rigidly Terminated
ملح روتشيل	Rochelle Salt
درجة حرارة الغرفة	Room Temperature
S	
الصحيح الذائي	Self Noise
الحساسية	Sensitivity
التركيب الآتماتيكي	Servo
التنبؤ قصير الخطوة	Short Term Prediction
معلومات جانبية	Side Information
المعلومات الجانبية	Side Information
صغرى	Singing
المحاير الأحادية	Single Loudspeaker

العامود الصوتي	Sound Column
شدة الصوت	Sound intensity
شدة الصورت	Sound Intensity Level
الضغط الصوتي	Sound Pressure
الإشعاع الصوتي	Sound Radiation
نظم تقوية الصوت	Sound Reinforcement Systems
سرعة انتشار الصوت	Sound Speed
نظم التعرف على المتكلم	Speaker Recognition
الممانعة الصوتية النوعية	Specific acoustic impedance
المرمّزات المعيارية	Speech coder Standard
رمّزات الكلام	Speech Coders
نظم التعرف على الكلام	Speech Recognition Systems
الموحات الكروية	Spherical Wave
الضغط الجوي المعياري	Standard Atmospheric Pressure
الضغط الجوي الساكن	Static Atmospheric Pressure
الصوت المحسّم	Stereo Sound
التساواة	Stiffness
رمّز الحالات الجزئية	Subband Coder
الاختبار السمعي الشخصي	Subjective Listening Test
السوبر زعاق	Super Tweeter
القناتان الخيطيان	Surround Channels
مقاطع صوتية	Syllabics

**T**

الأستان	Teeth
التقنيع بالمؤقت	Temporal Masking
سطح إيهاء	Termination
مانعة إيهاء	Termination Impedance
طبقة شفافة عازلة سميكة	Thick transparent coating
عتبة التغذية الخلفية	Threshold Feedback
عتبة السمع	Threshold of Hearing
عتبة الألم	Threshold of Pain
الميكروفون الحلقاني	Throat Microphone
الغضروف الدرقي	Thyroid Cartilage
جودة الكلام المثالية	Toll Quality
معرض النغمات	Tone Compensated
تقنيع نغمة لنغمة	Tone-to-tone masking
اللسان	Tongue
نظام الملاحة	Tracking Systems
محول الطاقة	Transducer
عامل التحويل	Transducer Factor
رموز التحويل	Transform Coding
الوحة المسافرة	Travelling Wave

الزعاق

Tweeter

**U**

الموجات فوق السمعية  
المكمم المتظم  
غير الصوتية

Ultrasonic Waves  
Uniform Quantizer  
Unvoiced

تابع التغاییر  
اللهأة  
المؤتمر المرئي  
التحويف الصوتي  
صوتية  
بضوابط جهارة  
العناصر الحجمية  
السرعة الحجمية

Variance Function  
Velum  
Video Conferencing  
Vocal Tract  
Voiced  
Volume Controls  
Volume Elements  
Volume velocity

**W**

العدد الموجي  
رمّزات الموجة  
طول الموجة  
إشارة الهمس

Wave Number  
Waveform coding  
Wavelength  
Whispering

الإشارات الكلامية ذات المجال العريض  
رموزات المجال العريض  
المدار

Wideband Speech  
Wideband Speech Coder  
Woofer





## **الكتب و المراجع العربية**

- 1 عصام عبود "أسس الكهربائيات" كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - سوريا 1987.
- 2 علي عادل كيالي "الكهربائيات" كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية - جامعة حلب - سوريا 1985.
- 3 عصام عبود "نظم تقوية الصوت" أهلية - جامعة دمشق 2001.

## **الكتب و المراجع الأجنبية**

- 1- L.E. Kinsler, A.R. FRYE, "Fundamentals of Acoustics" in John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 1982.
- 2- L.L. Beranek, "Acoustics", in Acoustic Society of America, USA, 1987.
- 3- H. Kuttruff, "Room Acoustics", Second Edition, Applied Science Publication LTD, 1979.
- 4- W. Ahnert, and F. Steffen, "Sound Reinforcement Engineering -Fundamentals and Practice", E and FN Spon, 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE, UK, 1999.
- 5- L.R. Rabiner, R.W. Schafer, "Digital Processing of Speech Signal", Printice-Hall signal processing, New Jersey, ISBN 0-13-213603-1, 1978.

- 6- J. Watkinson, "The Art Of Digital Audio" Second Edition, Focal Press, ISBN 0-240-51320-3, 1999.
- 7- N. S. Jayant, and P. Noll, "Digital Coding of Waveforms - Principles and Applications to Speech and Video", Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, ISBN 0-13-211913-7, 1984.
- 8- J. H. Rothweiler, "Polyphase Quadrature Filter – A New Subband Coding Technique", in Proceeding of International Conference of Speech and Signal Processing, ICASSP'83, pp 1280-1283, 1983.
- 9- D. Pan, "A Tutorial on MPEG/Audio Compression", in IEEE Trans. on Multimedia, 2(2), 60-74, 1995.
- 10- D. Pan, "Digital Audio Compression", in Digital Technical Journal, Vol .5, No. 2, Spring 1993.
- 11- T. Kate, W.R. Th. Et al, "Matrixing of bit rate reduced audio Signal", in Proceeding of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'92), 2, II-205-II-208, 1992.
- 12- S. Nuutila, "MPEG-4 Audio Compression", in 22, maliskuta, 2000.
- 13- T. W. Parsons, "Voice and Speech Processing", McGraw-Hill Inc., ISBN 0-07-048541-0, New York, 1987.
- 14- Hardwick, J.C. and Lim, L.S., "The application of the IMBE speech coder to mobile communications, in Proceeding of International Conference on

- Acoustics, Speech, and Signal Processing  
(ICASSP'91), 249-252, 1991.
- 15- Raymond Steele, "Mobile Radio Communication",  
IEEE Press, New York, 1994.
- 16- M.R. Schroeder, and B. S. Atal, "Code Excited  
Linear Prediction (CELP) High-Quality Speech at  
Very Low Bit Rates", in Proceeding of  
International Conference on Acoustics, Speech,  
and Signal Processing (ICASSP'85), 937-940,  
1985.
- 17- ITU-T Study Group, "Coding of Speech at 8 kbit/s  
Using Conjugate-Structure Algebraic-Code Excited  
Linear-Prediction (CS-ACELP)", in International  
Telecommunication Union Telecommunication  
Standardization Sector, Draft Recommendation,  
Version 6.5, Original: E, 26-December 1995.
- 18- P. Kroon, E.F. Deprettere, and R.J. Sluyter,  
"Regular-Pulse Excitation A Novel Approach to  
Effective and Efficient Multipulse Coding of  
Speech", in IEEE Transactions on Acoustics,  
Speech and Signal Processing, Vol. ASSP-34, No.  
5, pp 1054-1063, October 1986.
- 19- H. Gray, and J. D. Markel, "Distance Measures for  
Speech Processing", in IEEE Transactions on  
Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.  
ASSP-24, No. 5, pp 380-391, October 1976.
- 20- L. R. Rabiner, M. R. Sambur, "An Algorithm for  
Determining the Endpoints of Isolated Utterance",

- in The Bell System Technical Journal, Vol. 54, No. 2, Feb. 1975.
- 21- W. Testschner, "Voice Processing", Artech House Inc, 685 Canton Street, Norwood MA, USA, 1991.
  - 22- T. P. Barnwell, K. Nayebi, C. H. Richardson, "Speech Coding - A Computer Laboratory Textbook", in John Wiley & Sons, Inc. New York, ISBN 0-471-35154-7, USA, 1995.
  - 23- Ben Gold, Nelson Morgan, "Speech Audio Signal Processing", in John Wiley & Sons, Inc. New York, ISBN 0-471-35154-7, USA, 1999.
  - 24- Blu-ray Disc Founders, "White paper Blu-ray Disc Format, 1- A Physical Format Specifications for BD-RE", August 2004.
  - 25- Andy Marken, "Double Layer DVD+R Media White Paper", 2004.
  - 26- DVD White Paper, "An Introduction to DVD Recordable (DVD-R)", pioneer new Media Technologies, 2004, USA.
  - 27- D. Davis, and C. Davis, "Sound System Engineering" Second Edition, Focal Press, USA, 2000.
  - 28- H. W. SAMS, "Reference Data For Radio Engineering", ITT Press, USA, 1977.
  - 29- Joseph De Chiava, and John H. Callendar, "Time - Saver Standards for Building Types", Second Edition, in McGraw - Hill, USA, 1980.

دقق الكتاب من قبل اللجنة العلمية:

1- الاستاذ الدكتور حسان ريشة

2- الاستاذ الدكتور نديم شاهين

3- الاستاذ الدكتور حسن ابوالنور

دقق الكتاب لغويًا من قبل الدكتور عبد الكريم حسين

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية



جامعة دمشق  
University of Damascus