جامعة دمشق

المحاضرة 9: تتمة بحث المايكات مع اعتبارات تصميم لنظم التقوية

مادة الكهرصوت

قسم الإلكترونيات والاتصالات 2025

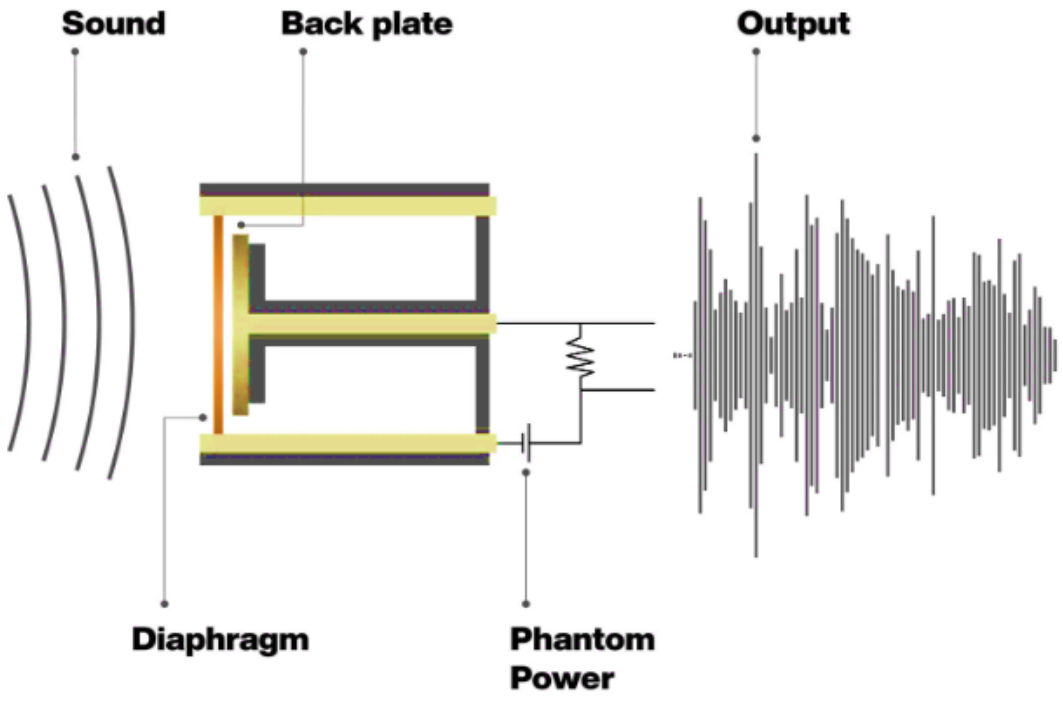
السنة 4

م. أروى نصري

2- محولات الطاقة الكهروستاتيكية :

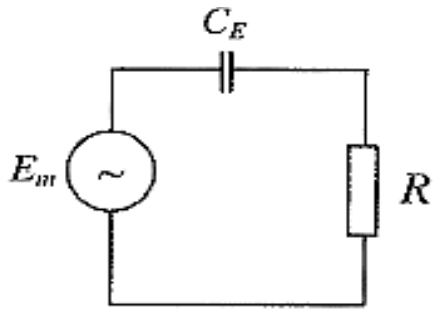
أ-محولات الطاقة المكثفية :

تعمل هذه المحولات على أساس **التفاعل الكهروستاتيكي** نوع condencer بين لوحين مشحونين(لبوسي مكثف) أحدهما ثابت والآخر متحرك يتعرض لاهتزاز نتيجة الموجة الصوتية بحال المايك وسندرس المايك المكثفي



عند التحويل من صوت إلى كهرباء: (مايك المكثفي):

- حركة الغشاء بفعل الصوت تغير سعة المكثف
- ينتج عن ذلك تغير في الشحنة ⟵ توليد إشارة كهربائية
- تحتاج جهد بطارية لتعمل phantom power لذا دارة المحول المكثفي
- عندما يعمل كمايك هي :



الدارة المكافئة لمحولات الطاقة المكثفي.

المبدأ مختلف كلياً عن الديناميكي:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d} \qquad Q = C \cdot V_0$$

الغشاء الرقيق يشكّل أحد لوحَي مكثف الصوت يحرّكه فيتغير d فتتغير C فتتغير الشحنة Q فيتولد جهد :

الجهد الخارج يتناسب مع إزاحة الغشاء وليس سرعته كما في الديناميكي. هذا هو جوهر الفرق.

الديناميكي **velocity transducer**
والمكثفي **displacement transducer**
وهذا التمييز هو الذي يُحدد كيف يُضبط كل منهما.

في المايك الديناميكي أو محولات الطاقة الديناميكية عادة الجهد يتناسب مع السرعة

القوة المحرّكة تتناسب مع الضغط هذا يُفسّر لماذا الحساسية مستوية في المنطقة فوق fM0 عندما تسود الكتلة يكون ZM≈jωMm وبالتالي:

$$F_{\text{قوة على الغشاء}} = A_{\text{مساحة الغشاء}} \cdot p_{\text{الضغط الصوتي}}$$

$$v_{\text{سرعة الغشاء}} = \frac{F}{Z_M} = \frac{A \cdot p}{\underbrace{j\omega M_m}_{\text{ممانعة الكتلة فوق } f_{M0}}}$$

$$V_{out} = Bl \cdot v = Bl \cdot \frac{A \cdot p}{j\omega M_m} \cdot j\omega = \frac{Bl \cdot A}{M_m} \cdot p$$

بما ان جهد الخرج مستقل عن التردد W فالحساسية لا تتعلق بالتردد في المايك الكهروديناميكي

$$\text{الحساسية} = \frac{V_{\text{output}}}{p}$$

(الضغط الصوتي p قد يتغير مع التردد بحسب المصدر والبيئة، لكن المايك الكهروديناميكي فوق fM0 يُترجم أي p يصله إلى جهد بنسبة ثابتة مستقلة عن التردد)

المشكلة في المحولات المكثفية الحساسية ستكون تابعة للتردد فيما لو عملنا فوق تردد الرنين كمافي الكهروديناميكي لأن :

هنا معادلة الجهد الخارج تتعلق بالازاحة للغشاء لا السرعة

$$V_{out} = \frac{V_0}{d_0} \cdot \xi$$

الغشاء يتبع معادلة كتلة-نابض:

$$M_m \ddot{\xi} + R_m \dot{\xi} + \frac{\xi}{C_m} = A \cdot p$$

فقط تحت fM0 حين تسود المطاوعة سيكون جهد الخرج مستقلا عن التردد
وهي منطقة العمل للمايك المكثفي عكس الكهروديناميكي :

$$\frac{\xi}{C_m} \approx A \cdot p \implies \xi = A \cdot C_m \cdot p = \text{ثابت مستقل عن } \omega$$

$$V_{out} \propto \xi = \text{ثابت} \implies \text{حساسية مستوية}$$

تتحقق منطقة العمل:

برفع fM0 فوق النطاق السمعي كله عبر:

غشاء خفيف جداً (بضعة ميكرومترات) **+ توتر عالٍ** على الغشاء اي جعله مشدودا جدا

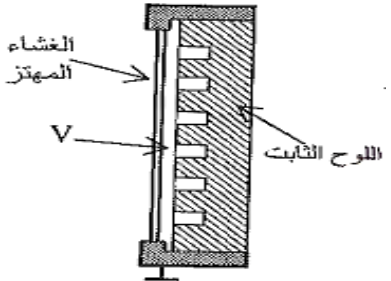
$$f_{M0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_m \cdot C_m}} \uparrow \Longleftarrow M_m \downarrow \text{ و } C_m \downarrow$$

هكذا يقع كامل النطاق السمعي (20Hz–20 kHz) **تحت** fM0 في منطقة المطاوعة ⇐ استجابة مستوية على كامل الترددات .

هنا يحصل التناقض :

رفع التوتر يرفع fM0 لكنه يُقلّل Cm فيُقلّل الحساسية وهذا لايصح

الحل: إضافة مطاوعة من الهواء خلف الغشاء CMA لتعويض الانخفاض دون المساس بـ fM0



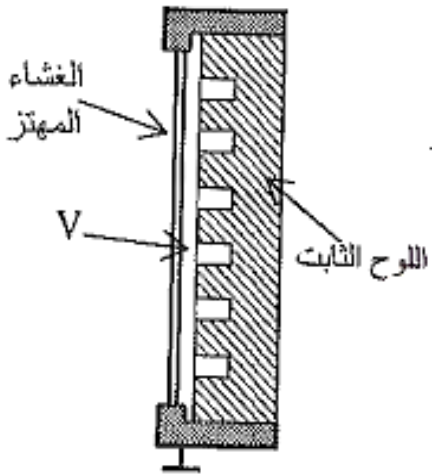
حيث المطاوعة الكلية هي مكافئة مطاوعة الطبقة خلف الغشاء ومطاوعة الغشاء

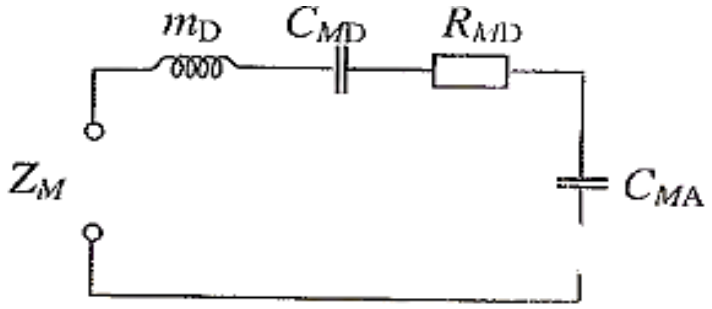
$$C_M = \frac{C_{MD} C_{MA}}{C_{MD} + C_{MA}}$$

نزيد حجم الطبقة الهوائية خلف الغشاء V أكثر من سطح الغشاء S لأن :

$$C_{MA} = \frac{V}{B.S^2}$$

فنختار صفيحة ثابتة ذات تجاويف :





التمثيل الديناميكي للممانعة الميكانيكية الكلية للميكرفون المكثفي.

نضع Pop Filter أمام **الميكروفون المكثفي** لأنه أكثر حساسية **لتيارات الهواء المفاجئة** **plosives** وليس فقط لأنه حساس للصوت نفسه.

يلتقط أدق تغير في ضغط الهواء حتى عند النفس الخفيف أو الحرف P بسبب حساسيته العالية
الغشاء خفيف جداً ممكن أن يتحرك بعنف ممايولد تشويه صوتي خلال التسجيل
يجعل أي خلل واضحًا جدًا في التسجيل (على عكس الديناميكي الأقل حساسية)

الهدف هو حماية الغشاء وتحسين جودة التسجيل.

فالهواء يتباطأ عند الشبك مما يمنع الهواء من ضرب الغشاء مباشرة

	الميكروفون الكهروديناميكي	الميكروفون المكثفي
مبدأ العمل	ملف يتحرك ضمن مجال مغناطيسي (مثل السماعة بالعكس)	مكثف متغير (غشاء رقيق + قطب خلفي)
الحاجة للطاقة	❌ لا يحتاج طاقة خارجية	يحتاج طاقة وهمية (Phantom Power +48V)
الحساسية	منخفضة نسبيًا	عالية جدًا
الاستجابة للتردد	محدودة (خاصة في الترددات العالية)	واسعة جدًا ودقيقة (مثالي للصوت البشري والآلات)
الدقة في التقاط التفاصيل	أقل، مناسب للأصوات القوية والبسيطة	عالية جدًا (يلتقط حتى النفس والهمس)
التحمل للضغط الصوتي	عالٍ جدًا (مثالي للدرامز، الأمبليفاير)	أقل من الديناميكي
الضجيج الذاتي	منخفض جدًا	أعلى نسبيًا
الاستخدام الشائع	الأداء الحي، تسجيل الآلات القوية	استوديوهات تسجيل، البودكاست، الصوتيات الدقيقة
السعر	أرخص بشكل عام	أغلى في العادة
التوجيهية	عادة كارديودية أو سوبر كارديودية	متعدد الأنماط (كارديودي، أومني، ثنائي...)

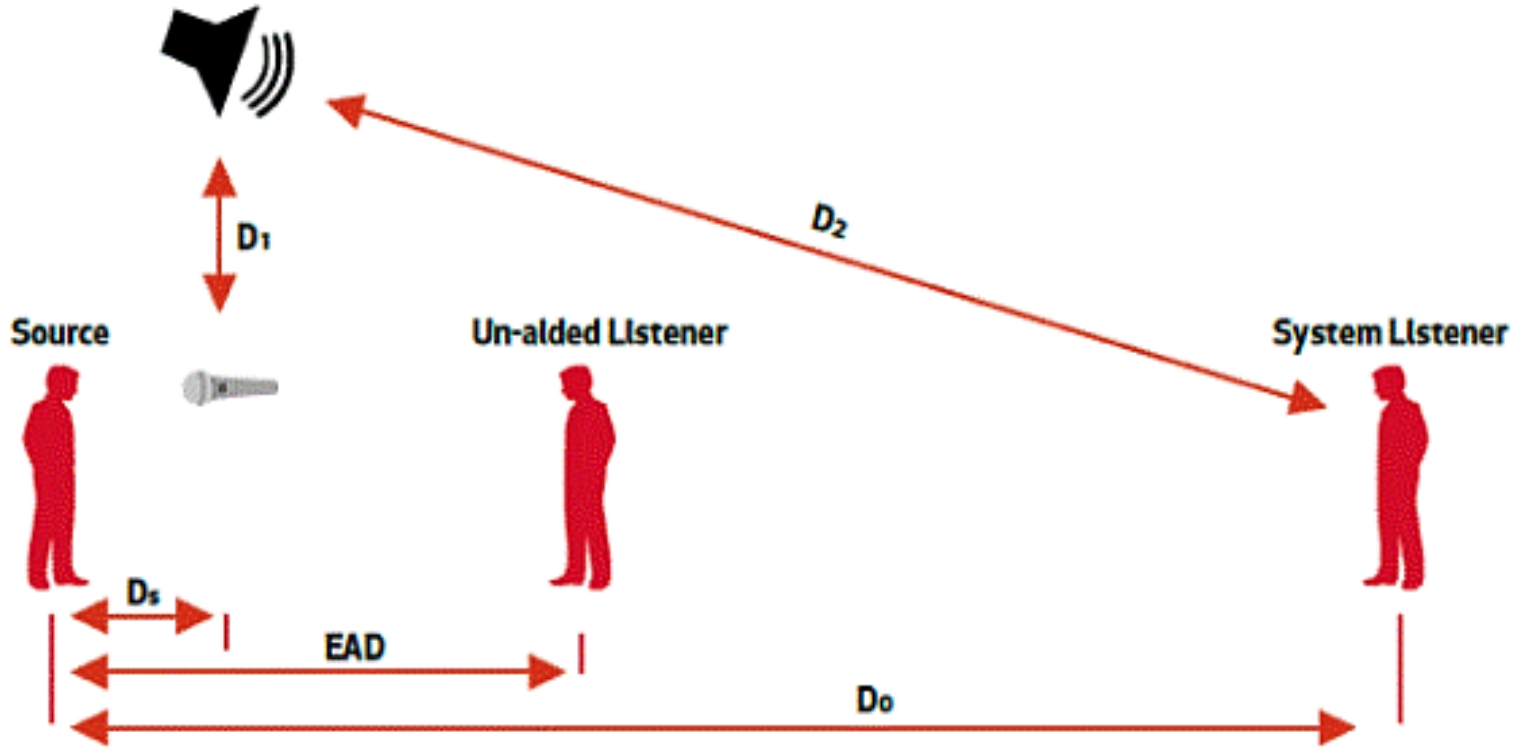
نظم التقوية الصوتية : Sound Reinforcement Systems

تكبير وتحسين ونقل الصوت في الأماكن التي لا يكفي فيها الصوت الطبيعي لوصوله بوضوح لجميع الحاضرين

لتأمين مستوى كاف للسمع الطبيعي في أماكن مفتوحة كالملاعب أو محدودة كالصالات والمسارح

تؤخذ الإشارات من مايك او مجموعة مايكات وتكبر بمكبرات سمعية ويعاد تحويلها إلى صوت بمستوى أعلى بواسطة مجاهير موزعة بشكل مناسب لتغطية منطقة الاستماع بمستوى جيد

الشكل العام لنظام التقوية البسيط في مكان مفتوح



اعتبارات تصميمية :

العامل	التأثير
زمن الترداد (Reverberation Time - RT60)	يجب التحكم فيه لتقليل الضبابية
المسافة الحرجة (Critical Distance)	تُحدد متى نحتاج السماعات للمساعدة
التغطية الصوتية	ضبط اتجاه السماعات لتغطية الجمهور بدون فراغات أو تداخل
التوزيع المكاني	تحديد مواضع الميكروفونات والسماعات بدقة
المعالجة الرقمية	تحسين التوازن الزمني والترددي

المتطلبات الأساسية لنظم التقوية :

- يجب أن يصل للمستمع مستوى أدنى للصوت (صوت ناتج عن مجهار مثلا) يزيد 25dB عن مستوى الضجيج الوسطي في المكان (مثال ضجيج ناتج عن نظام تكييف في القاعة)
- أعلى مستوى للصوت لايتجاوز 110dB بحيث لانصل لعتبة الألم 120dB
- يجب ألا تتفاوت مستوى الشدة بمايتجاوز 4-10dB بين المستمعين
- أدنى مستوى للصوت 50dB في أماكن التغطية المغلقة و يتجاوز 75dB في الأماكن المفتوحة بحيث يزيد 25dB عن مستوى الضجيج الوسطي
- المجال الترددي للإشارات الموسيقية من 50HZ-10KHZ وللكلامية من 100HZ-6.5KHZ على الأقل
- الفارق بين مستوى شدة إشارات أقرب مجهارين الواصل لأي مستمع يضبط بحيث يحقق فاصل زمني Δt
- توزع المجاهير جغرافيا بحيث يبدو اتجاه الصوت للمستمع مثل المصدر الحقيقي للصوت المسجل مكانيا

القيم المميزة للنظم :

1) الكسب الصوتي المطلوب :NAG

هو نسبة زيادة مستوى الصوت في موقع المستمع عن مستوى الصوت في نفس االمكان بحال عدم تشغيل نظام تقوية ويتحدد بالمسافة الصوتية المكافئة EAD التي هي المسافة بين المتكلم وأول مستمع (والذي يسمع بمستوى كاف يزيد على الأقل 25dB عن مستوى الضجيج بدون تشغيل نظم تقوية)

يراد من نظم التقوية أن تنتج عند أبعد مستمع على مسافة D_0 المستوى نفسه من شدة الصوت الموجود عند أقرب مستمع الذي يبعد مسافة EAD عن المصدرالمتكلم بحال عدم تشغيل نظام تقوية .

الكسب الصوتي الذي نحتاجه :

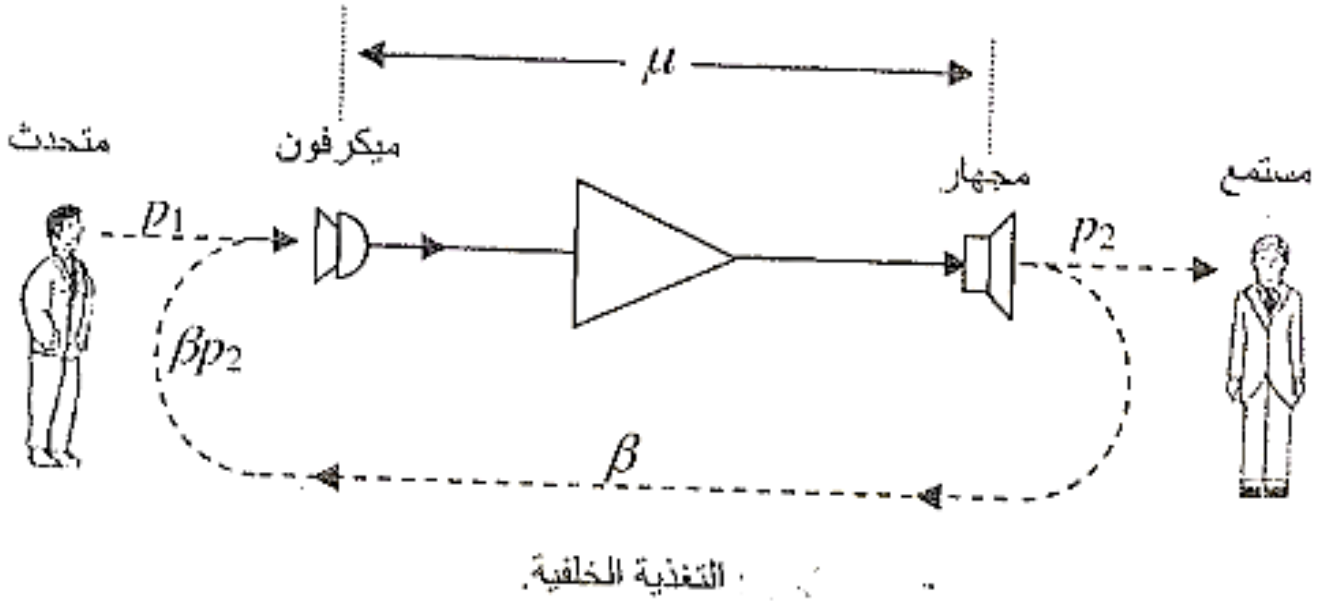
$$NAG = 20\log_{10}\frac{D_0}{EAD}\ [\mathrm{dB}]$$

بفرض $D_0 = 32\mathrm{m}$ و EAD=2m يكون NAG=24dB

لتحقيق كسب صوتي عالي يفضل كون المجهار والمايك **اتجاهي**

2) التغذية الخلفية الصوتية :

تذبذب الصوت عند عودة إشارة الصوت الناتجة عن المجهار للمايك مما يعني استمرار صدور الصوت حتى بتوقف المصدر المتكلم .



فإذا كان الضغط الصوتي الناتج عن المايك هو P_1

فالضغط الناتج عن المجهار $P_2 = \mu P_1$

ثم تتضاعف بكل لفة فإذا كانت التغذية الخلفية موجبة أي :

$$P_1 + \beta P_2 = P_1 + \beta\mu P_1$$

فالمقدار $\beta\mu$ الموجب يعني تزايد الصفير بكل جولة مما قد يعطل المايك والسالب منه يعزز مركبات ترددية ويخمد اخرى فيشوه الاستجابة الترددية للنظام الصوتي

ولحل المشكلة يجب **خفض** الكسب الصوتي NAG بمقدار هامش أمان(FSM= 6dB) عن قيمة PAG (وهو أقصى مقدار للكسب يمكن أن يوفره نظام الصوت قبل أن يبدأ في إصدار تغذية راجعة صوتية Feedback، أي قبل أن يصفّر المايكروفون بسبب دخول صوته المرتد من السماعة في دورة تضخيم مستمرة.)

$$\mathrm{PAG} \geq \mathrm{NAG} + 6\ \mathrm{dB}$$

أقصى مقدار للكسب الصوتي

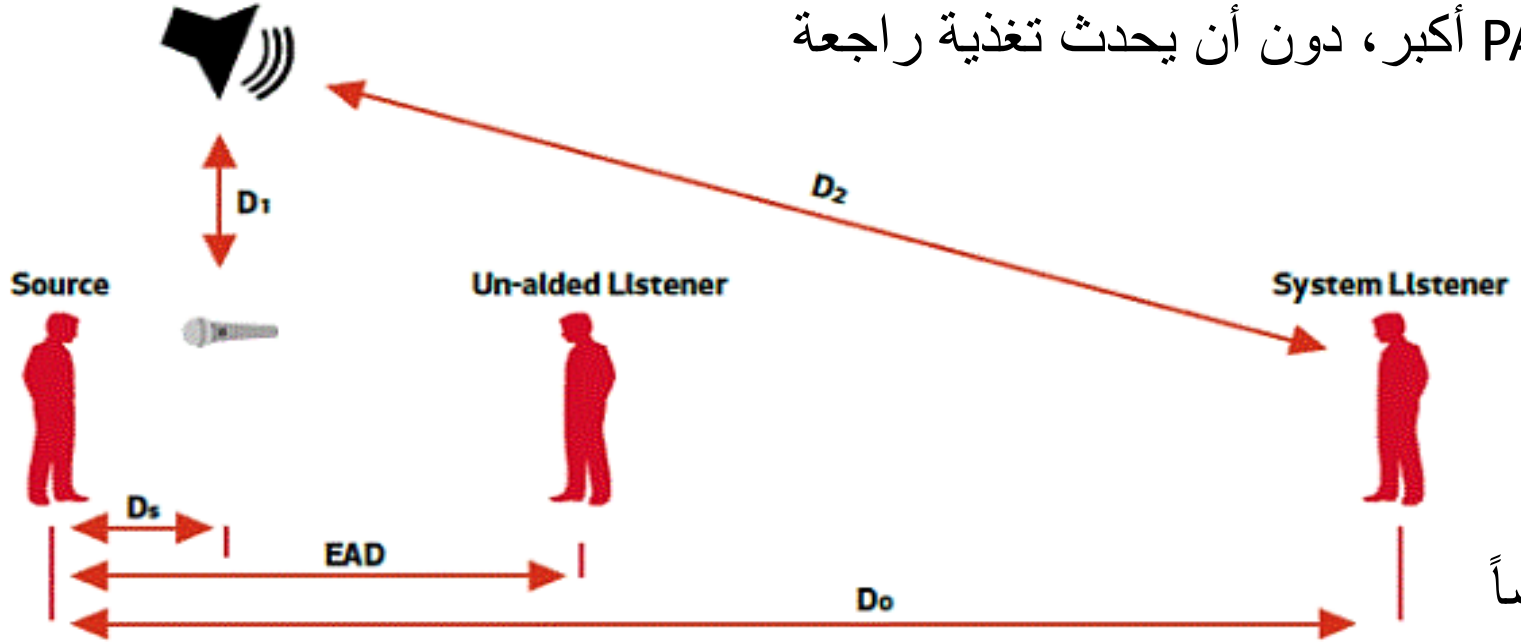
$$PAG = 20\log_{10}\left(\frac{D_0 \cdot D_1}{D_S \cdot D_2}\right) - 6$$

كلما زادت المسافة بين المايك والسماعة يزيد PAG
كلما اقترب المايك من المتحدث يزيد PAG لأن الإشارة المطلوبة تكون أقوى

ذلك بفرض المجهار والمايك عديم الاتجاهية omni أما بحال كونها اتجاهية نزيد بمقدار اتجاهية كل من المكبر والمايك لأن :

- الميكروفون لا يلتقط من الخلف مثل نمط cardioid أو supercardioid
- والسماعة تُصدر الصوت باتجاه محدد فقط (ولها معامل توجيه Qعالٍ).

فإننا نحصل على كسب صوتي ممكن أعلى أي PAG أكبر، دون أن يحدث تغذية راجعة



$PAG_{dir} = PAG_{omni} + D_m + D_{sp}$

حيث :

D_m كسب توجيه المايك عادة 3-6dB

D_{sp} كسب توجيه المجهار عادة 6-10dB

التوجيه اذا يزيد PAG ايضاً

واستخدام معالجة رقمية لصدى التغذية الراجعة ايضاً

عندما تكون السماعة والمتحدث قريبين من بعض (أي $D_2 \approx D_0$) والمتحدث قريب من المايك يمكن كتابة :

$$PAG = 20\log_{10}\left(\frac{D_1}{D_S}\right) - 6$$

مثال :

$$FSM = 6\ \text{dB}\ ،\ D_2 = 36\ \text{m}\ ،D_1 = 9\ \text{m}\ ،D_0 = 32\ \text{m}\ ،D_S = 0.4\ \text{m}$$

فيكون:

$$PAG_{omni} = 20\log_{10}\frac{D_0\ D_1}{D_S\ D_2} - FSM = 20\log_{10}\frac{(32)(9)}{(0.4)(36)} - 6$$

$$= 20\log_{10} 20 - 6 = 20\ \text{dB}$$

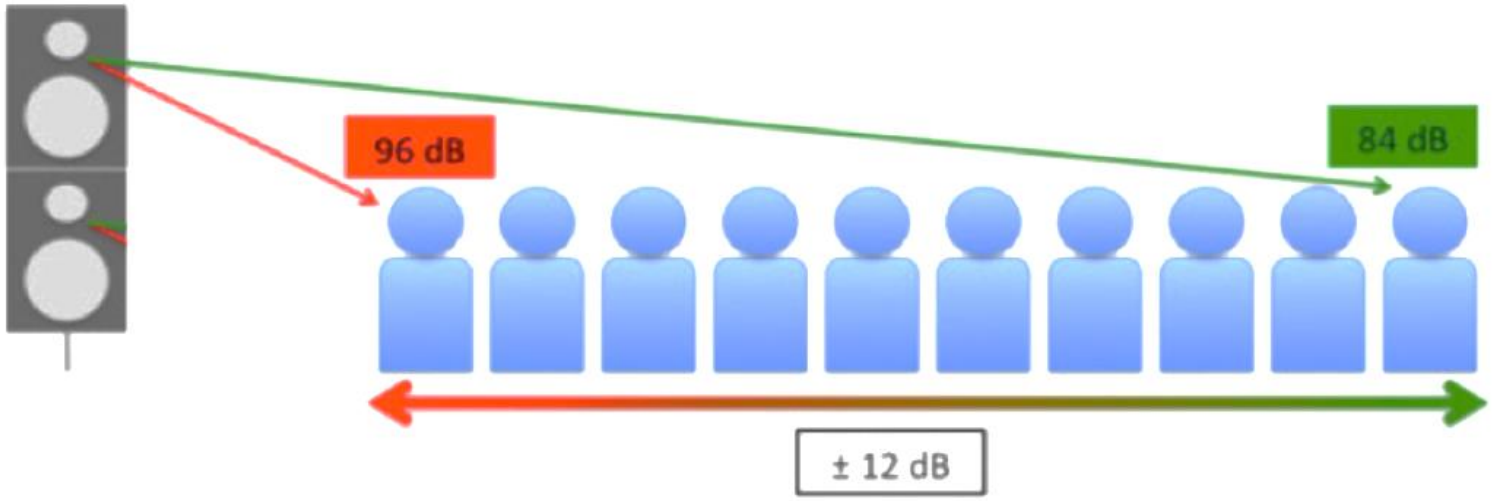
وسبق أن حسبنا NAG=24dB أي $NAG>PAG$ ولزيادة PAG **نستخدم مايك اتجاهي** فيزيد 6dB ويصبح $PAG>NAG$

وبحال المجهار ايضا اتجاهي بمقدار 6dB اضافية فيزيد ايضا الكسب قبل حدوث تغذية راجعة ليصبح PAG=32dB

توجيه الأجهزة هو **أقوى أداة غير إلكترونية** لزيادة كفاءة النظام ومنع الـ feedback

تذكرة : في الاماكن المفتوحة ينخفض الطاقة الصوتية 6dB عند مضاعفة البعد عن المنبع (بحال عدم التوجيه) وتنخفض 12dB بمضاعفة البعد 4مرات عن المنبع

.



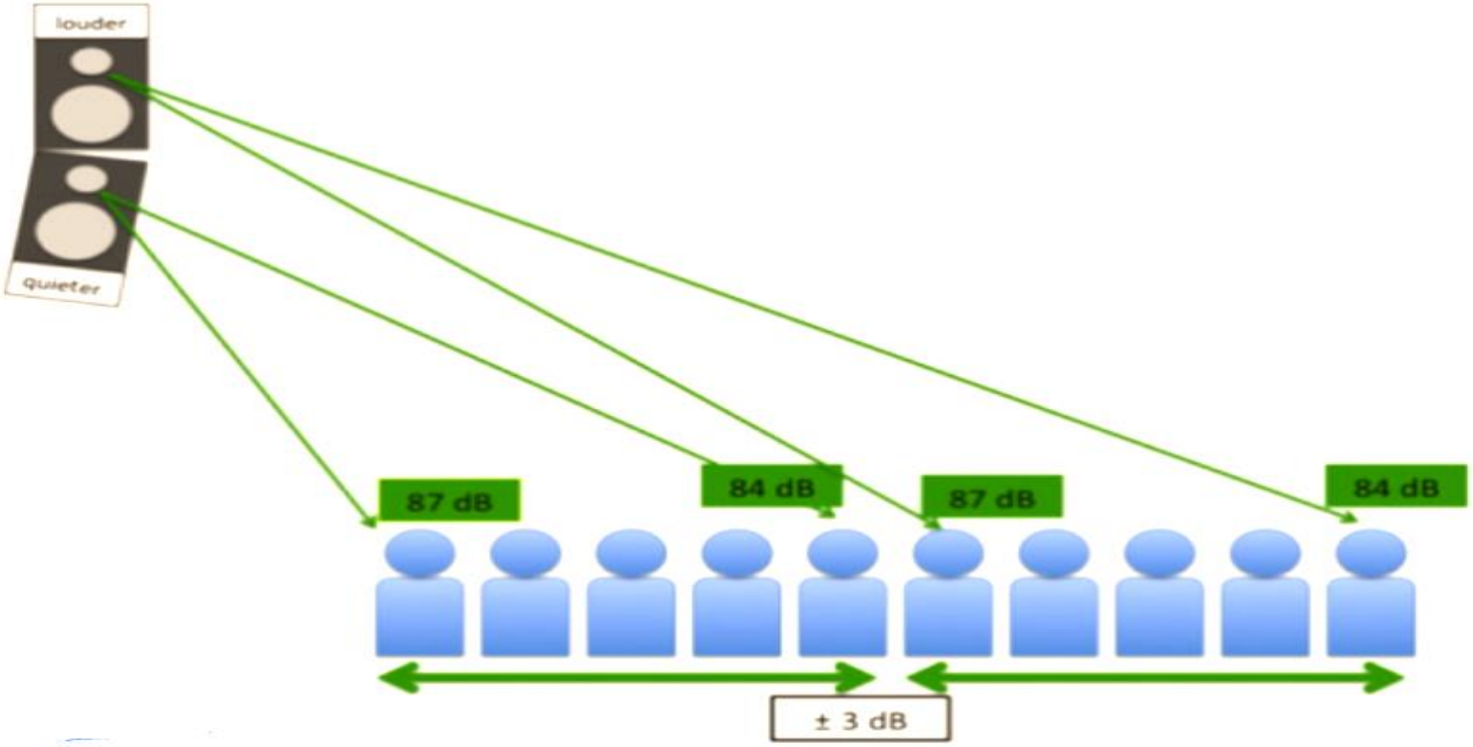
إن NAG يعبر عن الاحتياج الطبيعي للكسب لتعويض الفارق في المسافة.

نلاحظ من الشكل أن التفاوت بالشدة بين أقرب وابعد مستمع هو 12dB نتيجة فارق المسافة وبلاتوجيه للسبيكر(هذا التفاوت يفوق 10dB) رغم وجود نظام تقوية هنا (سبيكر) لذا لايعد مقبولا لأننا نريد كسب الصوتي يعطي زيادة بمستوى شدة الصوت لتصل المستمع البعيد نفس الشدة تقريبا التي يسمعها المستمع الاقرب من المتحدث مباشرة دون نظام تقوية صوتي(بحال عدم وجود سبيكر)

فنظام التقوية يحتاج سبيكر موجه أو مصفوفة سبيكرات موجهة ليحقق التوازن والتفاوت المقبول نناقش حلين مقبولين :

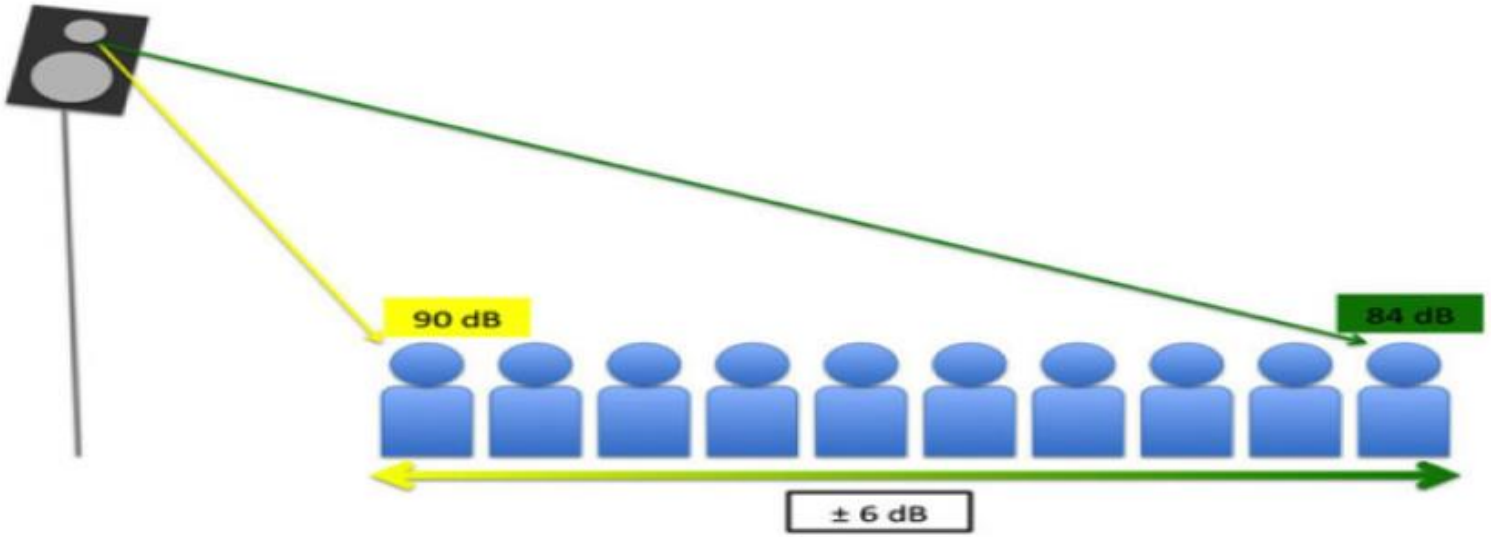
(بالتوجيه في نظم التقوية نستطيع أن نحقق كسب صوتي مطلوب مقبول تصميميا)

1- مصفوفة مجاهير موجهة :



التفاوت 3dB في المثال هنا وهو مقبول
نظام التقوية حقق الغرض المطلوب
وأعطى كسب صوتي يعوض المسافة عبر توجيه
فعال لمصفوفة سبيكرات

2- مجهار واحد موجه :



بحال نريد حل قليل الكلفة دون زيادة العدد
كلا الحلين انقص التفاوت بشكل مقبول
بين المستمعين لكن الحل الاول جعل التفاوت أقل

مثال :

نظام تقوية يستخدم سبيكر موجه كما في الشكل :

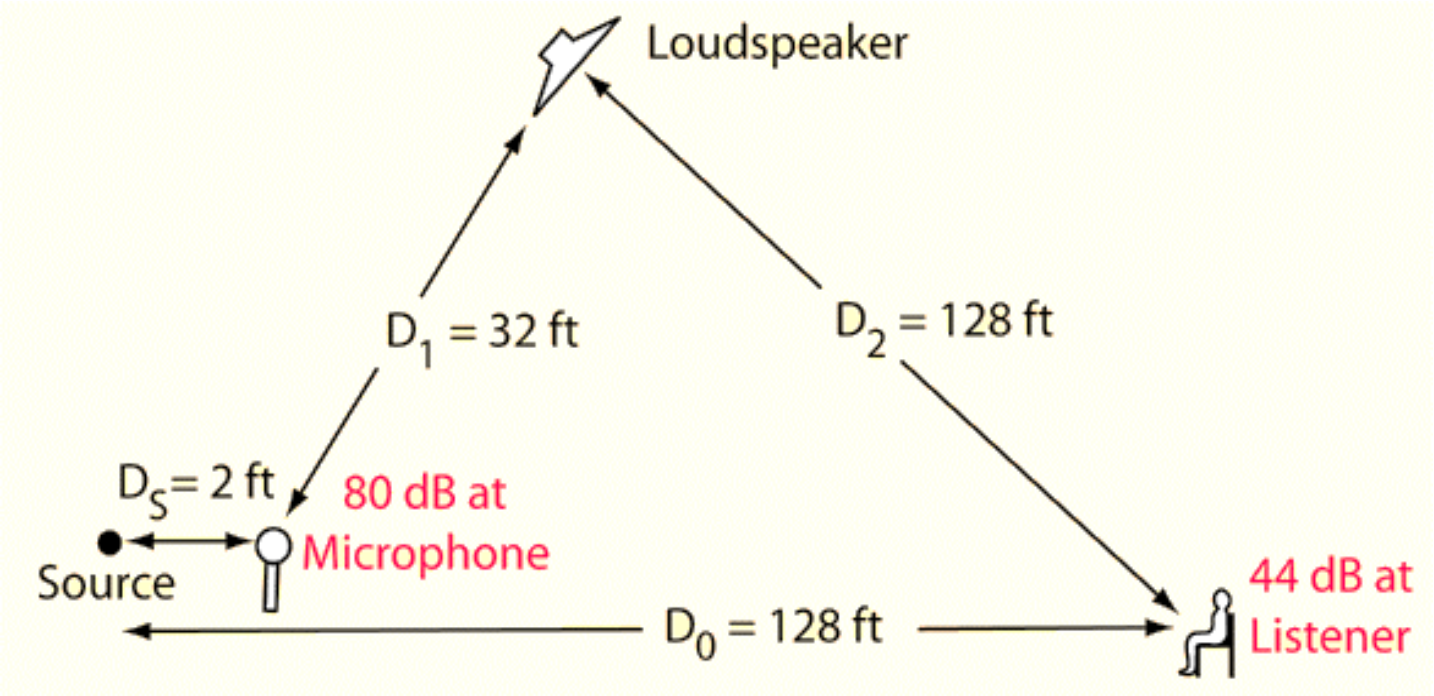
بفرض عدم تشغيل نظام تقوية أولاً

عند مايك يبعد مسافة 2ft عن المصدر كانت النسبة

80dB وتتناقص النسبة حسب المسافة وصولا

لمسافة 128ft حسب قانون تناسب الشدة عكسا

مع مربع المسافة (كلما ضاعفنا البعد تنقص 6dB)



الجدول يوضح قيمة الشدة عند المستمع : 44dB

وهي قيمة شدة غير مقبولة لمستوى سمع إشارة كلامية

واضحة و بالحساب يكون اقصى كسب صوتي قبل حدوث صفير هو (24dB-6dB)

فيمكن الوصول إلى مستوى شدة اقصى للمستمع 44dB+18dB وهو مسموع بالكاد لمحادثة

في الاماكن المغلقة في حال عدم وجود إشارة تقنيع أو ضجيجية مركبة

(راجع جدول الشدة للاشارات المختلفة محاضرة1)

في حال اردنا كسبا صوتيا مطلوبا 70dB يحقق ذلك بتوجيه السبيكر بمعامل 6dB

والمايك الاتجاهي بكسب 3dB مثلا.

Level dB	Distance ft
80	2
74	4
68	8
62	16
56	32
50	64
44	128

تصميم نظام تقوية صوتية في قاعة محاضرات (مكان مغلق):

أبعاد القاعة **4 × 10 × 20 :متر** -المجهار موضوع على الحائط الأمامي على ارتفاع 2 م و زمن الترداد RT60 = 1.5 s

الميكروفون على المنصة، والمسافة بين المحاضر والميكروفون DS=0.2 m

المسافة بين الميكروفون والمجهار D1=1.5 m

المسافة من المحاضر إلى أبعد مستمع D0=15 m

المسافة من المجهار إلى أبعد مستمع D2=17 m

الكسب الصوتي المطلوب NAG=18 dB

استطاعة المضخم الحالية P=10 W

حساسية المجهار 90 dB عند 1 W على بعد 1 m

يمكن بالمعطيات السابقة حساب المسافة الحرجة والكسب الصوتي الاقصى ومستوى الشدة على بعد مسافة معينة فرضا 10mمن المجهاروباجراء رسم توضيحي للنظام

$SPL_{10m}=90+10\log_{10}(P)-20\log_{10}(15)$ كما وجدنا في المحاضرة السابقة

في حال استخدام مايك و مجهار اتجاهيين بقيمة ما يزداد الكسب الصوتي لقيمة اكبر من الكسب المطلوب مع اخذ هامش أمان من التغذية الخلفية

لو نقلنا النظام لمكان مفتوح لن نناقش الترداد ولكن يزيد خطر الضجيج العام في المكان ويزيد الكسب الصوتي المطلوب لتحقيق سمع جيد يعوض فقد المسافة لعدم وجود انعكاسات ويزيد الكسب الاقصى بسبب عدم وجود خطر تغذية راجعة

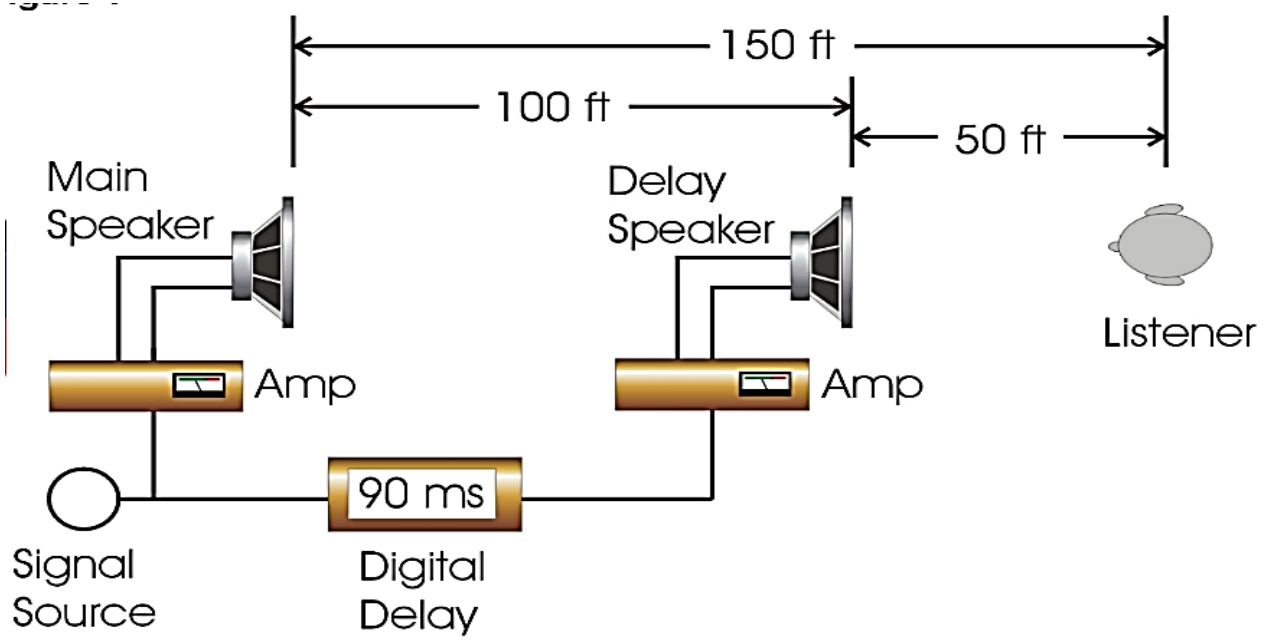
زيادة الاستطاعة ليست دائما هي الحل في تحقيق شدة مطلوبة على مسافة معينة .

أمثلة تصميم :

نستخدم مصفوفة مجاهير أي أكثر من مجهار في قاعة كبيرة:

الصوت من **سماعة واحدة على المنصة** main speaker يصل قويًّا فقط إلى الصفوف الأمامية.

بسبب **فقد** (20dB عند 10 أضعاف المسافة أي بزيادة البعد 10 مرات عن المنبع تنقص الشدة 100 مرة راجع محاضرة 1)، لا يصل مستوى كافٍ للصفوف الخلفية.



إذا رفعنا القدرة، تحدث مشاكل:

تشويش سمعي في الصفوف الأمامية.

صدى مفرط إذا كانت القاعة غير معالجة صوتيًا.

حدود حرارية وميكانيكية للسماعة.

الحلّ الأمثل:

وضع **سماعات إضافية موزعة** أقرب للمستمعين البعيدين، ونسميها:

Delay Speakers مبدأ تأخير الصوت Delay:

عندما تضيف سماعة على بُعد 12 أو 15 م من المنصة، فهي:

أقرب إلى المستمعين الجالسين في الخلف.

وبالتالي، إذا اشتغلت **دون تأخير زمني**، فسيصل صوتها إلى الأذن **قبل** صوت السماعة الأصلية التي على المنصة وهذا يسبّب:

تشويش إدراكي (ينتبه الدماغ إلى مصدر خاطئ).

تداخل تدميري أو ترددي comb filtering.

فقد في وضوح الكلام.

نريد أن **يتأخر صوت السماعة الإضافية** بحيث يصل إلى الأذن **بعد** الصوت الأصلي بزمن صغير 5–20 ms لتقوية الشعور بالاتجاه الطبيعي

نحسب : فرق المسافة بين المجهار الاصلي للمستمع و المجهار الاضافي للمستمع وهذا الفرق بالمسافة يوافق زمن :

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{c}$$

نبرمج السماعة الإضافية لتخرج صوتها **بعد** هذا الزمن.

مثال :

مستمع يجلس قرب السماعة الإضافية على الجدار الجانبي (تبعد 12 م).

نفس المستمع يبعد 18 م عن السماعة الأصلية.

فرق المسافة = 18 - 12 = 6 m

فرق الزمن = $\frac{6}{343} \approx 17.5\text{ms}$

إذاً: نضبط Delay Time في المعالج الرقمي (DSP) إلى **17.5 ms** لتلك السماعة