7 إنتشار الصوت في الخلاء

المقصود هنا هو إنتشار الصوت خارج الأماكن المغلقة مثل الحجرات و الصالات.

يضمحل منسوب الصوت عادة أثناء إنتشاره في الخلاء من المصدر إلى المستقبل نتيجة لعدة عوامل. و إن كانت هناك بعض الحالات التي تتوفر فيها عوامل يزداد بسببها منسوب الصوت. و بيان ذلك في التالي.

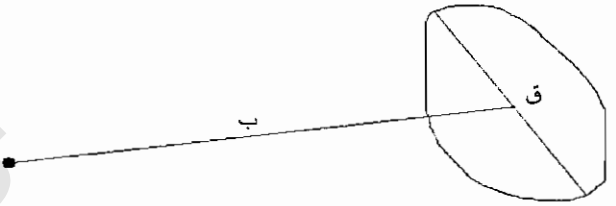
<u>إضمحلال منسوب الصوت نتيجة للتفرق أو الإنفراج الهندسي</u>

يمكن إعتبار مصدر الصوت نقطة صوتية إذا كان المصدر يشع الصوت في جميع الإتجاهات بنفس القيمة تقريبا و إذا أمكن إعتبار أكبر بعد فيه (الوتر أو القطر) صغيرا بالمقارنة بالمسافة بين وسط المصدر و المستقبل. و لقد وجدت أثناء مساهمتي في العمل في المرجع [7-1] أن ذلك يتحقق إذا كان أكبر بعد في المصدر أصغر من سبعة أعشار المسافة بين وسط المصدر و المستقبل.

أي أن يتحقق الشرط التالي:

ق أصغر من0,7ب (7-1)

و الشكل (7-1) يمثل منطقة ضوضاء على بعد ب من المستقبل.



الشكل (7-1)

<u>إنتشار الصوت من النقطة الصوتية (الإنتشار الكروي)</u>

تنتشر موجة الصوت من النقطة الصوتية في حالة عدم وجود أي أسطح عاكسة حولها إنتشارا كرويا وتسمى موجة كروية، أي أن جبهة الموجة يكون سطح كرة مركزها النقطة الصوتية. و بهذا تتوزع الطاقة الصوتية على سطح تزداد مساحته كلما زاد البعد عن المصدر (النقطة الصوتية). و بما أن مساحة سطح الكرة تتناسب طرديا مع مربع نصف قطرها إذا فتتناسب شدة الصوت عند أي نقطة تناسبا عكسيا مع مربع بعدها عن مصدر الصوت. وهذا ما يعرف بقانون التربيع العكسي.

و تعبر المعادلة التالية عن ذلك رياضيا:

$$ش = ق / 4 ط ب^2 \qquad (2-7)$$

حيث

ش : شدة الصوت [وات / متر^2] عند نقطة على بعد ب من المصدر (نقطة الصوت)

ق : قدرة مصدر الصوت [وات]

ط : النسبة التقريبية 3,14159

ب : بعد المستقبل عن المصدر [متر]
و العلاقة بين شدة الصوت ش و ضغط الصوت ض هي:
ش= ض^2 / ك س [وات / متر مربع] (3-7)
حيث
ض : ضغط الصوت [باسكال]
ك : كثافة الهواء [كيلوجرام / متر مكعب]
س : سرعة الصوت [متر/ثانية]

و بالمقارنة مع الهندسة الكهربية فإن العلاقة بين شدة الصوت و ضغط الصوت تماثل العلاقة بين القدرة الكهربية و الجهد الكهربي.
القدرة الكهربية = (الجهد الكهربي)^2 / المقاومة الكهربية

و من هنا يتضح سبب إطلاق إسم المقاومة السمعية على حاصل الضرب ك س في المعادلة السابقة.

مع ملاحظة أن تدفق القدرة الكهربية وو حدتها الوات يماثل تدفق القدرة الصوتية عبر وحدة المساحة أي شدة الصوت ووحدته وات / متر مربع.

بمساواة المعادلتين (7-2) و (7-3)
ش = ق / 4 ط ب^2 = ض^2 / ك س
فإن
ض^2 = ق ك س/ 4ط ب^2 (4-7)

أي أن ضغط الصوت ض يتناسب عكسيا مع المسافة ب بين مصدر الصوت و المستقبل.

و من المعادلة (1-3) التي تنص على أن منسوب ضغط الصوت م ض= 20خو(ض/ض$_0$) يتضح أن ذلك يعني أن منسوب ضغط الصوت م ض ينخفض بمقدار 6 ديسيبل مع مضاعفة المسافة بين مصدر الصوت الذي يمكن إعتباره نقطة صوتية و المستقبل.
حيث أن 20 خو 2 = 6 .

و في حالة الإنتشار الكروي الحر للصوت في الهواء فإن منسوب ضغط الصوت يساوي تقريبا منسوب شدة الصوت. أي أن
م ض = م ش (5-7)

<u>العلاقة بين منسوب ضغط الصوت و منسوب قدرة المصدر</u>

من المعادلة (7-4) فإن

ض^2 = ق ك س / 4 ط ب^2

فبقسمة الطرفين على ض$_0^2$ أي على (2x10^{-5}) ^{2}

((ص / (2x10^{-5})) ^{2} =**400** (ق /(4x10^{-10})) /(**4** ط ب^2)

حيث أن ك س = 400 [نيوتن x ثانية / متر ^{3}]

و بأخذ الخواريزمات لكل من الطرفين فإن

20 خو (ص/ (2x10^{-5}) = 10 خو(ق /(10^{-12}))- 10 خو 12,566- 20 خو ب

م ش - م و = 11 – 20 خو ب (6-7)

و لإعطاء مثال حسابي:
قيس منسوب ضغط الصوت على مسافة 100 متر من محول كهربي فوجد أنه 50 ديسيبل أ ، فما هو منسوب قدرة ذلك المحول، و كم تكون قدرة المحول ؟

م ق = 50 + 11 + 40 = 101 ديسيبل أ

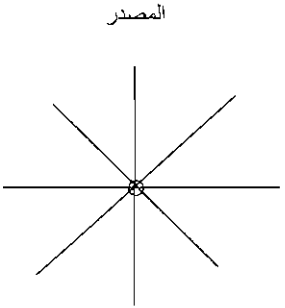
و من المعادلة (1-4) فإن م ق= 10خو(ق/ق0)

إذا ق/ق0 = 10 (م ق / 10)

ق = 10^{-12} x $10^{10,1}$ = $10^{-1,9}$ [وات]

<u>تأثير الريح و الإنعكاس الحراري على إنتشار الصوت</u>

إذ اسكنت الريح و ثبتت درجة حرارة الهواء مع الإرتفاع عن سطح الأرض داخل النطاق المحيط بمصدر الصوت و مستقبله فيتم إنتشار الصوت كرويا، أي ينعدم تأثير الريح و تغير درجة حرارة الهواء مع الإرتفاع على مسارات الصوت كما هو موضح بالشكل التالي (7-2) الذي يوضح أن الصوت ينتشر في جميع الإتجاهات بالتساوى.



يؤثر إتجاه الريح و الإنعكاس الحراري على منسوب الصوت عند المستقبل نتيجة لتأثيرهما على مسار انتشار الصوت.

الإنعكاس الحراري

عادة تنخفض درجة حرارة الهواء مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض. و أحيانا ينقلب هذا الوضع المعتاد فترتفع درجة حرارة الهواء مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض وذلك داخل نطاق محدود للإرتفاعات. و هذا ما يطلق عليه الإنعكاس الحراري. وهذه الظاهرة ليست نادرة الحدوث.

الأشكال الأربع التالية توضح تأثير إتجاه الريح والإنعكاس الحرارى على مسار انتشار الصوت.

تاثر انتشار الصوت بإتجاه الريح

إرتفاع حرارة الهواء مع الارتفاع عن سطح الأرض

في الشكل الأول نرى أن اتجاه الريح من المستقبل إلى المصدر ، أي أن اتجاه الريح هو في عكس اتجاه انتشار الصوت من المصدر إلى المستقبل ، ونتيجة لتلك الريح العكسية فإن مسارات الصوت الموضحة بالشكل تنحني إلى أعلى مما يسبب وجود المستقبل فيما يعرف بالظل السمعي ، أي أن مسارات الصوت الموضحة بالشكل لا تصل إلى المستقبل ، ويؤدي ذلك إلى إنخفاض منسوب الصوت عند المستقبل مقارنة بحالة سكون الريح وثبات درجة حرارة الهواء

في الشكل الثاني تهب الريح في نفس إتجاه انتشار الصوت من المصدر إلى المستقبل. و نتيجة لتلك الريح المساعدة فإن مسارات الصوت الموضحة بالشكل تنحني إلى أسفل، أي أن هناك مسارات

للصوت تصل إلى المستقبل ما كانت ستصله في حالة سكون الريح و ثبات درجة حرارة الهواء. و يؤدي ذلك إلى إرتفاع منسوب الصوت عند المستقبل مقارنة بحالة سكون الريح و ثبات درجة حرارة الهواء.

و من الشكل الثالث يتضح أن الحالة العادية التي فيها تنخفض درجة حرارة الهواء مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض تماثل حالة الريح العكسية، فينخفض منسوب الصوت عند المستقبل مقارنة بحالة سكون الريح و ثبات درجة حرارة الهواء.

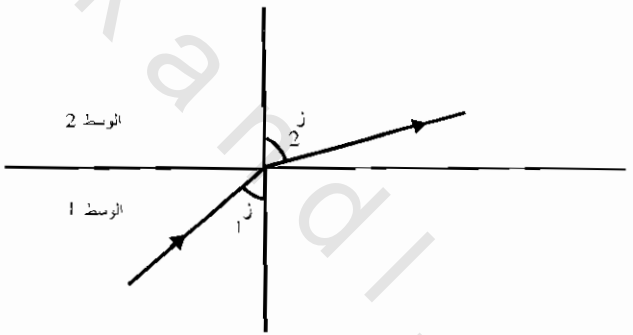
ويوضح الشكل الرابع أن تأثير الإنعكاس الحراري يماثل تأثير الريح المساعدة ، أي أن منسوب الصوت يزداد في هذه الحالة عند المستقبل مقارنة بحالة سكون الريح و ثبات درجة حرارة الهواء.

وتلخيص ذلك أن كلا من الريح المساعدة و الإنعكاس الحراري يتسببان في زيادة منسوب الصوت عند المستقبل.

وسبب انحناء مسار الصوت يكمن في التالي:
إن الصوت المنتشر في الهواء مع وجود ريح تكون سرعة إنتشاره هي محصلة سرعة إنتشاره في حالة سكون الريح بالإضافة لسرعة الريح. سرعة الريح عند سطح الأرض تكاد تكون منعدمة نتيجة للإحتكاك و تزداد مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض. ولذا فتزداد سرعة إنتشار الصوت مع الإرتفاع عن سطح الأرض.

و في حالة الإنعكاس الحراري ترتفع درجة حرارة الهواء مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض، و بما أن سرعة إنتشار الصوت في الهواء تزداد مع إرتفاع درجة حرارته فإن سرعة إنتشار الصوت تزداد مع الإرتفاع عن سطح الأرض.

ينص قانون سنيل أن مسار الصوت ينكسر حين انتشاره بين وسطين تختلف فيهما سرعة إنتشار الصوت. و سنيل عالم رياضيات و طبيعيات هولندي و هو Willebrord Snellius ولد عام 1580 في لايدن و مات بها عام 1626 .



وينص قانون الإنكسار هذا على أن :

جا ز1 / جا ز2 = س1 /س2

انظر الشكل أعلاه.

حيث :

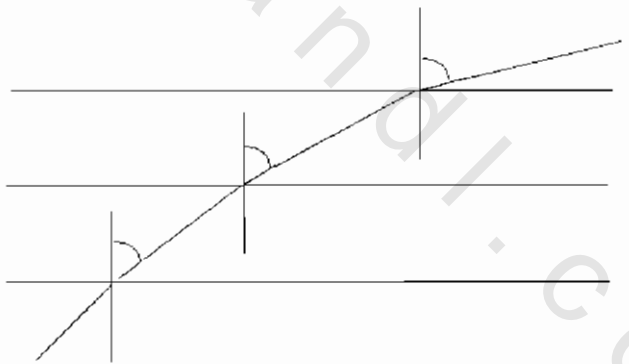
$ز_1$ = الزاوية المحصورة بين مسار الصوت في الوسط 1 و العمود المقام علي السطح الفاصل بين الوسطين .

$ز_2$ = الزاوية المحصورة بين مسار الصوت في الوسط 2 و العمود المقام علي السطح الفاصل بين الوسطين .

$س_1$ = سرعة إنتشار الصوت في الوسط 1

$س_2$ = سرعة إنتشار الصوت في الوسط 2

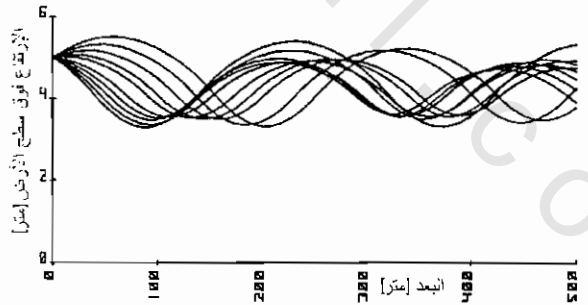
فحينما يكون معدل تغير سرعة إنتشار الصوت مع الإرتفاع عن سطح الأرض موجبا، أي أن سرعة إنتشار الصوت تزداد مع الإرتفاع عن سطح الأرض، مثل في حالة إنتشار الصوت مع إتجاه الريح و حالة الإنعكاس الحراري فإن الزاوية $ز_2$ تزداد مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض كما هو مبين بالشكل التالي (7-3).



و لهذا فإن مسار الصوت يكون على شكل قوس محدب تصل قمته عند الزاوية الحرجة التي تكون عندها :

$ز_2$ = ط/2 ، فيبدأ المسار في العودة إلى الأرض.
و أحيانا يكون معدل تغير سرعة إنتشار الصوت سالبا حتى إرتفاع ما من سطح الأرض ثم يصير موجبا. و مثال على ذلك الحالة التالية التي نشرتها بالمرجع [7-2] :
ريح ساكنة و معدل تغير سرعة إنتشار الصوت سالبا و قيمته – 0,2 متر/ثانية/متر من سطح الأرض إلى إرتفاع 4 متر، ثم فوق ذلك صار المعدل موجبا و قيمته 0,1 متر/ثانية/متر.

و الشكل التالي يبين عدة مسارات للصوت بدأت خروجها من المصدر عند الإحداثي الأفقي صفر بزوايا مختلفة حول المستوى الأفقي المار بالمصدر الموجود على إرتفاع 5 متر فوق سطح الأرض. و نلاحظ أن انتشار الصوت يحصر فيما يعرف بالنفق الصوتي و يؤدي ذلك إلى تركيز الطاقة الصوتية داخل هذا النفق فيسمع الصوت على بعد مئات الأمتار من المصدر، انظر المراجع [7-5,4,3].



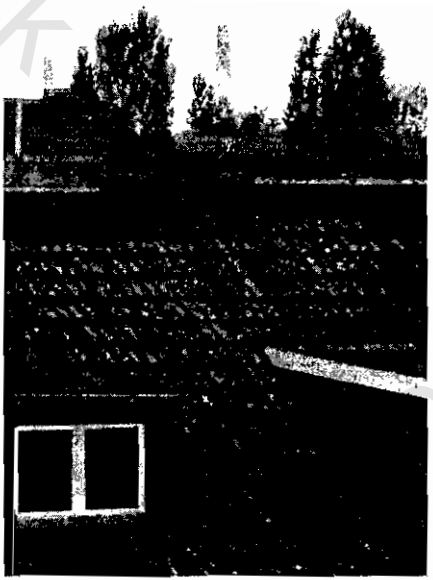
لمعرفة حالة الريح و تغير درجة حرارة الهواء مع الإرتفاع يمكن سؤال مركز الأرصاد الجوية، و لكنه غالبا ما يكون بعيدا عن

المكان الذي نريد معرفة حالته، بحيث لا تـدل معلومـات مركـز الأرصاد الجوية على الحالة الفعلية. و يمكن إجراء قياسات الريح و حرارة الهواء إذا ما توفرت الأجهزة و القوى العاملة المدربة.

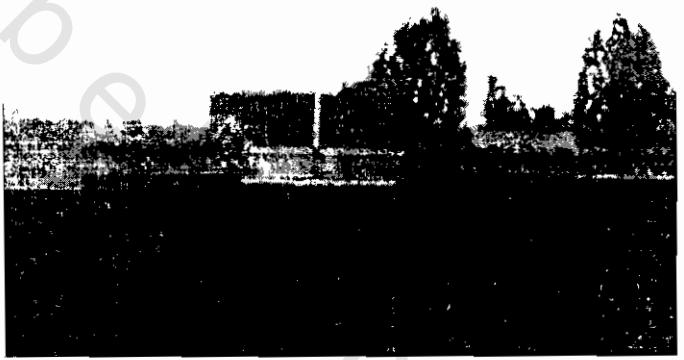
و هناك وسيلة مرئية لمعرفة ذلك في حالة وجود مدخنة قريبـة. و الصور التالية توضح ذلك.

نرى في الصورة التالية الدخان متجها من اليمين إلى اليسار تبعا لإتجاه الريح و صاعدا إلى أعلى بدون عودة إلى الهبـوط، ممـا يعني عدم وجود إنعكاس حراري.

نرى في الصورة التالية الدخان صاعدا مباشرة من المدخنة إلـى أعلى دالا على سكون الريح.



أما في الصورة التالية فإن الدخان يصعد ثم يعود إلى الهبوط ثـم يصعد ثانية مما يفيد و جود إنعكاس حراري.



إضمحلال الصوت الناتج عن الإمتصاص الجوي

يضمحل الصوت عند إنتشاره في الهواء نتيجة لتحول بعض الطاقة الصوتية إلى طاقة حرارية و هو ما يطلق عليه الإمتصاص الجوي. و مقدار ذلك الإضمحلال ضئيل و يعتمد على التردد و درجة حرارة الهواء و نسبة الرطوبة في الهواء.

الجدول التالي يعطي قيم معامل الإمتصاص الجوي للصوت [7-6].

معامل الامتصاص الجوي للصوت (ديسيبل / 100 متر)

درجة الحرارة المئوية	نسبة الرطوبة المئوية	التردد [هرتز]					
		125	250	500	1000	2000	4000
30	10	0,09	0,19	0,35	0,82	2,6	8,8
	20	0,06	0,18	0,37	0,64	1,4	4,4
	30	0,04	0,15	0,38	0,68	1,2	3,2
	50	0,03	0,10	0,33	0,75	1,3	2,5
	70	0,02	0,08	0,27	0,74	1,4	2,5
	90	0,02	0,06	0,24	0,70	1,5	2,6
20	10	0,08	0,15	0,38	1,21	4,0	10,9
	20	0,07	0,15	0,27	0,62	1,9	6,7
	30	0,05	0,14	0,27	0,51	1,3	4,4
	50	0,04	0,12	0,28	0,50	1,0	2,8
	70	0,03	0,10	0,27	0,54	0,96	2,3
	90	0,02	0,08	0,26	0,56	0,99	2,1

و يلاحظ من الجدول أن قيمة معامل الإمتصاص الجوي للصوت تزداد مع زيادة (إرتفاع) التردد. و من هنا يتضح أن نفس الصوت الذي نسمعه من بعد لا يحتوي على الترددات العالية (الحادة) مثل إحتوائه للترددات المنخفضة (الغليظة) ، فإذا اقترب مصدر الصوت سمعنا الترددات العالية (الحادة) بدرجة أعلى. و مثال على ذلك الرعد و الطائرة النفاثة التي يحتوي صوتها (أو يجب أن نقول ضجيجها) على ترددات عالية حادة مزعجة نسمعها

والطائرة قريبة منا، بينما تمتص تلك الترددات العالية كلما إبتعدت عنا مع بقاء نسبي للترددات المنخفضة (الغليظة).

تأثير إنعكاس الصوت عند سطح الأرض

النموذج الرياضي

المعلومات التالية مأخوذة باختصار من بحثي [7-7].

في كثير من الحالات يكون مصدر الصوت قريبا من سطح الأرض و لهذا فإن الصوت يصل إلى المستقبل مارا بمسارين: أحدهما هو المسار المباشر م ن من المصدر إلى المستقبل، و الثاني هو م ب ن من المصدر إلى سطح الأرض حيث ينعكس إلى المستقبل كما هو موضح بالشكل (7-4).

الشكل (7-4)

في هذه الحالة فإنه يوجد ترابط طوري وثيق بين الموجات الصوتية المباشرة و المنعكسة حيث أن كل منها نابع من نفس المصدرو ليس هذا الحال عند تقسيم الخط الصوتي إلى عدة نقاط ليس بينها ترابط طوري (راجع آخر هذا الباب). أي أنه يجب علينا هنا أن نجمع ضغط الصوت الناتج عن المسارين المباشر و المنعكس مع أخذ زاوية الطور لكل منهما في الإعتبار. وهذا

يعني وجود تداخل بين الموجات الصوتية المباشرة و المنعكسة عند المستقبل. و هذا التداخل هو السبب في تأثير الأرض على إنتشار الصوت و يشكل إضافة لمنسوب الصوت عند المستقبل إما إيجابيا أو سلبيا مقارنة بمنسوب الصوت في حالة إنعدام وجود الأرض، أي إما بزيادة منسوب الصوت في حالة التداخل البناء أو بإنقاص منسوب الصوت في حالة التداخل الهدام.

أي أن $ض_{ك} = ض_{ش} + ض_{ع}$

أو $ض_{ك} / ض_{ش} = 1 + ض_{ع} / ض_{ش}$

حيث

$ض_{ك}$: ضغط الصوت الكلي

$ض_{ش}$: ضغط الصوت المباشر

$ض_{ع}$: ضغط الصوت المنعكس

و في حالة الموجات الصوتية المستوية التي يشكل واجهة الموجة سطحا مستويا فإن :

$$ض_{ك} / ض_{ش} = 1 + (ع_{و_1} / ع_{و_2}) \times پ^{(خ ك (و_2 - و_1))} \quad (9-7)$$

حيث

$و_1$ = طول المسار المباشر = م ن

$و_2$ = طول المسار المنعكس = م ب + ب ن

پ = أساس الخوارزم الطبيعي = 2,71828

خ = الكمية التخيلية $\sqrt{-1}$

ك = الرقم الموجي = $2 \times ط / ل$

ط = 3,14159

ل = طول موجة الصوت [متر]

obeikandl.com

ع = معامل الإنعكاس لضغط الصوت في حالة الموجات الصوتية المستوية = (إ جا ز – 1) / (إ جا ز + 1)

حيث :

جا ز = جيب زاوية السقوط (أو زاوية الإنعكاس)

إ = إعاقة (معاوقة) الأرض المعيارية كما في المرجع [7–8]

$$إ = 1 + 9,08 (ت / ف)^{-0,75} + خ\, 11,9 (ت / ف)^{-0,73}$$

حيث :

ت = التردد [هرتز]

ف = مقاومة التدفق النوعية طوليا [جم سم$^{-3}$ ثانية$^{-1}$] و تعادل رقميا [10^{3} كجم متر$^{-3}$ ثانية$^{-1}$]

والقيم التالية لهذه المقاومة ف لبعض الأراضي معطاة بوحدة [جم سم$^{-3}$ ثانية$^{-1}$] لكي نتجنب إستخدام الرقم الضارب 10^{3} :

50 – 300 أراضي زراعية و حشائش

800 – 1000 أراضي يابسة مع إمكانية وجود بعض العشب

5000 – 20000 أراضي إسمنتية أو أسفلتية

و تختلف هذه القيم لنفس الأرض مع إختلاف درجة رطوبتها.

و يلاحظ أن الأراضي الرملية الصحراوية المنتشرة في بلادنا ليست مذكورة هنا و لذا نحبذ العمل على قياس مقاومة التدفق النوعية طوليا لها.

معامل إنعكاس الضغط في حالة الموجات الصوتية الكروية غ تعطيه المعادلة التالية:

غ = ع + د(ي) (1- ع)

$$\text{حيث ي} = \sqrt{(\text{خ ك و}_2 / 2)} \ (\text{جاز} + 1 / \text{إ})$$

$$\text{و د(ي)} = 1 + \text{خ} \sqrt{\text{ظ}} \ \text{ي پ}(-\text{ي}^2) \ \text{دخطأ} (- \text{خ ي})$$

حيث دخطأ (س) هي دالة الخطأ.

$$\text{دخطأ (س)} = 2 / \sqrt{\text{ظ}} \int_{\text{س}}^{\infty} \text{ك پ}(-\text{هـ}^2) \ \text{دهـ}$$

المرجع [7-9] أورد بجانب جداول قيمة دالة الخطأ معادلتين لحساب قيم الدالة. و قد استخدمتهما في بحثي [7-7]. انظر ملحق دالة الخطأ في آخر الكتاب.

و سنسمي منسوب الصوت المضاف الناتج عن الإنعكاس الأرضي تأثير الأرض. و كما ذكرنا من قبل فالمقصود بالمضاف هو مقارنة بمنسوب الصوت في حالة إمكانية إهمال تأثير الأرض لبعدها عن مصدر الصوت مثل في حالة كباري السيارات و السكك الحديدية و الطائرات المحلقة غير تلك الموجودة على الأرض.

تأثير الأرض = 20 خو| ض ي / ض ش|

$$\text{تأثير الأرض} = 20 \ \text{خو} \left| 1 + (\text{غ و}_1 / \text{و}_2) \ \text{پ}(\text{خ ك}(\text{و}_2 - \text{و}_1)) \right| \quad \text{[ديسيبل]} \quad (7\text{-}10)$$

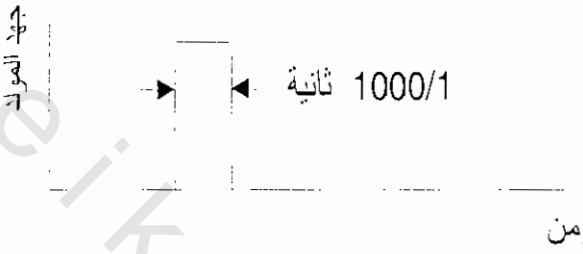
المعادلة السابقة (7-10) تعطي تأثير الأرض نتيجة لإنعكاس موجة الصوت الكروية وهذا هو الحال حينما يكون مصدر الصوت نقطة صوتية قريبة من سطح الأرض. و في حالة كون إرتفاع مصدر الصوت عن الأرض أكبر كثيرا من طول موجة الصوت فيمكن الإستعاضة عن معامل إنعكاس الضغط في حالة الموجات الصوتية الكروية غ (و الذي يتطلب حسابه إيجاد قيمة دالة الخطأ) بمعامل إنعكاس الضغط في حالة الموجات الصوتية المستوية ع و هو الأسهل حسابا. و ذلك لأن واجهة الموجة الكروية تقارب الإستواء كلما بعدت المسافة عن نقطة الصوت المصدرية.

و لمن يريد حساب تأثير الأرض أي الحصول على قيم المعادلة (7-10) و يحتاج إلى تذكر حساب الأرقام المركبةالمكونة من أرقام حقيقية و أرقام تخيلية أن يقرأ حاشية المطور و الأرقام المركبة.

<u>المقارنة بين النموذج الرياضي لتأثير إنعكاس الصوت عند سطح الأرض و القياس</u>

للتحقق من ذلك النموذج الرياضي قمت بعمل قياسات بالطريقة التي وفقني الله سبحانه و تعالى إليها، و كان أول إستخدام لها في بحوثي لرسالة الدكتوراة [7-10] باللغة الألمانية. و طريقة القياس هذه سميتها " طريقة النبضة الوحيدة لقياس الخصائص النقلية للأنظمة السمعية " و استخدمتها في قياسات إخماد الصوت بواسطة الحائط الفاصل داخل الأبنية ، و نشرتها باللغة الإنجليزية بالمرجع [7-11].

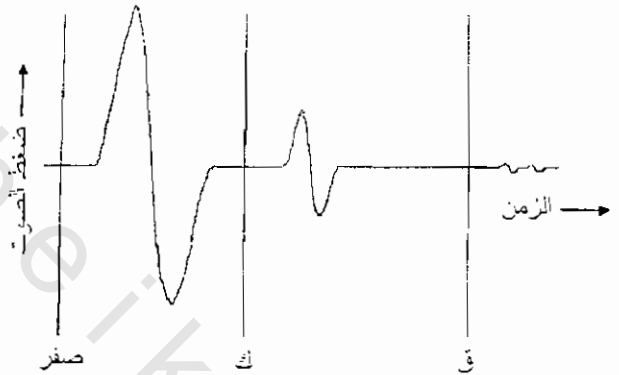
و هنا استخدمت مولد كهربي للنبضات المستطيلة في تغذية سماعة صوت صغيرة قطرها عشر متر (أي 10 سم) والشكل التالي يوضح النبضة الكهربية المستخدمة.



الشكل (7-5)

ويضبط المولد الكهربي بحيث يصدر نبضة وحيدة فقط و ذلك لكي يمكن تتبعها و انعكاستها. لأنه لو استخدمنا أكثر من نبضة واحدة لتداخلت النبضة الثانية مع انعكاسات الأولى.

وكان لاقط الصوت المستخدم من طراز المكثف و موصل بمحلل الترددات التوافقية (محلل فورييه). ونرى في الشكل التالي نافذتين زمنيتين: الأولى من صفر إلى ك - و نسميها النافذة ك - و تحتوي فقط على النبضة السمعية المباشرة من المصدر إلى المستقبل، و الثانية النافذة ق و تقع فيها النبضة السمعية المباشرة من المصدر إلى المستقبل و النبضة السمعية المنعكسة على الأرض، أما النبضات الصغيرة بعد الزمن ق فإنها ناتجة عن إنعكاسات النبضة على سقف الحجرة و حوائطها الجانبية.



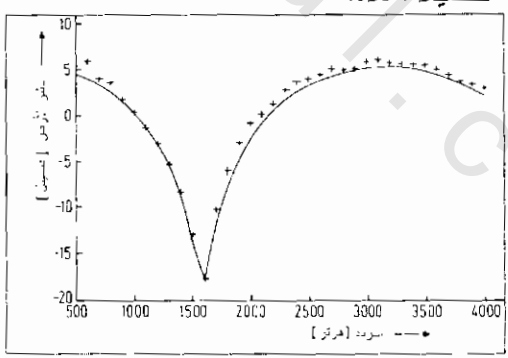
فمن المهم إختيار النافذة الزمنية بحيث لا يوجد بها سوي الإشارة المراد تحليلها إلى تردداتها التوافقية.

و بمقارنة طيفي الترددات الناتج عن كل من هاتين النافذتين بالمقياس الخوارزمي نحصل على تأثير الأرض كما هو محسوب بالمعادلة (7-10).

الشكل التالي (7-7) يظهر المقارنة بين نتائج النموذج الرياضي أي الحساب تبعا للمعادلة (7-10) و المبينة بالشكل بواسطة المنحنى، و بين نتائج القياس بواسطة طريقة النبضة الوحيدة و المرسومة على شكل علامة + . و أجري القياس داخل صالة و كان إرتفاع كل من المصدر و المستقبل 0,32 متر فوق سطح أرضية الصالة ذات المقاومة ف = 8000 [جم سم$^{-3}$ ثانية$^{-1}$]. و كانت المسافة الأفقية بين المصدر و المستقبل 1,9 متر. و يلاحظ من الشكل أن تأثير الأرض يختلف باختلاف التردد و يكون موجبا أو سالبا. فهو موجب حين يؤدي الإنعكاس الأرضي

إلى تقوية منسوب الصوت مقارنة بمنسوب الصوت في حالة وصول الصوت المباشر فقط من المصدر إلى المستقبل، و يحدث ذلك حين يكون التداخل بناءا لوجود توافق طوري بين الصوت المباشر و المنعكس. بينما يؤدي التداخل الهدام الذي يبلغ قمته حين وجود 180 درجة بين الطورين، يؤدي إلى تأثير سالب للإنعكاس أي إلى إنخفاض كبير في منسوب الصوت عند المستقبل كما هو الحال عند 1600 هرتز. أما التداخل البناء فإن الحد النظري الأقصى لتأثيره الإيجابي هو 6 ديسيبل و ذلك حين يتوافق الطورين و يكون منسوب الصوت المنعكس مساويا لمنسوب الصوت المباشر.

و هناك للأسف عدم فهم لتأثير الأرض على منسوب الصوت عند الكثير من العاملين في حقل حماية البيئة من الضوضاء، فمنهم من يعتقد أن الأرض تمتص جزءا من الصوت بحيث أن تأثيرها يؤدي في جميع الحالات إلى إنقاص منسوب الصوت. نعم إن الأرض تمتص جزءا من الصوت و لكن الجزأ الأكبر ينعكس مسببا لما ذكرته تفصيلا أعلاه.



شكل (7-7)

و خلاصة القول أنه في حالة الإنتشار الحر يؤدي الإنعكاس الأرضي إلى زيادة أو إخماد منسوب الصوت حسب الترددات الغالبة في طيف صوت المصدر، فإن كانت الترددات الغالبة تقع في نطاق التداخل البناء إزداد منسوب الصوت، و إن وقعت في نطاق التداخل الهدام إنخفض منسوب الصوت.

<u>تأثير الريح على منسوب الصوت عند المستقبل</u>

في حالة إتجاه الريح مع إتجاه إنتشار الصوت أي من مصدر الصوت إلى المستقبل فإن المركبة الأفقية لسرعة الريح تزداد طرديا مع الإرتفاع عن سطح الأرض، و تبعا لذلك تزداد سرعة إنتشار الصوت. المعادلة التالية تعطي سرعة الريح الأفقية:

$$\text{سرعة الريح} = س_{10} \left(\text{خو}^{\left(\text{ر} + \text{خش} \right)/\text{خش}} \right) / \left(\text{خو}^{(10 + \text{خش})/\text{خش}} \right) \qquad (11\text{-}7)$$

حيث

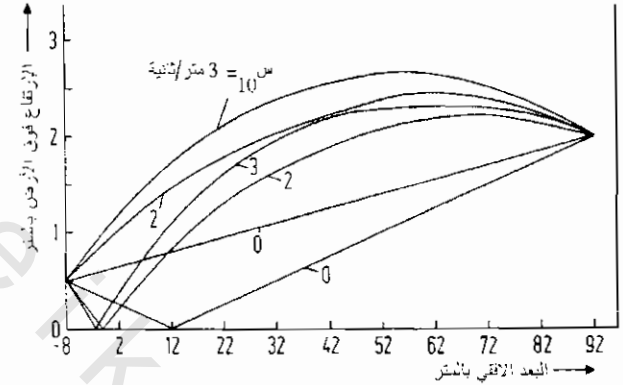
سرعة الريح = سرعة الريح الأفقية عند إرتفاع ر متر فوق سطح الأرض [متر/ثانية]

$س_{10}$ = سرعة الريح الأفقية عند إرتفاع 10 متر فوق سطح الأرض [متر/ثانية]

خو = الخوارزم الطبيعي أي للاساس ب = 2,71828

خش: طول الخشونة بالمتر و يعتمد على إرتفاع الغطاء النباتي للأرض.

الشكل التالي (7-8) يحتوي على ثلاث مسارات مباشرة و أخرى منعكسة على سطح الأرض، حيث يقع مصدر الصوت على إرتفاع نصف متر فوق الأرض و على بعد مائة متر من المستقبل الكائن على إرتفاع مترين فوق الأرض. (الإحداثي الأفقي لمصدر الصوت هو – 8 متر).



الشكل (7-8)

هنا خش = 0,3 متـــر، و اســـتخدمت المعادلـــة (7-11) لرســـم مسارات الصوت لقيم س10 = 0 و 2 و 3 متر/ثانية. و تفصـــيل ذلك لمن يريد كتابة برنامج للحاسوب لتتبع المسار و رسمه هـــو تقسيم المسافة بين المصدر و المستقبل إلى أجزاء صـــغيرة مـــع العلم أنها كلما صغرت ازدادت دقة تتبع المسار، ثم استخدام قانون سنيل لحساب إنكسار مسار الصوت الناتج عن تغير سرعة الريح و بالتالي سرعة إنتشار الصوت.

و بما أن المعادلة (7-11) تفيد أن سرعة الريح الأفقية تزداد مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض و أننا هنا ندرس حالة إنتشـــار الصوت في نفس إتجاه الريح، إذا فسرعة إنتشار الصوت تـــزداد في حالتنا هذه أيضا مع زيادة الإرتفاع عن سطح الأرض. أي أن الزاوية ز2 أكبر من الزاوية ز1. و لهذا فإن مسار الصوت يكـــون

على شكل قوس محدب تصل قمته عند الزاوية الحرجة التي تكون عندها ز$_2$ = ط/2 ، فيبدأ المسار في العودة إلى الأرض.

و نرى في الشكل (7-8) أن مسارات الصوت بدون ريح هي خطوط مستقيمة.

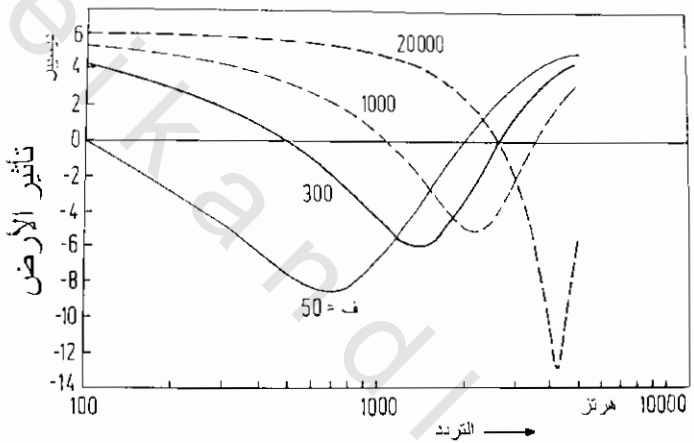
و مع زيادة سرعة الريح يزداد تحدبها و يزداد طولها، كما تسبب زيادة سرعة الريح زيادة زاوية الإنعكاس على الأرض. ولهذا فإن تأثير الأرض يتغير كما نرى في الشكل (7-9) حيث استخدمت المعادلة (7-10) لحسابه عند سرعات الريح الثلاث فوق أرض ذات مقاومة تدفق نوعية طوليا ف=50 [جم سم$^{-3}$ ثانية$^{-1}$].

الشكل (7-9)

<u>تأثير طبيعة الأرض على منسوب الصوت عند المستقبل</u>

كما ذكر من قبل فإنه باختلاف طبيعة الأرض و درجة رطوبتها تختلف مقاومة التدفق النوعية طوليا، و الشكل التالي (7-10)

يعطي تأثير طبيعة الأرض على تأثير الأرض أي على منسوب الصوت عند المستقبل لقيم مختلفة لهذه المقاومة. و ذلك باستخدام المعادلة (7-10) لمصدر نقطة الصوت على إرتفاع نصف متر من سطح الأرض مع كون المستقبل على بعد مائة متر من المصدرو على إرتفاع مترين من سطح الأرض المستوية بين المصدر و المستقبل.



الشكل (7-10)

الحائل الصوتي

الحائل الصوتي هو وسيلة لإخماد الضوضاء. و من أهم إستخداماته إخماد منسوب ضوضاء طرق السيارات و السكك الحديدية عند المساكن الواقعة على جوانب هذه الطرق و القريبة منها. و غالبا ما يبنى الحائل الصوتي على شكل حائط أو سد

طيني مزروع بالحشائش أو غيرها من النباتات. و غالبا ما يبنى الحائط بالطوب أو الأسمنت. كما توجد حوائط مبنية من الزجاج اللدن و ميزتها أنها لا تحجب الرؤية بين المساكن و الطرق.

و إخماد منسوب صوت الضوضاء يتم هنا نتيجة لإرغام مسار الموجات الصوتية على الحيود عن مسارها المباشر من المصدر (الطريق أو السكة الحديدية) إلى المسكن كما هو مبين بالشكل التالي.

حيث م مصدر الصوت و ح قمة الحائل و ن مكان مستقبل الصوت (نافذة أو شرفة).

الشكل (7-11)

في حالة طريق السيارات يؤخذ مصدر الصوت عند منتصف حارة الطريق المراد حساب منسوب الصوت لها و عند إرتفاع نصف متر فوق سطح الطريق. و في حالة السكة الحديدية يؤخذ مصدر الصوت عند منتصف المسافة بين قضيبي الإتجاه المراد حساب منسوب الصوت له و عند إرتفاع سطح القضيب لأن مصدر الصوت هو نقطة تلامس عجلة القطار للقضيب.

إخماد الحائل المجرد

مقدار إخماد الحائل المجرد لمنسوب الصوت يعتمد على الفرق بين طول مسار الصوت المحاد (م ح + ح ن) و طول مسار الصوت المباشر (م ن) من المصدر م إلى المستقبل ن. انظر الشكل (7-11).

و سنعطي هذا الفرق بين طول المسارين الرمز ف.

أي أن ف = (م ح + ح ن) – م ن

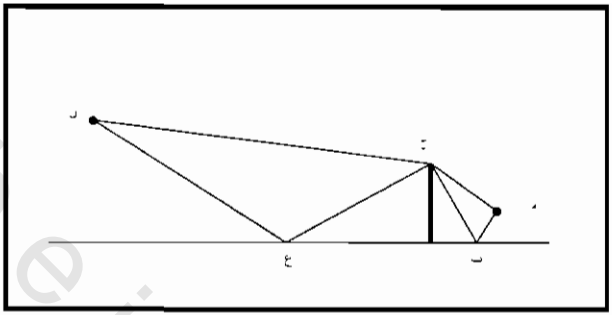
قيمة إخماد الحائل المجرد = 10 لو (4 + 80 ف / ل) [ديسيبل] (7-11)

حيث :

ف الفرق بين طول المسارين [متر]

ل طول موجة الصوت [متر]

المعادلة السابقة مبنية على نظرية كيرشوف (Robert Kirchhoff Gustav **عالم ألماني ولد عام** 1824 **في كونيجزبيرج و مات** 1887 **في برلين) في الحيود و تعطي قيمة إخماد الحائل المجرد، أي من غير مراعاة إنعكاس الصوت على الأرض. و لكن الشكل التالي** (7-12) **يوضح أن الصوت يصل من المصدر م إلى المستقبل ن عبر أربع مسارات هي : م ح ن ، م ب ح ن ، م ح ع ن ، م ب ح ع ن.**



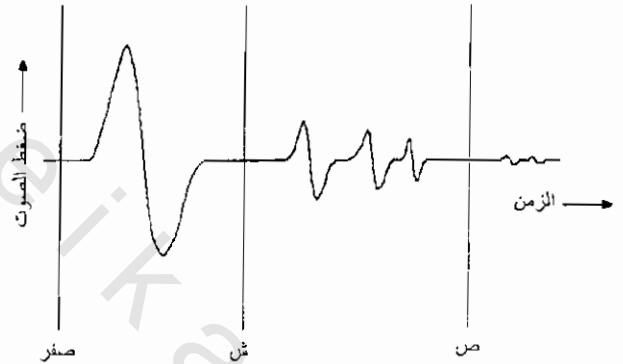
شكل (7-12)

و نلحظ أن المسار الأول م ح ن هو الوحيد الذي يصل من المصدر إلى المستقبل بدون إنعكاس الصوت على الأرض. أي أن المعادلة السابقة تعطي قيمة إخماد الحائل المجرد بدون مراعاة المسارات الثلاث الأخرى و التي تتعرض للإنعكاس على الأرض.

و لأن هناك معادلات أخرى لإخماد الحائل تعطي قيما مختلفة عن تلك التي تعطيها المعادلة (7-11) قمت بعمل قياسات بطريقتي (طريقة النبضة الوحيدة) للتحقق من المعادلة (7-11). وضعت حائلا رأسيا من الخشب عموديا على الأرض عرضه ثلاثة أمتار و ارتفاعه عن الأرض 1,225 متر بين مصدر الصوت و المستقبل و المذكوران في قياسات تأثير إنعكاس الصوت عند سطح الأرض. يقع المصدر و المستقبل في مستوى رأسي عمودي على سطح الحائل في منتصفه.

و كان بعد المصدر عن الحائل 0,885 مترا من ناحية و بعد المستقبل عن الحائل 1,065 مترا من الناحية الأخرى.

و باستخدام نفس النبضة القصيرة أدخلت الحائل مرة بين مصدر الصوت و المستقبل و مرة أخرى نزعته من بينهما.

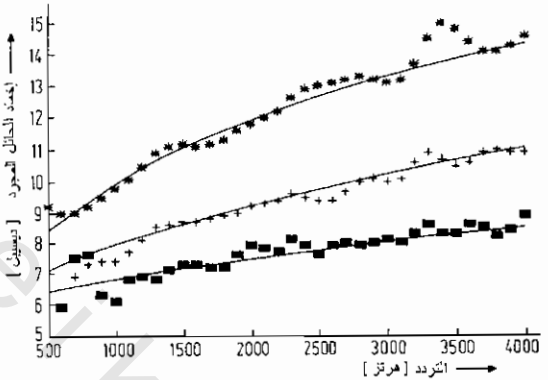


الشكل (7-13)

في النافذة الزمنية ش من الشكل (7-13) نرى نبضة المسار م ح ن للشكل (7-12) و في النافذة الزمنية ص إنضمت إلى نبضة المسار م ح ن نبضات الثلاث مسارات الأخرى للشكل (7-12).

أما النبضات الصغيرة بعد الزمن ص فهي ناتجة عن المسارات الجانبية حول الحائل و الإنعكاسات على الأسطح الأخرى المحددة لصالة القياس خلاف الأرض.

و نحصل على إخماد الحائل المجرد بمقارنة طيف النبضة الوحيدة في النافذة ك للشكل (7-6) مع طيف النبضة الوحيدة في النافذة ش للشكل (7-13).



الشكل (7-14)

و في الشكل (7-14) نرى ثلاث منحنيات لثلاث إرتفاعات للمصدر و المستقبل كالتالي:

المنحنى الأسفل: إرتفاع المصدر 1,18 متر و إرتفاع المستقبل 1,155 متر

المنحنى الأوسط: إرتفاع المصدر 1,18 متر و إرتفاع المستقبل 1,07 متر

المنحنى الأعلى: إرتفاع المصدر = إرتفاع المستقبل = 1,07 متر

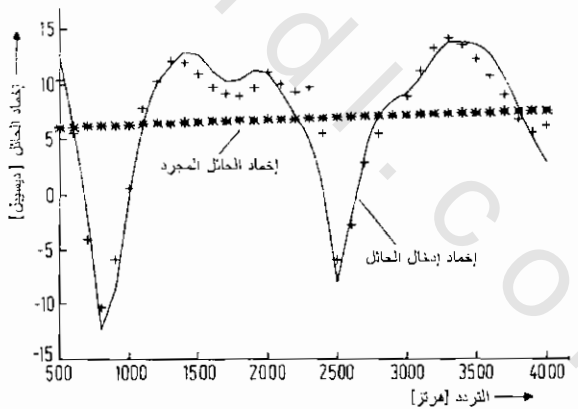
و المنحنيات محسوبة بالمعادلة (7-11) و النقاط حول كل من المنحنيات الثلاث تعطي نتائج القياس.

و من الفروق البسيطة بين نتائج القياس و الحساب نرى أن نظرية كيرشوف في الحيود صحيحة، و أنه يمكن الإعتماد على المعادلة (7-11) للحصول على إخماد الحائل المجرد.

إخماد إدخال الحائل

في عامة الأحوال فإن مصدر الصوت قريب مـن الأرض، و لـذا تؤثر المسارات المنعكسة على الأرض على الإخماد الفعلي للحائل الذي نطلق عليه "إخماد إدخال الحائل". و يعرف بأنه الفرق بـين منسوب الصوت عند المستقبل قبل إنشاء الحائل – أي قبل إدخال الحائل بين المصدر و المستقبل – و بين منسوب الصـوت عنـد المستقبل بعد إدخال الحائل.

وللحصول على إخماد إدخال الحائل يجب المقارنـة بـين طيـف الإشارة الصوتية بدون الحائل الموجودة في النافذة ق في الشـكل (7-6) مع طيف الإشارة الصوتية بعد إدخال الحائل الموجودة في النافذة ص في الشكل (7-13). أي أننا في كلتا الحالتين – قبـل و بعد إدخال الحائل – نأخذ في الإعتبار الإنعكاسات الأرضية.



الشكل (7-15)

نرى في الشكل (7-15) نتيجة قياس إخماد إدخال الحائل التي تحمل الرمز + ، و المنحنى المتصل يمثل نتيجة حساب إخماد إدخال الحائل ، بينما * ترمز إلى نتيجة حساب إخماد الحائل المجرد.

و لقد أجريت الحسابات طبقا للمعادلتين (7-10) و (7-11).

و كانت الأبعاد الهندسية: إرتفاع المصدر= 0,47 متر ، إرتفاع المستقبل = 0,445 متر ، إرتفاع الحائل = 0,505 متر ، بعد المصدر من الحائل = 0,885 - متر (الإشارة سالبة لكون المصدر يسار الحائل) ، بعد المستقبل من الحائل = 1,065 متر ، مقاومة التدفق النوعية طوليا للأرض = 8000 [جم سم$^{-3}$ ثانية$^{-1}$].

و من المهم الملاحظة أنه نتيجة للتداخل فإن إخماد إدخال الحائل يكون عند بعض الترددات أصغر من إخماد الحائل المجرد و عند بعض الترددات الأخرى أكبر. و هذا هو السبب في الإختلاف بين نتائج قياسات إخماد الحائل عند العديد من البحاث، فلقد إستخدموا إشارات صوتية لمدة زمنية ليست قصيرة بعكس طريقتي (النبضة الوحيدة) بحيث أنه لم يمكنهم التمييز بين إخماد إدخال الحائل و إخماد الحائل المجرد.

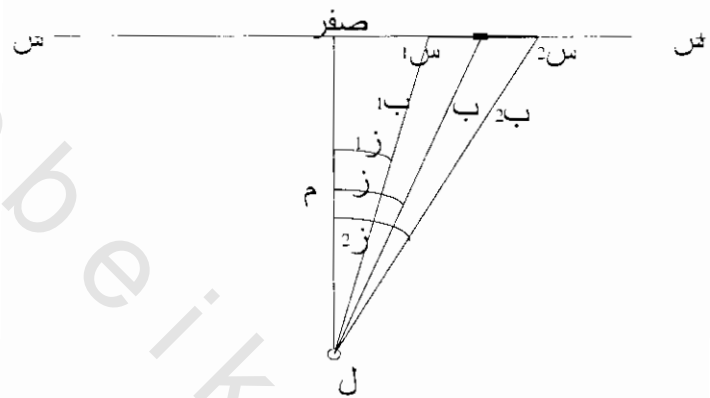
<u>ضوضاء طرق السيارات و السكك الحديدية</u>

يشكل مصدر الضوضاء هنا في المعتاد خطا مستقيما. ولذا فسندرس الآن إنتشار الصوت من المصدر الخطي. و سنبدأ بالإنتشار الحر أي بدون إعتبار لأي إنعكاسات للصوت عند أي

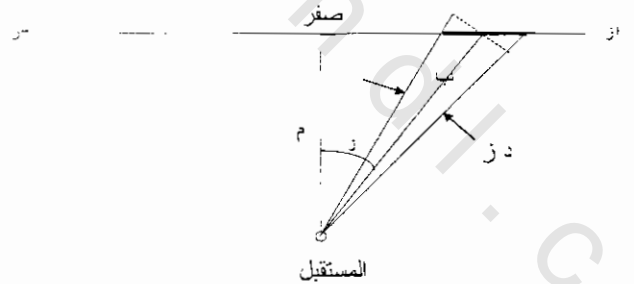
سطح مجاور أو أي عوامل أخرى مسببة لإضمحلال الصوت سوى ذلك الناتج عن إنفراج الصوت.
في حالتي طريق السيارات و السكة الحديدية فإن مصدر الصوت يتكون من نقاط عديدة (كل منها هي نقطة صوتية) ليس بينها ترابط طوري أي أنه لا توجد علاقة ثابتة بين زوايا الطور للموجات الصوتية الصادرة عنها. و في هذه الحالة فإن طاقة الصوت و بالتالي شدة الصوت الناتجة عن هذه النقاط الصوتية العديدة عند المستقبل هي المجموع الكلي لشدة الصوت الناتجة عن كل نقطة بمفردها.

في الشكل التالي يمتد المصدر الخطي من+ س إلى – س و لحساب شدة الصوت الناتجة من قطعة من الخط محصورة بين س1 و س2 فنقسمها إلى قطع متناهية الصغر و طول كل منها د س.

ب هي المسافة بين منتصف د س و المستقبل ل. و ز هي الزاوية المحصورة بين العمود القائم من المستقبل ل على المصدر الخطي عند س = صفر (وطوله م) و الخط الواصل من منتصف د س إلى المستقبل و الذي طوله ب. بينما ب1 = ل س1 و ب2 =ل س2 .



و الشكل التالي هو تكبير للقطعة د س المتناهية في الصغر لتوضيح هندسة الشكل حولها.



شدة الصوت عند المستقبل ل

الناتجة من القطعة د س المتناهية في الصغر

= ق ر x د س / (4 ط ب^2)

=(ق ر/ 4 ط) x د س / (م^2+س^2)

ق ر: قدرة الصوت للمتر الطولي من مصدر الصوت الخطي [وات / متر]

و بإجراء عملية التكامل فإن:

شدة الصوت عند المستقبل ل الناتجة من قطعة الخط المحصورة بين س1 و س2 =

$$\int_{س_1}^{س_2} ك\ (ق_ر / 4\ ط)\ x\ د\ س\ /\ (م^2 + س^2)$$

ك هي علامة التكامل و هذا التكامل مشهور و قيمته مدونة بالجداول .

أي أن شدة الصوت عند المستقبل ل الناتجة من قطعة الخط المحصورة بين س1 و س2

$$= (ق_ر / 4\ ط\ م)\ x\ [\ ظا^{-1}\ (س/م)\ ]_{س_1}^{س_2}$$

$$= (ق_ر / 4\ ط)\ x\ (ز_2 - ز_1)$$ (7-7)

في حالة الخط المتناهي في الطول تكون شدة الصوت عند المستقبل ل= (ق ر / 4 ط م) x (ط/2 − (−ط/2)) = ق ر/4 م

أي أن

منسوب ضغط الصوت للخط المتناهي في الطول = م ر − 10 خو م − 6 [ديسيبل] (8-7)

حيث م ر = منسوب قدرة الصوت للمتر الطولي من مصدر الصوت الخطي و 10 خو 4 = 6

هذا و يجب التنويه على أن بعض المراجع [7-12] قد أورد المعادلة (7-8) و بها الرقم 8 بدلا من 6 و ذلك نتيجة لخطأ الافتراض أن المصدر الخطي للصوت أسطوانة تصدر موجات أسطوانية.