الدرس الثالث: انتشار الصوت Propagation of Sound

أولا: سرعة الصوت:

كما ذكرنا في الفصل السابق، ينتقل الصوت أو ينتشر عبر وسط صلب أو سائل أو هواء. يتم تحديد سرعة الصوت من خلال المسافة التي تقطعها الموجة الصوتية خلال وحدة زمنية ، مثل الثانية. ينتقل الصوت بشكل أسرع في الأوساط الأكثر كثافة مثل المواد الصلبة و السوائل نسبتا للهواء. متوسط سرعة الصوت المنتقل في الهواء من النقطة A إلى النقطة B هو 1100 قدم في الثانية أو 345 مترًا في الثانية.

هناك ثلاثة عوامل رئيسية تؤثر على سرعة الصوت في الهواء وهي: درجة الحرارة ،الرطوبة ، و الضغط الجوي. حيث تزداد سرعة الصوت مع ارتفاع درجة الحرارة و / أو زيادة الرطوبة و / أو زيادة الضغط.

ثانيا: قانون التربيع العكسي Inverse Square Law:

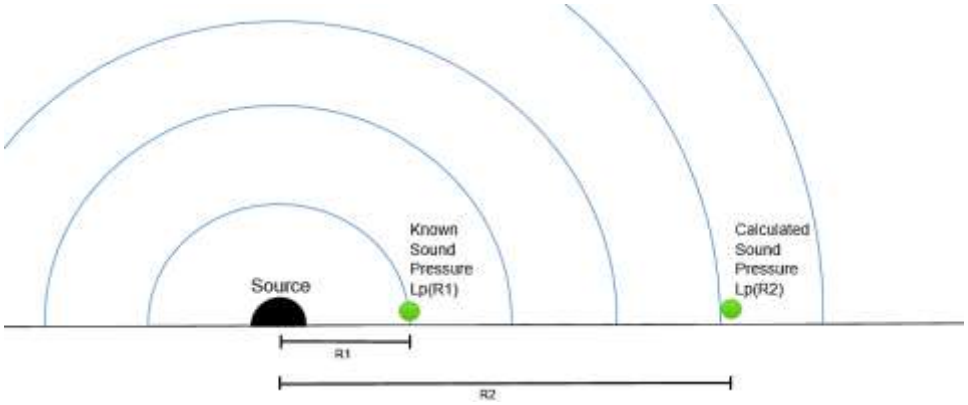
تقل شدة الصوت عندما تنتقل الموجات الصوتية بعيدًا عن المنبع. يمكن تفسير هذا الأمر بأن إزاحة جزيئات الهواء التي ينتجها المنبع المهتز تتناقص مع زيادة المسافة. ينتشر الصوت في جميع الاتجاهات بعيدا عن الجسم المهتز. في البيئة الصوتية المثلى لايوجد مايعيق انتشار الصوت فلا يتداخل ولاينعكس.

يمكن تعيين الانخفاض في شدة الصوت المرتبط بزيادة المسافة عن المنبع بدقة تامة، حيث تتناسب شدة أي صوت عكسيًا مع مربع المسافة التي قطعها الصوت. يُعرف هذا المبدأ باسم قانون التربيع العكسي. يتم وصف علاقة انخفاض شدة الصوت بالمسافة المقطوعة بالمعادلة التالية:

$$I \propto K\,(P/4\pi\, r^2)$$

في هذه المعادلة I تشير إلى شدة الصوت ، K تشير إلى ثابت يتعلق بكثافة وسط الانتشار وسرعة الصوت،P تشير إلى ضغط الموجة الصوتية عند المنبع، في حين r هي المسافة التي قطعها الصوت من المنبع إلى النقطة المراد قياس الصوت فيها. شكل 3.1

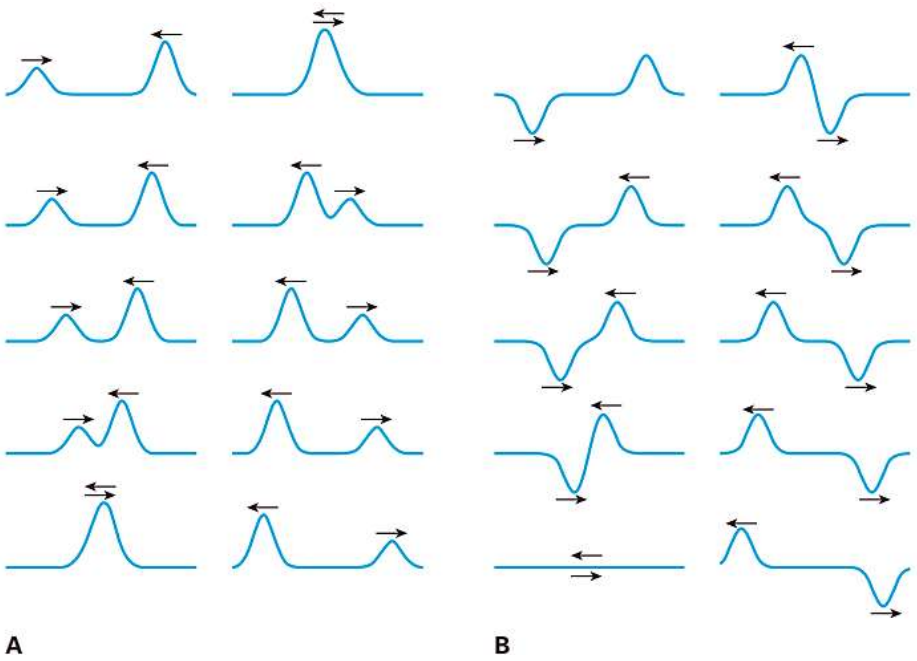
حسب قانون التربيع العكسي: تنقص قوة أو ضغط الموجة الصوتية بمقدار 6 ديسبل كلما تضاعفت المسافة التي يعبرها الصوت. وطبقا لنفس القانون فإن نقصان المسافة بين المنبع و المستمع او نقطة قياس الصوت سيسبب ازدياد في ضغط الموجة الصوت، يظهر ذلك من موقع r في المعادلة المذكورة وانعكاس تغيراتها على قيمة شدة الصوت.



شكل 3.1 يوضح قانون التربيع العكسي في انتشار الصوت

ثالثا: تداخل الأمواج المنتشرة Interference:

يمكن أن تتفاعل الموجات الصوتية أو تتداخل مع بعضها البعض بطرق مختلف. يوجد شكلان أساسيان لتداخل وتفاعل الأمواج الصوتية وهما التعزيز والحذف أو الإلغاء. حيث يسمى الأول بالتداخل البنَّاء constructive interference ويسمى الثاني بالتداخل الهدَّام destructive interference. يوضح الشكل 3.2 تفاعلًا بسيطًا بين موجتين أو أكثر. حيث تم تمثيل التداخل البناء مع الموجات المسماة A الجانب الأيسر من الشكل. تخيل أن الأمواج تسير في الاتجاه المشار إليه بواسطة الأسهم في الشكل، الذي يحدث هو أن ضغط كل موجة سيضاف إلى الموجة الأخرى وهذا مايسمى بالتعزيز او البناء وبالتالي يتشكل ضغط أكبر عندما تكون الإزاحة متوافقة بالجهة بين الموجتين. تذكر أن إزاحة الجسم المهتز وضغط الصوت الناتج يتغيران باستمرار بمرور الوقت وبالتالي نحن نهتم بالإزاحة اللحظية Instantaneous displacement وهي الإزاحة في وقت محدد. يظهر إلغاء الموجات في الجزء B الأيمن من الشكل 3.2 حيث يكشف التحري الدقيق للأشكال الموجية المختلفة عن موجتين أو أكثر من الضغط أو الإزاحة اللحظية متعاكستان بالاتجاه وبالتالي ستلغي إحداهما الأخرى عند حدوث التداخل أو تنقص سعة الموجة الناتجة عن التداخل نسبة لسعة كل منهما منفصلة.



الشكل 3.2 يظهر آليات التداخل البنَّاء A والتداخل الهدَّام B.

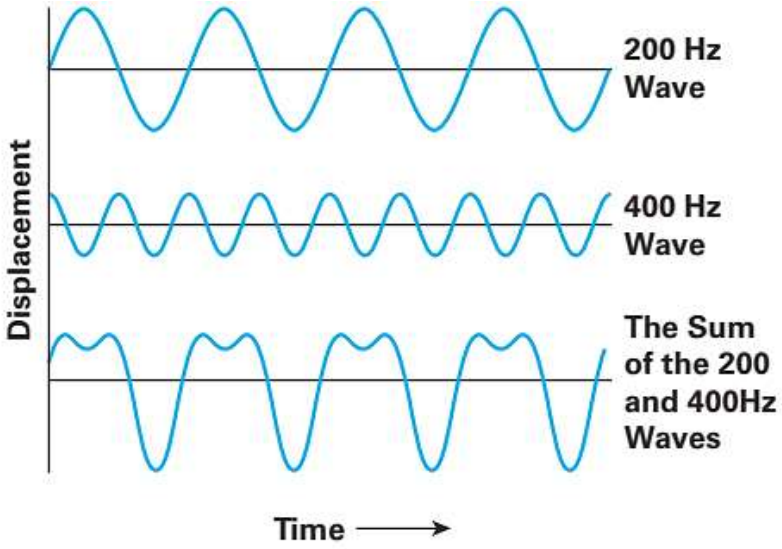
الارتداد أو الصدى Reverberation: يصدر الارتداد عندما تنعكس الموجات الصوتية على جدران الغرفة. يصل الصوت المرتد إلى آذان المستمع بعد تأخير طفيف. ينتقل بعض الصوت مباشرة من المصدر إلى آذان المستمع ، لكن الأصوات الأخرى ترتد من جدران الغرفة وتتأخر قليلاً قبل أن تصل إلى آذان المستمع. يتعارض ارتداد الأصوات في غرفة التخطيط أو في قاعة الصف بالمدرسة مع قدرة الشخص على إدراك وفهم الكلام.

الأمواج الو اقفة Standing waves: في عيادة السمعيات، تُعرف مشكلة تداخل الموجات الصوتية باسم تداخل الموجة الواقفة. تستخدم الأصوات الصادرة من مكبرات الصوت لاختبار السمع بالساحة الحرة أثناء جلوس المريض في المنتصف بين المكبرين. عند استخدام النغمة الصافية في الاختبار يصبح احتمال حدوث التداخل بالموجة الواقفة كبيرا، حيث تتداخل الموجة المقدمة مع الموجة المنعكسة عن الجدار والتي تماثلها بالتواتر وتعاكسها بالجهة ويسبب تداخلهما تشكل موجة ثابتة الذرى والقعور وتسمى بالموجة الواقفة. الأمر الذي يغير من شدة الأصوات الواصلة إلى أذن المريض وبالتالي يؤثر على دقة القياسات السمعية. ولذلك عادة ماتستخدم نغمة الWarble (نغمة متذبذبة كصوت العصفور) في اختبارات الساحة الحرة تجنبا لتشكل الأمواج الواقفة.

النبض أو الخفقان Beat: عندما يكون لدينا موجتين بسعتين متساويتين لكن بتواترين مختلفين عن بعضهما بفرق بسيط جدا. يحدث هذا، على سبيل المثال، عندما تصدر شوكتان رنانتان معاً صوتين ولكن بتواترين مختلفين قليلاً. أو عندما يكون هناك نوعين من آلات النفخ التي من المفترض أن يكون لها نفس التواتر تماما ولكن يفترقان قليلا عن بعضهما فيصبحان "خارج التناغم Out of Tone" . لنأخذ نقطة معينة في الفراغ حيث تتداخل الموجتان فتبدو الموجة الناتجة في الشكل وكأنها موجة جيبية واحدة ذات سعة متغيرة تمتد من القيمة العظمى إلى الصفر والعودة للسعة العظمى. يسبب الاختلاف في السعة اختلافا في علو الصوت يسمى النبض (الخفقان)، ويسمى التواتر الذي يتغير به ارتفاع الصوت بتواتر النبض. يكون تواتر النبض هو الفرق بين التواترين.

رابعا: الأصوات المركبة:

قمنا في الدرس السابق بدراسة خصائص أبسط الأصوات وهي النغمة الصافية أو الجيبية والتي تعتبر تابعا دوريا لأن سعتها تتغير بشكل متكرر ومتوقع من الموجب إلى السالب خلال االزمن. معظم الأصوات التي نواجهها في البيئة ليست جيبية ولا دورية. بدلاً من ذلك، فإن معظم الأصوات العالم الحقيقي تكون مركبة وتتكون من العديد من الترددات المختلفة. حيث تشمل الأصوات المركبة أعداد لاحصر لها من التواترات ضمنها وحسب درجة التعقيد والتنوع في التردد والطور والسعة والخصائص الزمنية يمكن تقسيم هذه الأصوات إلى انواع مختلفة: كالموسيقا والضجيج وحزمة الضجيج الضيق وطيف الكلام والموجات المربعية والمثلثية وغيرها.

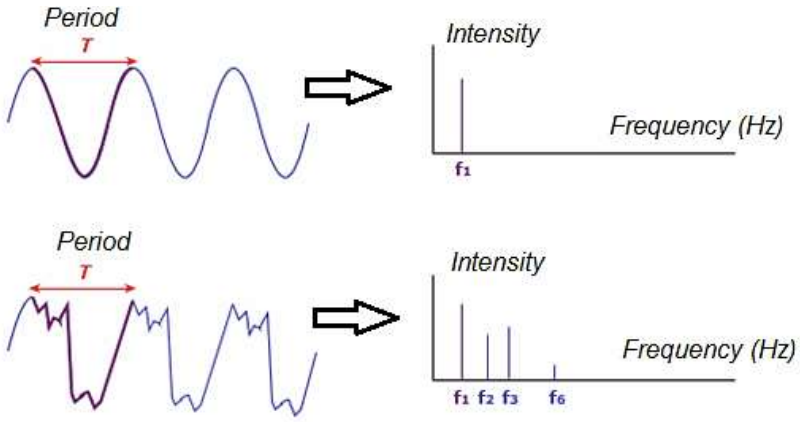


يوضح الشكل 3.3 كيف تنتج الأصوات المركبة عن مزيج من موجتين أو أكثر بترددات مختلفة، على وجه التحديد، يظهر المثال شكل موجة مركبة تم إنشاؤه بإضافة موجة 200 هرتز و 400 هرتز.

الشكل 3.3: تشكيل صوت مركب من مزيج نغمتين صافيتين بتواتر 200 و400 هرتز.

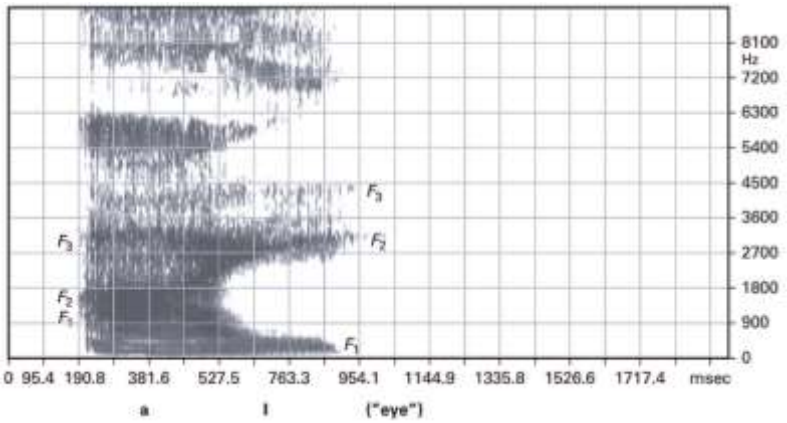
تتشكل بعض الأصوات المركبة من مئات الترددات ضمنها كطيف الموسيقا والكلام حيث يكون لكل منها خصائصه التواترية والزمنية التي تميزه عن باقي الأطياف. فكر للحظة في مئات اللغات المختلفة في العالم أو الآلاف التي لا توصف من الأغاني المكتوبة والمغناة والمعزوفات من العصور القديمة حتى الوقت الحاضر. كل منها هو مثال على تسلسل أصلي وفريد من نوعه للأصوات المعقدة التي يمكن استخدامها لنقل المعنى والعاطفة. سنراجع في مبحث آخر مجموعة متنوعة من أنواع الصوت، مع التركيز على تلك التي يستخدمها اختصاصيو السمعيات في تقييم السمع.

التمثيل في المجال الزمني والمجال الطيفي: غالبًا ما يتم عرض خصائص الأصوات البسيطة كالنغمة الصافية والأمواج الدورية ضمن مخططات ثنائية البعد. على المحور العمودي يتم تمثيل السعة (كما لاحظنا في كل المخططات في الفصل السابق) وعلى المحور الأفقي يتم تمثيل الزمن. وبالتالي هذه المخططات تفيد بالتنبؤ بتغير السعة عبر الزمن ودراسة الخصائص الزمنية للأصوات ويسمى هذا التمثيل بالمجال الزمني Time domain. يمكن أيضًا تمثيل الأصوات في المجال الطيفي Spectral domain، حيث يتم تمثيل السعة على المحور العمودي والتواترات المركبة للصوت على المحور الأفقي. يوضح الشكل 3.4 أمثلة عن التمثيل في المجال الزمني والطيفي.



الشكل3.4. أمثلة عن التمثيل في المجالين الزمني والطيفي للأصوات.

من الصعب عادة تمثيل كامل خصائص الصوت ضمن مخطط واحد، فغالبا ما يتم تمثيل اثنتين من الخصائص معا ويمكن تمثيل ثلاثة خصائص في مخططات ثلاثية الأبعاد. كمثال: يتم تمثيل الأصوات الكلامية ضمن المجال التواتري والزمني حيث يتم تمثيل الطيف التواتري على المحور العمودي والتبدل عبر الزمن على المحور الأفقي.



انظر إلى الشكل 3.5 والذي يظهر التمثيل الطيفي والزمني لصوت أنثوي يردد كلمة eye حيث تم تمثيل مضاعفات التواتر الأساسي للصوت والمسماة بالفورمانت Formants بالرموز F1,2,.. يستخدم اختصاصيو الكلام واللغة هذا النوع من التمثيل عادة في تشخيص اضطرابات الكلام والصوت.

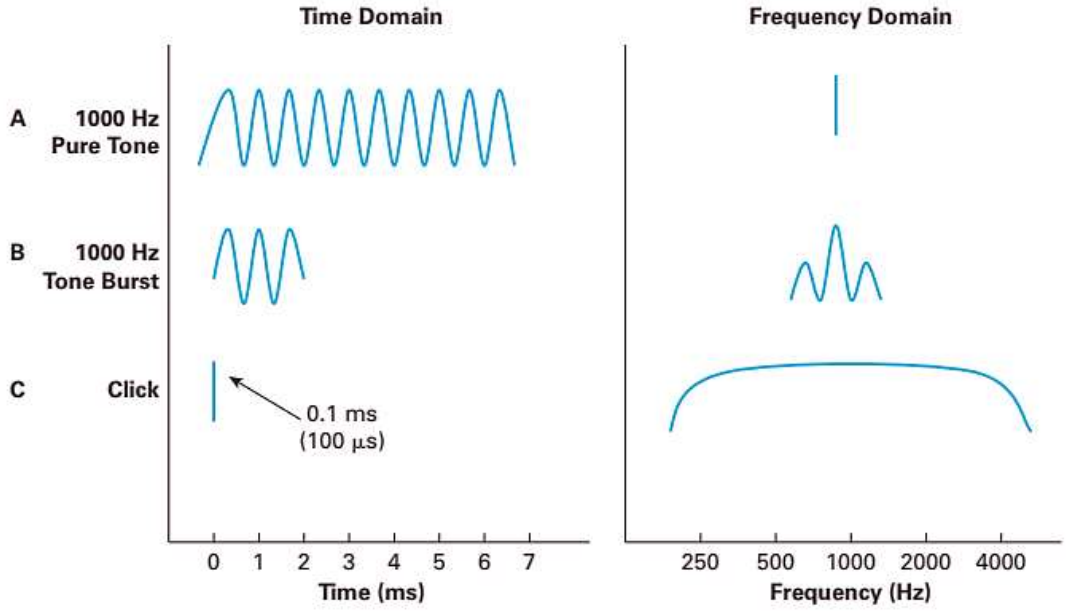
الشكل3.5: التمثيل الطيفي للأصوات الكلامية.

خامسا: نماذج الأصوات الهامة في علم السمعيات

الأصوات العابرة Transient Sounds:

الأصوات العابرة هي أصوات مختصرة للغاية مع فترات من المللي ثانية أو حتى جزء قصير من الألف من الثانية. يعتبر صوت الكليك (النقر) Click مثال شائع على هذه الأصوات العابرة. وهناك نوع آخر يسمى رشقة النغمات Toneburst وهي حزمة ضيقة من النغمات تتمركز حول تواتر مركزي وتستمر عدة أجزاء من واحدة الميللي ثانية (10-15 ميللي ثانية) وتتكون غالبا من أقل من 4 أو 5 دورات من الصوت

في الشكل 3.6 توضيح للعلاقة بين مدة المنبه السمعي وطيفه التواتري، حيث أنه كلما كان المنبه عابرا وذو مدة قصيرة جدا كلما كان طيفه التواتري أوسع بكثير وهذا حال منبه الكليك ذو مدة ال 100 ميكروثانية. في حين يمتد زمن التونبرست قليلا ليسمح بصفاء تواتري متمركز حول تواتر معين كتواتر 1000 هرتز في الشكل، أما للحصول على نغمة صافية فنحن بحاجة لزمن اطزل يمتد إلى عدة ثوان. نية هو 250/1 جزء من الثانية فقط. يشار إلى الأصوات النغمية القصيرة جدًا باسم رشقات النغمات. تستخدم المنبهات (الأصوات) العابرة وخصوصا القصيرة جدا كالكليك في اختبارات التقييم السمعي للأطفال الصغار والرضع نظرا لكونها تعطي استجابة سمعية مهمة يمكن تسجيلها وذلك بسبب طيفها التواتري الواسع والذي ينبه مناطق واسعة من الحلزون ويعوض بذلك عن عدم أو تأخر نضج الجهاز العصبي أو صعوبة الاختبار في هذا العمر.



الشكل 3.6. نماذج من المنبهات السمعية وعلاقة طول المنبه مع طيفه التو اتري

الضجيج Noise: عادة ما يشار إلى مصطلح الضجيج بطريقة سلبية نسبة لأي ضوضاء مزعجة أو أي طاقة صوتية غير مرغوب فيها وتسبب عدم الرضا أو عدم الراحة كصوت دراجة نارية مع عوادم مفتوحة أو صوت نباح الكلب في الليل أو الصباح الباكر. وحتى في غياب هذه الأصوات الخارجية هناك ضجيج دائم الوجود لايمكن تفاديه إلا في الغرف السمعية او غرف العزل الصوتي وهو ضجيج الخلفية أو مايسمى بضجيج المكان Background Noise وهو الضجيج الناجم عن الحركة المستمرة والحتمية لجزيئات الهواء والتي تسبب ضجيجا واسع الطيف من 250 إلى 8000 هرتز ولكن بطاقة منخفضة تقدر في درجات الحرارة والضغط الجوي العاديين بحدود 10^{-16} واط / م^2 ولحسن الحظ هذا المقدار منخفض ويمكن تجاهله ولايئثر على دقة قياس السمع حتى عند الأشخاص الذين لديهم حساسية سمعية أفضل من المتوسط.

أنواع الضوضاء في اختبارات السمع: للضجيج (noise) أهمية كبيرة في الاختبارات السمعية وفي الأبحاث العلمية السمعية وأيضا في بعض برامج التأهيل والعلاج السمعي كالعلاج بالضجيج لمرضى الطنين المزمن. يستخدم الضجيج إلى جانب النغمة الصافية في تخطيط السمع بالنغمة الصافية لزيادة دقة الاستجابة في حالات نقص السمع غير المتناظر وهو مايسمى بالتشويش Masking. كما يستخدم مرافقا للمنبه الكلامي في تخطيط السمع الكلامي لتشخيص بعض الاضطرابات وهو مايسمى بإدراك الكلام في الضجيج Speech In Noise Perception (SINP). للضجيج أنواع مختلفة حسب طيفها التواتري ولكل منها استخداماته الخاصة في علم السمعيات:

- الضجيج الأبيض White Noise هو أحد أهم أنواع الضجيج والذي يستخدم على نطاق واسع من المجالات ويتألف من صوت مركب من مجموعة كبيرة أو طيف واسع من التواترات على مساحة عدة أوكتافات وبسعة متساوية تقريبا وهو يشبه بالتعريف الفيزيائي اللون الأبيض والذي يتركب من كامل ألوان الطيف. هناك الضجيج الأحمر والزهري والأزرق ويشار بها إلى الضجيج واسع الطيف والذي لاتكون السعة فيه متساوية على جميع التواترات بل تكون الطاقة أكبر في التواترات الحادة نسبة للمنخفضة وتزداد ذروة الطاقة باتجاه التواترات الحادة من الأحمر للزهري فالأزرق والذي يتركز حول تواتر 8000 هرتز.
- حزمة الضجيج الضيقة Narrow Band Noise (NBN) وهو نوع آخر من المنبهات السمعية المستخدمة والتي تتركز طاقتها حول تواتر معين كحزمة ضيقة تواتريا مثلا من 900 إلى 1100 هرتز.
- ضجيج طيف الكلامSpeech Spectrum Noise وهو حزمة من الضجيج يمتد طيفها على التواترات الكلامية بين 300 و3000 هرتز.
- ضجيج حزمة الأوكتاف Octave Band Noise: يعرف الأوكتاف بأنه الطيف الفاصل بين تواترين ثانيهما ضعف الأولى فكل تضاعف في التواتر هو واحد اوكتاف، وبالتالي فإن ضجيج حزمة الأوكتاف هو الضجيج الذي يمتد طيفه التواتري على مساحة اوكتاف واحد مثلا بين 250 و500 هرتز أو بين 2000 و 4000 هرتز.

الكلام Speech:

الكلام هو صوت معقد للغاية يعرف فيزيائيا بأنه إشارة صوتية متبدلة بالتواتر والشدة عبر الزمن. تعتبر أصوات الكلام مهمة للغاية بالنسبة للإنسان لأنها تشكل أساس الاتصال الشفوي. دراسة طيف الكلام واسعة جدا وتشمل الكثير من التفاصيل والتي يتم تغطيتها في مواضع مختلفة عن هذا البحث. ولدراسة خصائص الكلام يجب دراسة كافة خصائص الصوت وتطبيقها عليه والتي لامجال لذكرها هنا. يتم التركيز في دراسة طيف الكلام على خاصيتين أساسيتين وهما التواتر الأساسي للكلام والتعزيزات (فورمانت).

التردد الأساسي Fundamental Frequency وهو أحد السمات المهمة للكلام حيث يتم تمييز صوت الإنسان بتواتره الأساسي F0 والذي يتم تحديده من خلال معدل اهتزاز الطيات الصوتية عند أي شخص ويختلف حسب العمر والجنس وكتلة وحجم الطيات الصوتية. يختلف التردد الأساسي لصوت الرجال عن النساء والأطفال. حيث يبلغ التوتر الأساسي لصوت الذكر البالغ السليم حدود ال130 هرتز وضمن مجال من 85 إلى 180 هرتز في حين يصل المجال التواتري لصوت النساء بين 170 إلى 250 هرتز والأعلى هو صوت الأطفال والذي يصل إلى حدود 300 هرتز.

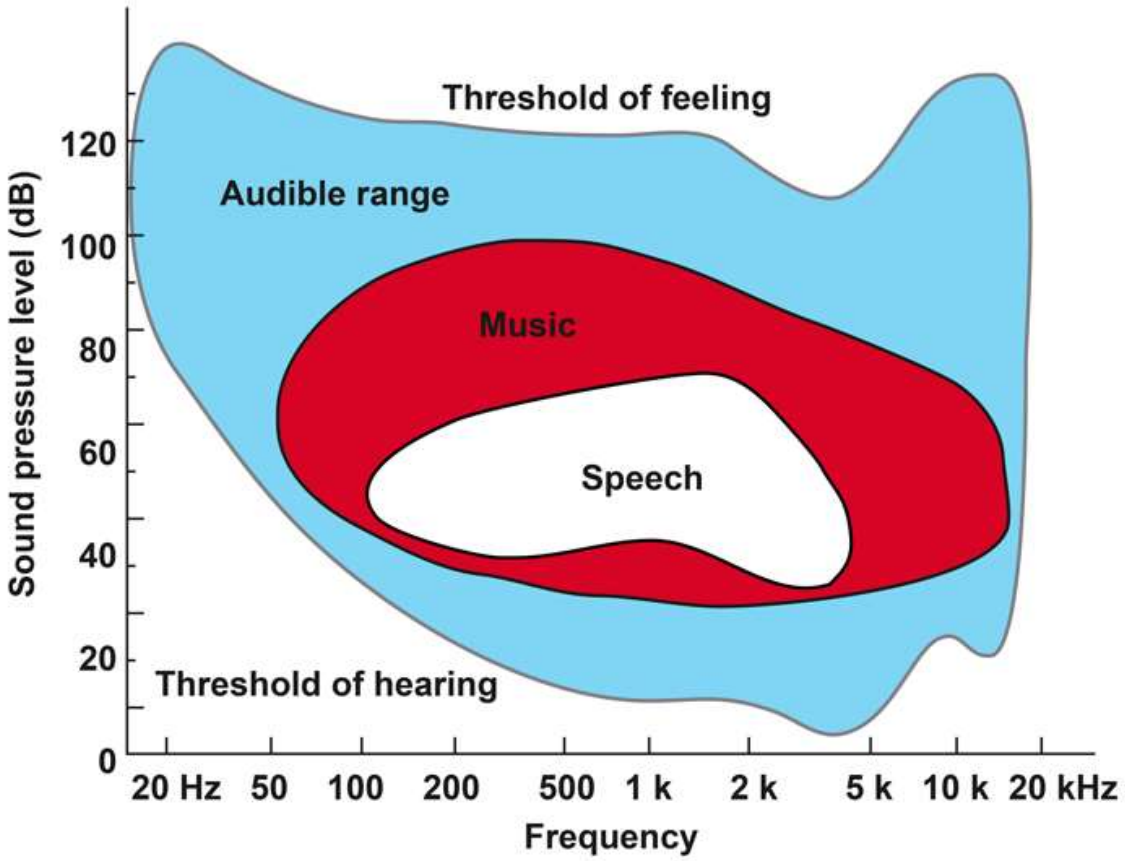
التعزيزات Formant: وهي المكمل الأساسي لصوت الإنسان إضافة للتواتر الأساسي وهي مجموعة من التعزيزات على تواترات عالية تشكل مضاعفات للتواتر الأساسي تتشكل على طول المسار الصوتي من البلعوم إلى الفم. فالتعزيزات F1,2,3,4,.. هي ذرى متتالية

في طيف الكلام (طاقة عالية) على تواترات تشكل مضاعفات للتواتر الأساسي وتتوافق مع رنين أو تجاوب السبيل السمعي وتعتبر الأساس في قدرة السبيل الصوتي على توليد الأصوات المختلفة كالصوامت Consonant والتي تتركز عند التواترات المتوسطة والحادة وأيضا الصوائت Vowels والتي تتركز في منطقة الطيف منخفض ومتوسط التواتر.

من أهم استخدامات إشارة الكلام في السمعيات هو تخطيط السمع الكلامي واختبارات المعالجة السمعية المركزية وتقييم عمل المعينات السمعية وأجهزة زرع الحلزون.

الموسيقا Music:

الموسيقى هي شكل آخر من أشكال الصوت المركب الذي يستخدم للتواصل أيضا. يتم استخدام كل خاصية من خصائص الصوت التي تمت مراجعتها في الفصل في وصف الموسيقى. تشبه المصطلحات المستخدمة في علم السمع إلى حد ما المصطلحات المستخدمة من قبل الموسيقيين والعلماء الذين يجرون أبحاثًا حول إدراك الموسيقى. يتم وصف الموسيقى من حيث التردد والطبقة Pitch، والشدة والجهارة Loudness، والخصائص الزمنية مثل مدة الأصوات وتسلسلها. ومع ذلك، غالبًا ما تختلف مصطلحات الموسيقى عن المصطلحات المستخدمة في علم السمع، على الرغم من مشاركة العديد من المفاهيم. الأشخاص الذين يعانون من ضعف السمع والذين يعانون من صعوبات في فهم الكلام قد يعبرون أيضًا عن مخاوفهم بشأن مشاكل سماع الموسيقى. من المفيد الاطلاع على المقياس الموسيقي لأهميته في تقييم ومساعدة المرضى الذين يعانون من ضعف السمع والذين يعبرون عن مشاكل في إدراك الموسيقى أو انخفاض الاستمتاع بالاستماع إلى الموسيقى. يوضح الشكل 3.7 كل م طيف الكلام والموسيقا وتقاطعهما على محوري التواتر والشدة.



الشكل 3.7. يوضح طيف الكلام والموسيقا والأصوات المسموعة في الأذن البشرية

الأصوات البيئية Environmental Sounds:

يكاد يكون من المستحيل تجنب التعرض اليومي لمجموعة متنوعة بشكل لا يصدق من الأصوات البيئية. كما ذكرنا سابقًا ، يُستخدم مصطلح الضوضاء عادةً للإشارة إلى الأصوات البيئية التي لا صلة لها بالموضوع السمعي ولا تنقل المعنى وتؤثر أحيانًا على التواصل أو جودة الحياة. من الضروري معرفة الأصوات البيئية المتنوعة وشدتها وتأثيرها على الوظيفة السمعية وحياة الإنسان. تستخدم الأصوات البيئية كأصوات الحيوانات ووسائل النقل في برامج التأهيل السمعي في مراحلها الأولى قبل بدء تعريف الطفل بالأصوات الكلامية كونها أسهل وطيفها التواتري أوسع. إن التعرض للأصوات الشديدة يسبب أذية سمعية ونقص سمع محرض بالضجيج وبعض الأصوات العالية جدا تسبب صدمة صوتية أو رض صوتي حاد كالانفجارات. في حين تشكل الحروب والمعامل ونمط الحياة الصاخب والاستماع غير الآمن للموسيقا أهم أسباب نقص السمع المحرض بالضجيج. في الجدول 3.1 يوجد تعريف بالعديد من الأصوات البيئية وشدتها.

الجدول 3.1. يوضح مجموعة من الأصوات البيئية وشدتها

Intensity in dB SPL	Ratio of Sound Pressure to Reference Level	SPL (dynes/cm^2)	Sounds
0	1:1	.0002	Absolute human hearing threshold for a 3000-Hz pure tone
20	10:1	.002	A whispered voice at 4 feet
40	100:1	.02	A quiet room
50	316:1		A typical office
60	1,000:1	.2	Average level of soft conversation 5 feet from the speaker
70	3,160:1		Moderately intense conversational level
80	10,000:1	2.0	Average level of shouting at a distance of about 5 feet, or the sound of heavy traffic
90	31,600:1		Elevated train, or pneumatic drill at 10 feet
100	100,000:1	20.0	Symphony orchestra, or rivet gun at 35 feet
120	1,000,000:1	200.0	Sound of a jet airplane engine, or MP3 player at high volume
140	10,000,000:1	2000.0	Loud sound causing pain

انتهت المحاضرة