جامعة دمشق
كلية العلوم الصحية

تشريح وفزيولوجيا السمع والنطق

Physiology of Hearing

(وظيفة الأذن الخارجية والوسطى)

د سامر محمد محسن
MD., ENT, PhD OF Audiology

October 2021

مقدمة

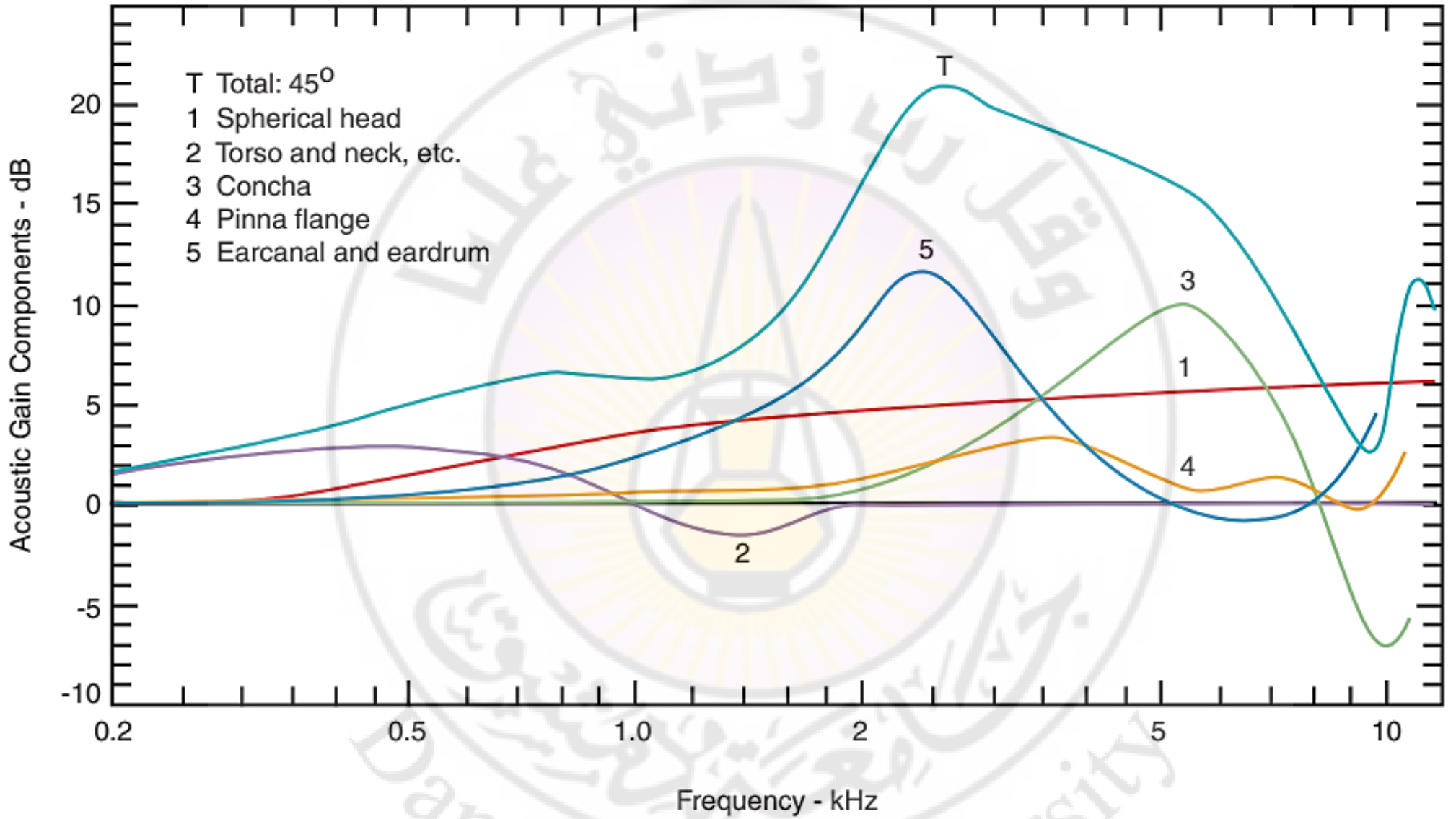
- يصل الصوت إلى الحلزون بالطريقين الهوائي air conduction عبر مجرى السمع والأذن الوسطى والطريق العظمي bone conduction الذي يتجاوز الأذن الوسطى.
- لايعتبر النقل بالطريق العظمي ذو أهمية عند الأشخاص ذوي السمع الطبيعي في حين له أهمية واضحة في تخطيط السمع بسبب العبور الذي يحدث من سماعة الأذن المفحوصة بالطريق العظمي إلى الأذن الأخرى الغير مفحوصة.
- يتأثر الصوت الواصل إلى غشاء الطبل بالصيوان ومجرى السمع وشكل الرأس. يختلف هذا التأثير حسب التواترات المختلفة كما يتعلق تأثير الرأس بجهة مصدر الصوت.

دور الصيوان

- للصيوان بشكله المميز دور هام في تجميع الصوت وتوجيهه باتجاه مدخل مجرى السمع ولكن هذه التفاصيل التشريحية الموجودة في الصيوان لها دور في إجراء تبدلات طيفية على الصوت الوارد.
- كما أن للصيوان دور في تحديد جهة الصوت في المستوى العمودي على وجه الخصوص.
- عند دراسة ضغط الموجة الصوتية الوارد من الحقل الحر إلى غشاء الطبل يتم اعتماد نموذج مانيكان يشبه الرأس البشري ويوضع مكرفون في مكان غشاء الطبل لاستقبال الصوت وقياسه. تبين نتائج هذه الدراسة ان الدور المهم للصيوان يظهر على التواترات المرتفعة حول ال 4 كيلوهرتز.

دور مجرى السمع

- يعمل مجرى السمع كوسط رنان resonator بالإضافة لوظيفة نقل الصوت sound transfer.
- تعرف وظيفة النقل أو تابع نقل التواتر frequency transfer function أو نظام النقل transmission function بأنه تمثيل بياني للنسبة بين الخرج عند غشاء الطبل والدخل عند مدخل المجرى في الصوت وتعرف بمخطط بود Bode plot وهي تابع التبدل في السعة amplitude حسب التواتر ويعبر عنه بالديسبل.
- يتميز تابع النقل بوجود ذروة حول التواتر 3000 هرتز (وسطياً 2.8 كيلوهرتز) بحيث يلاحظ وجود كسب بحدود 10 ديسبل على الصوت الواصل إلى غشاء الطبل حول التواتر المذكور نسبة للصوت الوارد عند مجرى السمع.
- ينطبق هذا الأثر على الأصوات الواردة من مكان بعيد إلى مجرى السمع (الحقل الحر) ويختلف عند استخدام السماعات الرأسية head phone أو سماعات داخل المجرى insert phone.
- لاحظ الشكل 4-2.



يساهم الصيوان بنسبة مقبولة في تشديد الصوت ولو كانت أقل نسبيا من تشديد مجرى السمع الظاهر بحيث تبلغ حصيلة التشديد الكلية للاذن الخارجية بحدود 20 ديسبل على التواتر 2000 هرتز.

دور الرأس

- يلعب الرأس دور الحاجز أو المعيق لتجمع الأمواج الصوتية في الحقل الحر.
- يؤثر الرأس والأذن على الحقل الصوتي بحيث يختلف ضغط الموجة الصوتية عند مدخل الأذن نسبة لأي نقطة أخرى في الرأس.
- يرتبط تأثير الرأس بحجمه وبطول موجة الصوت وبالتالي يتعلق التضخيم amplification بالتواتر أو طيف الصوت. وعليه يختلف طيف الصوت الواصل إلى غشاء الطبل عن ذلك المقاس في الحقل الحر.
- بحساب بسيط يمكن معرفة طول الموجة الصوتية لكل تواتر، فلو افترضنا سرعة الصوت في الهواء بالشروط العادية 340 م/ثا وعليه فإنه لتواتر 1000 هرتز يكون طول الموجة الصوتية مقدرا بحدود 34 سم. وعليه يمكننا مقارنة علاقة طول موجة كل تواتر بحجم الرأس.
- كما يتعلق دور الرأس بجهة مصدر الصوت حيث يلعب الرأس دور الحاجز baffle للأذن الواقعة من جهة مصدر الصوت في حيث يلعب دو الظل shadow للأذن الواقعة في عكس جهة مصدر الصوت.

دور الرأس

- إن دراسة تأثير الرأس على الصوت الوارد إلى غشاء الطبل يفترض وجود الرأس في الحقل الحر بمواجهة المنبع الصوتي دون وجود أي عوائق بينهما وأي انعكسات reflection الأمر الذي لا يتحقق في أغلب الحالات كما في داخل غرفة عادية حيث ينعكس الصوت من اتجاهات مختلفة ولتحقيق هذه الشروط لأغراض بحثية أو تشخيصية يجب استخدام الغرف معدومة الصدى Anechoic chamber والتي تمتاز بوجود جدران تمتص أغلب طاقة الموجة الصوتية وتلغي أو تخفف الانعكاس قدر الإمكان.

الأسس الفيزيائية للسمع الاتجاهي
Directional Hearing

- إن الأساس الفيزيائي لتحديد جهة الصوت في المستوى الأفقي يعتمد على اختلاف زمن وصول الصوت إلى الأذنين Inter-aural time difference (ITD) وعلى اختلاف شدة الصوت الواصل إلى الأذنين Inter-aural loudness difference (ILD).
- لا يتعلق اختلاف الشدة بجهة منبع الصوت في المستوى الأفقي وحسب وإنما يعتمد أيضاً على التواتر في حين لا يتعلق اختلاف زمن الوصول إلى الأذنين بالتواتر.
- يتم معالجة الاختلاف في الزمن والشدة في السبيل السمعي المركزي وعليه يتم تحديد جهة الصوت.

الأسس الفيزيائية للسمع الاتجاهي
Directional Hearing

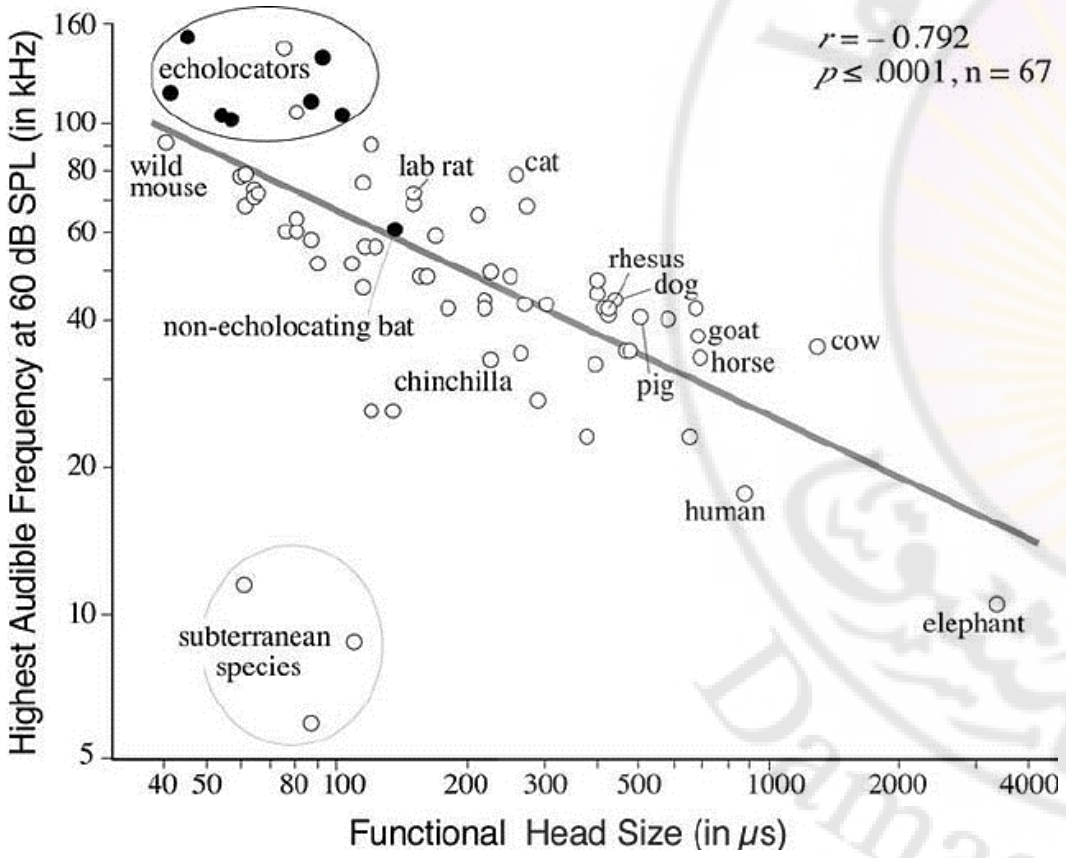
- ينجم الاختلاف في شدة الصوت الواصل إلى الأذنين عن تموضع الرأس كعائق داخل الحقل الحر. حيث يلعب الرأس دور الدرع (shield) أمام الأذن المعاكسة لجهة منبع الصوت مما يخفف شدة الصوت الواصلة إليها في حين يلعب دور حاجز baffle خلف الأذن الموافقة لجهة المنبع فيسمع الصوت فيها أعلى شدة.

- وهذا الأمر يرتبط بالتواتر حيث أن الأصوات ذات التواترات المرتفعة (طول الموجة أقصر) ترتطم بالكامل بالرأس ويكون فرق الشدة فيها جلياً أكثر من التواترات المنخفضة ذات طول الموجة الكبيرة والتي قد تتجاوز ظل الرأس وصولاً للأذن المقابلة دون خسارة تذكر في شدة الصوت. وعليه تم القول بأن دور الرأس في نقل الصوت إلى مدخل مجرى السمع لا يعتمد فقط على زاوية منبع الصوت Azimuth وإنما أيضاً على تواتره.

المجال التواتري للسمع
Hearing Range

- أصبح معروفاً أن المجال التواتري للسمع عند الإنسان يتراوح بين 20 هرتز- 20 كيلو هرتز، فين حين يمكن في ظروف القياس المثالية أن يتم سماع صوت يصل تواتره إلى 12 هرتز أو 28 كيلوهرتز.
- يسجل ارتفاعاً واضحاً في عتبات السمع عند تواتر 15 كيلوهرتز عند الإنسان البالغ السليم. في حين تكون حساسية السمع المثلى عند اللإنسان حول تواترات أخفض من ذلك بحيث لا تتجاوز 8000 هرتز.
- يتعلق المجال التواتري وخصوصاً السمع على التواترات الحادة بشكل وحجم الرأس وخصائص الجهاز السمعي عند الإنسان.
- تمتلك الحيوانات المختلفة مجالاً للسمع يختلف بحسب شكل وحجم الرأس وبحسب متطلباتها للبقاء، بحيث يتطلب السمع المفيد إدراك الاختلاف في زمن الوصول وشدة االصوت بين الأذنين مجالاً أوسع للتواترات عند للحيوانات ذات حجم الرأس الأصغر.

المجال التواتري للسمع Hearing Range



- يتراوح مجال السمع عند الرئيسات من غير البشر كالثدييات بين 60 هرتز و58 كيلوهرتز فين حين تمتلك القطط مجالاً أوسع (حجم رأس أصغر) يتراوح بين 55 هرتز – 79 كيلوهرتز، باستثناء قط الشنشيلا chinchillaوالذي يمتاز برأس كبير نسبياً وطول حلزون قريب للحزون البشري وبالتالي طيف تواتري أضيق عند التواترات المرتفعة مما يجعله مناسباً كحيوان تجربة في الأبحاث السمعية
- يعتبر الخفاش والجرذ الأبيض والفئران ذات كفاءة عالية في السمع على التواترات المرتفعة، حيث يستطيع الخفاش سماع أصوات يصل تواترها حتى 200 كيلوهرتز والفأر السوري الصغير بحدود 120 كيلوهرتز والجرذ الأبيض والجربل بحدود 70 كيلوهرتز.
- في حين تعتبر الحشرات الأكفأ على الإطلاق فس سماع أصوات ذات تواترات مرتفعة تصل حتى 300 كيلوهرتز وذلك يجعلها في مأمن من الخفاش.
- يمكن قياس الأمر ذاته على الطيور والأسماك، في حين يمتلك الفيل المجال التواتري الأضيق بين الثدييات ولا يستطيع تمييز الأصوات ذات التواتر الأعلى من 12 كيلوهرتز.

دور الأذن الوسطى كناقل معاوق
Middle ear as impedance Transformer

- تمثل وظيفة الاذن الوسطى واحدة من أهم السيناريوهات الفيزيولوجية في البدن، فلو تخيلنا أن نريد التحدث الى شخص وهو تحت الماء فلن يسمعنا لأن معظم الصوت سوف ينعكس على سطح الماء الأمر نفسه بالنسبة للحلزون المليء بالسوائل فمن المفترض أن تنعكس كامل الموجة الصوتية عن سطح النافذة البيضية وذلك بسبب الاختلاف الواسع بين طبيعة الوسط الغازي للأذن الوسطى والسائل للحلزون.

- نظريا يمكن القول أن نقل الصوت الى النافذة البيضية يجب أن يتحسن بمقدار **36 ديسبل** اذا عملت الاذن الوسطى كناقل معاوق مثالي مع نسبة نقل صحيحة. أما واقعيا فإن نسبة نقل الاصوات في الاذن الوسطى لدى البشر تبتعد بشكل بسيط عن المثالية و ذلك بسبب ارتداد جزء من الصوت على غشاء الطبل و هذا يسبب خسارة في الصوت المنقول للقوقعة.

- إن العمل الناقل للمعاوقة في الاذن الوسطى ينجم بشكل أساسي عن فرق المساحة بين القسم الفعال من غشاء الطبل و الصفيحة القدمية للركابة بالإضافة لتدخل كل من تأثير الرافعة لعظيمات السمع والتواء غشاء الطبل.

- إن للاذن الوسطى كتلة Mass و صلابة Stiffness تجعل خواصها الناقلة معتمدة على تواتر الصوت.

آليات الأذن الوسطى

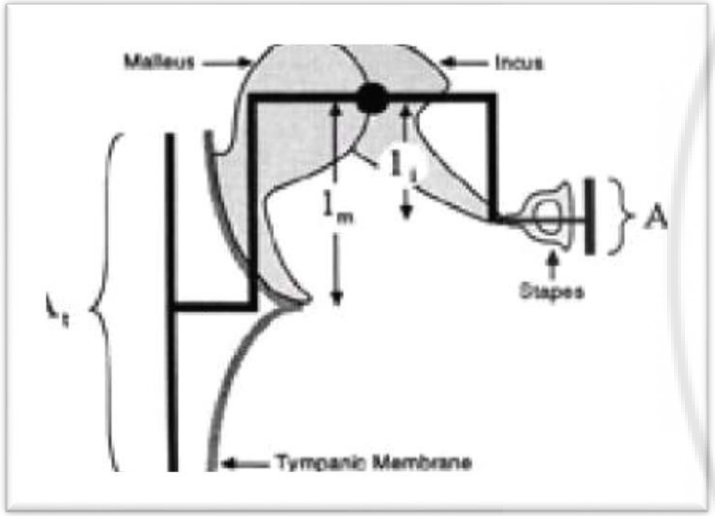
- لقد صممت آليات الأذن الوسطى لزيادة الضغط المقدم الى الحلزون وبالتالي التغلب على مقاومة جريان الطاقة المسمى بالمعاوقة Impedanceوكما نعلم أن:

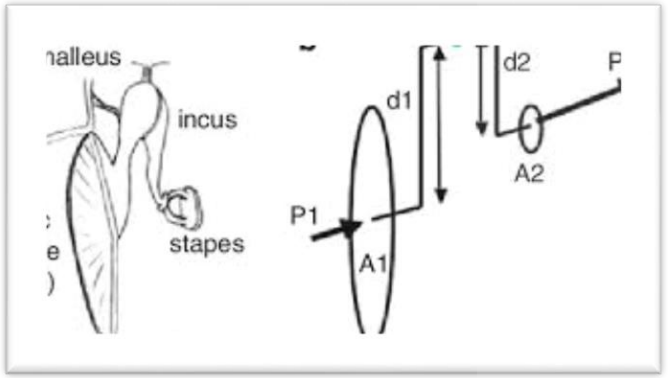
الضغط = القوة / السطح

- فإن زيادة الضغط تقوم على إما زيادة القوة أو إنقاص السطح وتقوم آلية الأذن الوسطى على الطريقة الثانية كوسيلة أساسية للتوفيق بين معاوقة الأذن الخارجية والداخلية وهي الوظيفة الأساسية للأذن الوسطى والتي تتمثل في التوفيق بين كلا الجهازين الناقلين الأذن الخارجية والحلزون.

- **ملاحظة أساسية**: إن نسبة مساحتي غشاء الطيل الى الصفيحة القدمية للركابة تعتمد على تواتر الصوت لأن القسم الفعال من غشاء الطبل و ليس سطحه التشريحي كاملا هو من يشكل نسبة النقل ومن هنا نبدأ بالتصور أن آليات الأذن الوسطى تعتمد على التواتر Frequency Dependent.

آليات الأذن الوسطى

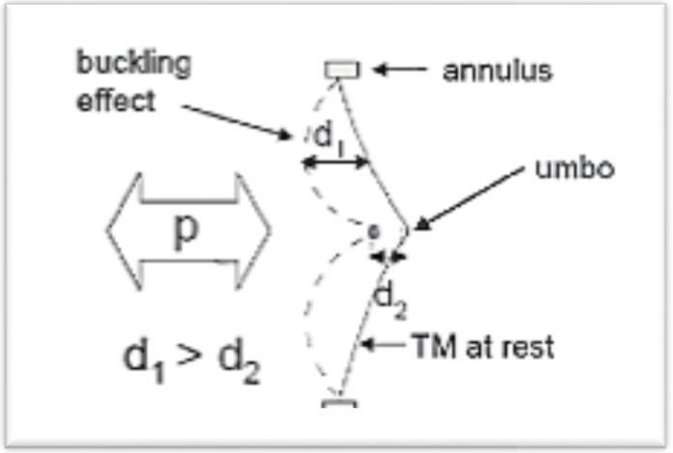




- تقوم الآلية الأولى للأذن الوسطى على مبدأ فرق المساحة Area difference بين غشاء الطبل والنافذة البيضية: حيث تبلغ المساحة الفعالة لغشاء الطبل بحدود ٥٥ مم مربع في حين تبلغ مساحة النافذة البيضية حوالي ٣.٢ مم مربع مما يجعل غشاء الطبل أكبر ب ١٧ مرة من النافذة البيضية وعليه فإن الطاقة الصوتية الواصلة الى غشاء الطبل يتم تجميعها كالقمع باتجاه السطح الأصغر للنافذة البيضية مما يحقق كسب وقدره ١٧ الى ١ والذي يقدر بزيادة حوالي ٢٥ ديسبل.
- أما الآلية الثانية للأذن الوسطى فتعتمد على فرق الرافعة Lever difference حيث أن طول قبضة المطرقة يبلغ حوالي ٩ مم أما طول النائئ الطويل للسندان فهو حوالي ٧ مم مما يعطي كسب قدره ب١/٢ والدي يقدر بزيادة حوالي ٢ ديسبل.

آليات الأذن الوسطى

- أما الآلية الثالثة فتتمثل بالتواء غشاء الطبل: Buckling حيث أنه عندما تصل الموجة الصوتية لتحرك غشاء الطبل فإنه يلتوي قليلا دافعا قبضة المطرقة قليلا الى أبعد من غشاء الطبل المتحرك مؤدياً إلى كسب وزيادة في الضغط بحدود ٤-٦ ديسبل.
- مجتمعةً معا فإن: فرق الصفحة - الرافعة والالتواء تسبب كسب يقدر بحدود ٣١ ديسبل من غشاء الطبل وصولا الى الحلزون وذلك حسب تواتر المنبه وعليه فإن غياب الأذن الوسطى سيحتم خسارة تضخيم بحدود ٣١ ديسبل من مجرى السمع إلى الحلزون أي أن الوظيفة المحولة (المعدلة) Transforming للأذن الوسطى هامة جداً لحدوث السمع audition وأن العوامل التي تسبب اضطراب وظيفة الأذن (حالات الالتهاب – التصلب - الورم الكبي الوداجي) يكون لها تأثير خطير على آليات نقل الصوت إلى الأذن الداخلية.



The footplate of stapes acts like a small piston on the cochlear fluid through a membraneous connection that seals the oval window of the cochlea. The buckling motion of the tympanic membrane decreases the velocity two-fold and increases the force two-fold, changing the impedance ratio four-fold.

- إن كفاءة الاذن الوسطى كناقل معاوق تعتمد على تواتر الصوت حيث تعيق صلابة الاذن الوسطى الحركة عند سماع الأصوات ذات التواتر المنخفض بينما تخمد الكتلة الحركة عند ورود الاهتزازات ذات التواتر المرتفع.
- يتسبب الاحتكاك في الأذن الوسطى في فقدان الطاقة بشكل مستقل عن تواترالصوت.
- إن نسبة الرافعة قد تكون متعلقة بتواتر الصوت لأن نمط اهتزاز السلسلة العظمية يختلف باختلاف تواترالصوت المسموع .
- تتعلق مساحة المنطقة الفعالة من غشاء الطبل بتواترالصوت المسموع وهذا بدوره يقود الى اعتماد ناقلية الأذن الوسطى على تواتر الصوت.
- بما أن نقل الصوت عبر الأذن الوسطى يعتمد على تواتره، فان عمل الاذن الوسطى كناقل للاهتزازات الصوتية لا يمكن تقديره أو التعبيرعنه برقم واحد ثابت بل يجب التعبير عن نسبة نقل الصوت في الأذن الوسطى على انه تابع للتواتر، وهو ما يسمى وظيفة النقل (التحويل) Transformation .

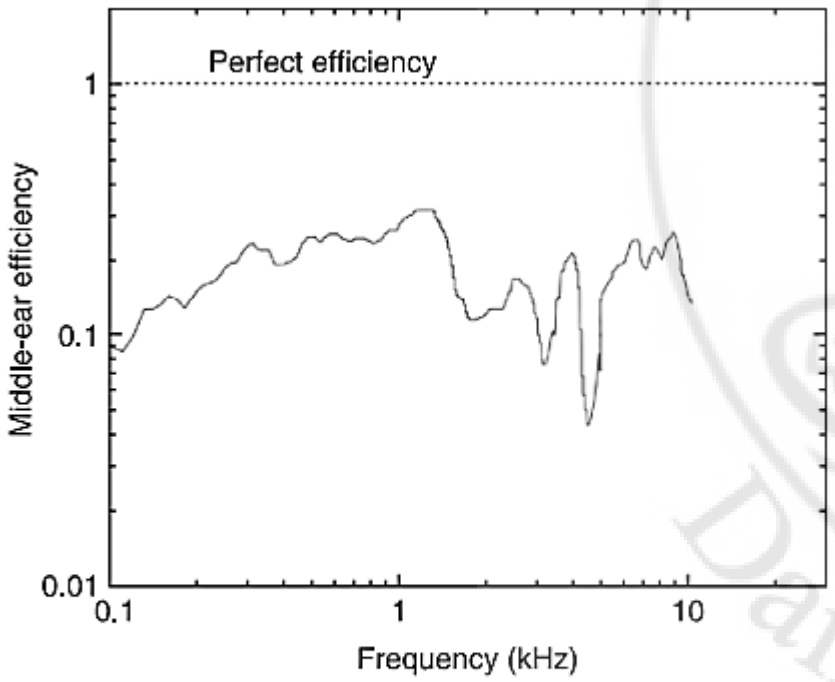


FIGURE 2.9 The efficiency of the cat's middle ear, showing the fraction of sound power entering the middle ear that is delivered to the cochlea (after Rosowski, 1991, with permission from the American Institute of Physics).

المعاوقة السمعية للأذن الوسطى

- إن المعاوقة السمعية للأذن تعبر عن مقاومة غشاء الطبل للاستجابة للمنبه الصوتي.
- إن دراسة المعاوقة السمعية للأذن يمكنها أن تعطي لمحة هامة حول عمل الأذن الوسطى تتضمن دور كل من أجزاء الأذن الوسطى لإبصال الاهتزازت إلى سائل اللمف.
- إن دراسة المعاوقة السمعية للأذن مهم أيضا لدراسة أمراض الأذن الوسطى حيث أنه لا يقتصر على البحث العلمي و إنما يتعداه إلى الممارسة السريرية الروتينية حيث أن اختبار مخطط الطبلة Tympanometry يستخدم في العيادات لتقييم وظيفة الأذن الوسطى و تحديد ضغط الهواء في جوف الاذن الوسطى.
- كما ان قياس التبدلات في معاوقة الاذن الوسطى السمعية يستخدم لتسجيل تقلصات عضلات الاذن الوسطى و هذا ما يعرف بمنعكس الركابة وله استخداماته في تشخيص الاضطرابات الاذنية العصبية.

العبور Immittance

- وهو مصطلح يمثل مركبا لمفهومين أساسيين في علم الصوتيات وهما المعاوقة Impedance والقبول أو التسهيل Admittance.
- Acoustic Immittance: وهي مفهوم يعبر عن كمية طاقة الصوت التي تعبر الوسط بغض النظر عن طريقة قياسها.
- المعاوقة السمعية Acoustic impedance: وهي ممانعة الأذن الوسطى لعبور الصوت خلالها إلى حد معين.
- القبول Acoustic Admittance: وهي كمية الطاقة المنتقلة من اهتزاز غشاء الطبل بفعل تغيرات ضغط الموجة الصوتية والواصلة إلى الحلزون وتسبب حركة السوائل فيه. (أي مقدار الطاقة الواصلة من الموجة الصوتية عبر الأذن الوسطى).
- المطاوعة Compliance: وهي خصائص الأذن الوسطى التي تيسر انتقال الصوت عبرها.
- خلاصة عمليتي الممانعة والتسهيل تحدد كمية أو مقدار الطاقة الصوتية التي تعبر الأذن الوسطى وتقدم للأذن الداخلية.

ما هي المعاوقة السمعية؟

- **المعاوقة السمعية** هي ممانعة الوسط لحركة الموجة الطولية.
- يعتمد مقدار المعاوقة على كل من خصائص الوسط ونوع الموجة المنتشرة عبره. وهي تميز العلاقة بين ضغط الصوت المطبق وسرعة الجسيم الناتجة عنه و تسمى هذه الممانعة بالمعاوقة الصوتية النوعية (Specific acoustic impedance) للوسط لأنها تميز الوسط نفسه.
- بماذا يذكر هذا النموذج؟

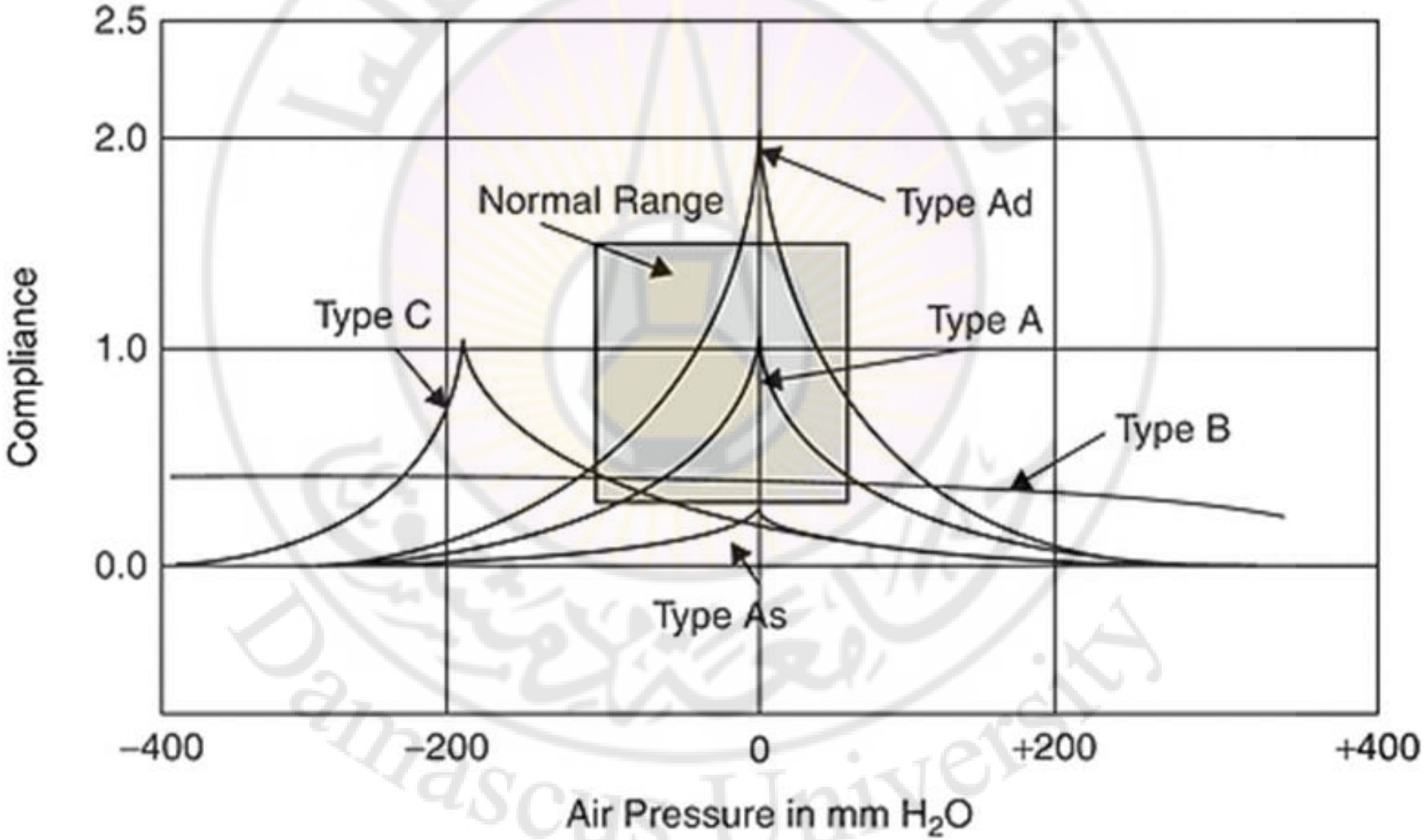
$$z(x) = \frac{p(x)}{u(x)}$$

Air Pressure

Specific Acoustic Impedance

Longitudinal Particle Velocity

Tympanometry



دور عضلات الأذن الوسطى

- تنقبض عضلات الأذن الوسطى عادةً كرد فعل للصوت المرتفع الشدة يسمى المنعكس السمعي Acoustic Reflex.
- إن انقباض العضلة موترة الطبلة يسحب قبضة المطرقة إلى الداخل، مما يزيد من صلابة الأذن الوسطى و يسبب انزياح غشاء الطبل إلى الانسي.
- بينما تسحب العضلة الركابية الركابة في الاتجاه الذي هو عمودي على حركتها البستونية الشكل مما يتسبب في حركة انزلاقية في المفصل السنداني الركابي.
- إن هاتين الآليتين تسميات آليات توهين الصوت في الأذن الوسطى وتعملان بشكل انعكاسي بهدف حماية الأذن من انتقال الأصوات الشديدة إلى الحلزون وحدوث أذية سمعيا ولكن في الحقيقة لهما دور مفصل أبعد من ذلك يتم دراسته في مقرر لاحق.

دور عضلات الأذن الوسطى

- إن تقلص العضلتين معا يسبب ازدياد كبير في المعاوقة دون تأثر مهم في حركة غشاء الطبل بسبب معاكسة عمل الركابية لموترة الطبلة في تحريكه.
- تتقلص العضلة موترة الطبلة مع البلع وانفتاح نفير اوستاش لتسهل تبدل الهواء في الأذن الوسطى وتعويض الأكسجين الممتص من المخاطية.
- قد يكون للمنعكس الركابي على التواترات المنخفضة أهمية في عدم سماع الأصوات منخفضة التواتر داخل الرأس والتي من المفترض أنها مزعجة للشخص.
- قدرت التجارب الحيوانية على القطط بان مقدار التوهين الذي يؤمنه المنعكس الركابي يتراوح بين 8-10 ديسبل.

أي سؤال ؟؟

جامعة دمشق
كلية العلوم الصحية

تشريح وفزيولوجيا السمع والنطق

Physiology of Hearing

(وظيفة الأذن الداخلية)

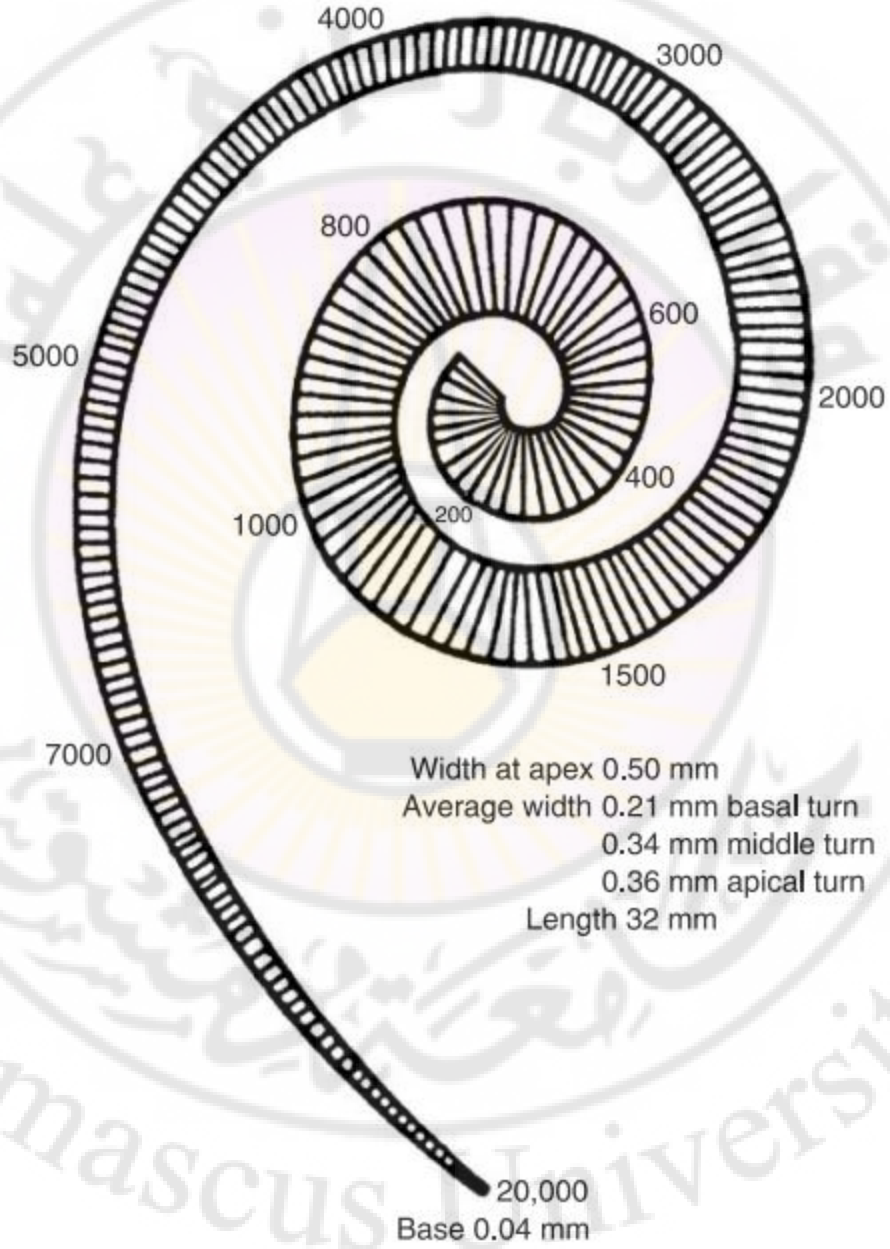
د سامر محمد محسن

MD., ENT, PhD OF Audiology

October 2021

وظيفة الأذن الداخلية

- يعتبر الحلزون من أكثر الأعضاء الحسية دقة وروعة في جسم الإنسان حيث أن هذا العضو الصغير بمكوناته المتناهية في صغر الحجم يقوم بوظيفة رائعة بكل إتقان ودقة على طول الحياة بدون تنكس يذكر ولو أن ضجيج الحياة الحديثة له أثر هام على هذه الوظيفة سيناقش لاحقا.
- يقوم الحلزون بكلتا وظيفتي التحليل الطيفي والزماني للإشارة الصوتية. حيث يقصد بالتحليل الطيفي المقدرة على استخلاص جميع التواترات المختلفة من الإشارة المعطاة. والتحليل الزماني يقوم على كشف أدق التغييرات في الإشارة السمعية خلال فواصل زمنية دقيقة جدا.
- يساعد الحلزون على إدراك رقعة الصوت Pitch وحدته Loudness وهي المرادفات الحسية Psychoacoustic لما يقوم الحلزون بتحليله من خصائص الإشارة الصوتية كالتواتر Frequency والمطال Amplitude يضاف إليها المحتويات الزمنية للإشارة Temporal aspects، تشكل هذه الآليات المرحلة الأولى للمعالجة السمعية Auditory Processing للإشارات الصوتية.


4000
3000
800
600
5000
2000
400
200
1000
1500
7000
Width at apex 0.50 mm
Average width 0.21 mm basal turn
0.34 mm middle turn
0.36 mm apical turn
Length 32 mm
20,000
Base 0.04 mm

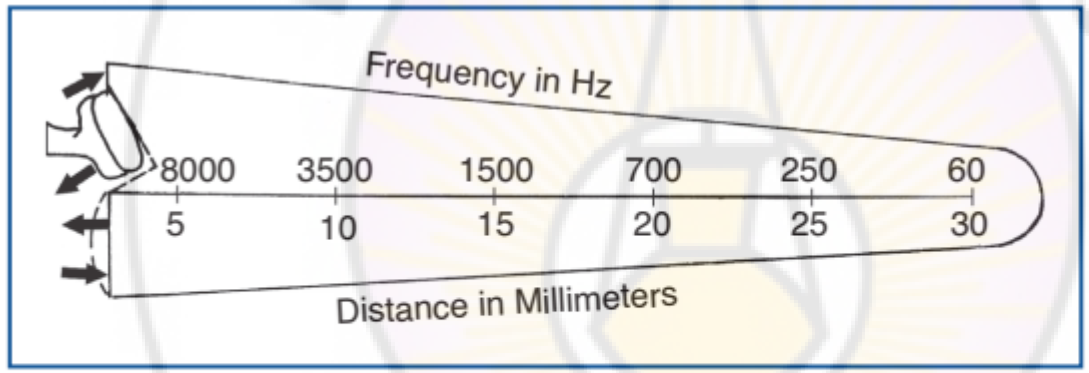
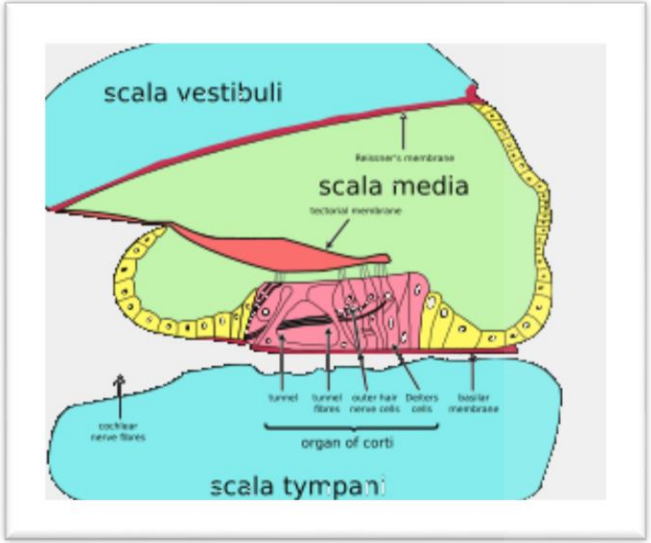


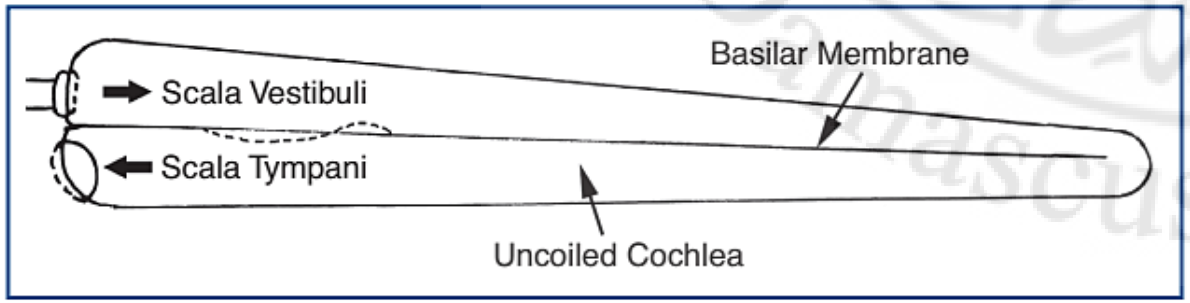
Figure 5–4. The frequency to distance relationship from the stapes to a place along the human basilar membrane.

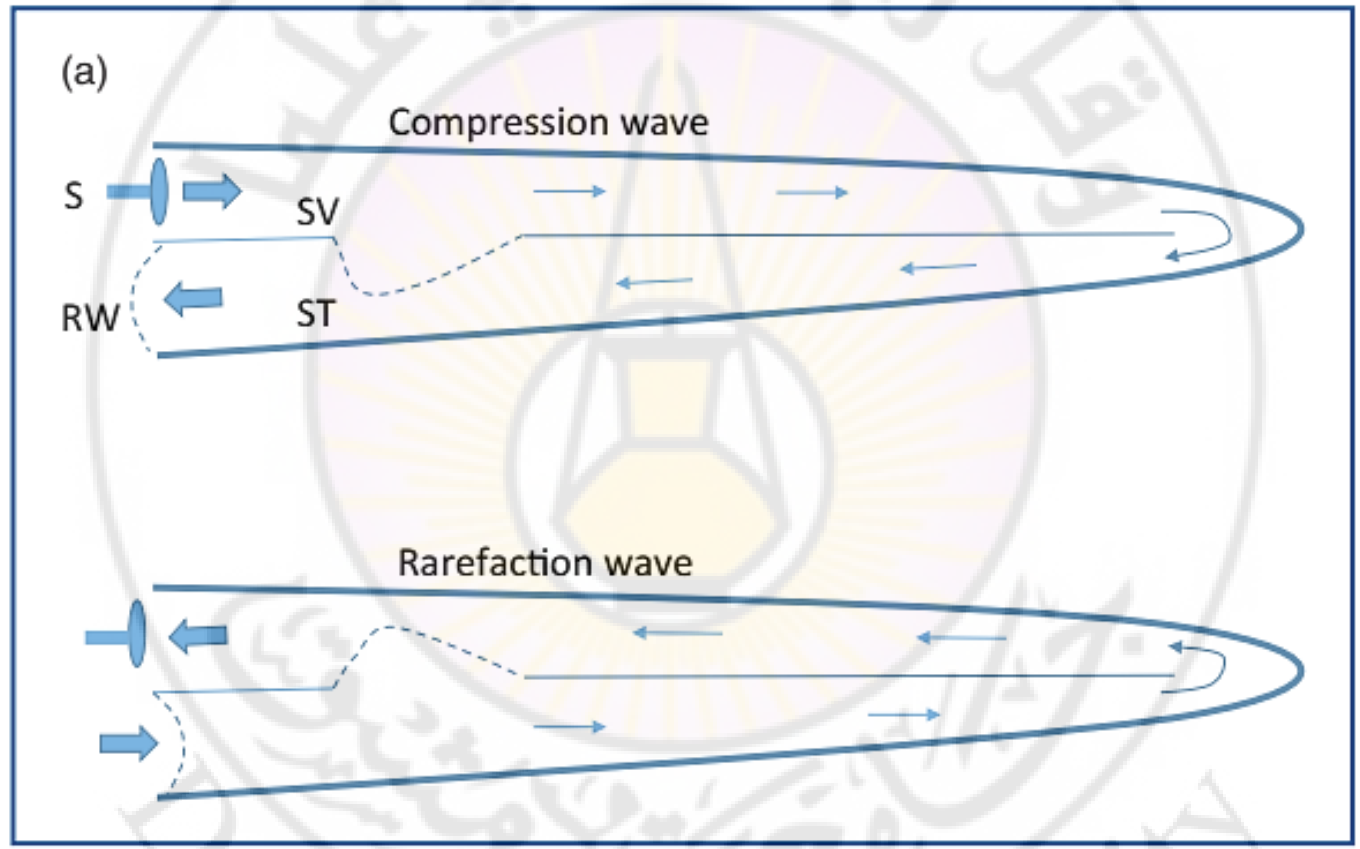
Damascus University

وظيفة الأذن الداخلية



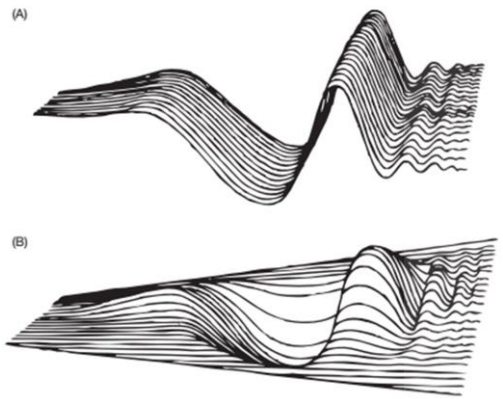
- تنتقل الموجة الصوتية من خلال انزياح الذرات في الهواء مسببة حركة غشاء الطبل والعظيمات التي تنقل الاهتزازات الى النافذة البيضية عبر قاعدة الركابة Stapes Footplate، بحيث يحدث دفعها للداخل عندما تكون الموجة انضغاطية Condensation وسحبها للخارج عندما تكون انبساطية Rarefaction وعليه فإن كل التعقيد الموجود في الموجة الصوتية يتم ترجمته بشكل مباشر الى سوائل الحلزون توسط قاعدة الركابة.
- عندما تضغط الركابة اللمف الباطن Perilymph في السقالة الدهليزية Scala Vestibuli فإن غشاء رايسنر Reissner's membrane يتمدد باتجاه السقالة الوسطى Scala media ويتمدد الغشاء القاعدي Basilar membrane باتجاه السقالة الطبلية Scala Tympani. وبالتالي فإن أي انضغاط للسوائل في السقالة يسبب انزياح مباشر للغشاء القاعدي.

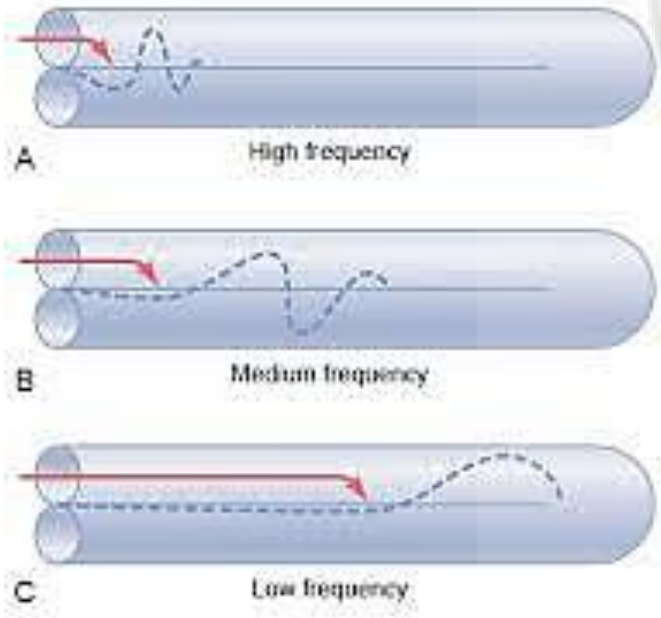




Damascus University

آلية الموجة المسافرة



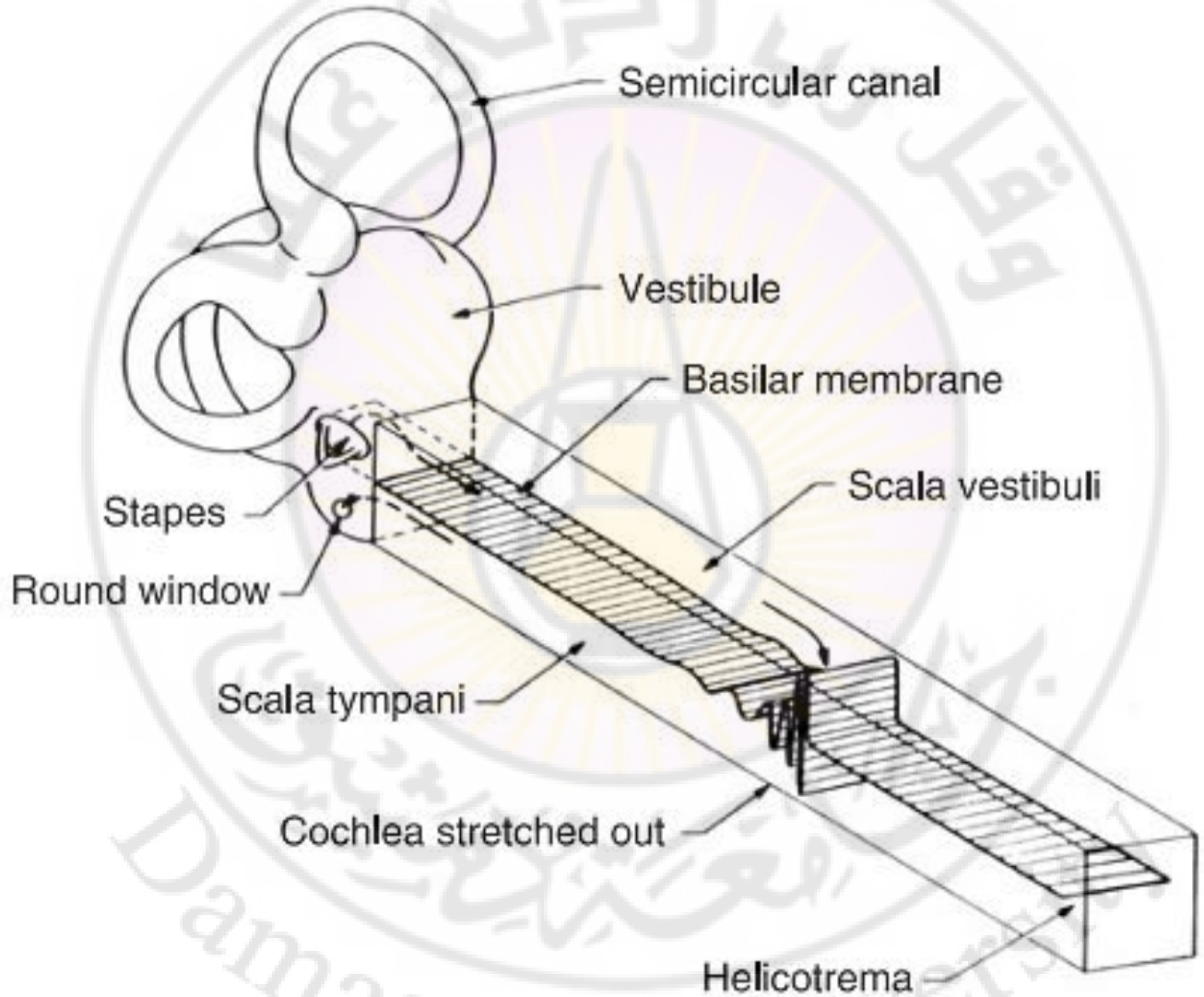


- كما هو معروف فإن تواتر الصوت يحدد بعدد الذبذبات أو الاهتزازات في الثانية وبالتالي فإن إشارة صوتية تواترها 100 هرتز ستسبب حركة قاعدة الركابة (معقد غشاء الطبل - عظيمات - قاعدة الركابة) بمعدل ١٠٠ مرة بالثانية داخلاً وخارجاً وتنتقل هذه الحركة الدورية Periodic إلى الغشاء القاعدي حيث ينشأ ما يسمى بالموجة المسافرة Travelling wave.

- لقد اكتشف Bekesy أن الغشاء القاعدي مصمم لدعم وتسهيل تشكيل الموجة المسافرة الموافقة لتواتر اهتزاز الموجة الصوتية.

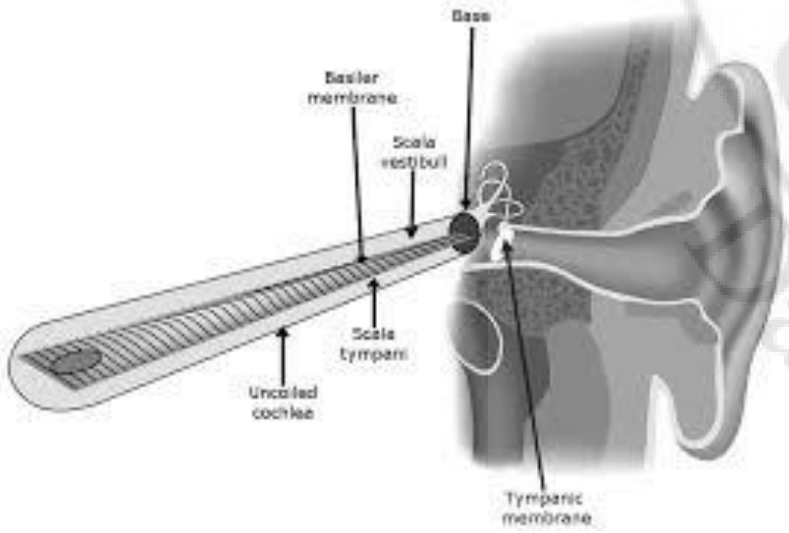
- عندما ترتطم الأصوات عالية التواتر بالأذن الداخلية فإن الجزء القاعدي للحلزون يقوم بالاهتزاز (قرب الدهليز)، في حين الأصوات منخفضة التواتر تسبب اهتزاز الغشاء القاعدي في الأجزاء الرأسية (قمة) الحلزون قاطعة مسافة طويلة على طول الغشاء القاعدي (الأمر يتعلق بطول الموجة والذي يتناسب عكساً مع التواتر).

- على هذا الأساس يقوم الموج المسافر بفصل المكونات التواترية للأصوات المركبة مكانياً حيث يعالج الأصوات عالية التواتر عند القاعدة و المنخفضة التواتر عند القمة (Apex).

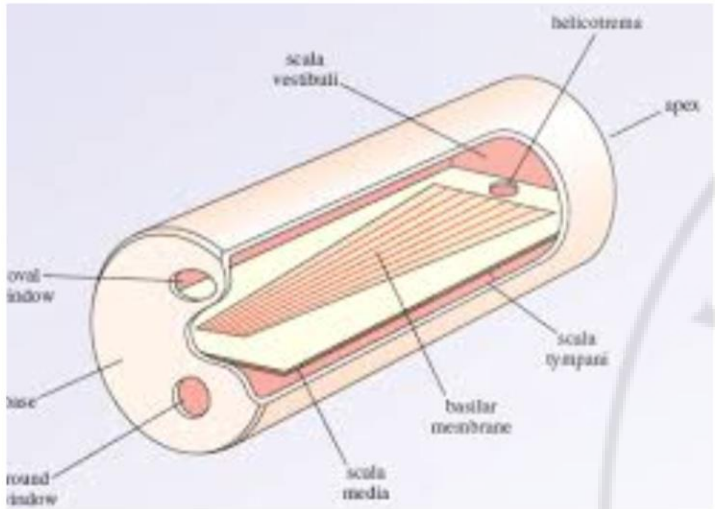

Semicircular canal
Vestibule
Basilar membrane
Scala vestibuli
Stapes
Round window
Scala tympani
Cochlea stretched out
Helicotrema

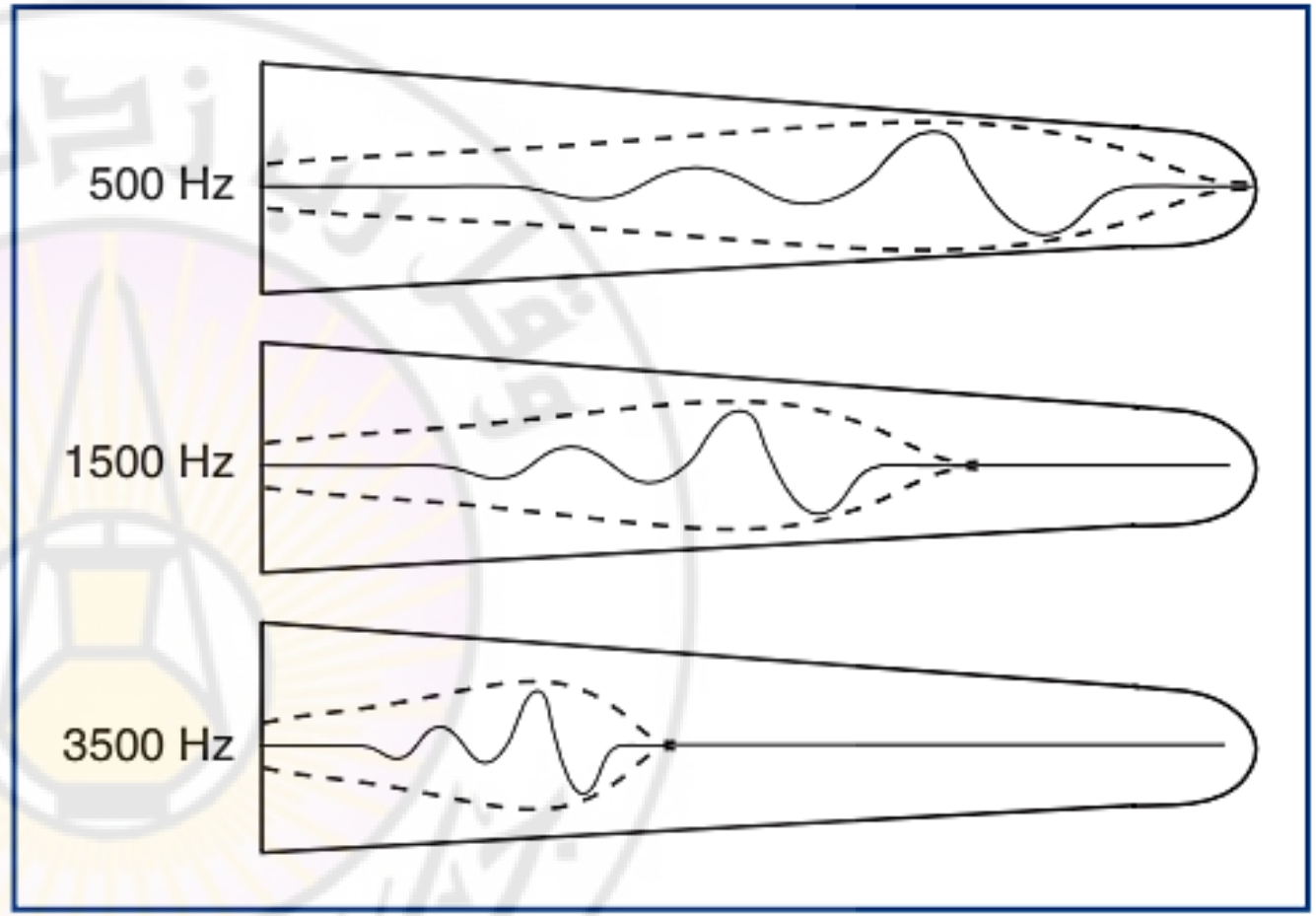
الموجة المسافرة وخصائص الغشاء القاعدي

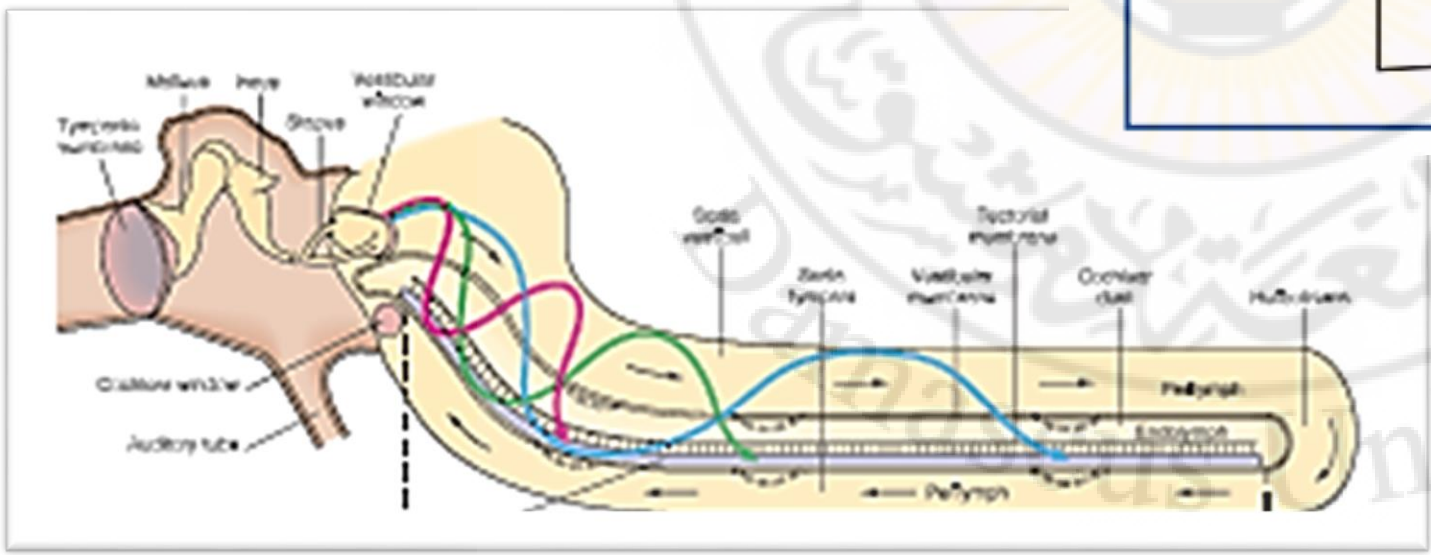
- يمكن تشبيه الموج المسافر بأمواج البحر حيث تصل إلى أعلى ارتفاعها لتتخامد عند الشاطئ، كذلك الحال يبلغ الموج المسافر أعلى ذروة له على الغشاء القاعدي في نقطة معينة تشكل النقطة الأساسية لتفعيل الخلايا المشعرة داخل عضو كورتي ومنها النهايات العصبية. وعليه يمكن القول يتشكل الموج المسافر عند قاعدة الحلزون ويستمر بالتشكل والانتفاخ على طول الحلزون ليصل إلى نقطة يبلغ فيها أعلى ذروة له ثم يتخامد بسرعة وبشكل شبه نهائي بعد الذروة. وعليه فإن الأصوات منخفضة التواتر تسبب تكسر (تموّت) الموج المسافر عند ذروة الحلزون وأن النقطة التي تمثل أكبر انزياح للغشاء القاعدي تحدد المعلومات التواترية Frequency information والتي يتم توصيلها إلى الدماغ.



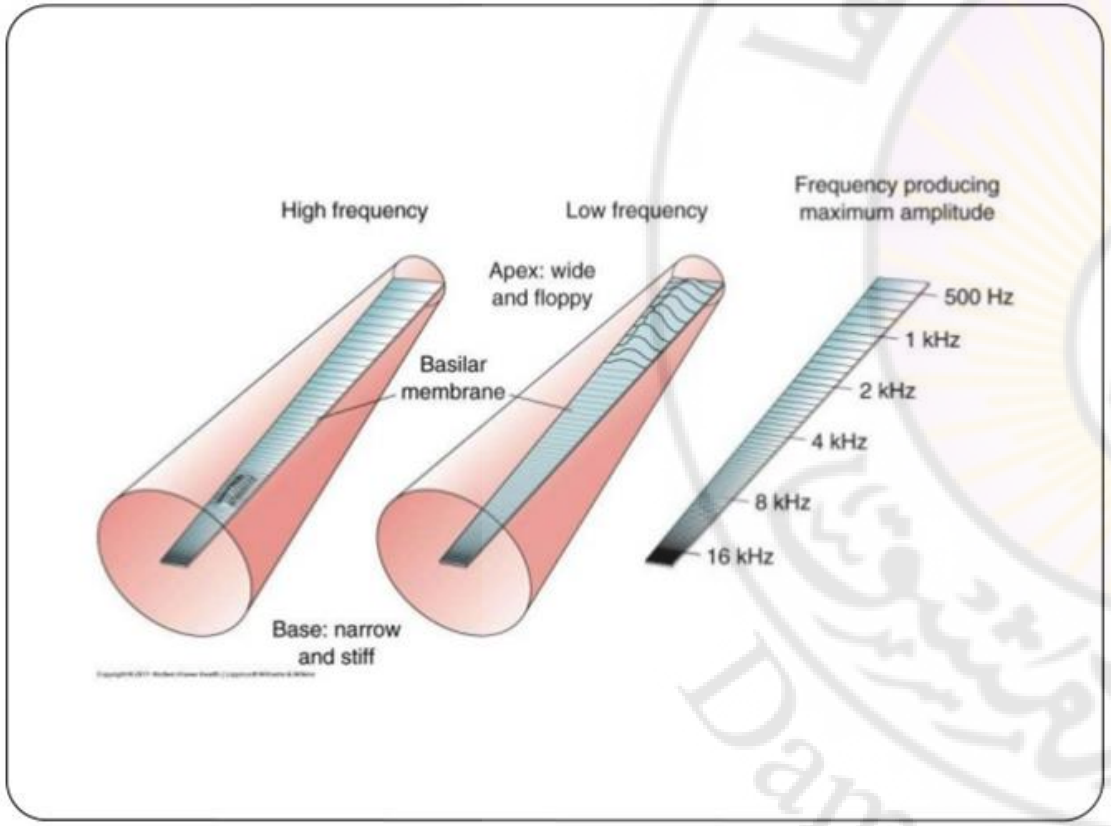
- يتعلق اهتزاز الغشاء القاعدي بدرجة القساوة stiffness حيث تكون القساوة أكثر ما يمكن عند القاعدة وتتناقص بشكل تدريجي منسق باتجاه القمة. يضاف إلى ذلك عامل الكتلة Mass حيث أنه كلما زادت الكتلة كلما نقص التواتر الطنيني وتتزايد كتلة الغشاء القاعدي تدريجياً من القاعدة إلى القمة. وأخيراً فإن الغشاء القاعدي يصبح أعرض Wider بالتدريج من القاعدة إلى القمة.


helicotrema
scala vestibuli
apex
oval window
scala tympani
base
basilar membrane
round window
scala media


500 Hz
1500 Hz
3500 Hz



خصائص الغشاء القاعدي

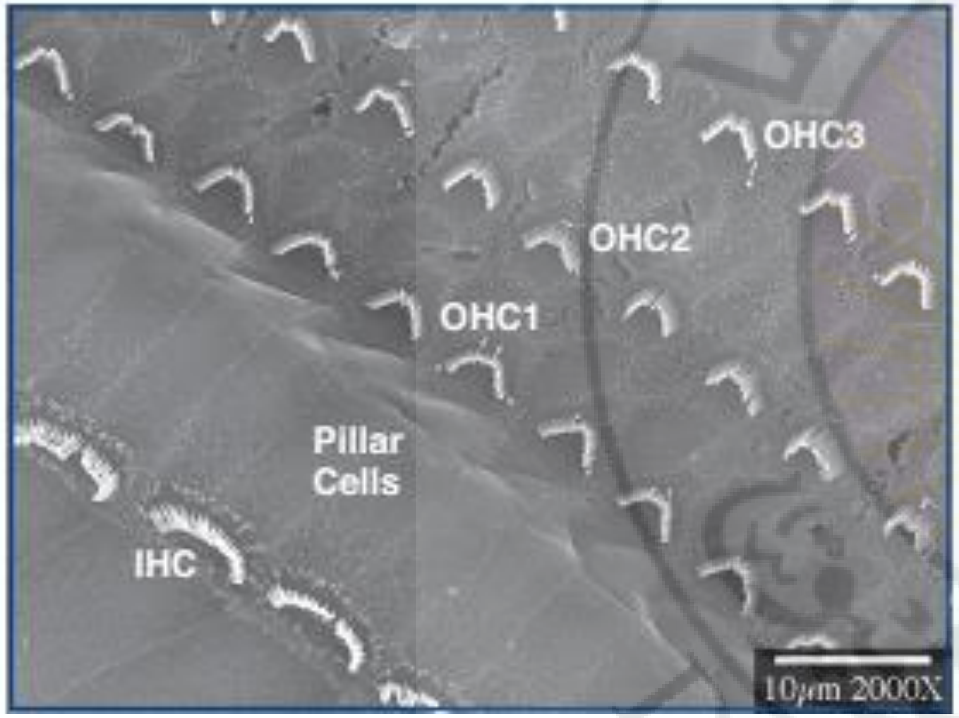


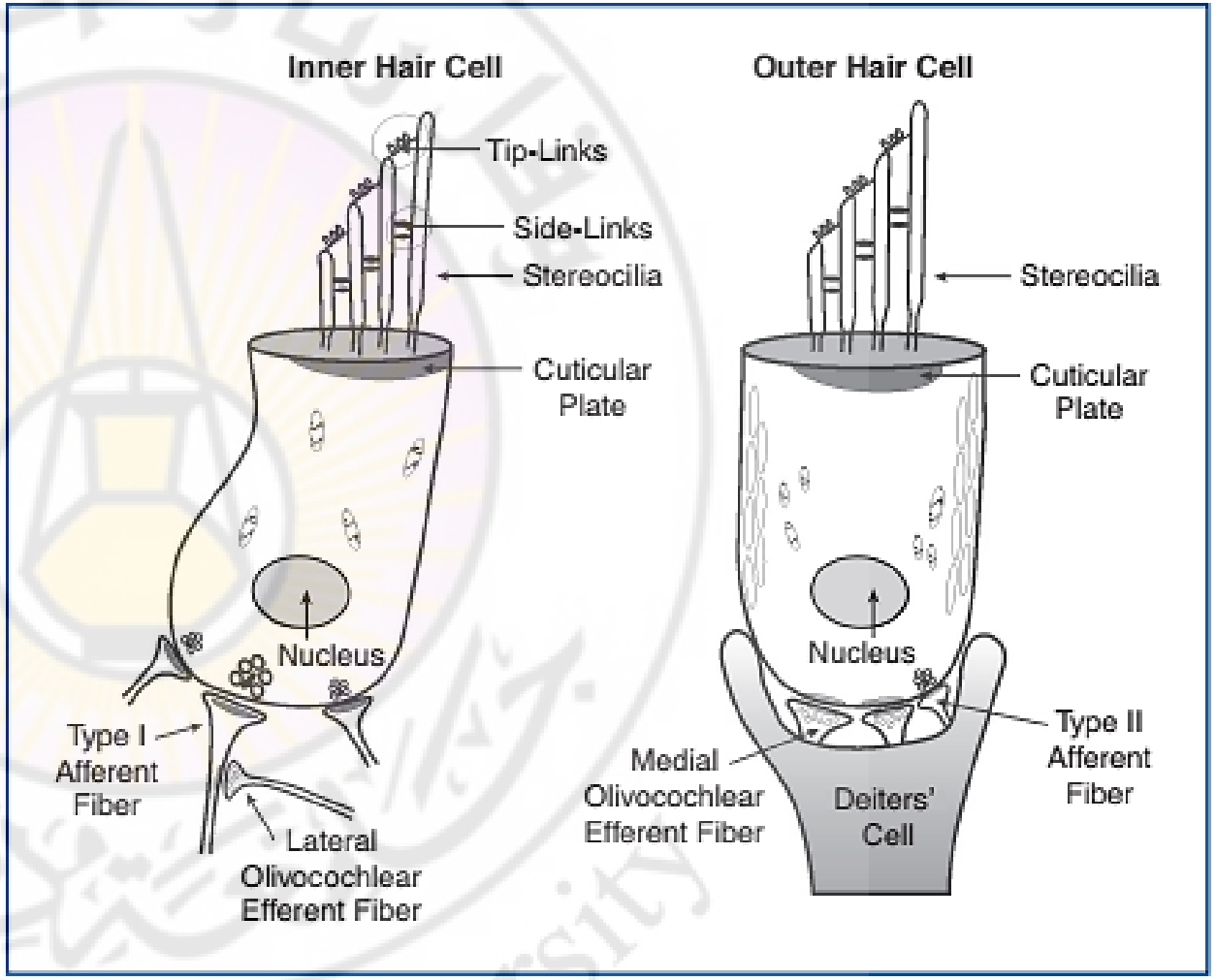
- وبالتالي هذه العناصر الثلاثة للغشاء القاعدي : القساوة – الكتلة و العرض مجتمعةً تجعل من الغشاء القاعدي محلل تواتري ممتاز Excellent Frequency Analyzer.
- ملاحظة هامة: أياً كانت نقطة بدء تشكّل الموجة المسافرة على طول الحلزون فإنّ اتجاه مسيرها يكون دائماً باتجاه القمة وذلك تبعاً للخصائص آنفة الذكر للغشاء القاعدي.

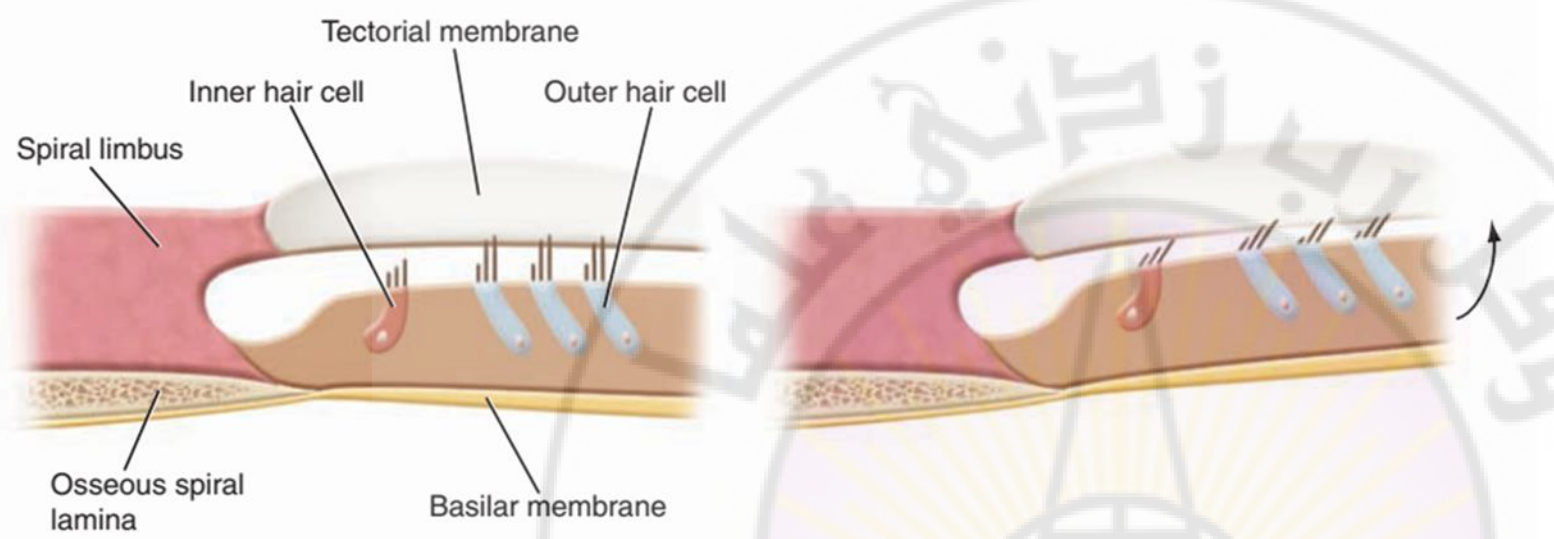
وظيفة الخلايا المشعرة في الحلزون

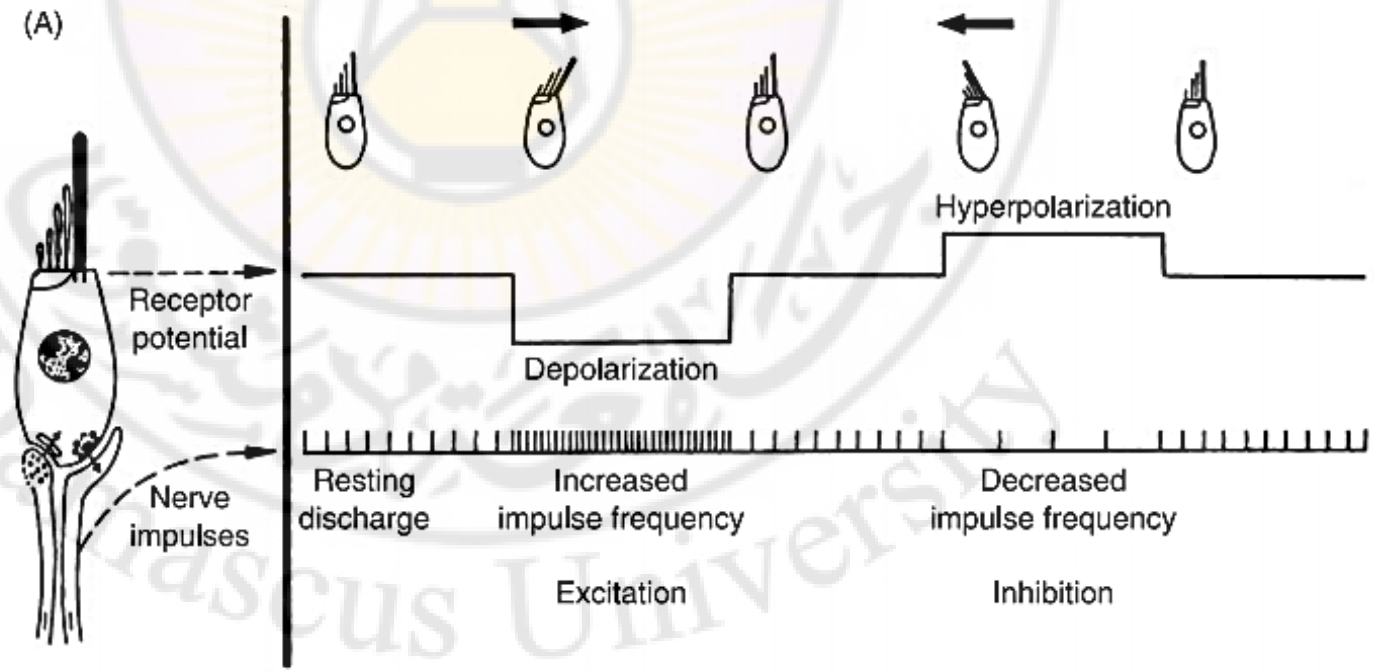
- تختلف وظيفة الخلايا المشعرة الداخلية عن الخارجية : فالخلايا المشعرة الداخلية وظيفتها ترميز التواتر عبر ألياف العصب السمعي Frequency coding، أما الخلايا المشعرة الخارجية فتهتم بترميز الشدة Intensity coding، ولكن على ما يبدو فإنها لا تتفعل عندما تكون شدة الإشارة الصوتية الواردة أقل من 40 د سي بل SPL.
- إن فقدان الخلايا المشعرة الخارجية لوظيفتها لا يسبب فقداً كاملاً للسمع وإنما يؤدي إلى ارتفاع في عتبات السمع

Damascus University

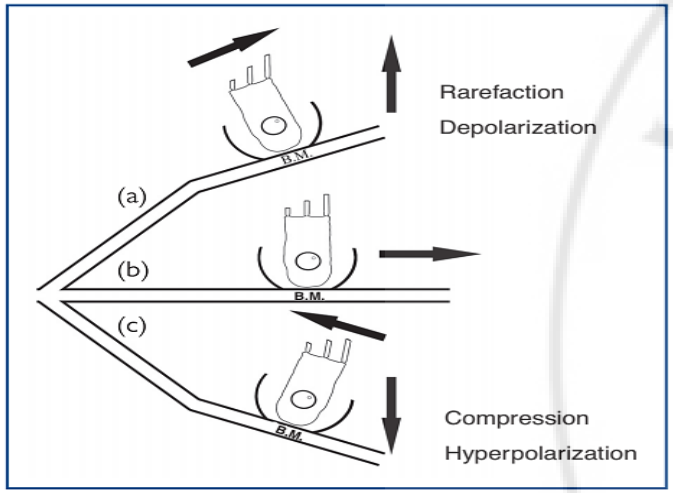

OHC3
OHC2
OHC1
Pillar
Cells
IHC
10μm 2000X

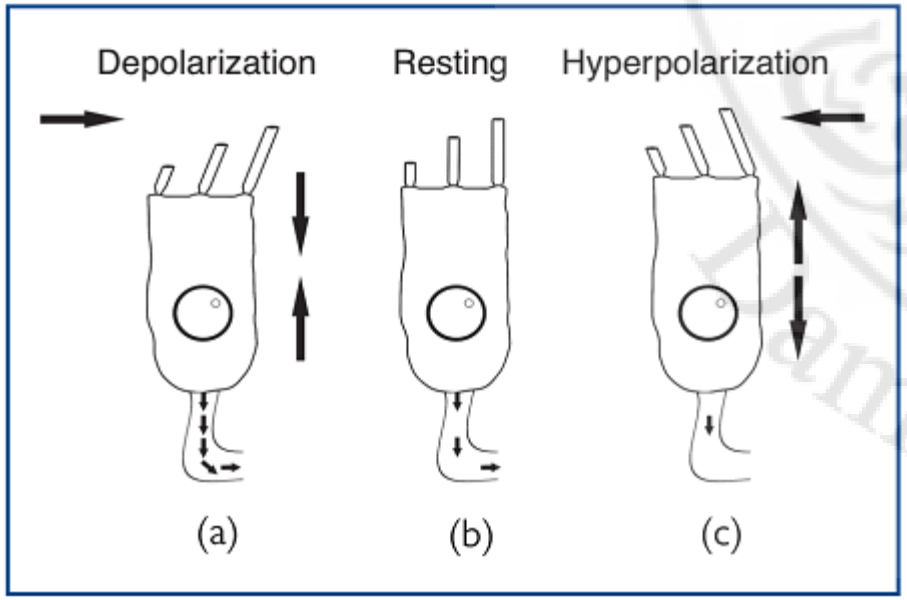

Inner Hair Cell
Tip-Links
Side-Links
Stereocilia
Cuticular
Plate
Nucleus
Type I
Afferent
Fiber
Lateral
Olivocochlear
Efferent Fiber
Outer Hair Cell
Stereocilia
Cuticular
Plate
Nucleus
Medial
Olivocochlear
Efferent Fiber
Deiters'
Cell
Type II
Afferent
Fiber


Tectorial membrane
Inner hair cell
Outer hair cell
Spiral limbus
Osseous spiral lamina
Basilar membrane


(A)
Receptor potential
Nerve impulses
Hyperpolarization
Depolarization
Resting discharge
Increased impulse frequency
Decreased impulse frequency
Excitation
Inhibition

الحوادث الكهربائية Electrical Events

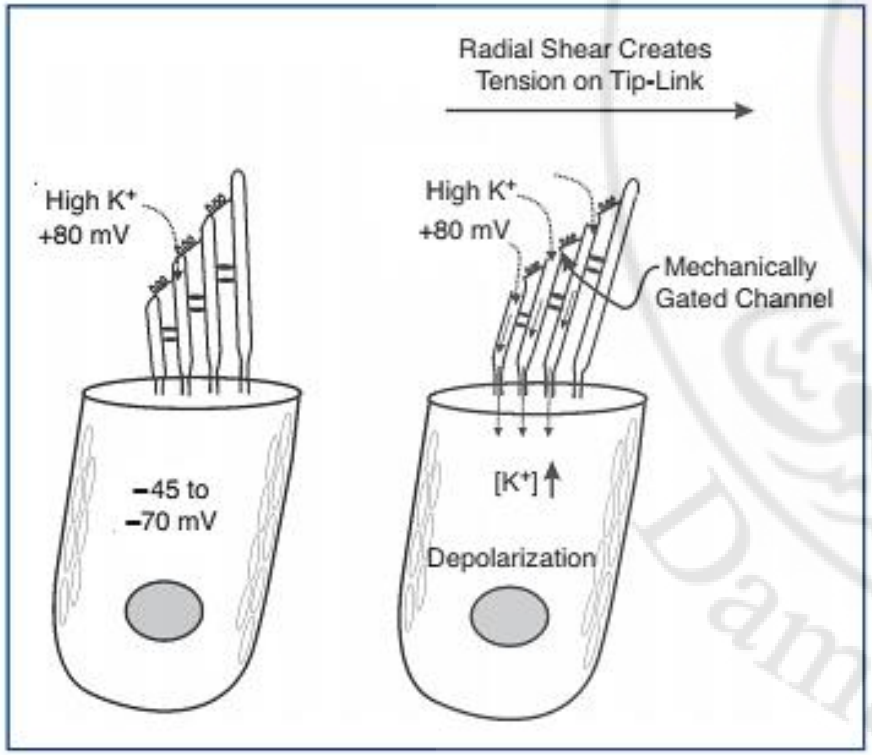




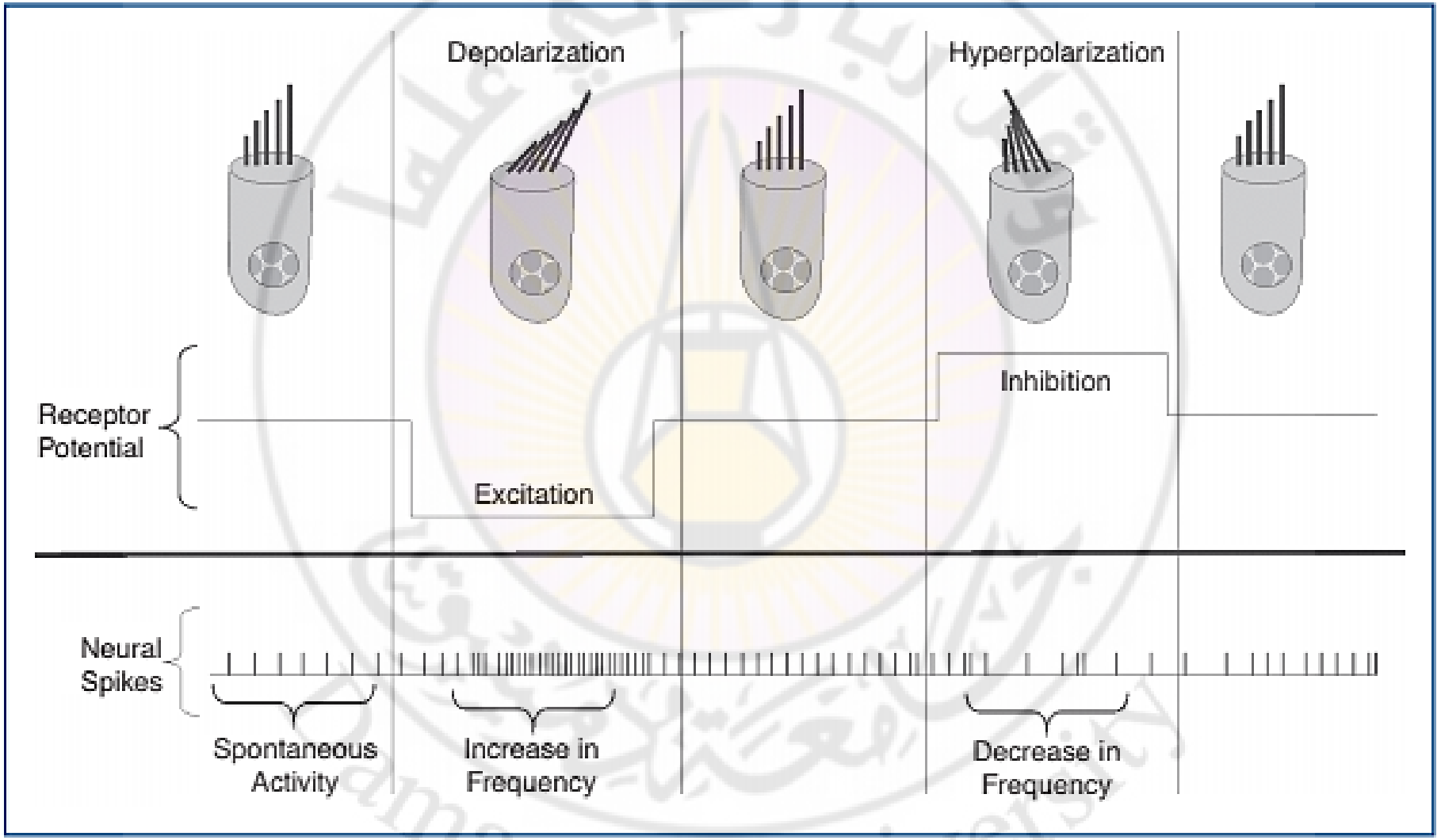
- الحلزون هو محلل تواتري و مبدل أيضاً Frequency analyzer and Transducer حيث أن تفعيل الخلايا المشعرة الداخلية يساهم في تحويل الطاقة الميكانيكية لقاعدة الركابة إلى طاقة كهروكيميائية. يحدث تفعيل الخلايا المشعرة الداخلية عندما ينزاح الغشاء القاعدي باتجاه السقالة الدهليزية في حين يحدث التثبيط عندما ينزاح باتجاه السقالة الطبلية.
- في حالة الراحة تكون هناك 15% من القنوات الشاردية مفتوحة وعند انزياح الأهداب Cilia باتجاه الهدب المركزي kinocilium يحدث نزع استقطاب depolarization في حين يحدث فرط استقطاب hyperpolarization عندما تنزاح بعيداً عن الهدب المركزي.

الحوادث الكهربائية في الحلزون

- نزع الاستقطاب داخل الخلية المشعرة الداخلية يشكل كمون المستقبل Receptor potential والذي يزداد بشكل تدريجي مع ازدياد شدة المنبه. وعند قاعدة الخلية المشعرة توجد المنطقة الفاعلة Active zone حيث يتحرر الناقل العصبي الغلوتامات وينبه ألياف العصب الثامن.



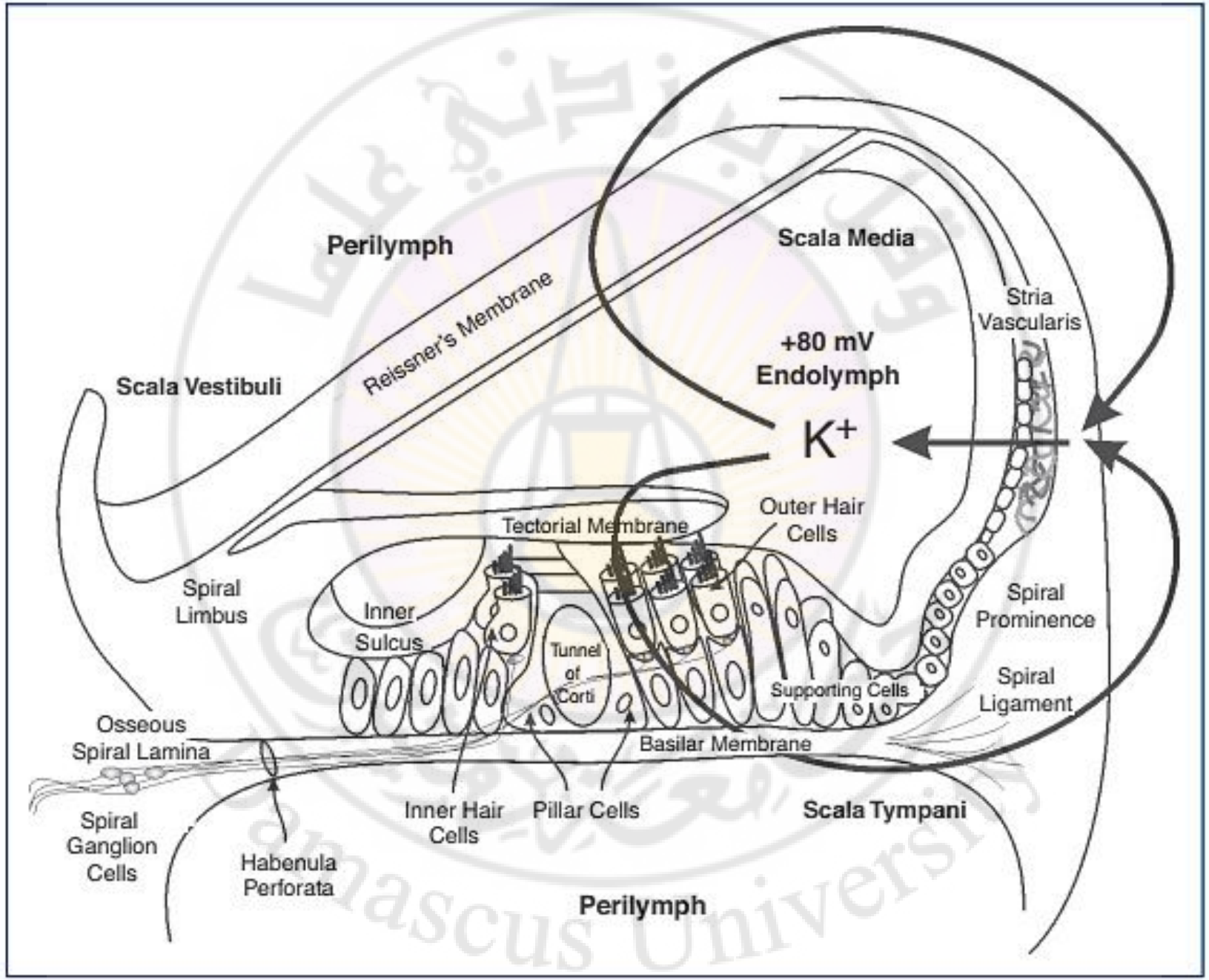
- Davis Battery Theory: إن تجمع البوتاسيوم بتركيز عال في القناة الوسيطة Scala Media مشكلا مايسمى الكمون داخل حلزوني يشكل الخازن (البطارية) الأساسي لتامين شوارد البوتاسيوم اللازمة لتفعيل الخلايا المشعرة الداخلية، حيث تلعب الصفيحة الوعائية والرباط الحلزوني الدور الأساسي في دورة شادرة البوتاسيوم بين اللمف المحيطي واللمف الداخلي وتحقيق فرق الشحنة الأساسي لتشكيل كمون المستقبل الحلزوني.



Damascus University

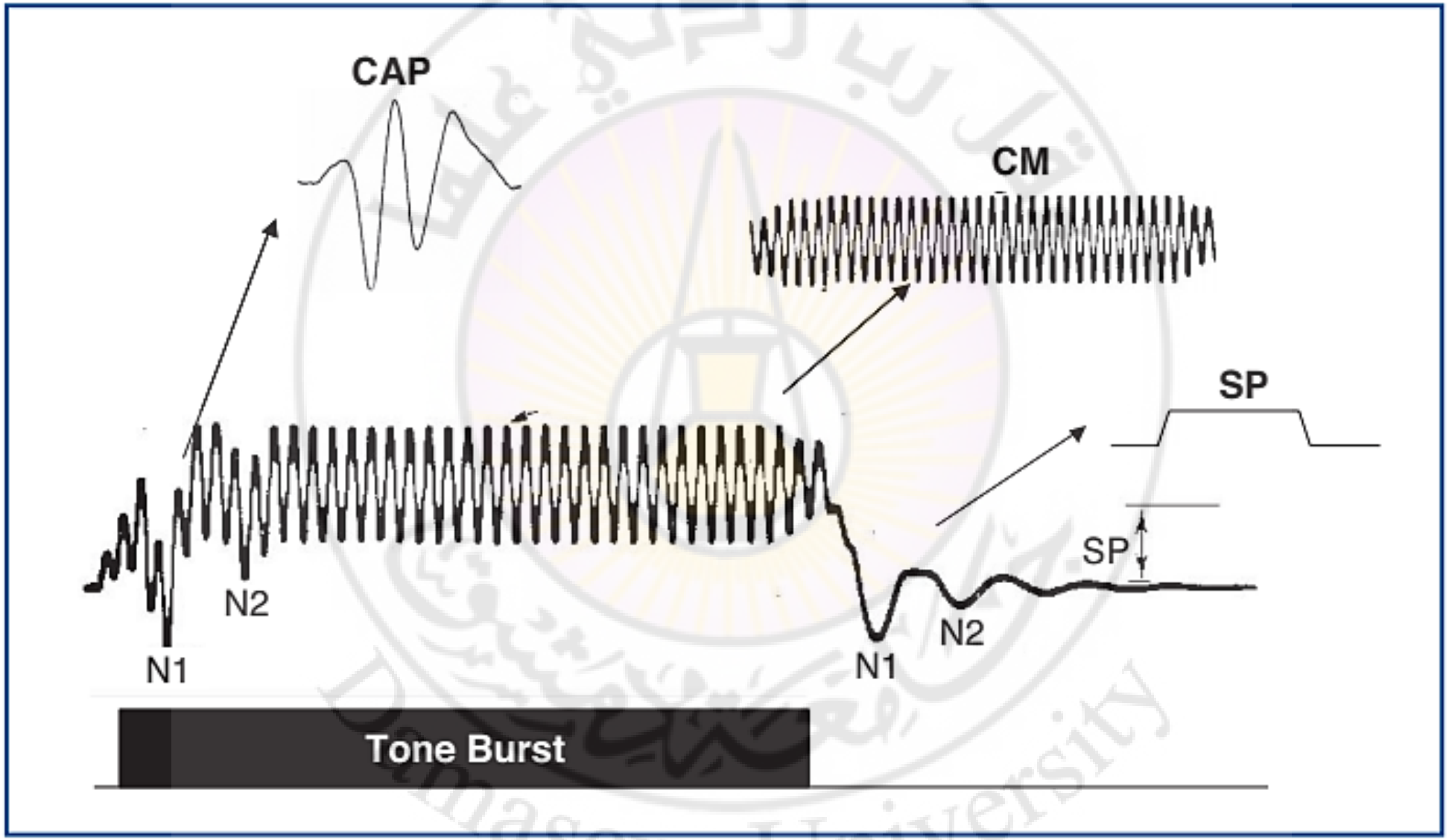
الكمونات الحلزونية

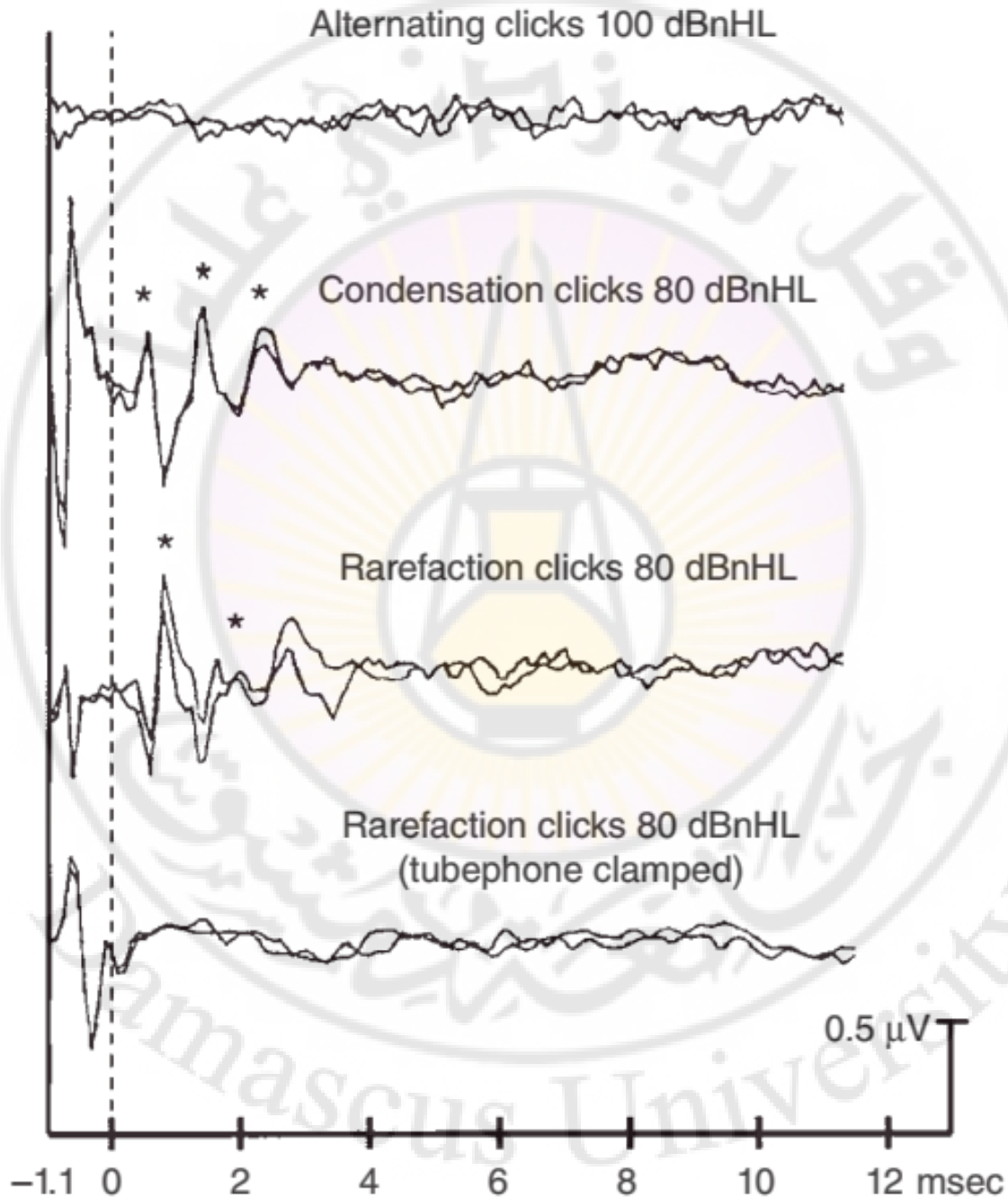
- الكمون داخل الحلزونيEndo-cochlear potential: يسمى أيضا كمون المستقبل Receptor Potential وهو كمون موجب ثابت بحدود +80 ميلي فولط داخل السقالة المتوسطة نسبةً للسقالتين الطبلية والدهليزية وهو أحد كمونات الراحة الحلزونية، ويشكل أساساً للآليات الشاردية المرتبطة بتفعيل الخلايا المشعرة.
- إن تشكل هذا الكمون يرتبط بوجود آليات فاعلة لتزويد اللمف الباطن بتراكيز عالية من شاردة البوتاسيوم حيث تلعب آليات النقل المرتبطة بال ATP والاتصالات الفجوية احد أهم هذه الآليات حيث أن أي خلل في هذه الآليات يسبب ضعف أو عدم تشكل الكمون داخل الحلزوني مسببا خللا في تنبه (نزع استقطاب) الخلايا المشعرة الحلزونية.


Perilymph
Scala Media
Reissner's Membrane
Stria Vascularis
+80 mV
Endolymph
Scala Vestibuli
K+
Outer Hair Cells
Tectorial Membrane
Spiral Limbus
Inner Sulcus
Tunnel of Corti
Spiral Prominence
Supporting Cells
Spiral Ligament
Osseous Spiral Lamina
Basilar Membrane
Inner Hair Cells
Pillar Cells
Scala Tympani
Spiral Ganglion Cells
Habenula Perforata
Perilymph

مكروفونية الحلزون Cochlear Microphonic

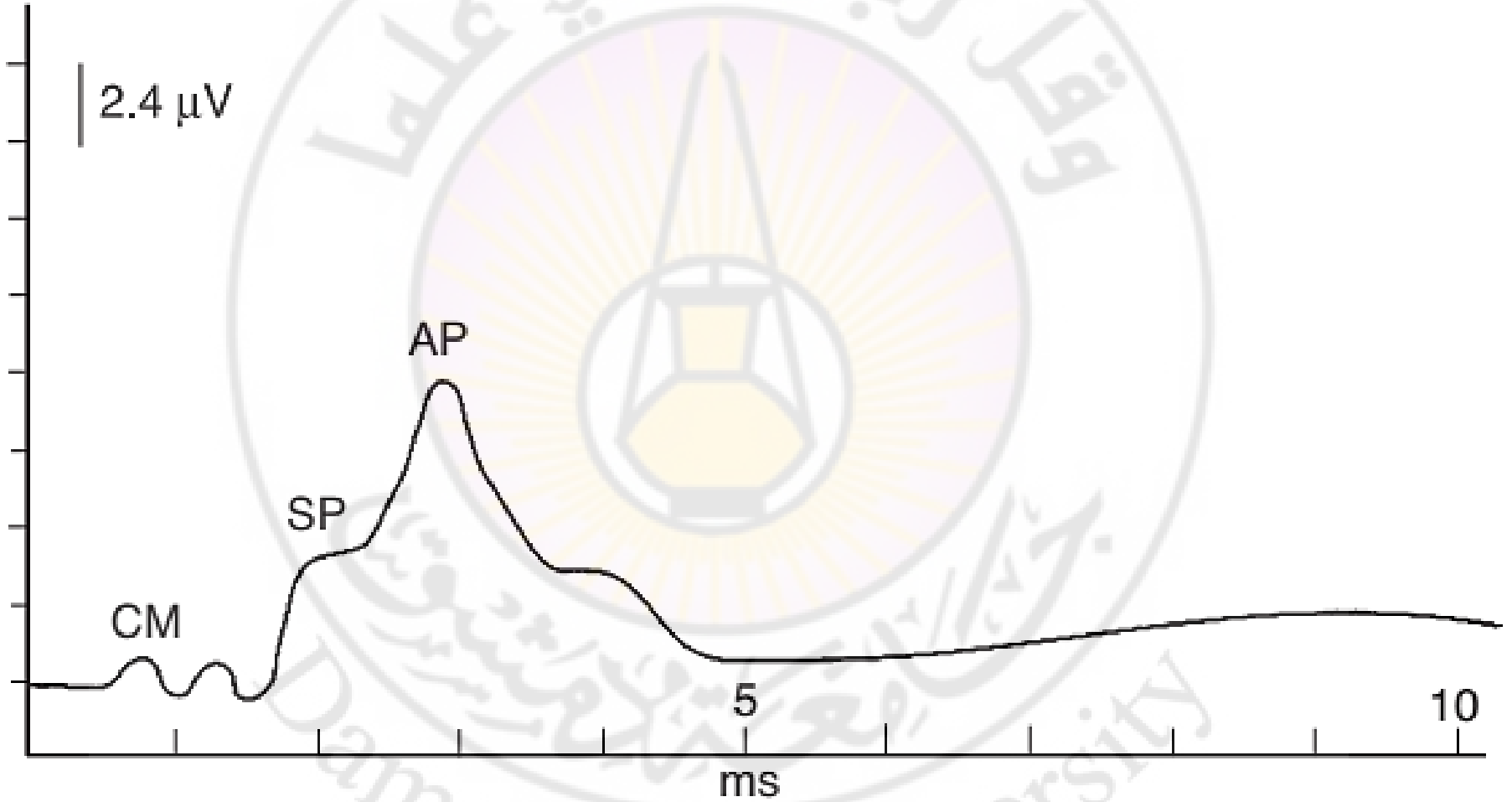
- وهو كمون ينشأ في الحلزون استجابة للمنبه صوتي، ينجم عن حركة أهداب الخلايا المشعرة الخارجية وحركة الغشاء القاعدي بشكل متوافق مع المنبه وهو تيار متناوب يتبع قطبية المنبه ولذلك سمي بالمكرفوني.
- عند إعطاء منبه انبساطي يظهر الكمون المكرفوني بقطبية سالبة (اعتباريا) وعند إعطاء منبه انقباضي يظهر الكمون بقطبية موجبة وعند إعطاء منبه تناوبي يختفي الكمون المكرفوني.
- يمكن تسجيل الكمون المكرفوني CM باستخدام التقنيات و الأجهزة المتوافرة لتخطيط جذع الدماغ ووجوده دليل على سلامة الخلايا المشعرة الخارجية بالحلزون.


CAP
CM
SP
SP
N1
N2
N1
N2
Tone Burst

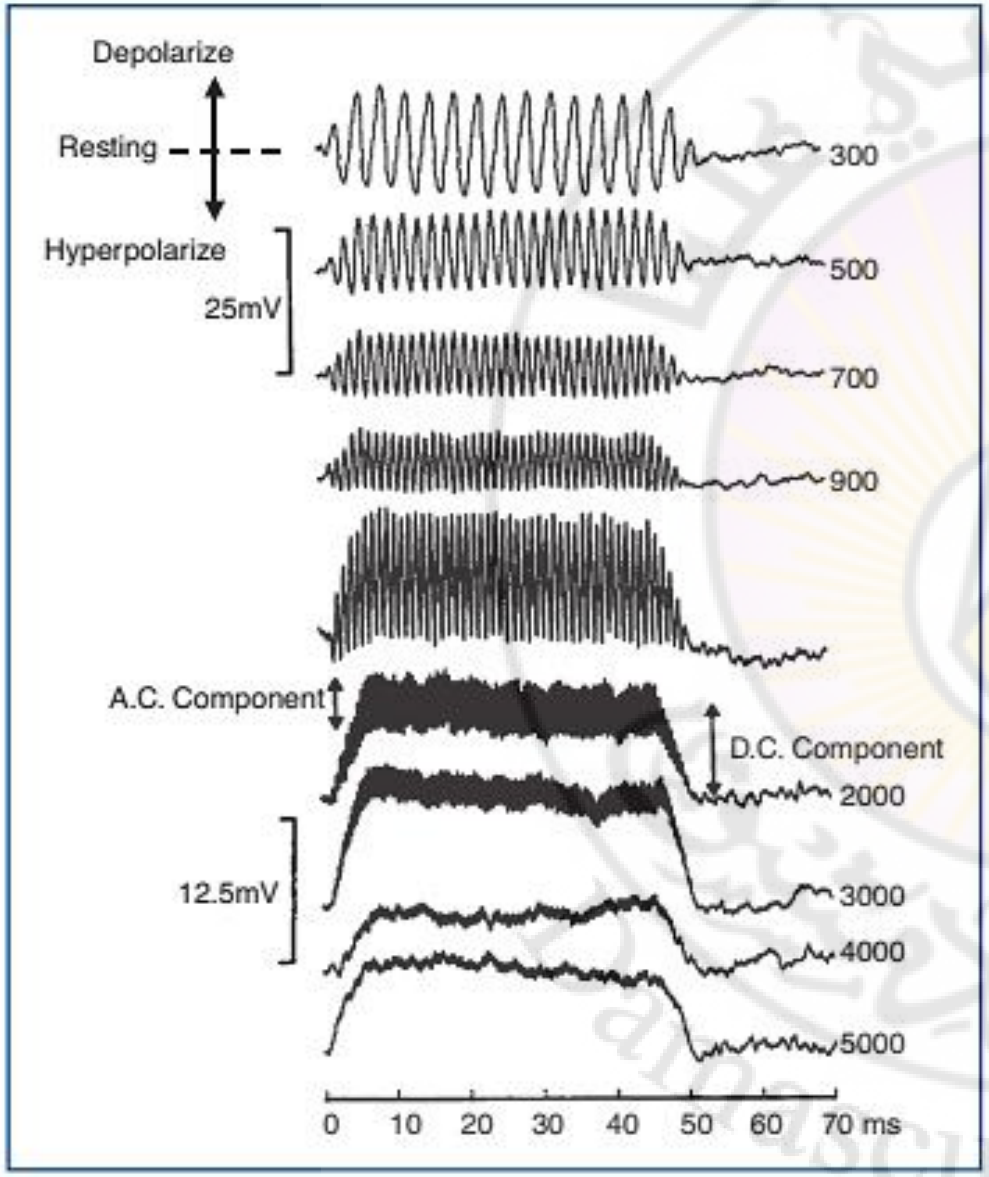

Alternating clicks 100 dBnHL
Condensation clicks 80 dBnHL
Rarefaction clicks 80 dBnHL
Rarefaction clicks 80 dBnHL
(tubephone clamped)
0.5 μV
–1.1
0
2
4
6
8
10
12 msec

الكمون الجمعي Summating Potential

- وهو عبارة عن جريان كهربائي مباشر DC يعبر عن وجود فرق بين الكمون داخل الخلوي وبين اللمف الباطن في القناة الوسطى.
- يظهر على شكل كمون سلبي يحاكي انزياح الغشاء القاعدي و يستمر طيلة استمرار المنبه الصوتي أي يتوافق مع مغلف المنبه Stimulus Envelope.
- يعبر الكمون الجمعي عن حركة الغشاء القاعدي عند التواتر النوعي وهو أكثر نوعية لحركة الغشاء القاعدي من اختبار CM.
- يمكن قياس الكمون الجمعي من خلال الكترودات قريبة جدا من مكان توليده كالالكترود داخل الطبلة أو داخل المجرى وقد لايظهر في حال تسجيله في الحقل البعيد بالالكترودات خلف الأذن.



Damascus University



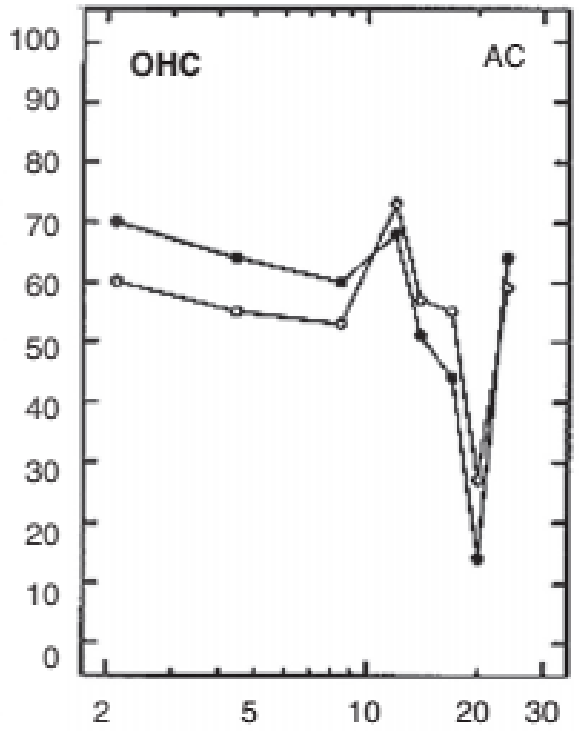
Intracellular response from an IHC in the base of the cochlea in response to an 80 dB SPL tone. frequency varied from 300 to 5000 hz. AC and DC components are labeled in the 2000-hz trace. The dashed line on the left side of the 300-hz trace shows the resting potential. note that the response to the 300-hz tone is asymmetric, with a larger response in the depolarizing than the hyperpolarizing direction. AC and DC responses are evident from the 300-hz trace to the 2000-hz trace. note that the AC response is nearly absent in the 5000-hz trace.

الكمون المركب Compound Action Potential

- ينشأ AP بشكل مستقيم من تنبيه عدد كبير من الخلايا المشعرة الداخلية بآن واحد سببه تفعيل آني متزامن لعدد كبير من ألياف العصب السمعي.
- يعبر هذا الكمون عن مرحلة تنبيه العصب السمعي من خلال الخلايا المشعرة الداخلية وهو يشكل الموجة الولى من اختبار جذع الدماغ.
- يغيب هذا الكمون او يضطرب في نقص السمع الناجم عن خلل الخلايا المشعرة الداخلية في حين يبقى سالما في مشاكل نقص السمع الناجمة عن العصب مع سلامة الحلزون.
- يمكن تسجيل الكمونات الثلاثة AP,SP,CM وتساعد في تشخيص العديد من الأمراض كالاعتلال العصبي السمعي وداء منيير.

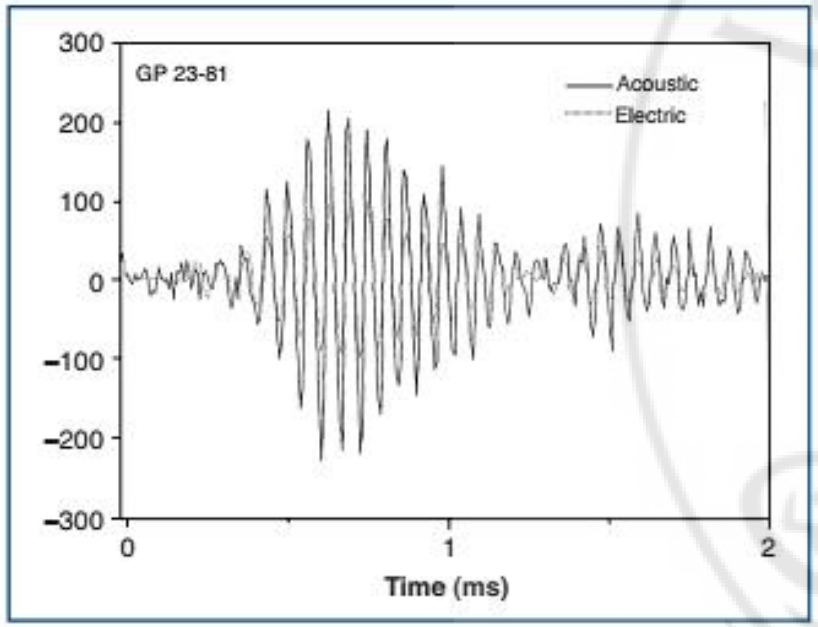
Outer Hair Cell Function

- Selective destruction of OHCs results in an elevation of psychophysical and physiologic thresholds of up to 40 to 60 dB and a significant widening of tuning curves.
- Changes similar to these are seen in IHC and OHC receptor potential tuning curves following acute acoustic trauma.
- There is a division of labor whereby the OHCs enhance the sensitivity and tuning around the CF; the enhanced response near CF is then relayed to the IHCs, which are responsible for transmitting the information to the central auditory system.
- The physiological processes that improve the sensitivity and tuning of the inner ear are often referred to as the **"cochlear amplifier."**



Damascus University

Outer Hair Cell Function



- إن حركية الخلايا المشعرة الخارجية تتم بفضل بروتين البرستين الموجود قرب جدار الخلية وتتم أيضا بفضل حوادث كهربائية داخل الخلية.
- إن حركة الخلايا المشعرة الخارجية يسبب توليد إشارات اكوستيكية ترتد عبر الأذن الوسطى إلى مجرى السمع يتم تسجيلها بوساطة مكرفون مناسب وتسمى بالإصدار الصوتي الأذني Otoacoustic Emission (OAEs) هذه الإصدارات هي التي تقود إلى فكرة كون الحلزون مولد للصوت .Cochlea as sound generator
- إن تسجيل هذه الإصدارات هو دليل على سلامة الحلزون ويستخدم كاختبار ماسح للسمع وتشخيصيا يفيد في تشخيص الآفات ماوراء الحلزونية.

أي سؤال ؟؟

جامعة دمشق
كلية العلوم الصحية

تشريح وفزيولوجيا السمع والنطق

Physiology of Hearing

(وظيفة الجهاز العصبي السمع)

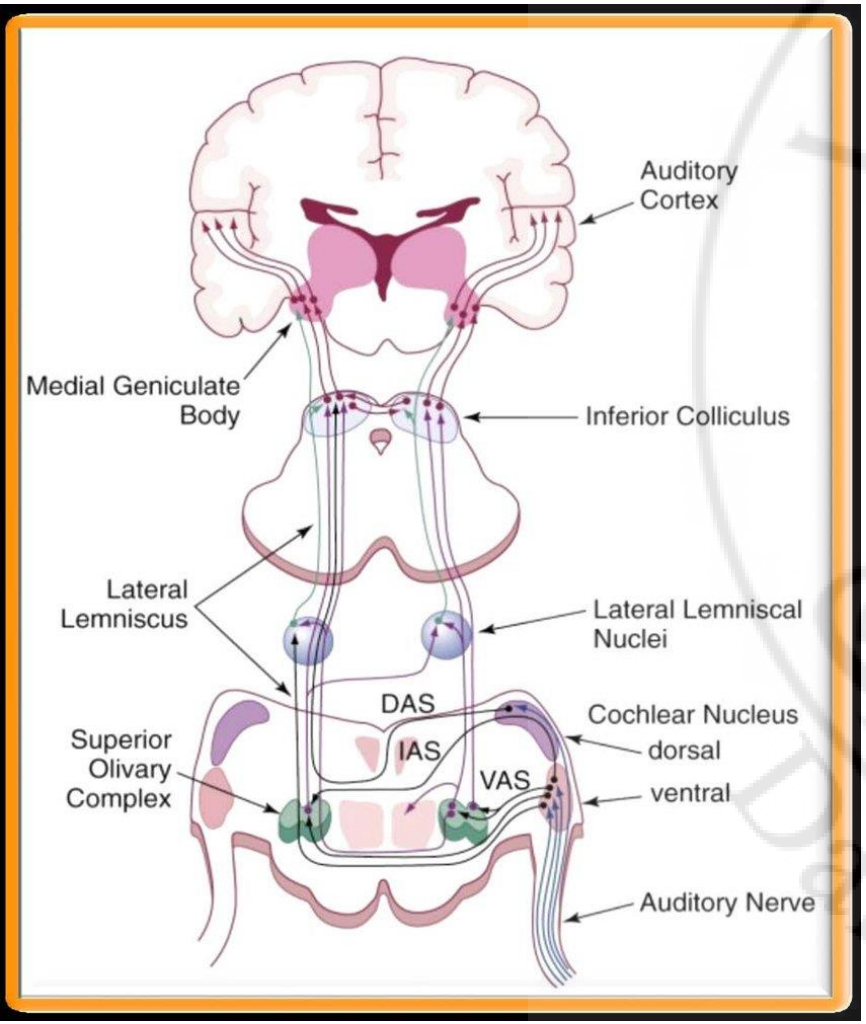
د سامر محمد محسن
MD., ENT, PhD OF Audiology

November 2021

مقدمة

- الجهاز العصبي السمعي هو الأكثر تعقيدًا من بين جميع السبل الحسية.
- إن تعقيد تشريح الجهاز العصبي السمعي كبيربحيث يتماشى مع حجم الوظائف الدقيقة والمتنوعة المسندة إلى هذا الجهاز.
- تستند معظم معرفتنا حول وظيفة الجهاز العصبي السمعي إلى دراسات الخلايا العصبية المفردة والاختبارات في الوسط غير الحي In-Vitroثم بدأت المعرفة تتطور شيئا فشيئا من خلال التجارب على الحيوانات ولاحقا طرق الاختبار الالكتروفزيولوجية والتصوير الوظيفي التي مكنت من دراسة النظام السمعي عند الإنسان الحي مما أظهر درجة تعقيد هذا النظام.
- عادة ما كان بقارن الجهاز السمعي بالهاتف للتبسيط ولكن بعد تطور المعرفة لم يعد يصبح هذا النموذج مناسبا لافراطه في التبسيط اذ ان النظام السمعي يعمل ضمن وحدات وظيفة معقدة ومتفاعلة مع بعضها وضمن مستويات متعددة متتالية ومتداخلة وليس مستوى البساطة التي يمثلها نموذج الهاتف.
- وحتى المقارنة مع أنظمة الكمبيوتر يعتبر مجحفا وبسيطا فيكفي مقارنة وجود أكثر من 100 مليار خليه عصبية تعمل بآن واحد وبمستويات وظيفية مختلفة مع أضخم وأعقد معالج كمبيوتري لندرك حجم التعقيد في النظام العصبي.

استجابة السبيل السمعي المركزي



النواة الحلزونية (CN): في جذع الدماغ – كمونات عمل و نمط تفعيل يشبه إلى حد كبير نمط تفعيل ألياف العصب السمعي بهدف حفظ الانتقائية التواترية.

المركب الزيتوني العلوي (SOC): هي محطة التعامل بين الأذنين Binaural interaction حيث يتم في هذه المحطة تصالب 80% من ألياف السبيل السمعي كما يتم تحديد جهة الصوت Localization اعتماداً على فرق زمن وصول الصوت ITD (Inter aural time difference) وفرق شدة الصوت بين الأذنين ILD (Inter aural level difference)

الأكيمة السفلية IC: تتلقى تعصيب مزدوج من كلا الطرفين من المركب الزيتوني ووارد مباشر من النويات الحلزونية CN. عصبونات هذه النواة تبدي منحنيات تنغيم Tuning curve من شأنها حفظ الانتقائية التواترية التي تم ترميزها في ألياف العصب السمعي .

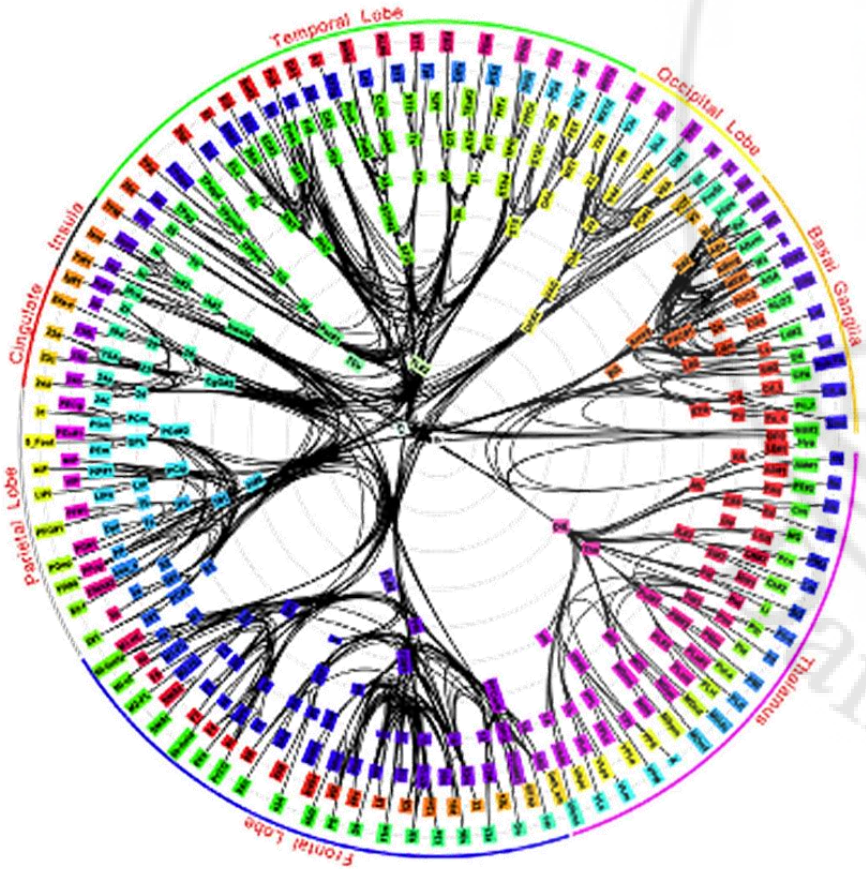
الجسم الركبي الأنسي MGB: هي محطة الوصول في المهاد وهي آخر الطريق الحسي في جذع الدماغ، القسم البطني منها يصدر المعلومات السمعية مباشرة إلى القشر السمعي الأولي في الفص الصدغي، أما القسم الظهري فلديه ارتباطات مع مناطق مخية أخرى. تبدي عصبونات الجسم الركبي الأنسي منحنيات تنغيم حادة جداً شبيهة لمنحنيات تنغيم العصب السمعي وبالتالي تقوم بحفظ الانتقائية التواترية.

مقدمة

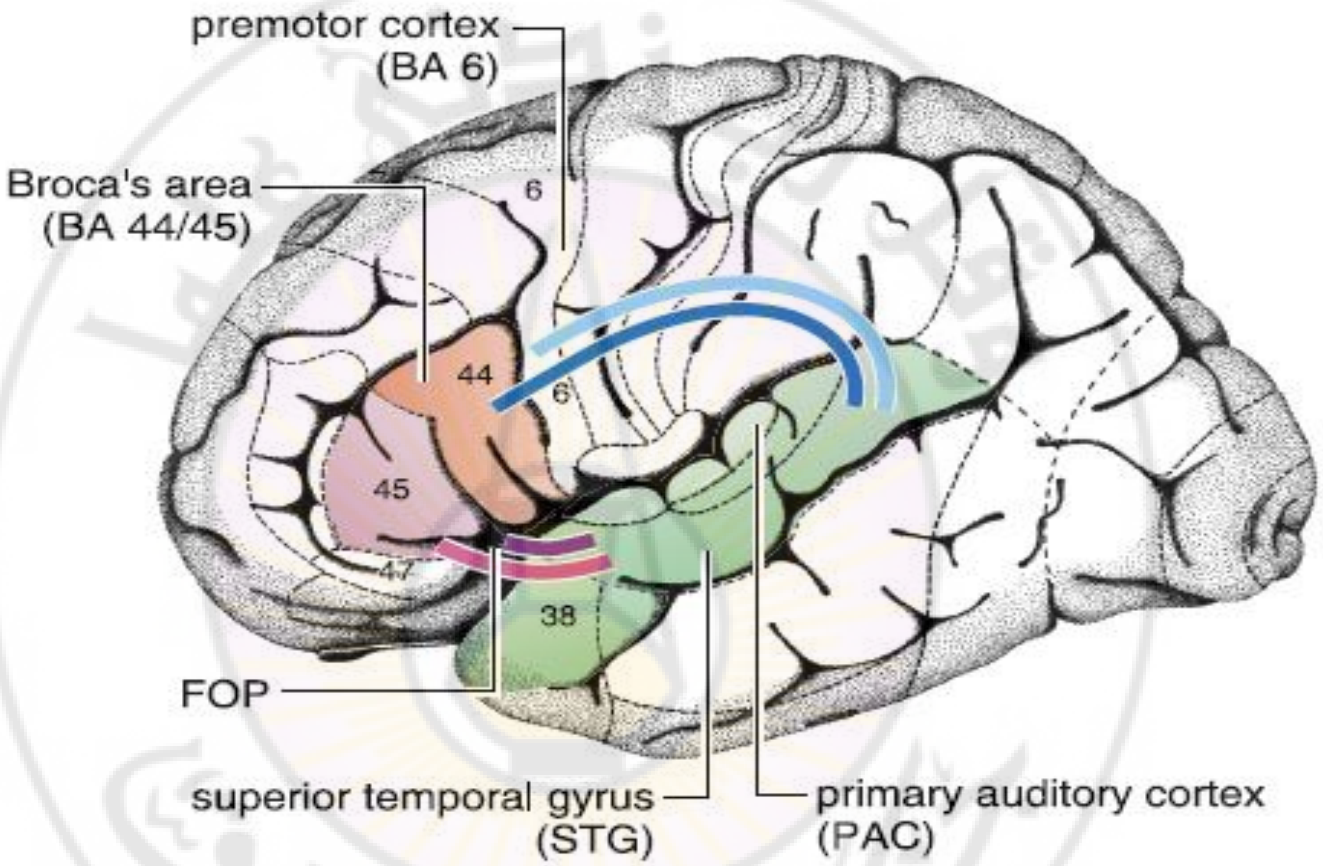
- مايميز النظام العصبي السمعي هو الحجم الهائل للمدخلات والمخرجات في كل لحظة والتي تعالج على مستويات متعددة من الاهمية من خلال الارتباطات الوظيفية بين هذا الجهاز وباقي عناصر الجهاز العصبي والانظمة الحسية الاخرى ضمن مفهوم الشبكات الدماغية .Brain Network

- إن الفهم الدقيق لآلية عمل الشبكات يجيب على التساؤل القائم حول وظيفة عنصر معين ودرجة تعقيدها وتداخلها اذ لا يمكن الان ان ننسب وظيفة واحدة لمكون واحد وانما كل مكون يسهم في العديد من الوظائف وبدرجات مختلفة من الاهمية والاولوية حسب دوره في كل شبكة من الشبكات الدماغية اذ يمكن للمكون العصبي ان يكون محطة هامة في عدة شبكات عصبية وممكن ان يكون محطة ارتباط وتداخل بين الشبكات.

- هذه المعطيات الجديدة في فهم علم الأعصاب وضعت حجر الأساس لفهم مبادئ المرونة العصبية Neuroplasticityوالخروج بها من المستوى الخلوي النسيجي (استطالات وزيادة مشابك) إلى المستوى الوظيفي السريري (ارتباطات وشبكات) مع العلم أن هذه الارتباطات ممكن أن تكون تشريحية كالارتباطات بلين العصبونات وممكن تكون وظيفية من خلال نقل الأثر Functional Connectivity.



Auditory Structural connectivity



Dorsal Pathway I

pSTG to premotor cortex via AF/SLF

Dorsal Pathway II

pSTG to BA 44 via AF/SLF

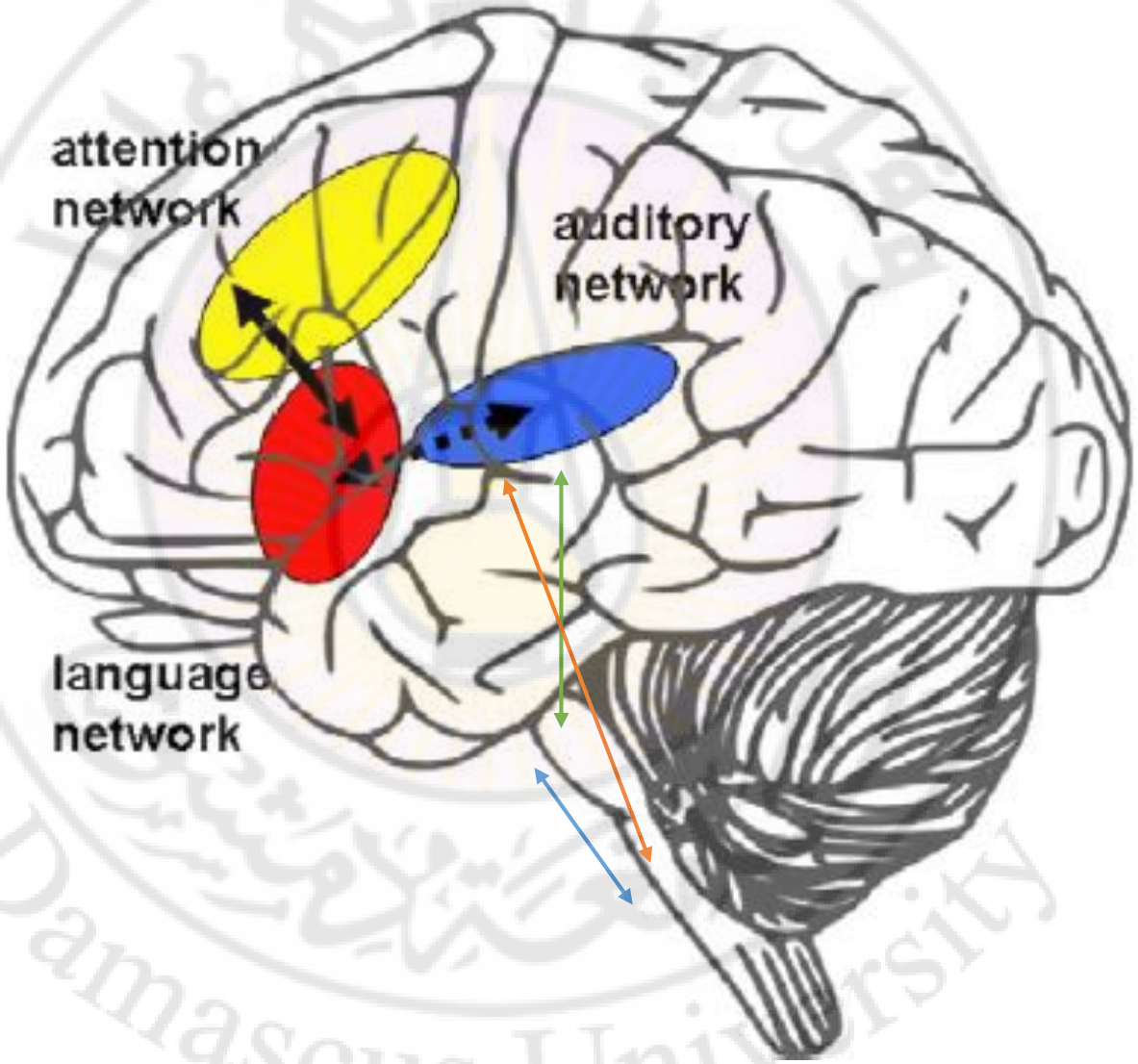
Ventral Pathway I

STG to BA 45 via EFCS

Ventral Pathway II

antSTG to FOP via UF

The Whole Auditory Network



Damascus University

الترميز Coding

- يعد الكلام هو الصوت الأكثر أهمية بالنسبة للانسان، ومن الطبيعي طرح السؤال التالي: كيف يميز الجهاز العصبي السمعي أصوات الكلام؟
- هذا سؤال معقد للغاية ومن الواقعي طرح أسئلة أبسط مثل كيفية التمييز بين الترددات.
- يعتبر تمييز التردد من السمات البارزة للوظيفة السمعية وقد تمت دراسة أساسه الفزيولوجي على نطاق واسع لأنه من المفترض أنه يلعب دورًا مهمًا في التمييز بين الأصوات الطبيعية.
- سنناقش أولاً تمثيل التردد في الجهاز العصبي السمعي كترميز مكاني وكشفرة زمنية وبعد ذلك سنناقش الأهمية النسبية لهاتين الطريقتين المختلفتين لترميز التردد للتمييز بين الأصوات المعقدة.
- تخضع الشفرة العصبية للأصوات المعقدة لتحولات أكثر شمولاً من تلك التي تثيرها النغمات الصافية.
- إن قدرتنا على تمييز التغييرات في طيف الأصوات المعقدة عالية أيضًا ويفترض أن هذه القدرة ضرورية للتمييز الكلام.
- تعتبر التغييرات في التردد (الطيف) والسعة من السمات البارزة في التمييز السمعي.

ترميز التواتر في الجهاز العصبي السمعي

- يمكنن للاذن البشرية التمييز بين التغييرات الصغيرة جدًا في تواتر النغمة الصافية.
- حتى الأفراد المدربين بشكل معتدل يمكنهم اكتشاف الفرق بين نغمة 1000 هرتز ونغمة 1003 هرتز (ثلاثة أعشار فرق 1٪ في التردد).
- أثارت الحساسية الهائلة للجهاز السمعي البشري تجاه التغيرات في التردد فضول العديد من الباحثين وبُذلت جهود كبيرة لتحديد الآلية التي تميز الأذن والجهاز العصبي السمعي من خلالها هذه الفروق الدقيقة في تردد النغمة الصافية.

ترميز التواتر في الجهاز العصبي السمعي

- تم تقديم فرضيتين لشرح الأساس الفزيولوجي لتمييز التردد.

1. الفرضية المكانية: والتي تقول بأن تمييز التردد يعتمد على انتقائية الغشاء القاعدي للتردد والذي يتم تمثيله من خلال اهتزاز الغشاء القاعدي في مكان معين من الغشاء القاعدي للحلزون حسب كل تواتر.
2. الفرضية الزمانية: وتقول بأن تمييز التردد يعتمد على ترميز شكل الموجة (temporal pattern) للأصوات في نمط تفريغ الخلايا العصبية السمعية ، والمعروف باسم قفل الطور (phase locking).

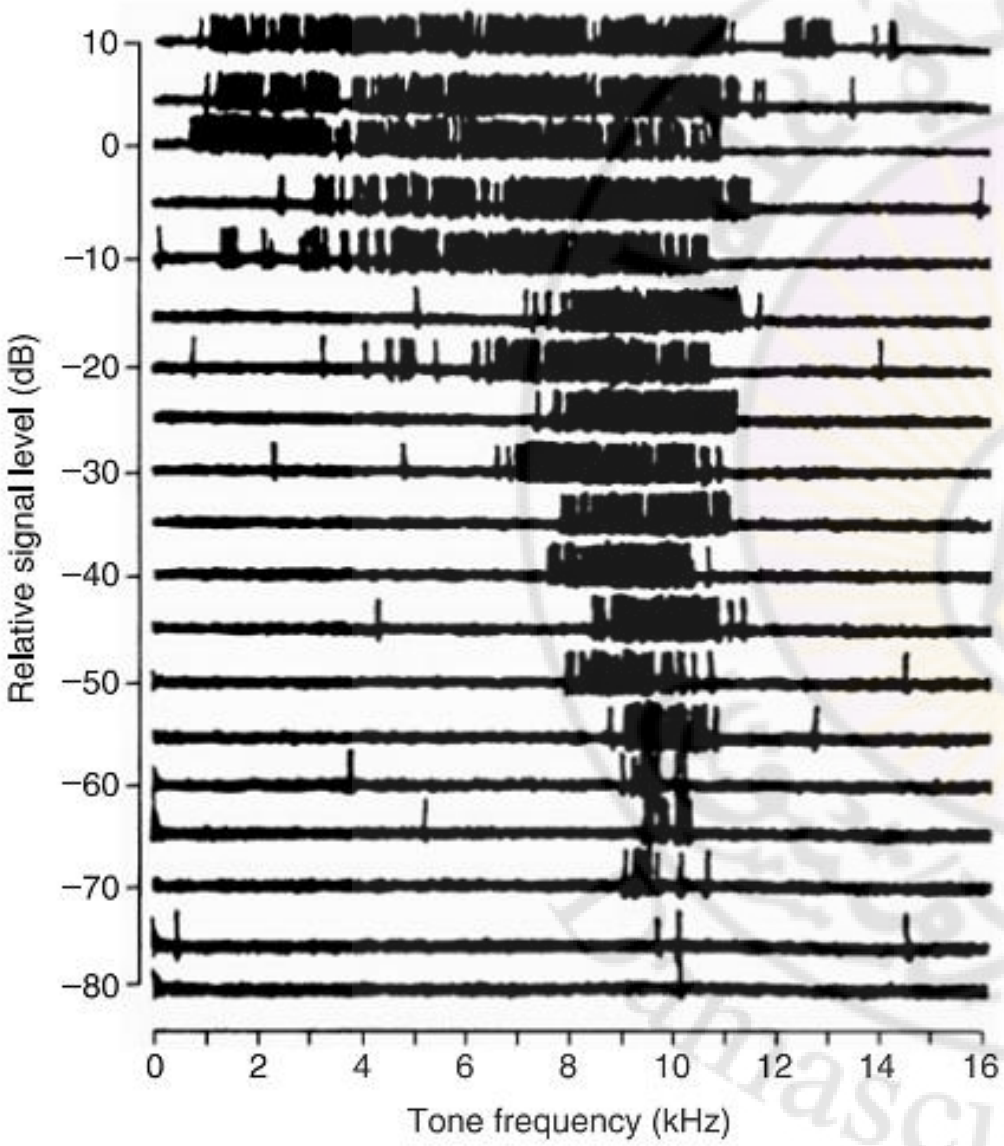
- هناك دليل تجريبي كبير على أن كلا النمطين من ترميز المكان والزمان للصوت يتم في استجابات الخلايا العصبية للجهاز العصبي السمعي الصاعد بما في ذلك القشرة الدماغية السمعية.

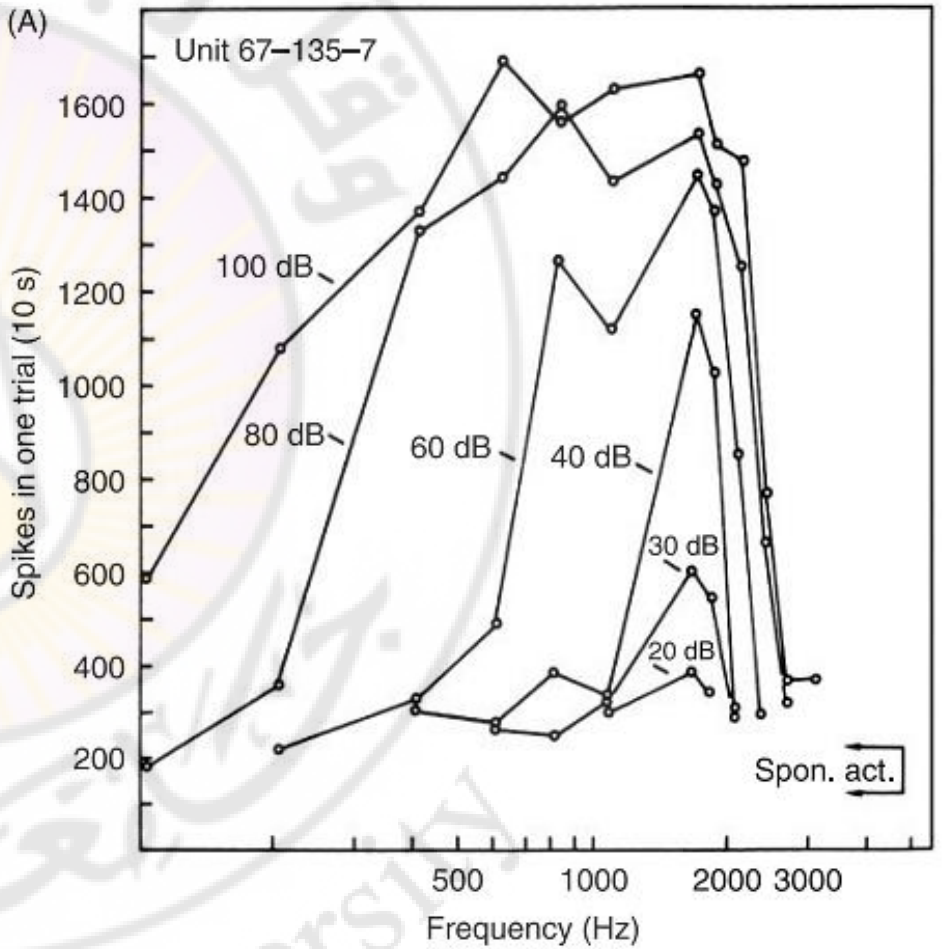
Frequency Selectivity in the Auditory Nervous System

- تمتاز جميع محطات الجهاز العصبي السمعي بالانتقائية (الحساسية) التواترية والتي يكون نشؤها في الحلزون ويتم حفظها في العصب السمعي وكامل نويات جذع الدماغ السمعية وصولا إلى نورونات القشر السمعي.
- تمتاز منحنيات تنغيم الخلية العصبية (الليف العصبي السمعي) بأنها بارزة جدا وهي ناتجة عن اهتزاز الغشاء القاعدي النوعي والذي يعمل دور فلتر محدود النطاق Band-pass filter نوعي للتواتر توافقا مع النظرية المكانية.
- في حين تعتبر وظيفة الخلايا المشعرة هي المسؤولة عن تعديل استجابة اهتزاز الغشاء القاعدي وبالتالي ترميز النمط الزمني.
- وبالتالي فإن مكان الاهتزاز وسعته في الحلزون هي المحدد الأساسي للترميز الطيفي للأصوات.
- يتم ترجمة هذا الاهتزاز على شكل تنبيه عصبي واطلاق كمونات عمل في العصب السمعي discharge pattern تكون عبارة عن استجابة لتبدل الصوت الناجم من اهتزاز الغشاء القاعدي وليس للصوت نفسه (أي بعبارة اخرى استجابة للصوت المفلتر - وتبقي المناطق الاخرى جاهزة للتنبيه متاثرة باجزاء الطيف المختلفة).

Frequency Selectivity in the Auditory Nervous System

- تعرف عتبة الليف Fiber`s threshold بأنها ادنى مستوى صوت ينتج عنه تغير ملحوظ في معدل تفريغ الألياف.
- تكون عتبة الألياف العصبية هي الأدنى عند تردد معين وهذا هو التردد المميز للألياف أو التواتر النوعيCF Characteristic frequency.
- يتسع نطاق الاستجابة الترددية للألياف العصبية السمعية مع زيادة شدة الصوت (الشكل)، هذا يعني أنه يتم تنشيط المزيد من الألياف العصبية مع زيادة شدة النغمة فوق عتبتها.
- تسمى منحنيات استجابة الليف العصبي للتواتر مع تبدل الشدة باسم منحنى عتبة تردد الألياف العصبية أو منحنى التنغيم tuning curve.
- هذه المنحنيات هي التمثيل الأفضل للانتقائية التواترية في الياف العصبي السمعي وعند تمثيل منحنيات التواتر لمجموعة من الالياف معا تكون عبارة عن محصلة منحنيات التواتر لكل ليف مجموعة معا لتمثل استجابة العصب السمعي لطيف الصوت المركب (الشكل).
- تختلف منحنيات التنغيم الخاصة بالتواترات المنخفضة عن تلك الخاصة بالتواترات المرتفعة


Relative signal level (dB)
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
−70
−80
0
2
4
6
8
10
12
14
16
Tone frequency (kHz)


(A)
Unit 67–135–7
Spikes in one trial (10 s)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
100 dB
80 dB
60 dB
40 dB
30 dB
20 dB
Spon. act.
500
1000
2000
3000
Frequency (Hz)

منحنيات التنغيم التواترية

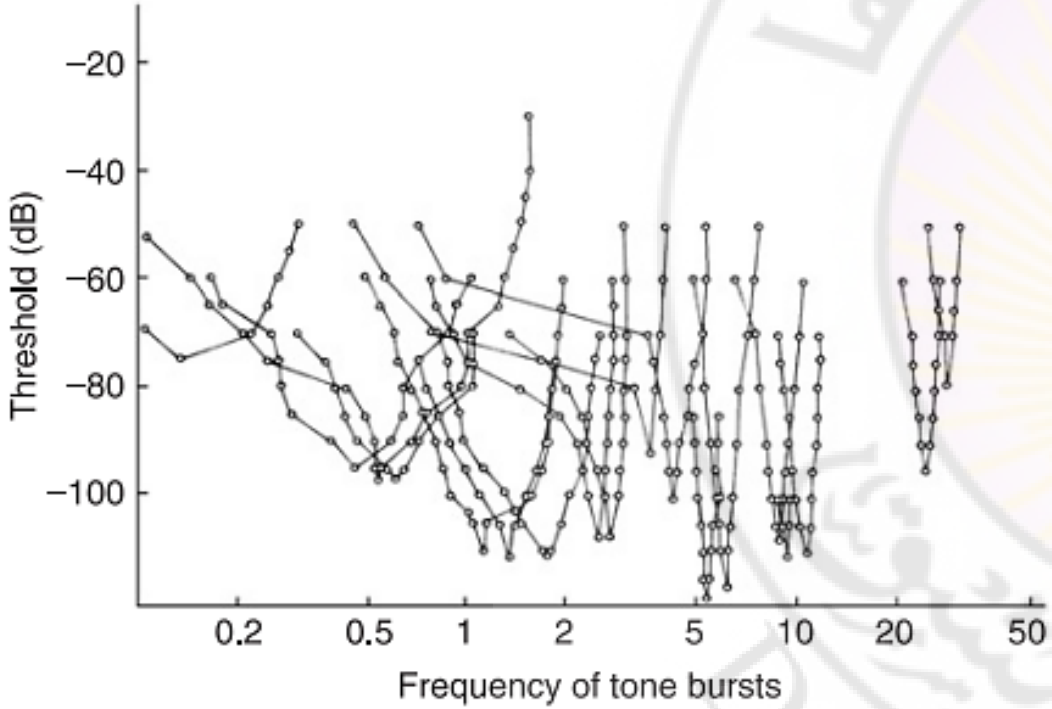
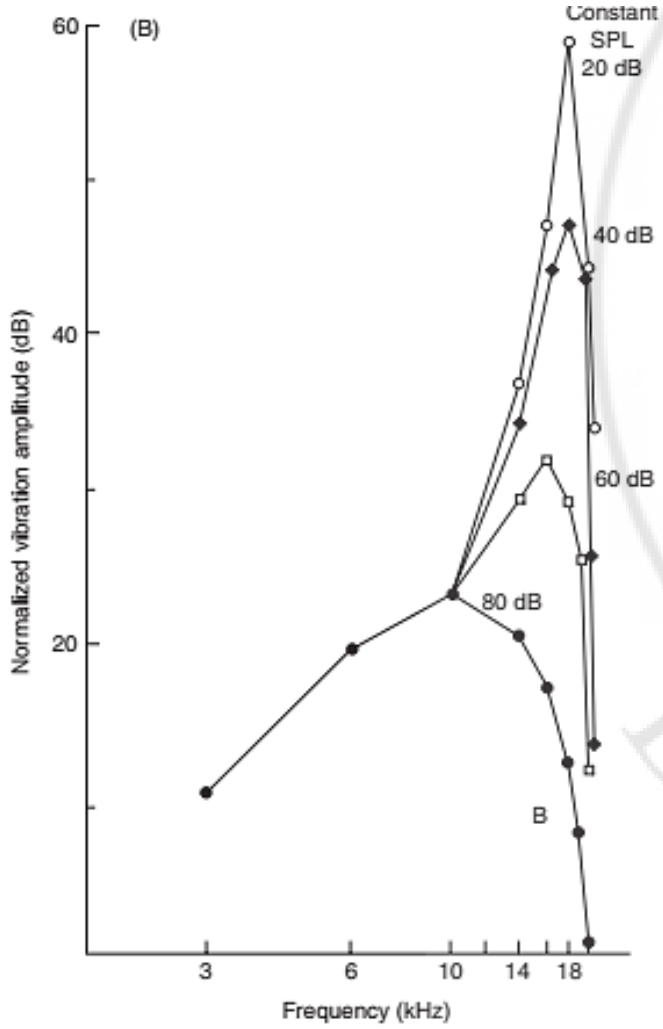


FIGURE 6.3 Typical frequency threshold curves of single auditory nerve fibers in a cat. The different curves show the thresholds of individual nerve fibers. The left-hand scale gives the thresholds in arbitrary decibel values and the horizontal scale is in kHz (reprinted from Kiang et al., 1965, with permission from MIT Press).

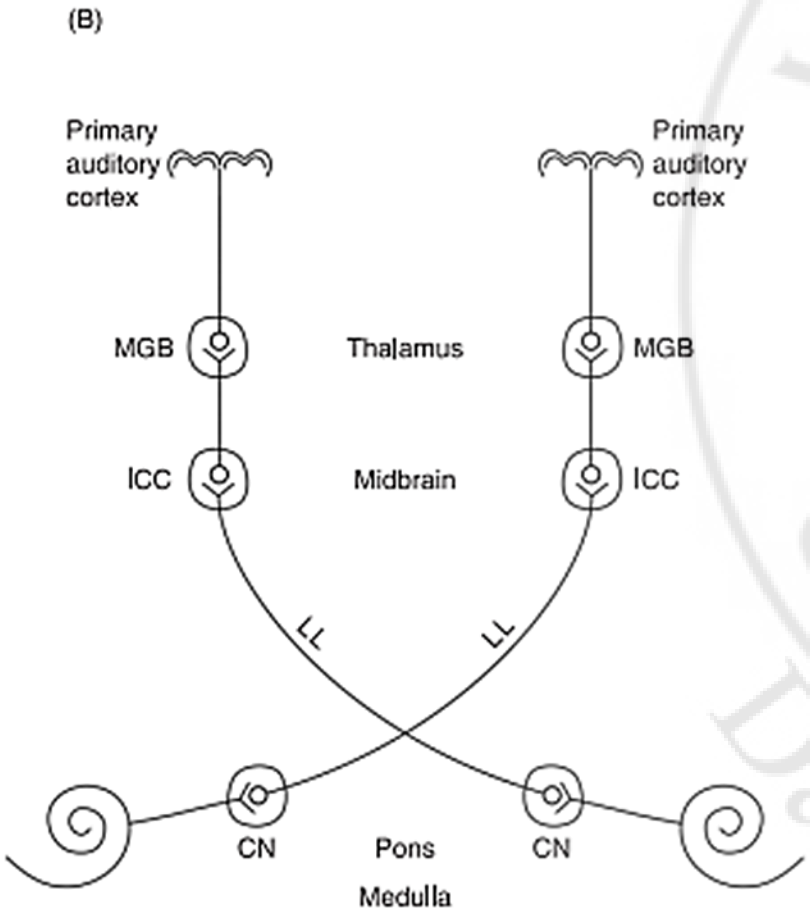
- من الملاحظ أن منحنيات تنغيم التواترات المرتفعة حادة جدا وعميقة في حين تكون منحنيات تنغيم التواترات المنخفضة أكثر اتساعا.
- يظهر الشكل أيضا عتبات تنبيه كل واحد من هذه المنحنيات والتي تختلف حسب التواتر.
- تكون منحنيات التنغيم الخاصة بالتواترات المنخفضة أكثر تناظرا من تلك الخاصة بالتواترات المرتفعة.
- تكون منحنيات التنغيم للألياف التي تمتلك نفس التواتر النوعي متماثلة أيضا.

Cochlear Non-linearity Is Reflected in Frequency Selectivity of Auditory Nerve Fibers

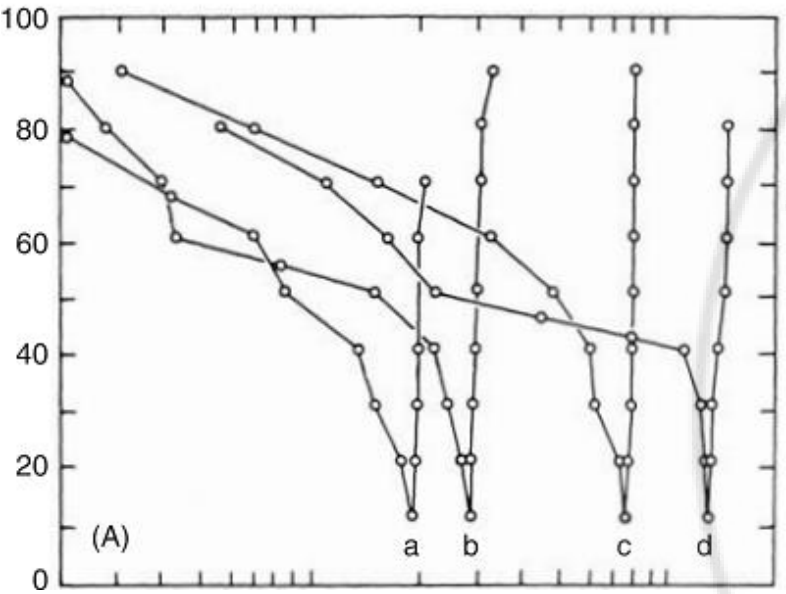


- إن عدم خطية حركة الغشاء القاعدي تجعل الانتقائية التواترية معتمدة على شدة الأصوات التي تصل إلى الأذن.
- تنعكس اللاخطية الحلزونية في منحنيات التنغيم ألياف العصب السمعي.
- أظهرت الدراسات أن الانتقائية التواترية تنخفض كلما ازدادت شدة المنبه.
- لا يقتصر الأمر على عرض منحنيات تنغيم الألياف العصبية السمعية التي تتغير مع شدة الصوت ولكن أيضا التواتر الذي تنحرف باتجاهه هذه المنحنيات يعتبر هاما.
- إجمالا تنحرف منحنيات التنغيم باتجاه التواترات المنخفضة بشكل تدريجي مع ازدياد شدة التنبيه ابتداء من قرب العتبة وصولا إلى شدات عالية تفوق 75 ديسبل فوق العتبة.

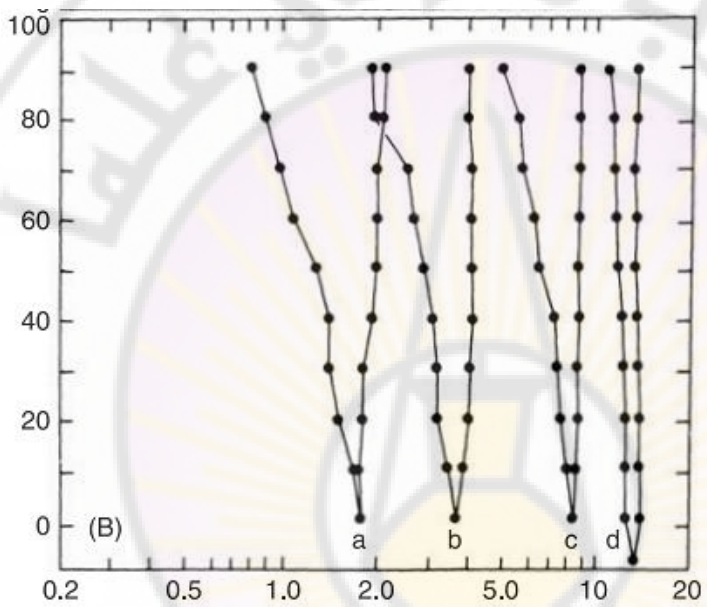
Frequency Tuning in Nuclei of the Ascending Auditory Pathways



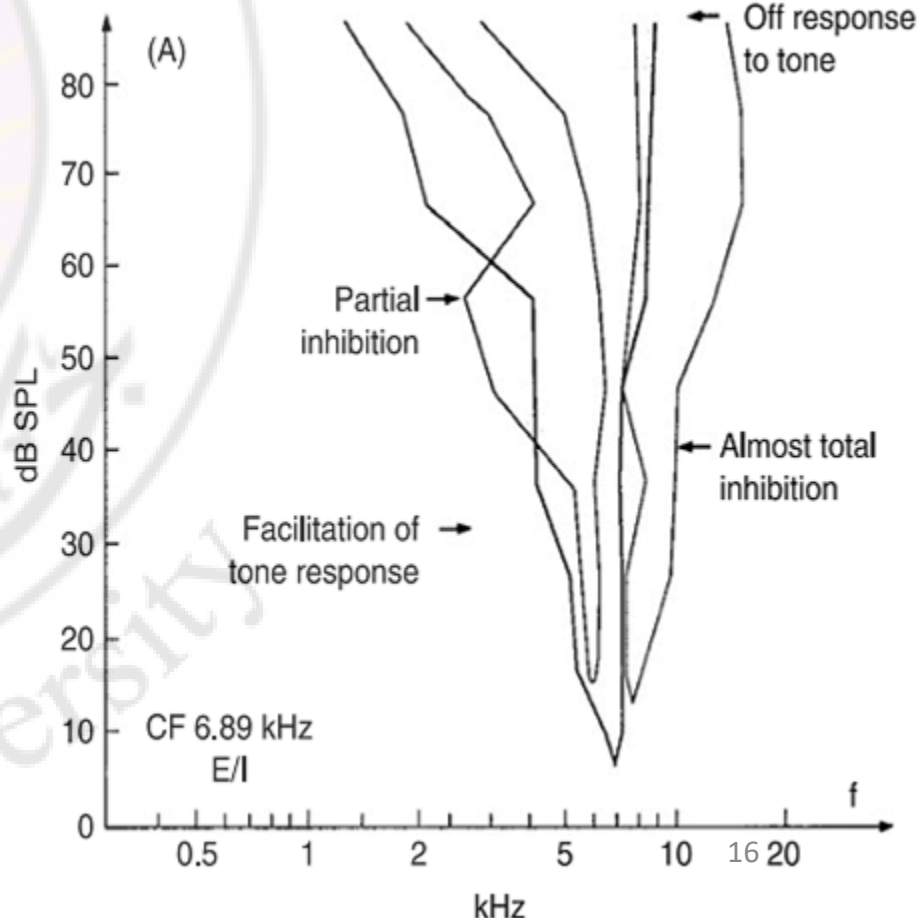
- عند الدراسة باستخدام الطرق التقليدية، فإن جميع الخلايا في نوى السبيل السمعي الصاعد بما في ذلك القشرة الدماغية السمعية تظهر انتقائية تواترية واضحة.
- وهكذا يبدو أن انتقائية التردد هي سمة بارزة لاستجابات الخلايا العصبية المفردة في جميع النوى السمعية.
- تكون منحنيات تنغيم النواة الحلزونية شبيهة بتلك المسجلة في ألياف العصب السمعي مع اختلاف طفيف في منحنيات الخلايا المتوضعة مركزيا في النواة كما يشاهد اختلاف طفيف في منحنيات تنغيم خلايا القشر السمعي أما التبدل الأهم والكبر فيلاحظ في منحنيات تنغيم المركب الزيتوني العلوي وأيضا في الأكيمة السفلية والجسم الركبي الأنسي.
- تكون منحنيات تنغيم الأكيمة السفلية أكثر حدة عادة.
- ينجك هذا الاختلاف في منحنيات التنغيم عن تفاوت درجات التشابك والتوزع بين الألياف المختلفة وتأثير المسارات التثبيية والتحريضية المتعددة.



Auditory nerve tuning curves

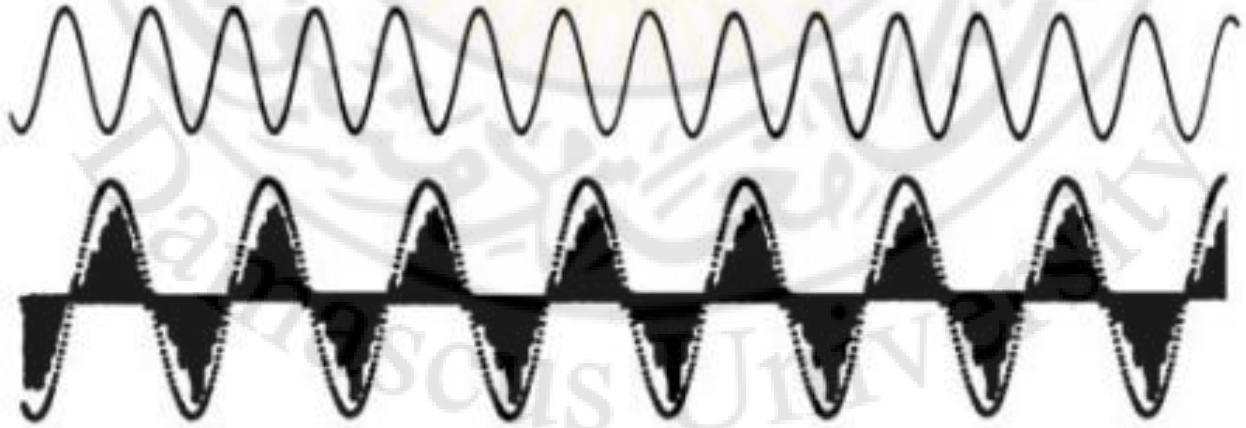


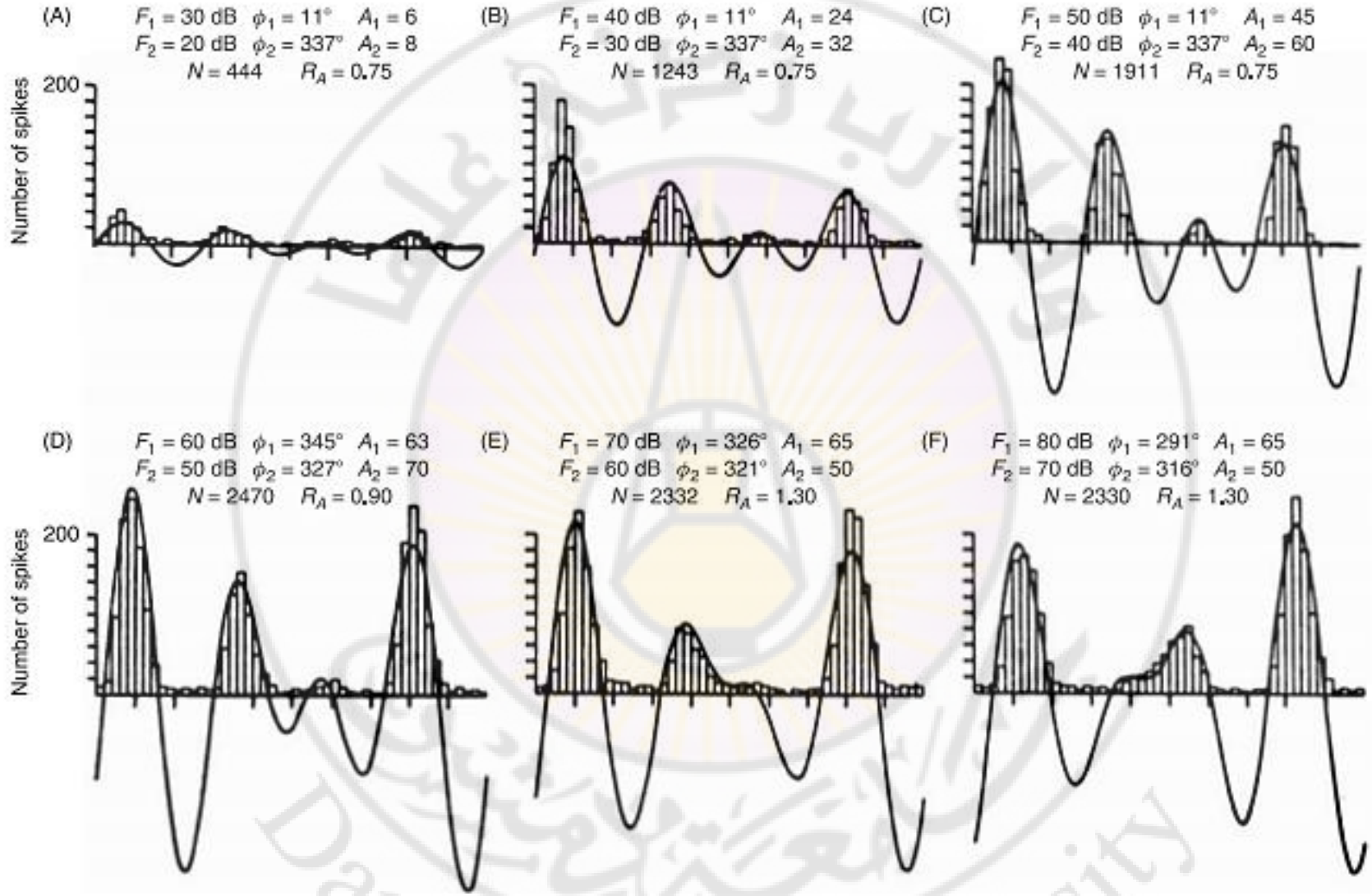
Inferior colliculus tuning curves



CODING OF TEMPORAL FEATURES

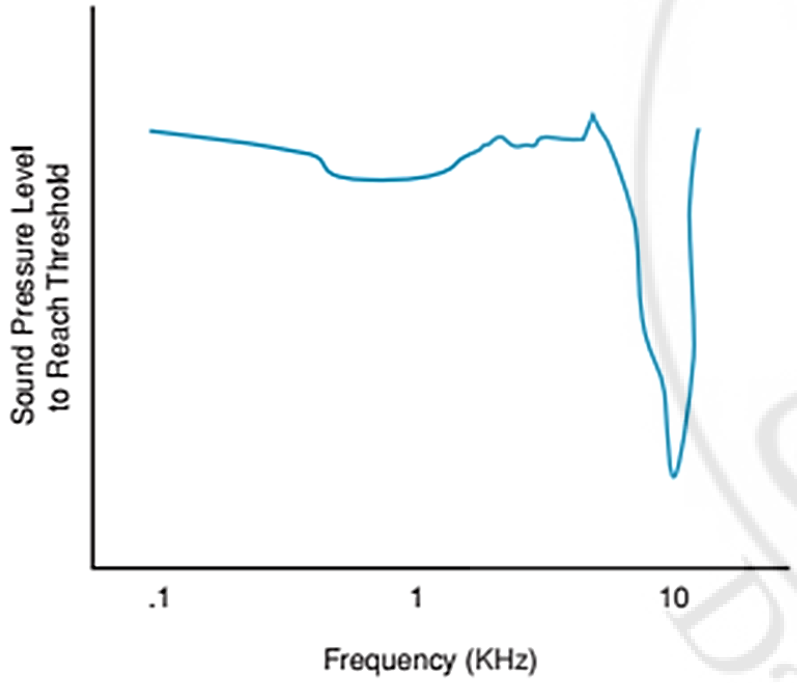
- هناك دليل كبير على أن العصب السمعي يزود الجهاز العصبي بترميز عصبي مقفل الطور Phase-locked على النمط الزمني لاهتزاز الغشاء القاعدي.
- إن قفل الطور لليف العصبي لمنبه بسيط يمكن التنبؤ به ودراسته ولكن هناك القليل من المعلومات هو هذه الخاصية للأصوات المركبة.
- إن مفهوم قفل الطور يعني أن تنحصر استجابة الليف العصبي في طور محدد للمنبه في حين يرسم مخطط استجابة الليف طيفا يتوافق مع شكل المنبه (وأوضح مثال هو قفل طور الليف العصبي السمعي لمنبه نغمة صافية).





Period histograms of discharges in a single auditory nerve fiber of a squirrel monkey to stimulation with two tones of different frequencies that were locked together with a frequency ratio of 3:4 and an amplitude ratio of 10 dB. The different histograms represent the responses to this sound when the intensity was varied over a 50-dB range.

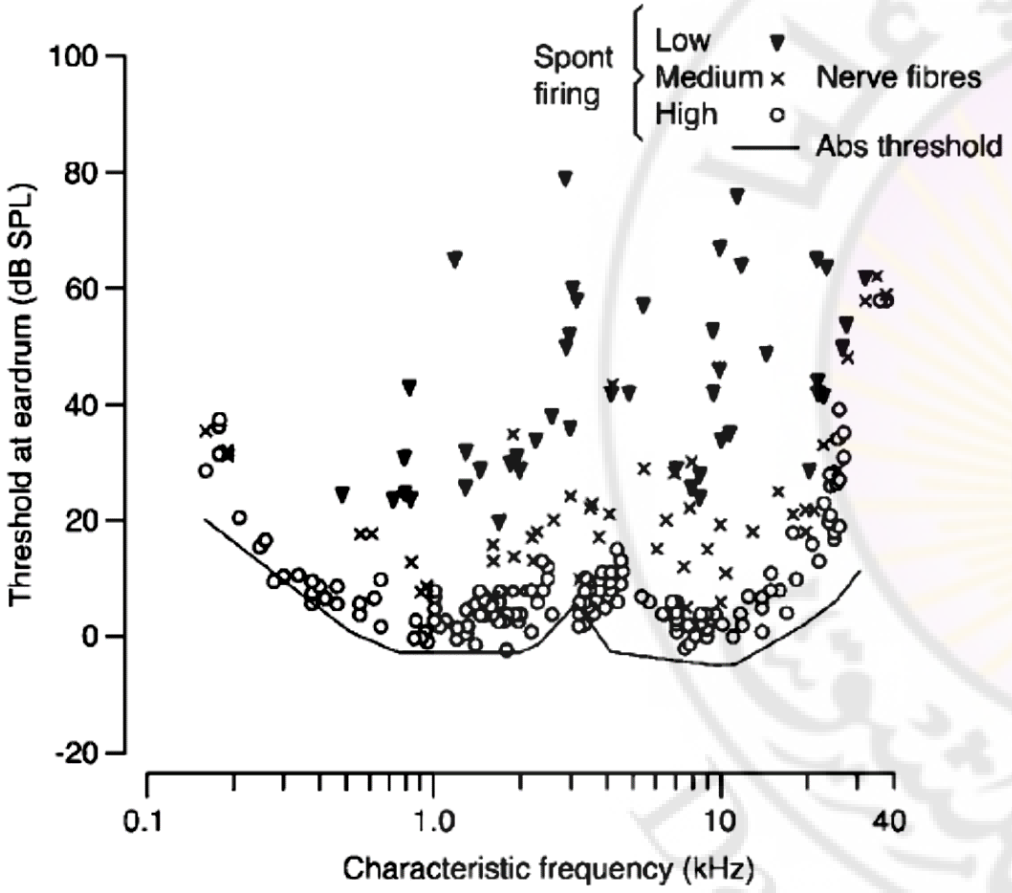
الاستجابة الكهربائية لليف العصبي السمعي



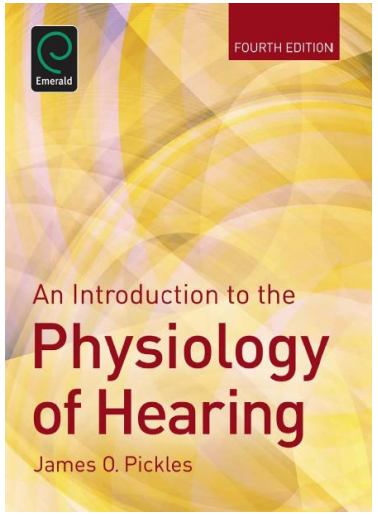
- هناك نوعان من ألياف العصب السمعي. ألياف ذات معدل تفعيل عفوي منخفض (عتبة عالية) high threshold وألياف ذات معدل تفعيل عفوي مرتفع high spontaneous rate (عتبة منخفضة) الأولى تحتاج لشدة تنبيه عالية لتتفعل وليس لها نشاط عفوي يذكر في حين أن الثانية تستجيب لأخفض المنبهات شدة وهي المسؤولة عن سماع الأصوات المنخفضة قرب العتبة السمعية، في حين تتفعل الألياف عالية العتبة عند ازدياد شدة المنبه.
- تتميّز الألياف منخفضة العتبة بانتقائية تواترية عالية فكل مجموعة من الألياف تختص بنقل إشارة كهربائية لمنبه صوتي ذو تواتر معين متوافقة بذلك مع التوزع التواتري للحلزون ويبدي مخطط تفعيل الليف العصبي ذروة حادة عند التواتر المخصوص.

(مثال: شكل مخطط تنبيه الليف العصبي 1000 هرتز).

ترميز الشدة في الليف العصبي السمعي

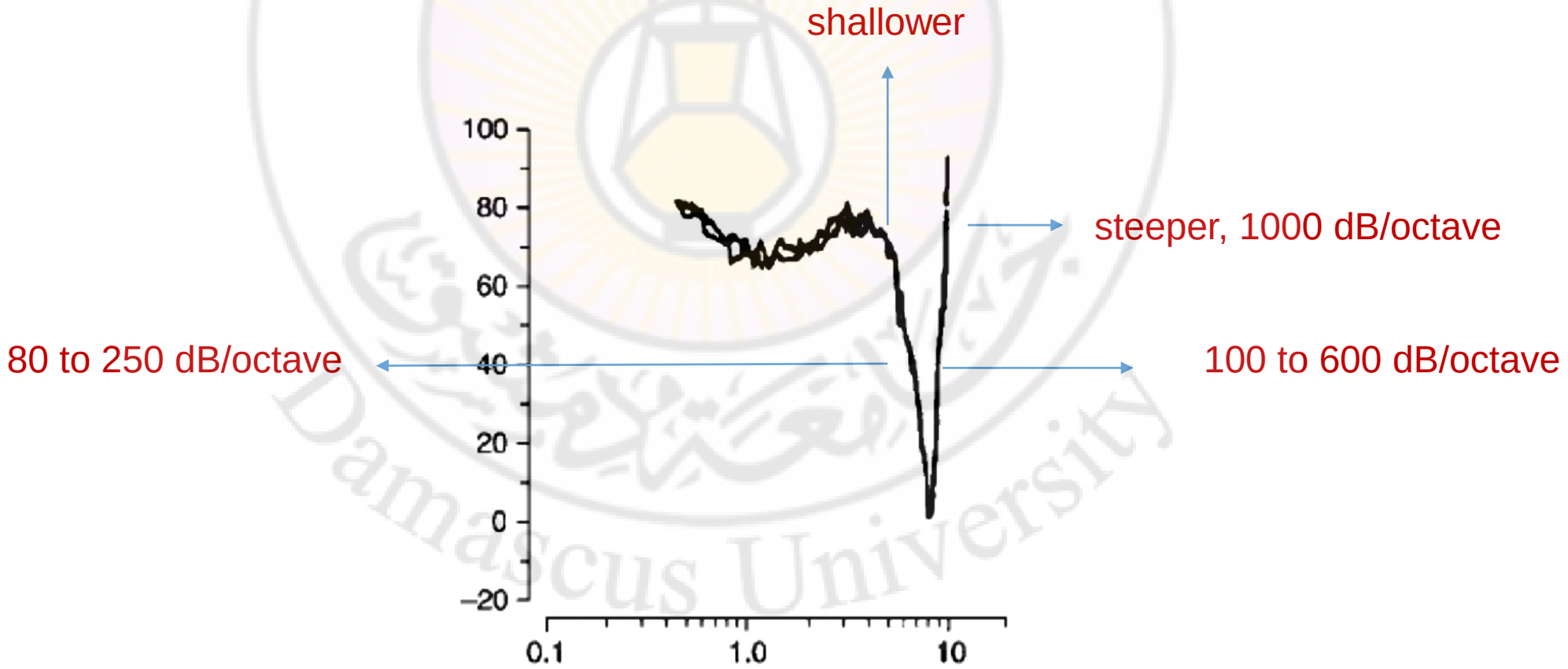


- هذا التنوع في معدل فعالية الألياف العصبية هو المسؤول عن حفظ ترميز التواتر في الألياف منخفضة العتبة وبنفس الوقت ترميز الشدة من خلال وجود نوعين من الألياف العصبية، حيث تستطيع الألياف منخفضة العتبة بالاستجابة للحد الأدنى من الاشارة الصوتية وعند ازدياد شدة المنبه بالتدريج يزداد معدل تنبيه هذه الألياف ليصل ذروته وعندها تبدأ الألياف مرتفعة العتبة بالتنبيه لتستجيب للأصوات العالية الشدة، حيث يسمى الفرق بين أخفض صوت يمكن سماعه وأعلى صوت مسموع يمكن تحمله بالمجال الحيوي الديناميكي Dynamic range والذي يعكس سلامة هذه الألياف.



The degree of frequency selectivity has been expressed in two ways:

- the first way: is by the slopes of the tuning curve above and below the characteristic frequency.



أي سؤال ؟؟

جامعة دمشق
كلية العلوم الصحية

تشريح وفزيولوجيا السمع والنطق

Physiology of Hearing

(وظيفة الجهاز العصبي السمع)

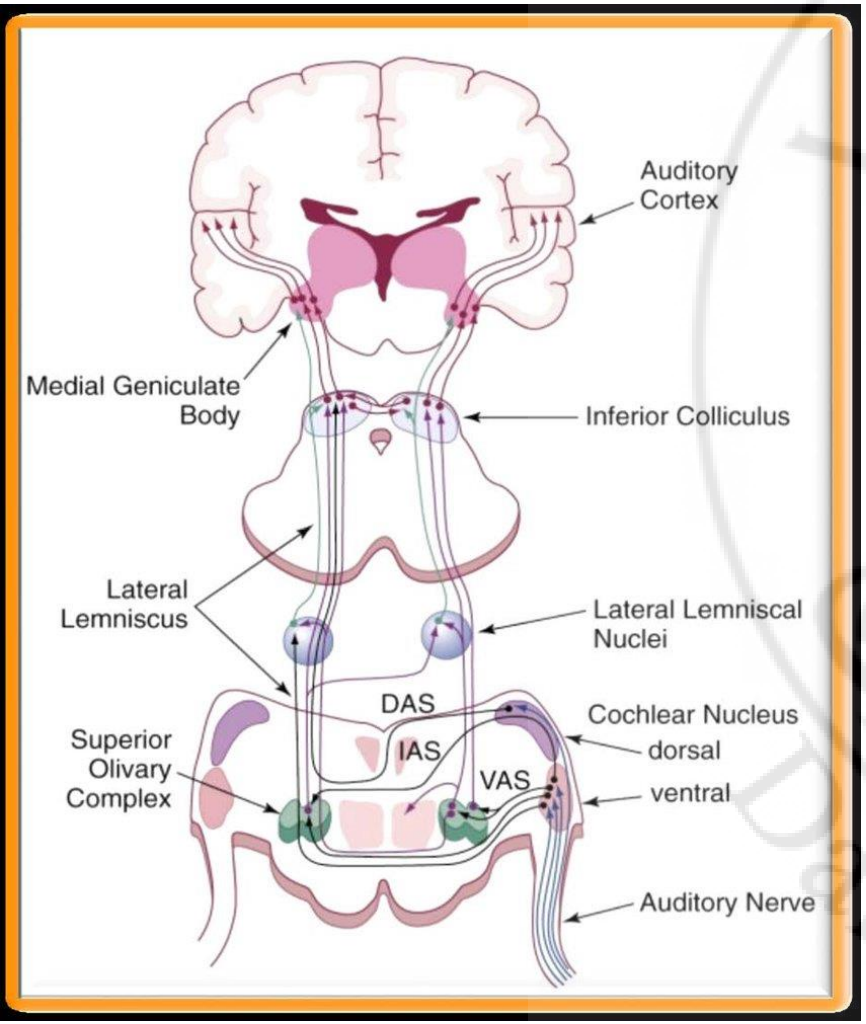
د سامر محمد محسن
MD., ENT, PhD OF Audiology

November 2021

مقدمة

- الجهاز العصبي السمعي هو الأكثر تعقيدًا من بين جميع السبل الحسية.
- إن تعقيد تشريح الجهاز العصبي السمعي كبيربحيث يتماشى مع حجم الوظائف الدقيقة والمتنوعة المسندة إلى هذا الجهاز.
- تستند معظم معرفتنا حول وظيفة الجهاز العصبي السمعي إلى دراسات الخلايا العصبية المفردة والاختبارات في الوسط غير الحي In-Vitroثم بدأت المعرفة تتطور شيئا فشيئا من خلال التجارب على الحيوانات ولاحقا طرق الاختبار الالكتروفزيولوجية والتصوير الوظيفي التي مكنت من دراسة النظام السمعي عند الإنسان الحي مما أظهر درجة تعقيد هذا النظام.
- عادة ما كان بقارن الجهاز السمعي بالهاتف للتبسيط ولكن بعد تطور المعرفة لم يعد يصبح هذا النموذج مناسبا لافراطه في التبسيط اذ ان النظام السمعي يعمل ضمن وحدات وظيفة معقدة ومتفاعلة مع بعضها وضمن مستويات متعددة متتالية ومتداخلة وليس مستوى البساطة التي يمثلها نموذج الهاتف.
- وحتى المقارنة مع أنظمة الكمبيوتر يعتبر مجحفا وبسيطا فيكفي مقارنة وجود أكثر من 100 مليار خليه عصبية تعمل بآن واحد وبمستويات وظيفية مختلفة مع أضخم وأعقد معالج كمبيوتري لندرك حجم التعقيد في النظام العصبي.

استجابة السبيل السمعي المركزي



النواة الحلزونية (CN): في جذع الدماغ – كمونات عمل و نمط تفعيل يشبه إلى حد كبير نمط تفعيل ألياف العصب السمعي بهدف حفظ الانتقائية التواترية.

المركب الزيتوني العلوي (SOC): هي محطة التعامل بين الأذنين Binaural interaction حيث يتم في هذه المحطة تصالب 80% من ألياف السبيل السمعي كما يتم تحديد جهة الصوت Localization اعتماداً على فرق زمن وصول الصوت ITD (Inter aural time difference) وفرق شدة الصوت بين الأذنين ILD (Inter aural level difference)

الأكيمة السفلية IC: تتلقى تعصيب مزدوج من كلا الطرفين من المركب الزيتوني ووارد مباشر من النويات الحلزونية CN. عصبونات هذه النواة تبدي منحنيات تنغيم Tuning curve من شأنها حفظ الانتقائية التواترية التي تم ترميزها في ألياف العصب السمعي .

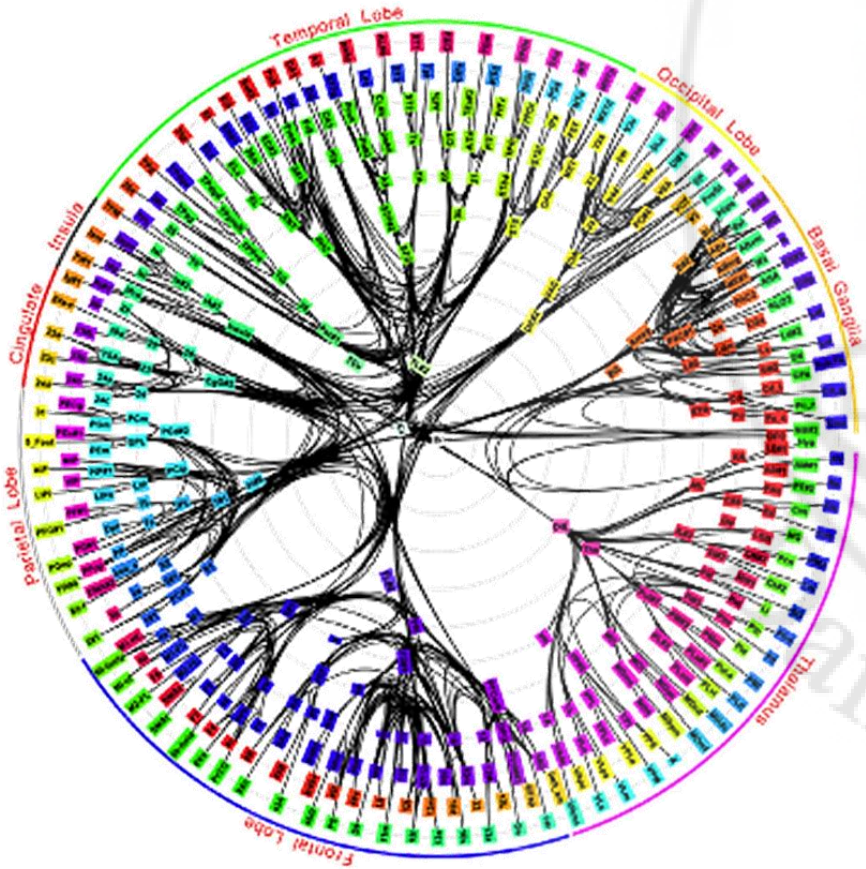
الجسم الركبي الأنسي MGB: هي محطة الوصول في المهاد وهي آخر الطريق الحسي في جذع الدماغ، القسم البطني منها يصدر المعلومات السمعية مباشرة إلى القشر السمعي الأولي في الفص الصدغي، أما القسم الظهري فلديه ارتباطات مع مناطق مخية أخرى. تبدي عصبونات الجسم الركبي الأنسي منحنيات تنغيم حادة جداً شبيهة لمنحنيات تنغيم العصب السمعي وبالتالي تقوم بحفظ الانتقائية التواترية.

مقدمة

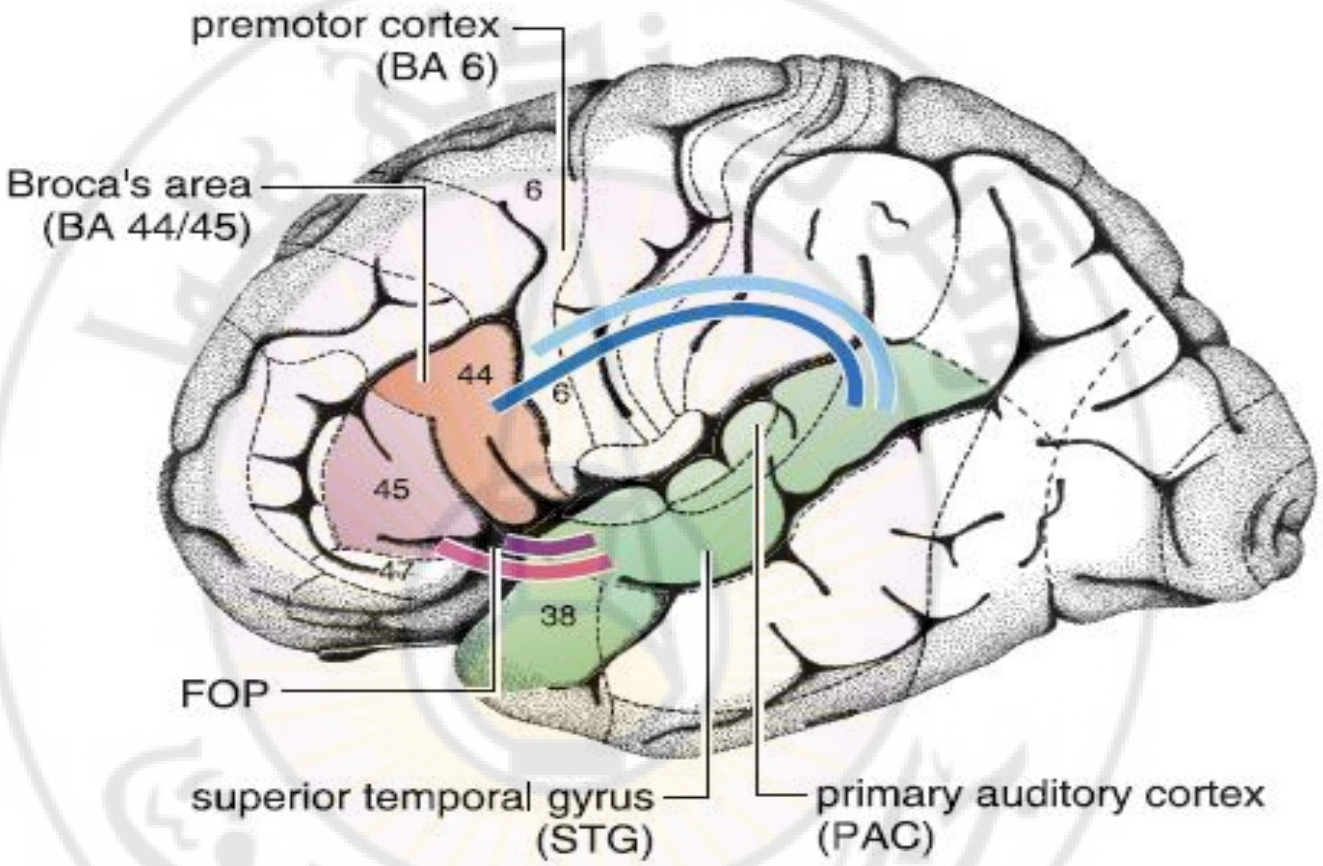
- مايميز النظام العصبي السمعي هو الحجم الهائل للمدخلات والمخرجات في كل لحظة والتي تعالج على مستويات متعددة من الاهمية من خلال الارتباطات الوظيفية بين هذا الجهاز وباقي عناصر الجهاز العصبي والانظمة الحسية الاخرى ضمن مفهوم الشبكات الدماغية .Brain Network

- إن الفهم الدقيق لآلية عمل الشبكات يجيب على التساؤل القائم حول وظيفة عنصر معين ودرجة تعقيدها وتداخلها اذ لا يمكن الان ان ننسب وظيفة واحدة لمكون واحد وانما كل مكون يسهم في العديد من الوظائف وبدرجات مختلفة من الاهمية والاولوية حسب دوره في كل شبكة من الشبكات الدماغية اذ يمكن للمكون العصبي ان يكون محطة هامة في عدة شبكات عصبية وممكن ان يكون محطة ارتباط وتداخل بين الشبكات.

- هذه المعطيات الجديدة في فهم علم الأعصاب وضعت حجر الأساس لفهم مبادئ المرونة العصبية Neuroplasticityوالخروج بها من المستوى الخلوي النسيجي (استطالات وزيادة مشابك) إلى المستوى الوظيفي السريري (ارتباطات وشبكات) مع العلم أن هذه الارتباطات ممكن أن تكون تشريحية كالارتباطات بلين العصبونات وممكن تكون وظيفية من خلال نقل الأثر Functional Connectivity.



Auditory Structural connectivity



Dorsal Pathway I

pSTG to premotor cortex via AF/SLF

Dorsal Pathway II

pSTG to BA 44 via AF/SLF

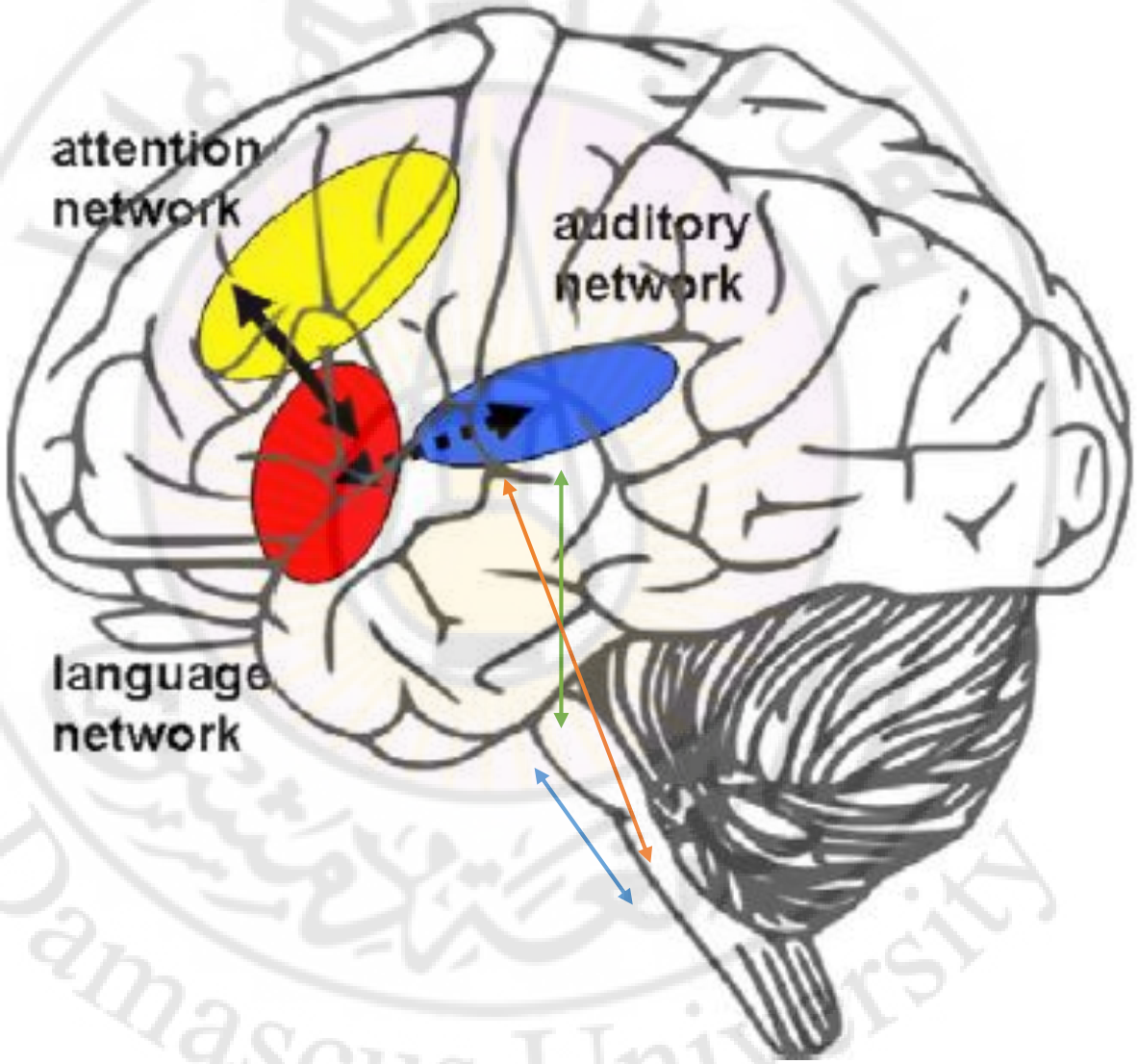
Ventral Pathway I

STG to BA 45 via EFCS

Ventral Pathway II

antSTG to FOP via UF

The Whole Auditory Network



Damascus University

الترميز Coding

- يعد الكلام هو الصوت الأكثر أهمية بالنسبة للانسان، ومن الطبيعي طرح السؤال التالي: كيف يميز الجهاز العصبي السمعي أصوات الكلام؟
- هذا سؤال معقد للغاية ومن الواقعي طرح أسئلة أبسط مثل كيفية التمييز بين الترددات.
- يعتبر تمييز التردد من السمات البارزة للوظيفة السمعية وقد تمت دراسة أساسه الفزيولوجي على نطاق واسع لأنه من المفترض أنه يلعب دورًا مهمًا في التمييز بين الأصوات الطبيعية.
- سنناقش أولاً تمثيل التردد في الجهاز العصبي السمعي كترميز مكاني وكشفرة زمنية وبعد ذلك سنناقش الأهمية النسبية لهاتين الطريقتين المختلفتين لترميز التردد للتمييز بين الأصوات المعقدة.
- تخضع الشفرة العصبية للأصوات المعقدة لتحولات أكثر شمولاً من تلك التي تثيرها النغمات الصافية.
- إن قدرتنا على تمييز التغييرات في طيف الأصوات المعقدة عالية أيضًا ويفترض أن هذه القدرة ضرورية للتمييز الكلام.
- تعتبر التغييرات في التردد (الطيف) والسعة من السمات البارزة في التمييز السمعي.

ترميز التواتر في الجهاز العصبي السمعي

- يمكنن للاذن البشرية التمييز بين التغييرات الصغيرة جدًا في تواتر النغمة الصافية.
- حتى الأفراد المدربين بشكل معتدل يمكنهم اكتشاف الفرق بين نغمة 1000 هرتز ونغمة 1003 هرتز (ثلاثة أعشار فرق 1٪ في التردد).
- أثارت الحساسية الهائلة للجهاز السمعي البشري تجاه التغيرات في التردد فضول العديد من الباحثين وبُذلت جهود كبيرة لتحديد الآلية التي تميز الأذن والجهاز العصبي السمعي من خلالها هذه الفروق الدقيقة في تردد النغمة الصافية.

ترميز التواتر في الجهاز العصبي السمعي

- تم تقديم فرضيتين لشرح الأساس الفزيولوجي لتمييز التردد.

1. الفرضية المكانية: والتي تقول بأن تمييز التردد يعتمد على انتقائية الغشاء القاعدي للتردد والذي يتم تمثيله من خلال اهتزاز الغشاء القاعدي في مكان معين من الغشاء القاعدي للحلزون حسب كل تواتر.
2. الفرضية الزمانية: وتقول بأن تمييز التردد يعتمد على ترميز شكل الموجة (temporal pattern) للأصوات في نمط تفريغ الخلايا العصبية السمعية ، والمعروف باسم قفل الطور (phase locking).

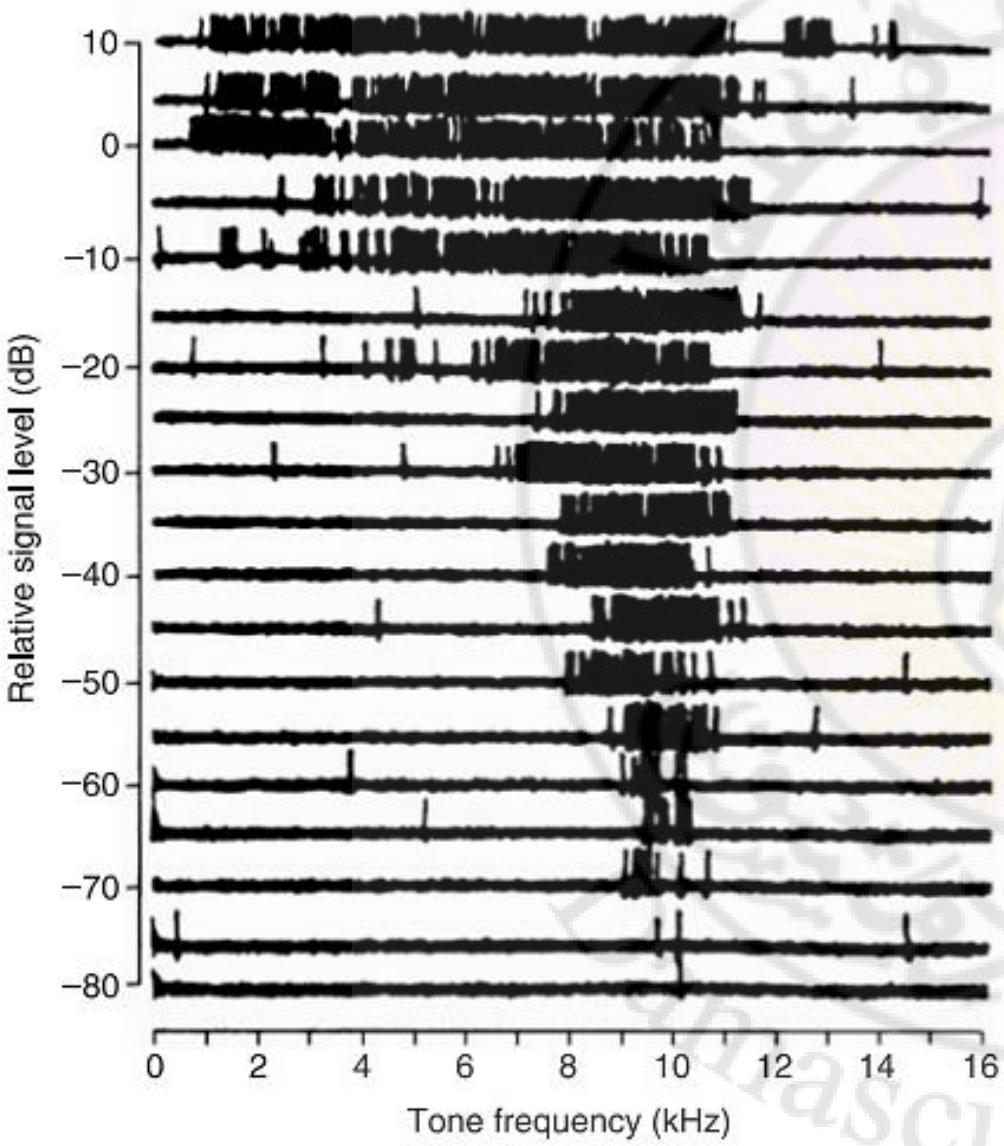
- هناك دليل تجريبي كبير على أن كلا النمطين من ترميز المكان والزمان للصوت يتم في استجابات الخلايا العصبية للجهاز العصبي السمعي الصاعد بما في ذلك القشرة الدماغية السمعية.

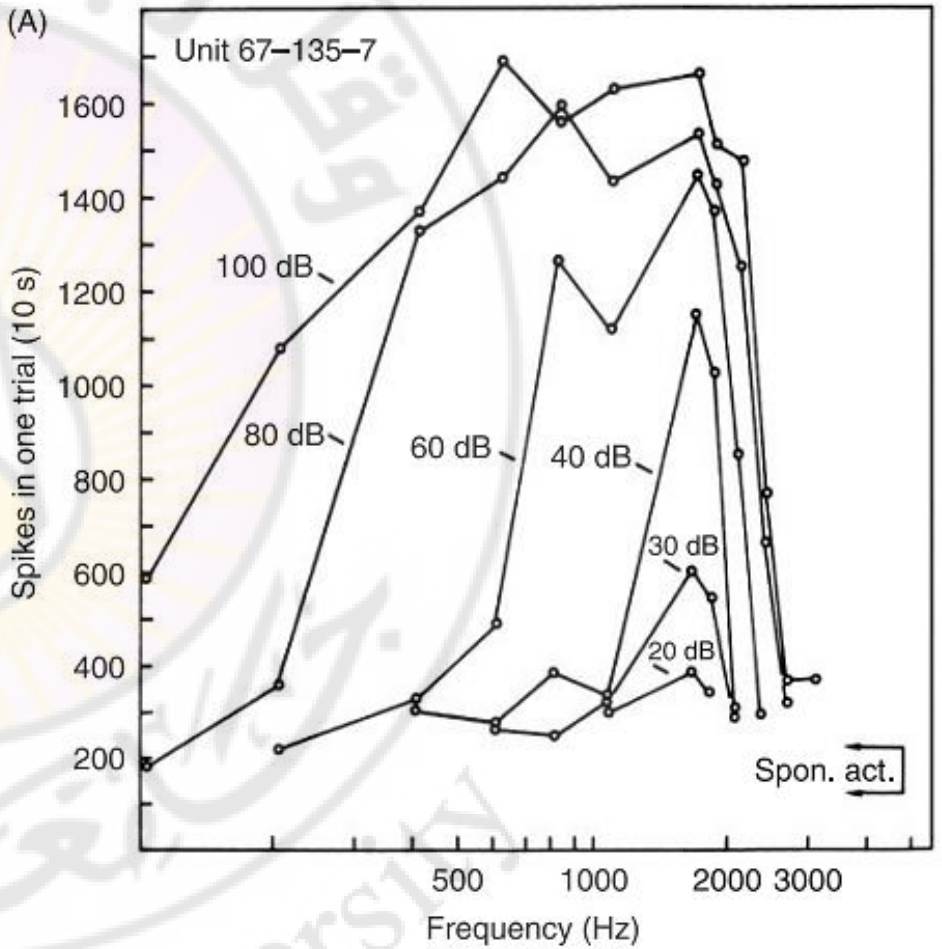
Frequency Selectivity in the Auditory Nervous System

- تمتاز جميع محطات الجهاز العصبي السمعي بالانتقائية (الحساسية) التواترية والتي يكون نشؤها في الحلزون ويتم حفظها في العصب السمعي وكامل نويات جذع الدماغ السمعية وصولا إلى نورونات القشر السمعي.
- تمتاز منحنيات تنغيم الخلية العصبية (الليف العصبي السمعي) بأنها بارزة جدا وهي ناتجة عن اهتزاز الغشاء القاعدي النوعي والذي يعمل دور فلتر محدود النطاق Band-pass filter نوعي للتواتر توافقا مع النظرية المكانية.
- في حين تعتبر وظيفة الخلايا المشعرة هي المسؤولة عن تعديل استجابة اهتزاز الغشاء القاعدي وبالتالي ترميز النمط الزمني.
- وبالتالي فإن مكان الاهتزاز وسعته في الحلزون هي المحدد الأساسي للترميز الطيفي للأصوات.
- يتم ترجمة هذا الاهتزاز على شكل تنبيه عصبي واطلاق كمونات عمل في العصب السمعي discharge pattern تكون عبارة عن استجابة لتبدل الصوت الناجم من اهتزاز الغشاء القاعدي وليس للصوت نفسه (أي بعبارة اخرى استجابة للصوت المفلتر - وتبقي المناطق الاخرى جاهزة للتنبيه متاثرة باجزاء الطيف المختلفة).

Frequency Selectivity in the Auditory Nervous System

- تعرف عتبة الليف Fiber`s threshold بأنها ادنى مستوى صوت ينتج عنه تغير ملحوظ في معدل تفريغ الألياف.
- تكون عتبة الألياف العصبية هي الأدنى عند تردد معين وهذا هو التردد المميز للألياف أو التواتر النوعيCF Characteristic frequency.
- يتسع نطاق الاستجابة الترددية للألياف العصبية السمعية مع زيادة شدة الصوت (الشكل)، هذا يعني أنه يتم تنشيط المزيد من الألياف العصبية مع زيادة شدة النغمة فوق عتبتها.
- تسمى منحنيات استجابة الليف العصبي للتواتر مع تبدل الشدة باسم منحنى عتبة تردد الألياف العصبية أو منحنى التنغيم tuning curve.
- هذه المنحنيات هي التمثيل الأفضل للانتقائية التواترية في الياف العصبي السمعي وعند تمثيل منحنيات التواتر لمجموعة من الالياف معا تكون عبارة عن محصلة منحنيات التواتر لكل ليف مجموعة معا لتمثل استجابة العصب السمعي لطيف الصوت المركب (الشكل).
- تختلف منحنيات التنغيم الخاصة بالتواترات المنخفضة عن تلك الخاصة بالتواترات المرتفعة


Relative signal level (dB)
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
−70
−80
0
2
4
6
8
10
12
14
16
Tone frequency (kHz)


(A)
Unit 67–135–7
Spikes in one trial (10 s)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
100 dB
80 dB
60 dB
40 dB
30 dB
20 dB
Spon. act.
500
1000
2000
3000
Frequency (Hz)

منحنيات التنغيم التواترية

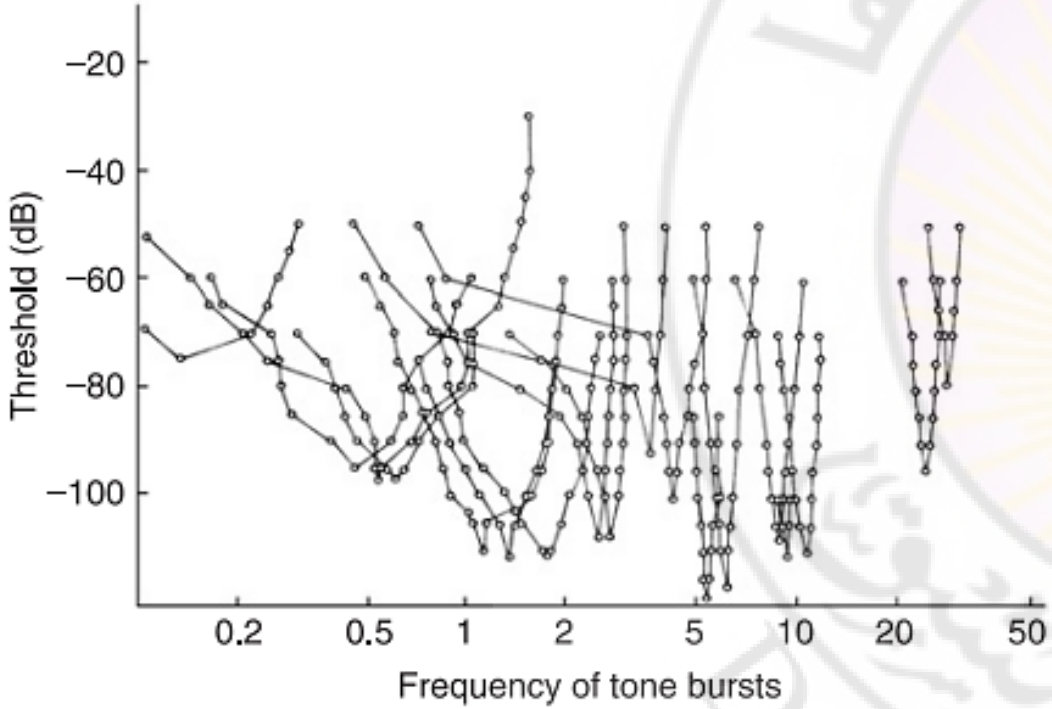
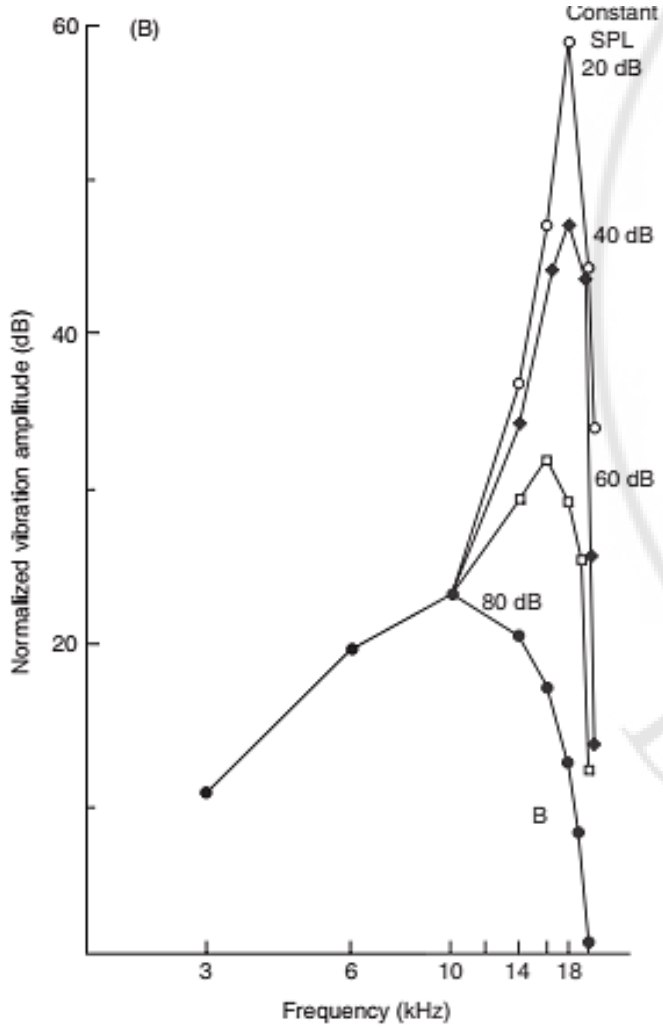


FIGURE 6.3 Typical frequency threshold curves of single auditory nerve fibers in a cat. The different curves show the thresholds of individual nerve fibers. The left-hand scale gives the thresholds in arbitrary decibel values and the horizontal scale is in kHz (reprinted from Kiang et al., 1965, with permission from MIT Press).

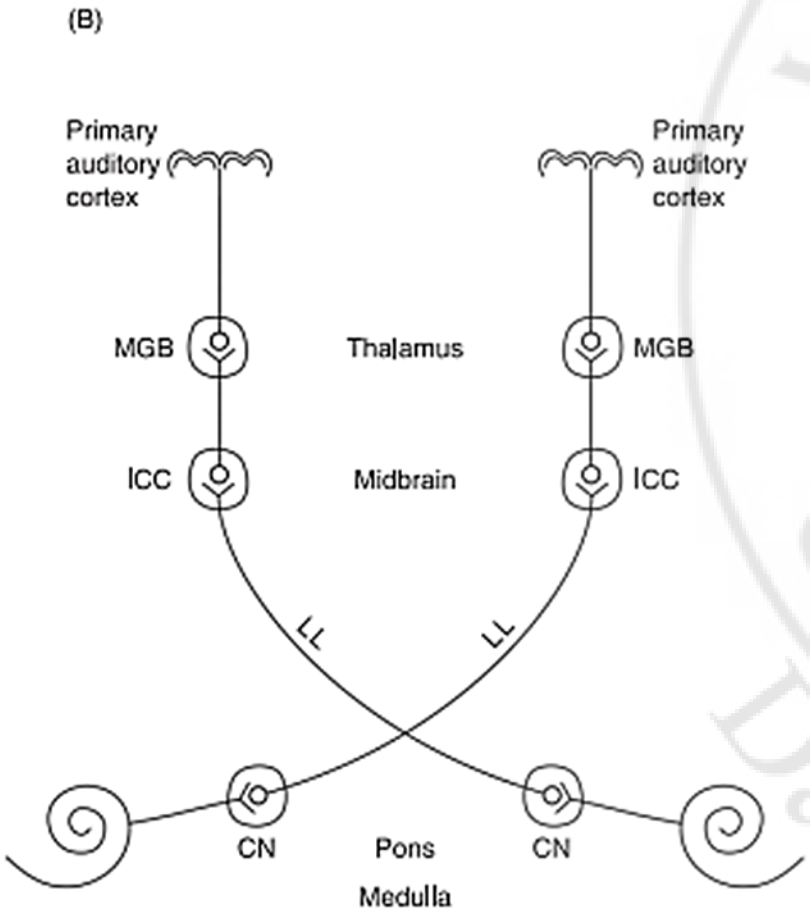
- من الملاحظ أن منحنيات تنغيم التواترات المرتفعة حادة جدا وعميقة في حين تكون منحنيات تنغيم التواترات المنخفضة أكثر اتساعا.
- يظهر الشكل أيضا عتبات تنبيه كل واحد من هذه المنحنيات والتي تختلف حسب التواتر.
- تكون منحنيات التنغيم الخاصة بالتواترات المنخفضة أكثر تناظرا من تلك الخاصة بالتواترات المرتفعة.
- تكون منحنيات التنغيم للألياف التي تمتلك نفس التواتر النوعي متماثلة أيضا.

Cochlear Non-linearity Is Reflected in Frequency Selectivity of Auditory Nerve Fibers

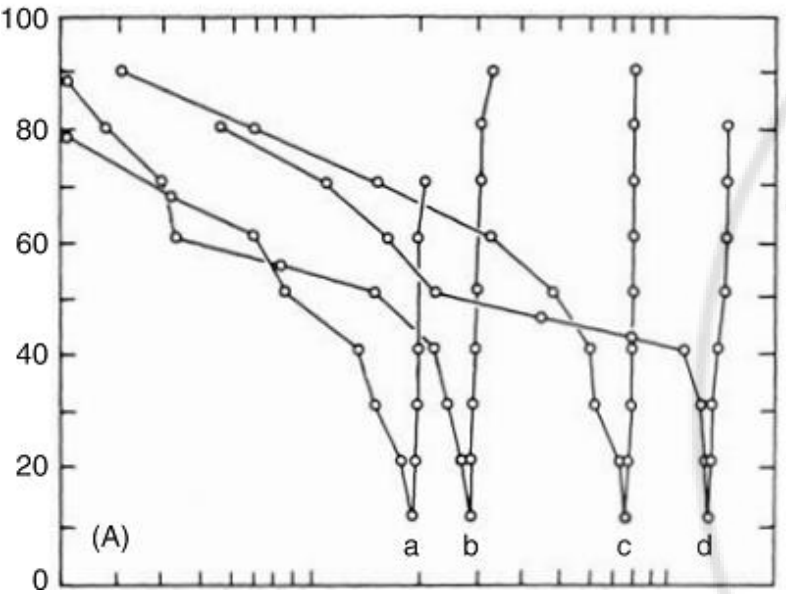


- إن عدم خطية حركة الغشاء القاعدي تجعل الانتقائية التواترية معتمدة على شدة الأصوات التي تصل إلى الأذن.
- تنعكس اللاخطية الحلزونية في منحنيات التنغيم ألياف العصب السمعي.
- أظهرت الدراسات أن الانتقائية التواترية تنخفض كلما ازدادت شدة المنبه.
- لا يقتصر الأمر على عرض منحنيات تنغيم الألياف العصبية السمعية التي تتغير مع شدة الصوت ولكن أيضا التواتر الذي تنحرف باتجاهه هذه المنحنيات يعتبر هاما.
- إجمالا تنحرف منحنيات التنغيم باتجاه التواترات المنخفضة بشكل تدريجي مع ازدياد شدة التنبيه ابتداء من قرب العتبة وصولا إلى شدات عالية تفوق 75 ديسبل فوق العتبة.

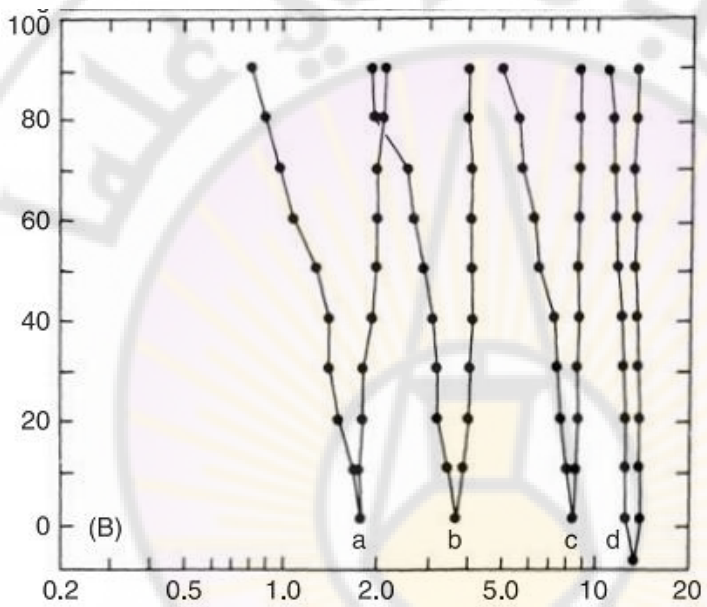
Frequency Tuning in Nuclei of the Ascending Auditory Pathways



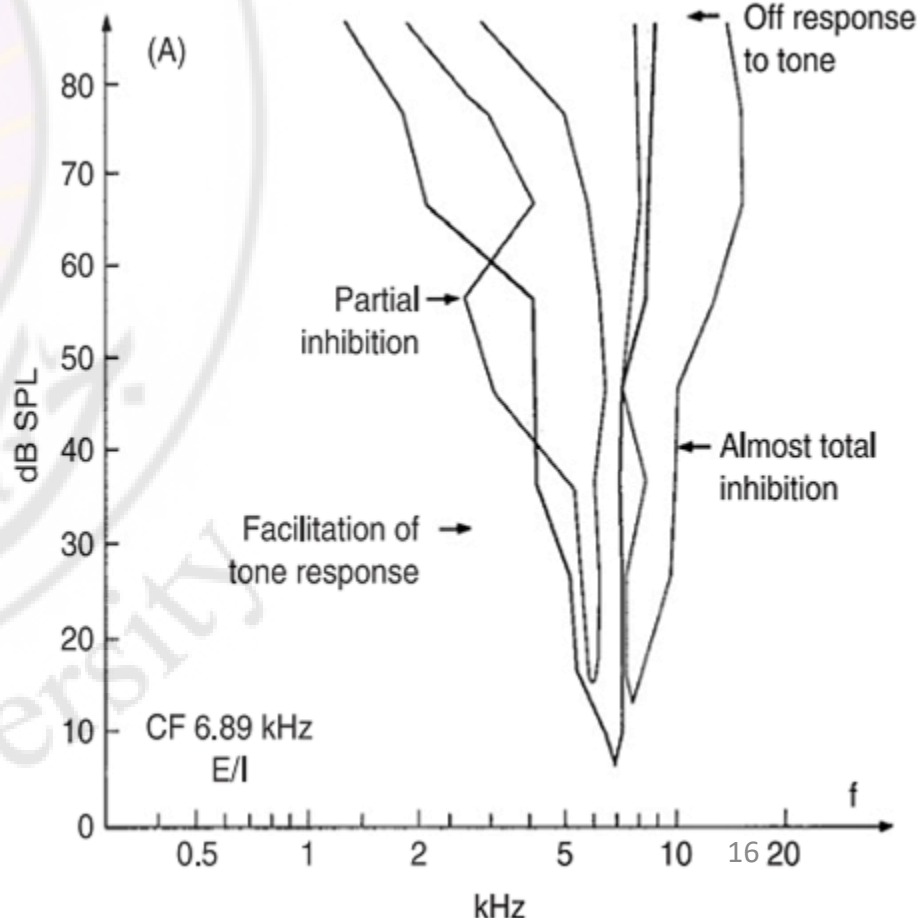
- عند الدراسة باستخدام الطرق التقليدية، فإن جميع الخلايا في نوى السبيل السمعي الصاعد بما في ذلك القشرة الدماغية السمعية تظهر انتقائية تواترية واضحة.
- وهكذا يبدو أن انتقائية التردد هي سمة بارزة لاستجابات الخلايا العصبية المفردة في جميع النوى السمعية.
- تكون منحنيات تنغيم النواة الحلزونية شبيهة بتلك المسجلة في ألياف العصب السمعي مع اختلاف طفيف في منحنيات الخلايا المتوضعة مركزيا في النواة كما يشاهد اختلاف طفيف في منحنيات تنغيم خلايا القشر السمعي أما التبدل الأهم والكبر فيلاحظ في منحنيات تنغيم المركب الزيتوني العلوي وأيضا في الأكيمة السفلية والجسم الركبي الأنسي.
- تكون منحنيات تنغيم الأكيمة السفلية أكثر حدة عادة.
- ينجك هذا الاختلاف في منحنيات التنغيم عن تفاوت درجات التشابك والتوزع بين الألياف المختلفة وتأثير المسارات التثبيية والتحريضية المتعددة.



Auditory nerve tuning curves

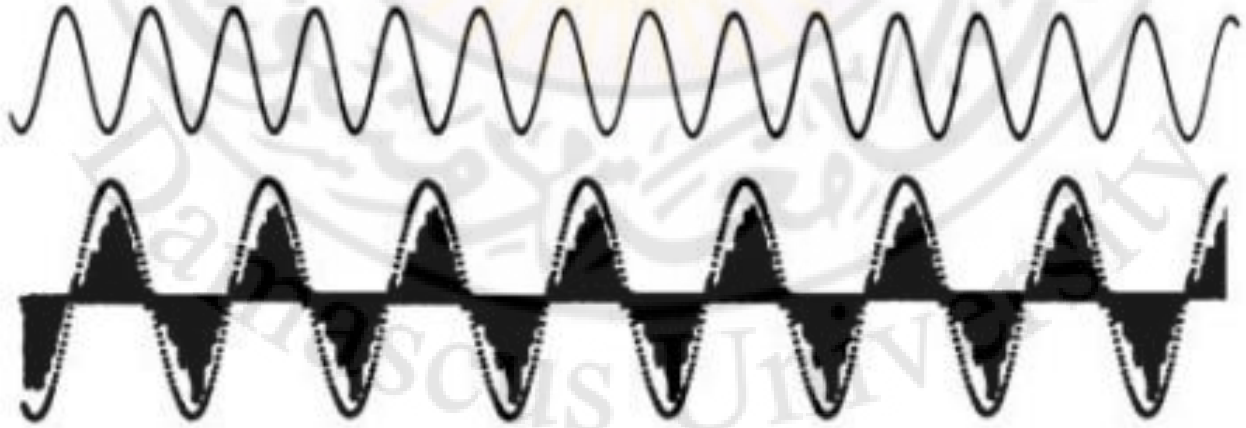


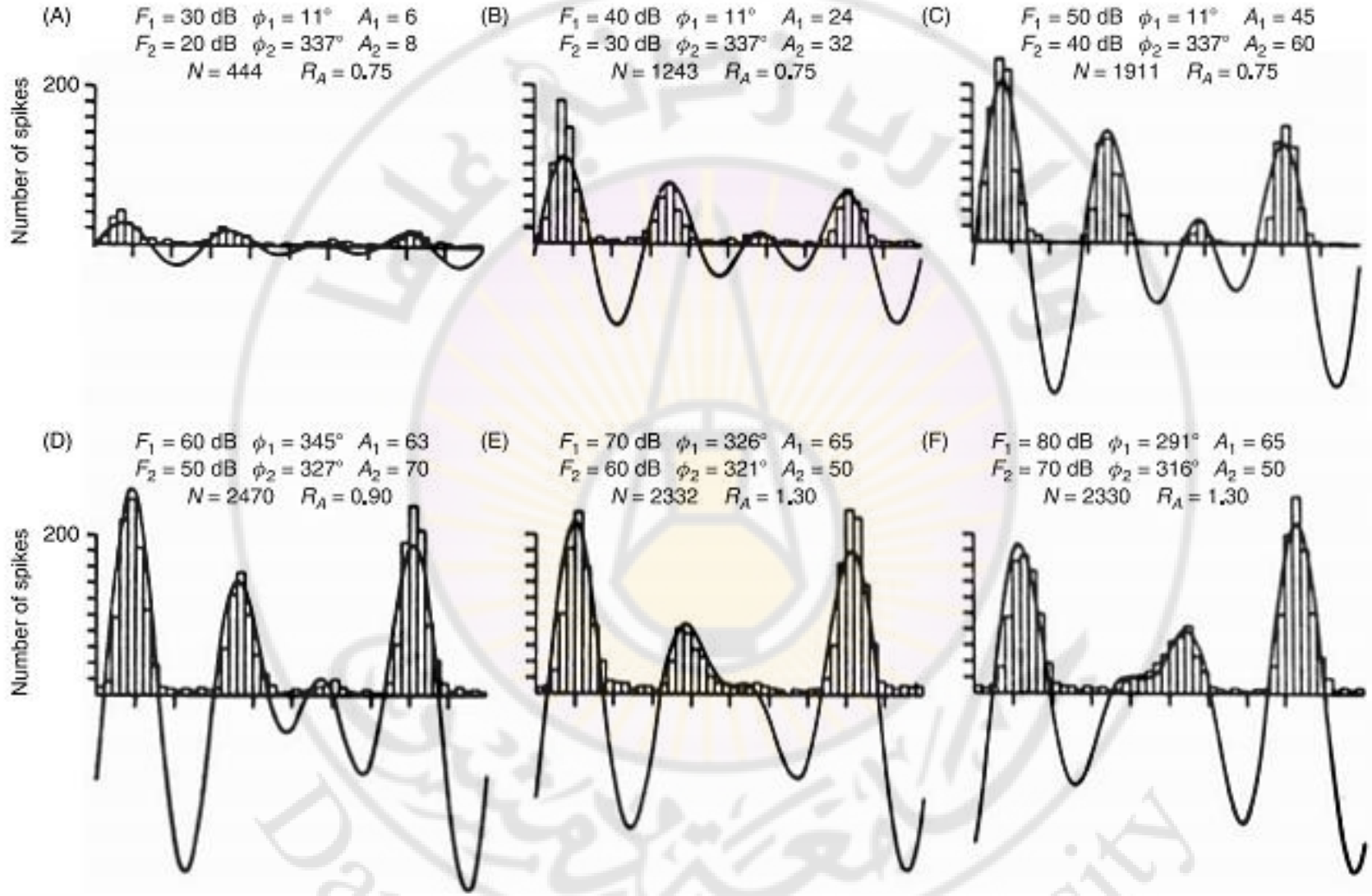
Inferior colliculus tuning curves



CODING OF TEMPORAL FEATURES

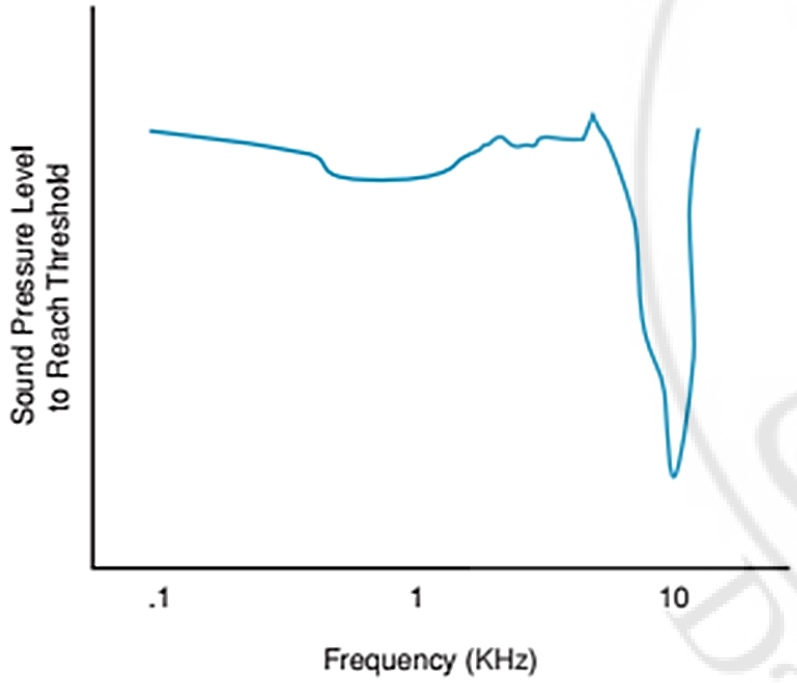
- هناك دليل كبير على أن العصب السمعي يزود الجهاز العصبي بترميز عصبي مقفل الطور Phase-locked على النمط الزمني لاهتزاز الغشاء القاعدي.
- إن قفل الطور لليف العصبي لمنبه بسيط يمكن التنبؤ به ودراسته ولكن هناك القليل من المعلومات هو هذه الخاصية للأصوات المركبة.
- إن مفهوم قفل الطور يعني أن تنحصر استجابة الليف العصبي في طور محدد للمنبه في حين يرسم مخطط استجابة الليف طيفا يتوافق مع شكل المنبه (وأوضح مثال هو قفل طور الليف العصبي السمعي لمنبه نغمة صافية).





Period histograms of discharges in a single auditory nerve fiber of a squirrel monkey to stimulation with two tones of different frequencies that were locked together with a frequency ratio of 3:4 and an amplitude ratio of 10 dB. The different histograms represent the responses to this sound when the intensity was varied over a 50-dB range.

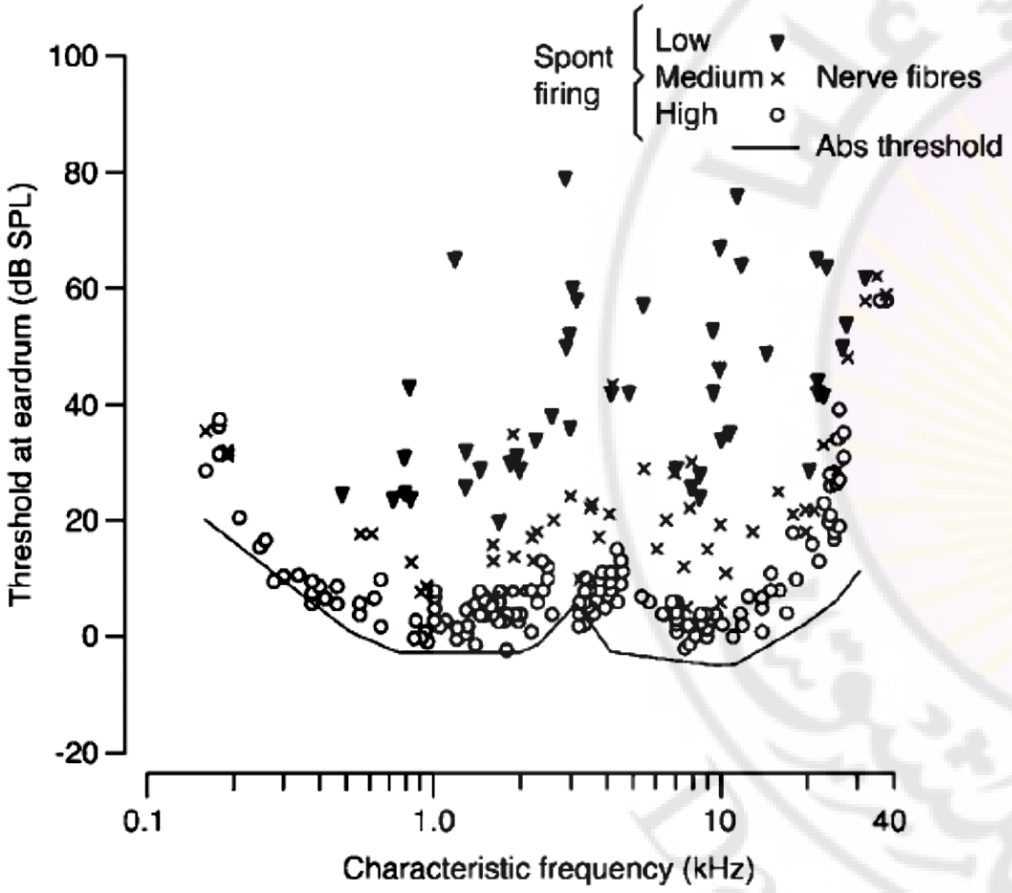
الاستجابة الكهربائية لليف العصبي السمعي



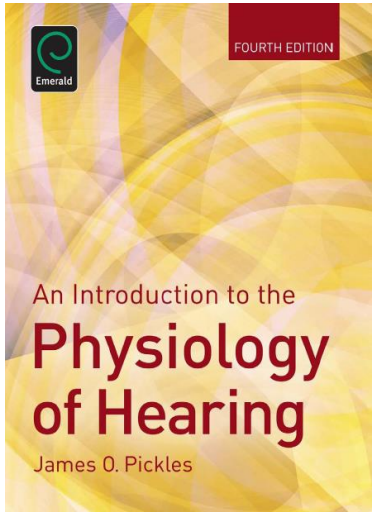
- هناك نوعان من ألياف العصب السمعي. ألياف ذات معدل تفعيل عفوي منخفض (عتبة عالية) high threshold وألياف ذات معدل تفعيل عفوي مرتفع high spontaneous rate (عتبة منخفضة) الأولى تحتاج لشدة تنبيه عالية لتتفعل وليس لها نشاط عفوي يذكر في حين أن الثانية تستجيب لأخفض المنبهات شدة وهي المسؤولة عن سماع الأصوات المنخفضة قرب العتبة السمعية، في حين تتفعل الألياف عالية العتبة عند ازدياد شدة المنبه.
- تتميّز الألياف منخفضة العتبة بانتقائية تواترية عالية فكل مجموعة من الألياف تختص بنقل إشارة كهربائية لمنبه صوتي ذو تواتر معين متوافقة بذلك مع التوزع التواتري للحلزون ويبدي مخطط تفعيل الليف العصبي ذروة حادة عند التواتر المخصوص.

(مثال: شكل مخطط تنبيه الليف العصبي 1000 هرتز).

ترميز الشدة في الليف العصبي السمعي

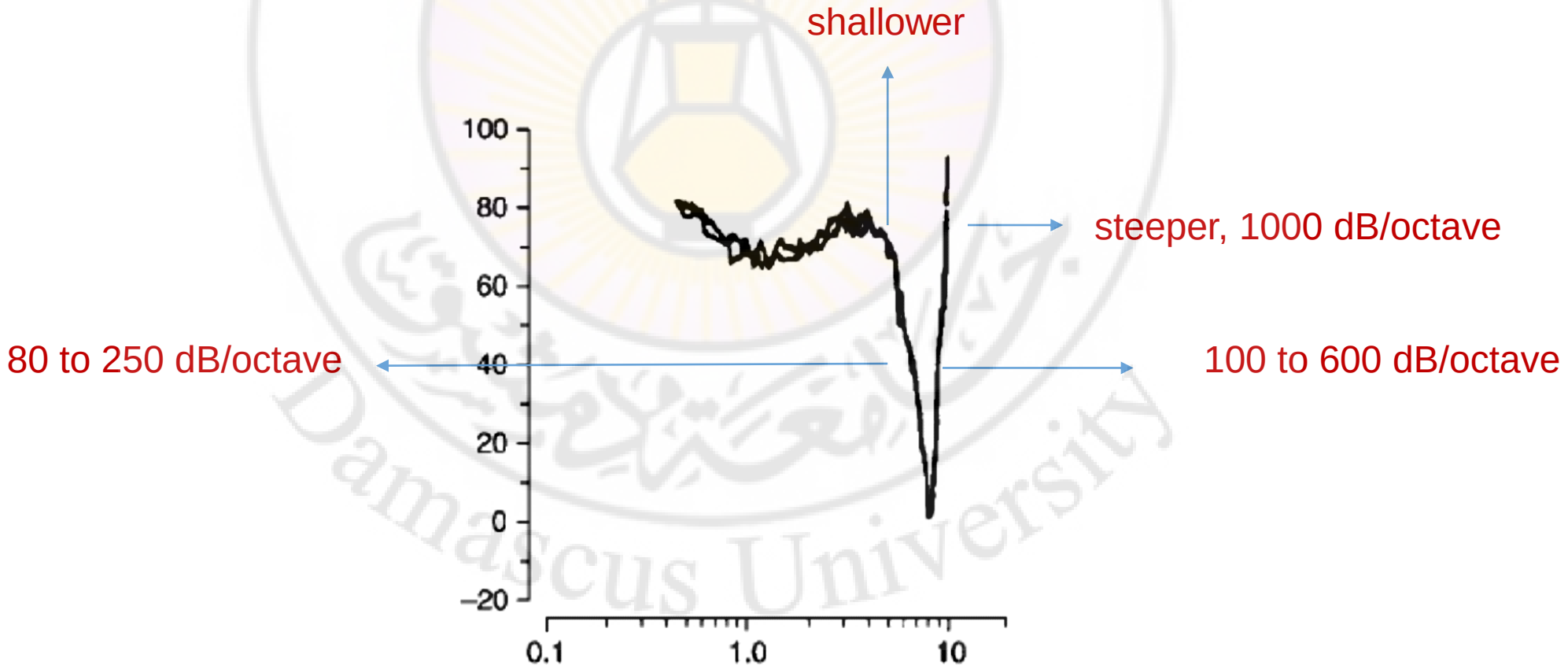


- هذا التنوع في معدل فعالية الألياف العصبية هو المسؤول عن حفظ ترميز التواتر في الألياف منخفضة العتبة وبنفس الوقت ترميز الشدة من خلال وجود نوعين من الألياف العصبية، حيث تستطيع الألياف منخفضة العتبة بالاستجابة للحد الأدنى من الاشارة الصوتية وعند ازدياد شدة المنبه بالتدريج يزداد معدل تنبيه هذه الألياف ليصل ذروته وعندها تبدأ الألياف مرتفعة العتبة بالتنبيه لتستجيب للأصوات العالية الشدة، حيث يسمى الفرق بين أخفض صوت يمكن سماعه وأعلى صوت مسموع يمكن تحمله بالمجال الحيوي الديناميكي Dynamic range والذي يعكس سلامة هذه الألياف.



The degree of frequency selectivity has been expressed in two ways:

- the first way: is by the slopes of the tuning curve above and below the characteristic frequency.



أي سؤال ؟؟

فيزيولوجيا التنفس

مقدمة:

يتطلب التنفس جهدا عضليّا وترتبط فعالية التنفس بمقدار ما يستطيع الفرد أن يتحكم بهذا الجهد العضلي بنجاح. تتبدل وظيفة التنفس بالتمرين، مع تقدم العمر، وفي الامراض المختلفة، وبالأخذ بعين الاعتبار أهميه التنفس في وظيفة الكلام يمكن القول: عندما يذهب التنفس يفقد التواصل الكلامي.

يستطيع الانسان أن يقوم بكلتا وظيفتي الشهيق العفوي الهادئ والشهيق القسري، وكذلك هناك ما يقابلها من زفير منفعل وزفير فاعل. في الزفير المنفعل فإننا نترك للقوى الكامنة في عضلات القفص الصدري أن ترجع لطبيعتها دون بذل جهد. وفي الزفير الفاعل فإننا نبذل جهدا عضليا أكثر من ذلك. تتركز الكتلة الأساسية لهذه القوى في عضلة الحجاب الحاجز حيث يؤدي تقلصها إلى الشهيق في حين تعود إلى وضعها الأصلي بالزفير. هناك نوعين من القوى المطبقة في وظيفة التنفس هما: المرونة **Elasticity** والجاذبية **Gravity**.

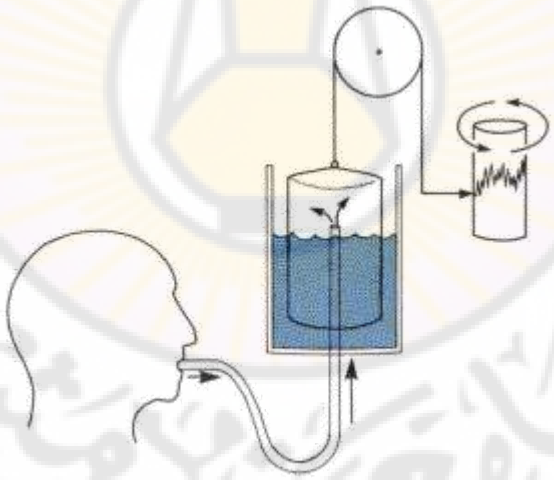
- في الطفولة الباكرة تكون الرئة تملأ القفص الصدري بحيث لايكون هناك فضاء اضافي لتمدد الرئة داخله. ورويدا رويدا مع نمو الطفل فإن أضلاع القفص الصدري تنمو أسرع من الرئتين ويتوسع القفص الصدري ويتشكل الضغط السلبي في جوف الجنب **pleura** سامحا بذلك للرئتين بإمكانية التمدد لتملأ الفراغ. يؤمن تمدد الرئتين سعة إضافية **capacity** ومخزون للتنفس **Reserve** وهذا الأمر موجود عند البالغ وليس عند الطفل، فالطفل يحتاج إلى شهيقين أو ثلاثة ليصل إلى نفس حجم شهيق البالغ.
- عند الشهيق يتم تمدد العضلات وتوسيع القفص الصدري وتباعد الأضلاع وعند استرخاء هذه العضلات تعود كل هذه البنى الى وضعها الطبيعي وهو المقصود به **elasticity.** في حين تدعم قوة الجاذبية الزفير المنفعل حيث تعيد قوة الجاذبية الأضلاع إلى وضعيتها بعد التمدد في حالة الوقوف او الجلوس. هناك ثالوث عزم الدوران**Torque** - الجاذبية والمرونة الذي يتحكم بآليات الزفير المتنوعة.

قياس التنفس:

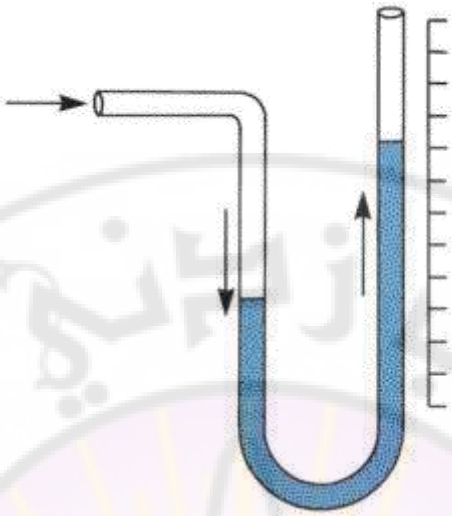
يتم تحديد كميه الهواء التي يتم تنفسها بشكل أساسي حسب الاحتياجات الجسدية. وتعمل فيزيولوجيا الكلام ضمن هذه الحدود.

يتم قياس التنفس بإحدى المفاهيم التالية: معدل التدفق - حجوم وسعات الرئة - الضغوط التنفسية.

يتم استخدام السبيروميتر spirometer لقياس كل من :الحجم، التدفق والسعات، يتألف مقياس النفس العادي من أنبوب متصل بحاويه يتم فتحها من الاسفل موضوعه داخل حاويه أخرى يملؤها الماء. وعليه يتم تحديد حجم التنفس من خلال مقدار انزياح الماء الذي يسبب نفخ الشخص في الانبوب. أما المانومترManometer فيستخدم لقياس الضغط. حيث ينفخ الشخص في أنبوب ليرفع سطح الماء في حاوية بحيث يزداد ارتفاع سطح الماء بمقدار ازدياد الضغط.



Spirometer: device used to measure respiratory volume



Manometer: device used for measuring air pressure differences

التنفس وظيفة حياتيّة:

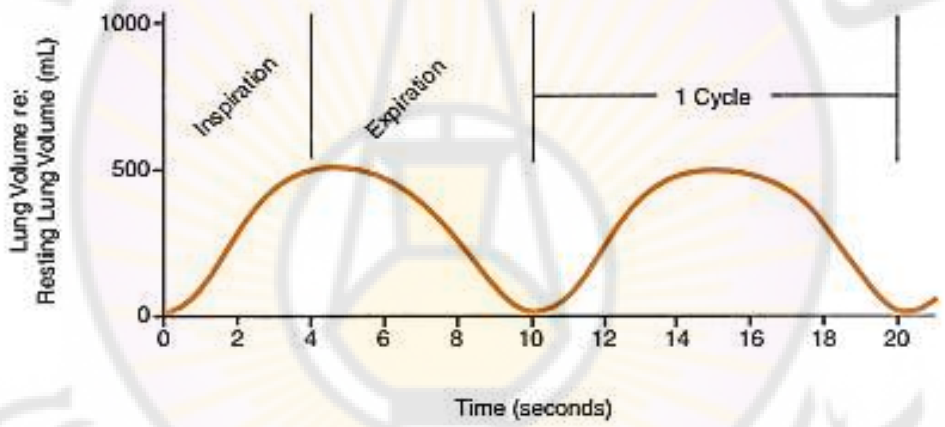
من الواضح جدا ان التنفس هو وظيفة حياتية، فلو اخذنا مثال السباح الذي يستطيع حبس النفس الماء لفتره معينه (طويله قليلا)وانه من خلال ذلك يدرك حدود جهازه التنفسي وانه يشعر بالذعر عندما يقترب من هذه الحدود. إن فهم مثل هذه الحدود يساعد في فهم آليه عمل جهاز التنفس ودوره في الكلام أيضا.

أثناء الشهيق يحدث تبدلات طفيفة في وضعيه البدن مع نتائج فزيولوجية كثيرة ومعقدة. حيث أن الهدف الاساسي لجهاز التنفس هو تأمين غاز الاكسجين وطرح غاز الكربون. إن المراحل الأربعة لهذا التبادل الغازي هي:

1. التهوية **ventilation**: وتعبر عن حجم الهواء الداخل إلى الرئتين.
2. التوزيع **distribution**: وفيه يتم توزيع الهواء الداخل على الأسناخ.
3. النضح أو الارتشاح **perfusion** : حيث يتم عبور الهواء عبر جدران الأسناخ.
4. الانتشار **diffusion**: وفيه يتم اختلاط المكونات والقيام بالتبادل.

الدورة التنفسية Respiratory cycle :

يستطيع الشخص البالغ أن ينجز 12-18 دورة تنفسية في الدقيقة خلال التنفس الهادئ.
تعرف **الدورة التنفسية** بأنها تتألف من عملية شهيق واحدة وعملية زفير واحدة تالية.
في الدورة التنفسية الهادئة يتم جريان حوالي نصف ليتر (٥٠٠مل) غاز بين الشهيق والزفير بما يعادل بحساب سريع حوالي ٦٠٠٠-٨٠٠٠مل (٦-٨ليتر) غاز في الدقيقة.
يسمى حجم الهواء المستخدم في الدقيقة التنفسية الكاملة بحجم التنفس **minute volume**.



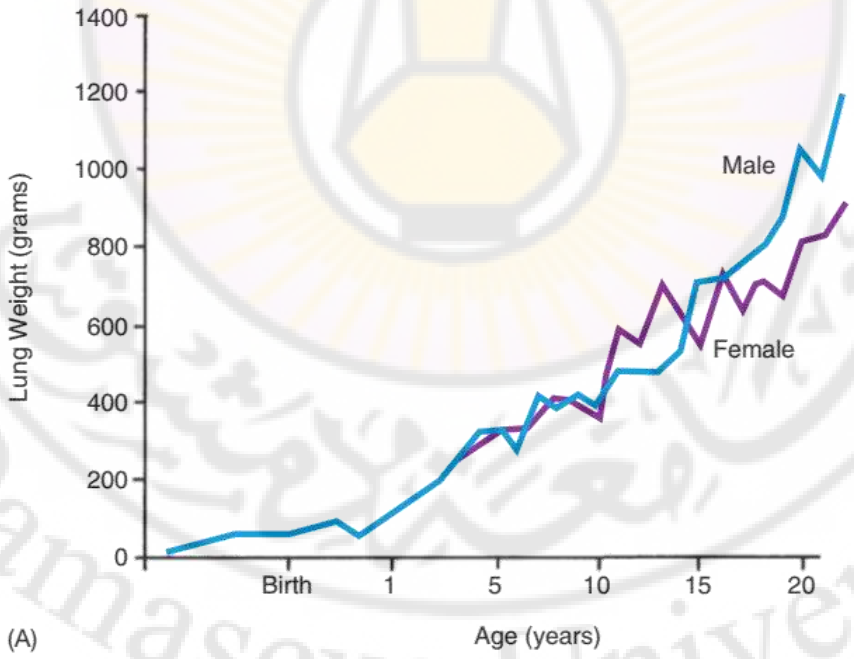
-التبدلات التطورية لجهاز التنفس:

- إن تطور الرئة تشريحيا ووظيفيا منذ الولادة وحتى البلوغ يشمل سعة الرئة - حجم القفص الصدري - عدد الاسناخ، وهذه التبدلات تختلف بين الذكور والاناث بعد سن البلوغ.
- إن اختلاف طول وقطر الطرق التنفسية يجعل الفرق واضح بين عدد مرات التنفس عند الوليد 40 -70/د والتي تتناقص تدريجيا لتصل الى معدل تنفس البالغ 12-18/د

Respiration rate in breaths per minute as a function of age.

AGE	RESPIRATION RATE (bpm)
Newborn	60
1 year	30
2 years	25
3 years	24
5 years	20
10 years	18
15 years	18
20 years	17

من نتائج هذا التطور أيضا إضافة لازدياد الحجم عند البالغ هو تشكل حجم متبقي لا يمكن زفيره يسمى **بالحجم المتبقي Residual volume** وهذا الحجم يساعد في تامين السعه الاحتياطية للتنفس عند البالغ والتي تعد غير موجودة عند الطفل.



الحجوم والسعات التنفسية:

1-الحجوم الرئوية:

أ-الحجم الجاري Tidal volume (TV) هو حجم الهواء المستنشق او المزفور في كل نفس سوي، ويبلغ نحو 500مل عند الرجل البالغ المتوسط القد.

ب-حجم الشهيق المدخر Inspiratory reserve volume (IRV) هو أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها زيادة على كمية الحجم الجاري السوية وهي عادة تعادل 3000 مل تقريبا.

ج-حجم الزفير المدخر Expiratory reserve volume (ERV) هو :
أقصى كمية هواء يمكن إخراجه بزفير جهدي بعد نهاية الزفير الجاري السوي، وهي تعادل نحو 1100 مل في الحالات السوية.

د-الحجم الثمالي Residual volume (RV) هوحجم الهواء الذي يبقى في الرئتين بعد الزفير الجهدي الأقصى ويعادل وسطيا نحو 1200مل.

2-السعات الرئوية:

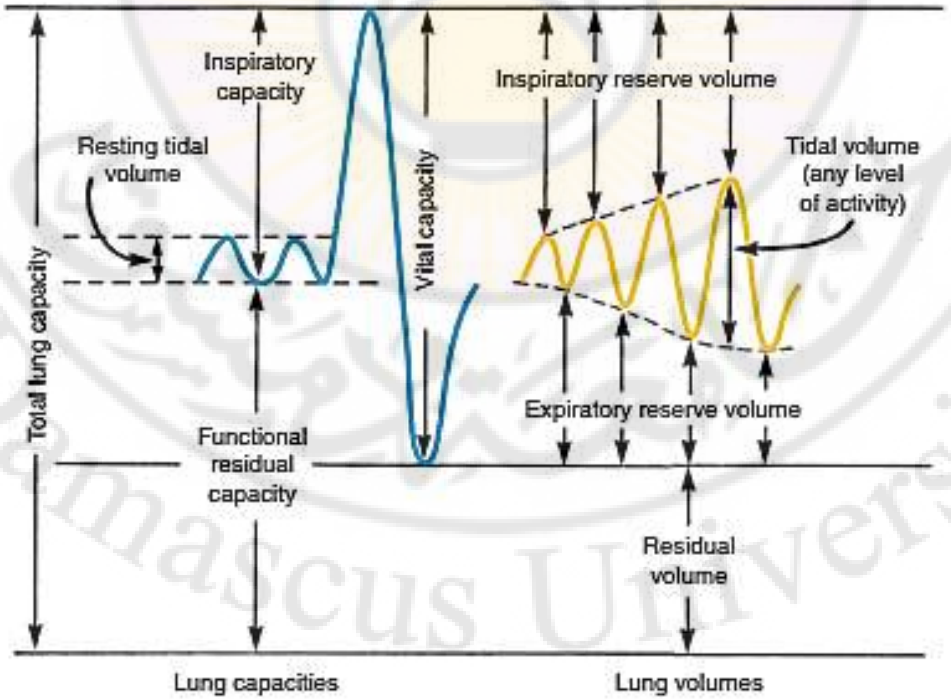
أ-السعة الشهيقية Inspiratory capacity (IC) وتعادل الحجم الجاري مع حجم الشهيق المدخر، وهي أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها ابتداء من مستوى الزفير السوي، وتعادل نحو 3500مل.

ب-السعة الوظيفية المدخرة Functional residual capacity (FRC) :
وتعادل حجم الزفير المدخر مع الحجم الثمالي، وهي كمية الهواء الباقية في الرئتين، وتعادل نحو 2300 مل عند نهاية الزفير السوي.

ج-السعة الحياتية Vital capacity (VC) وتعادل حجم الشهيق المدخر مع الحجم الجاري مع حجم الزفير المدخر. وهي أكبر كمية هواء يمكن للشخص أن يخرجها من رئتيه بعد شهيق قسري، وتعادل نحو 4600 مل.

د-السعة الكلية للرئة Total lung capacity (TLC) وهي أكبر حجم يمكن أن تتمدد اليه الرئتان باستخدام أكبر جهد تنفسي ممكن وتبلغ نحو 5800مل. وهي تعادل السعة الحياتية مضافا اليها الحجم الثمالي.

VOLUME/CAPACITY	MALES (in CC)	FEMALES (in CC)	AVERAGE (in CC)
Resting tidal volume	600	450	525
Inspiratory reserve volume	3000	1950	2475
Expiratory reserve volume	1200	800	1000
Residual volume	1200	1000	1100
Vital capacity	4800	3200	4000
Functional residual capacity	2400	2700	2550
Inspiratory capacity	3600	2400	3000
Total lung capacity	6000	4200	5100



ضغوط السبيل التنفسي Pressures of the respiratory system

هناك خمس ضغوط في الجهاز التنفسي مخصصة للوظيفة الكلامية والغيركلامية وهي الضغط السنخي **Alveolar.p**، الضغط داخل الجنب **Intrapleural.p** ، الضغط تحت المزمار **Subglottal.p**، الضغط داخل الفموي **Intraoral.p**

والضغط الجوي **atmospheric pressure.**

ويقدر الضغط الجوي ب ٧٦٠مم زئبق ويشكل القيمة المرجعية لكافة الضغوط التنفسية ويعطى قيمة الصفر المرجعي.

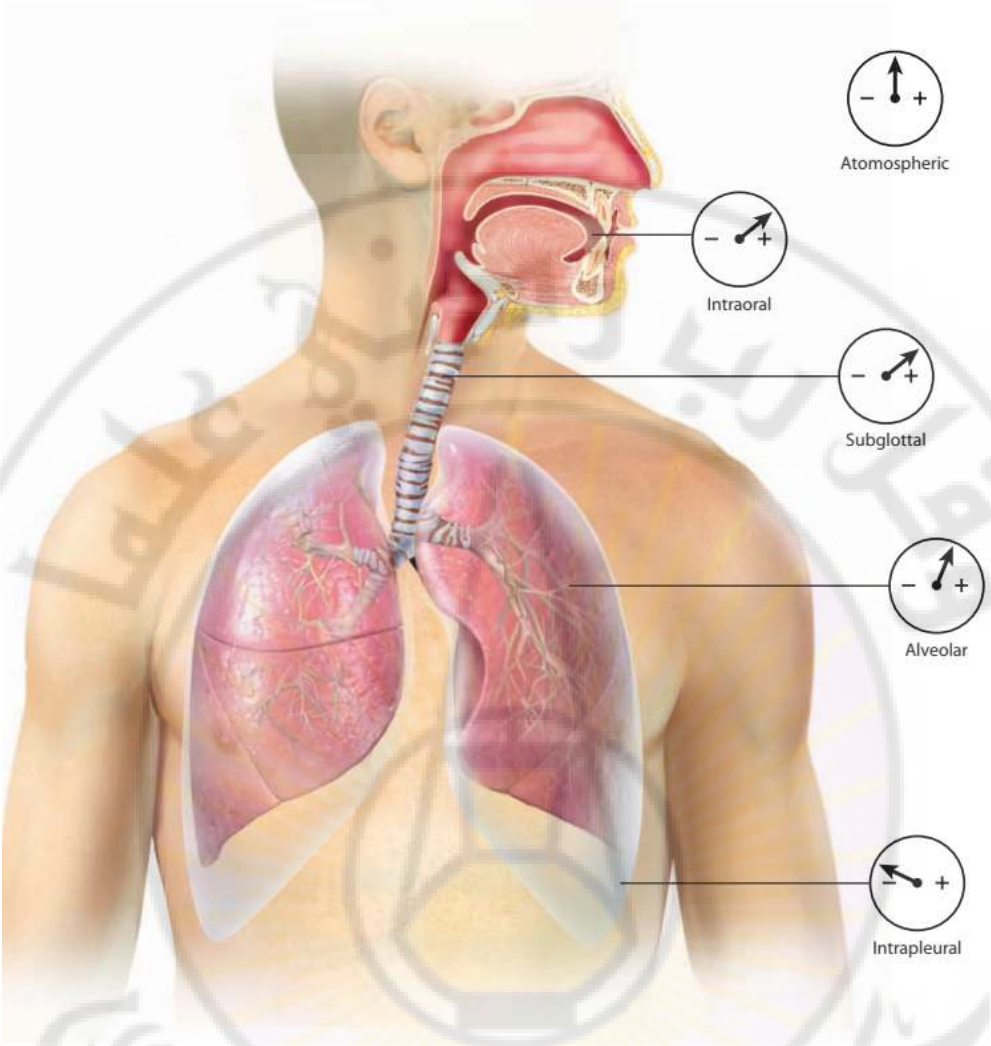
الضغط الفموي mouth pressure (pm) أو الضغط داخل الفم وهو الضغط الذي يمكن قياسه داخل الفم.

الضغط تحت المزمارPS: وهو الضغط أسفل الحبال الصوتية.

الضغط السنخي Al.P: هو ضغط الهواء المقاس على مستوى الأسناخ الرئوية.

الضغط الجنبي PL.P:هو الضغط بين طبقات الجنب المغلقة للرئتين.

- تقاس جميع هذه الضغوط مرجعيا نسبة للضغط الجوي، فعندما نقول الضغط السنخي مثلا + ٣سم ماء فإننا نعني أنه تم توليد ضغط داخل الأسناخ يفوق الضغط الجوي ب٣سم ماء.



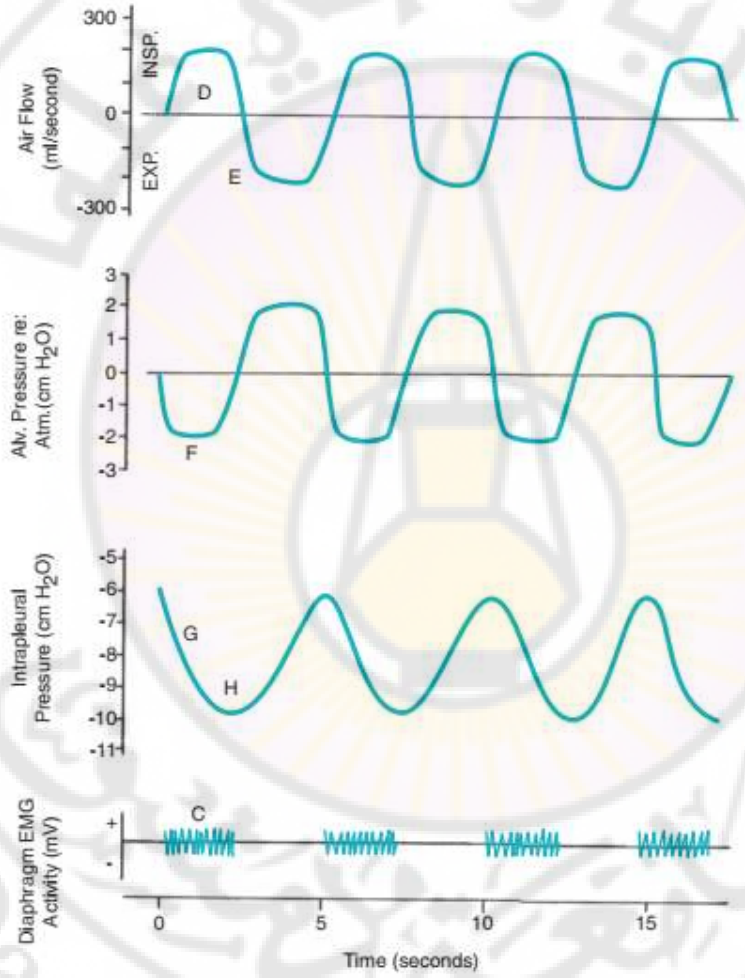
- عند التنفس الهادئ يتمدد الحجاب الحاجز للأسفل مسببا تشكل ضغط سلبي نسبي داخل الأسناخ يقدر ب - ٢سم ماء نسبة للضغط الجوي الأمر الذي يؤدي لدخول الهواء الى الأسناخ خلال الشهيق وارتفاع الضغط داخلها الى + ٢سم ماء الاعلى من الضغط الجوي مسببا خروج الهواء بشكل منفعل أثناء الزفير.
- يعتبر الضغط الفموي والضغط تحت المزماري من الضغوط الهامة أيضا في عمليات الشهيق والزفير.
- يتعلق الضغط تحت وفوق المزماري بشكل مباشر بالتبدلات الضغطية داخل الرئة عندما يكون المزمار مفتوحا.

- عندما تسحب الرئتين الهواء في الشهيق، يكون هذين الضغطين سلبيين. وأثناء الزفير يصبحان إيجابيين. ولكن هذه الصورة الواضحة لتبدل الضغط تصبح أكثر تعقيدا عندما يكون المزمار مغلقا.
- عندما نغلق المزمار من أجل التصويت **phonation voicing** فإننا نطبق انغلاقا واضحا في مسير جريان الهواء في المجاري التنفسية العلوية. يسبب إغلاق المزمار ارتفاع آني في الضغط تحت المزمار مع استمرار الرئتين بالزفير وبنفس الوقت ينخفض الضغط الفموي ليقارب الضغط الجوي مما يسبب تشكل فارق كبير بالضغط بين الضغطين (فوق المزمار _تحت المزمار). وعندما يصل هذا الضغط الى مستوى 3-5 سم ماء فإن الحبال الصوتية تنتقل لوضعية الانفتاح ويبدأ التصويت.
- هذا الفارق بالضغط يشكل ضغطا حاسما **critical pressure** لأنه يشكل المتطلب بالحد الأدنى للتنفس من أجل الكلام.
- إن متطلبات التنفس الكلامي والتنفس الغير كلامي متفاوتة بشكل كامل. فمتطلبات غير الكلامي تتلخص بتأمين حجم كافي للتبادل الغازي لتأمين المتطلبات الاستقلابية للجسد.
- عندما نريد التحدث فإننا نقوم بالتحكم بتنفسنا وعليه وجد الباحثون انه عند الاستعداد للكلام نقوم بتهيئة الصدر ليأخذ وضعية مناسبة لشهيق إضافي وكافي لتأمين الاعتبارات العروضية للكلام Suprasegmentals وعادة تفوق هذه الحجوم تلك المأخوذة في التنفس لغير غرض الكلام.
- <u>يمكن استعراض هذه الآلية للضغوط الحاسمة كالتالي:</u>

1. أثناء الكلام يتم التحكم بالعمليات التنفسية لتعاكس الضغط الجوي الثابت نسبيا.
2. يؤدي انقباض الحجاب الحاجز والعضلات الشهيقية لانخفاض الضغط الجنبي بشكل ملحوظ مما يؤدي الى توسع الرئتين.
3. عندما تتمدد الرئتان يهبط الضغط السنخي نسبيا للضغط الجوي مسببا دخول الهواء.
4. عندما تسترخي العضلات الشهيقية ويعود الحجاب الحاجز الى وضعه المرتفع يسمح للقفص الصدري والرئتين بالعودة الى وضعها الأولي مما

يجعل الضغط داخل الجنب يرتفع (ولكنه يبقى سلبيا) ويرتفع الضغط السنخي نسبيا للضغط الجوي مسببا خروج الهواء من الرئتين.

5. هده التبادلات الزفيرية تتبع قانون المرونة - بحيث بمقدار ما تطبق قوى لتمدد الصدر والرئتين تكون القوة اللازمة لعودة الرئتين والصدر لوضعها معادلة لها.



• **تجربة:** قم بتجربة أخذ نفس وحبسه وراقب مقدار التشنج العضلي اللازم لحبس النفس، ثم قم بأخذ نفس إضافي وقم بملاحظة الضغط الزائد، ثم قم بزفر الهواء ببطىء شديد وحاول تحسس المقاومة الحاصلة في العضلات التنفسية (يجرى هذا التمرين والعين مغلقة).

التنفس من أجل الكلام Respiration for speech:

- يتطلب التنفس لغرض الكلام الحفاظ على معدل جريان ثابت نسبيا للهواء بضغط ثابت نسبيا **Steady flow at steady pressure**، وهذا أمر يعد بالغ الصعوبة بالنسبة لجهاز مخصص بتبادل الهواء بشكل دوري داخل وخارج تجويف.
- تتطلب الحبال الصوتية حداً أدنى من الضغط تحت المزمار يقدر ب 3-5 سم ماء للقيام بهذه الوظيفة.
- ان العنصر الاكثر أهمية وفعالية في التنفس يتمثل في تأمين الطاقة الكافية لحفظ السعة الحيوية VS بحدود قريبة من الحجم الرئوي عند الراحة RLV.
- بالتالي عندما نريد زيادة الحجم الشهيقي فوق مستوى RLV فإن ذلك يتطلب جهد عضلي إضافي وبالتالي تقلص المزيد من العضلات التنفسية إلى طاقتها العظمى. ولكن لا يمكن أن تبقى العضلات في هذه الحالة لوقت طويل لأنها ستخسر الكثير من الطاقة وبالتالي فإنها تميل الى حفظ السعة الحيوية للمحادثة قريبة من السعة الحيوية للراحة والتي تتراوح بين 35-60% من السعة الحيوية ونعمل بالمقابل على زيادة الحجم الشهيقي RLV ونبقى بعيدين قدر الإمكان عند الحدود العظمى.
- الكلام العالي يتطلب شهيق أكبر وبالتالي تستخدم حجوم تصل الى 80% من السعة الحيوية.

كيف يمكن الحفاظ على الضغط تحت المزمار؟

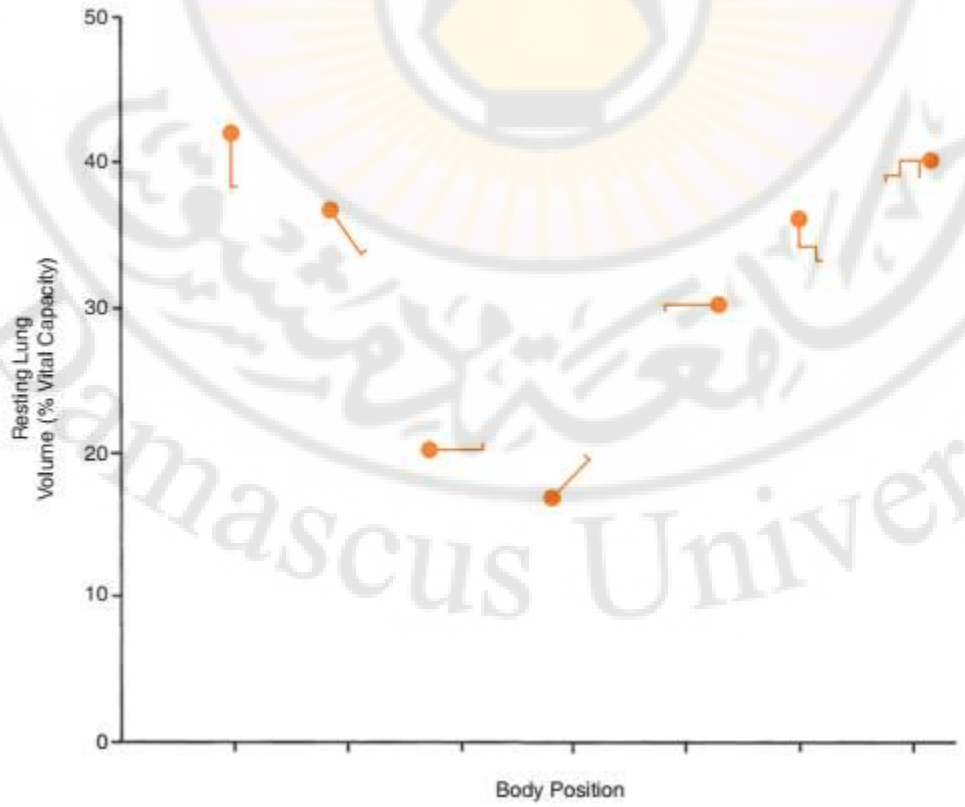
يتشكل هذا الضغط بصورة مباشرة من القوى الزفيرية والتي تكون منفعلة كليا عندما يتجاوز ٣٨% من السعة الحيوية. وبالتالي فإن الضغط تحت المزمار يتشكل بشكل أساسي من القوى الزفيرية المؤلفة من المرونة والجاذبية.

تستخدم العضلات الشهيقية لضبط جريان الهواء المزفور إضافة الى دورها البدئي في الشهيق وبالتالي تساهم بشكل أساسي بالتحكم بالضغط تحت المزمار والحفاظ عليه ضمن مستويات ثابتة لازمة للتنظيم الدقيق لعملية التصويت**phonation**.

تأثير الوضعية على الكلام Effect on posture on speech

تعتبر وضعية الجسم عامل هام ومساهم في فعالية التنفس، وأي حالة تؤثرعلى الوضعية بإمكانها التأثير على التنفس. عندما تتغير وضعية الجسم من الوقوف إلى الجلوس فالإضطجاع تتبدل البنى الفيزيائية وقوى الجاذبية للجهاز التنفسي. أثناء الجلوس يتم ضغط أحشاء البطن للأسفل مما يساعد في الشهيق وأيضا يمكن دفع الأضلاع للأسفل لتساعد في الزفير. أما عند الاضطجاع تنتشر الأحشاء للأسفل باتجاه العمود الفقري وهنا لا يتم مساعدة لا الشهيق ولا الزفير ويصبح من وظيفة العضلات التنفسية أن ترفع كل من القفص الصدري والبطن معا لتأمين التنفس عكس الجاذبية. وهنا يتم تخصيص قسم كبير من السعة للعمل عكس الجاذبية وتبقى سعة أقل بكثير من المعتاد للتنفس بغرض التصويت.

- قم بالتنفس بوضعية الجلوس مثلا أصدر الصوت A بشكل ممتد ثم انتقل لوضعية الاضطجاع وكرر نفس الصوت وقارن فرق مدة التصويت بين كلا الوضعيتين.
- من هذه التجربة نستنتج أن أفضل وضعية للتنفس والكلام هي وضعية الانتصاب (جلوس-وقوف)، بينما الوضعيات الأخرى تتطلب جهدا عضليا إضافيا.



الضغوط التنفسية Pressures of speech :

هناك مستويين من الضغوط ينجزها الجهاز التنفسي افتراضيا في نفس الوقت.

المستوى الأول: هو الضغط الثابت نسبيا المؤمن لثبات الضغط تحت المزمار واللازم لتحريك الطيات الصوتية. حيث يجب الحفاظ على ثباتية هذا الضغط لنتمكن من استمرار التصويت بشدة ثابتة غير متناقصة. الحد الأدنى للضغط اللازم لفتح الحبال لبدء التصويت يقارب 3-5سم ماء. يتطلب الكلام في حالة المحادثة ضغط يعادل 10-7سم ماء. في حين يحتاج الكلام المرتفع لضغوط أعلى.

المستوى الثاني : هو الضغط اللازم لتأمين السيطرة على الجزيئات الكلامية كالتشديد وغيرها والتي يتم من خلال تبدلات في الضغوط وتعديل الحنجرة حيث تستخدم عند الضرورة الكلامية. حيث تحدث تبدل ضغط Bursts انفجارات سريعة وقصيرة تسبب تغيرات في شدة وطبقة الصوت خلال عشر الثانية فقط ويتم تأمينها من خلال زيادة مفاجئة في الضغط تحت المزمار بحدود 2 سم ماء لتامين التشديد. حيث تبقى العضلات التنفسية في حالة من المقوية التقلصية المتدرجة خلال الزفير مما يسمح بتحقيق أمرين:

***الأول :** تكون جاهزة لتأمين المزيد من التعديلات الضغطية السريعة لتأمين متطلبات الكلام.

***الثاني والأهم :** أن هذا التقلص الجزئي المداوم للعضلات البطنية يمكنه من سحب الأحشاء البطنية وعضلات الصدر لتأمين التبدلات اللازمة للاعتبارات العروضية للكلام كالتشديد وغيرها.

- في الدورة التنفسية العادية يشكل الشهيق 40% من الدورة و60% للزفير، فلو تخيلنا ذلك في المحادثة سنحصل على 6 ثوانٍ من الكلام تتلوها 4 ثواني من الراحة الأمر الذي يعتبر غير منطقي ويسبب التشتيت في الكلام.
- يقوم النموذج المعدل للتنفس الكلامي على تأمين زفير طويل متناقص تدريجيا لتأمين جمل طويلة ومناسبة يتخلله عمليات شهيق سريعة وقصيرة لتأمين الاستمرار السلس للمحادثة دون تقطيع لتصبح حصة الشهيق 10%من الدورة التنفسية ويبقى 90% للزفير الكلامي.

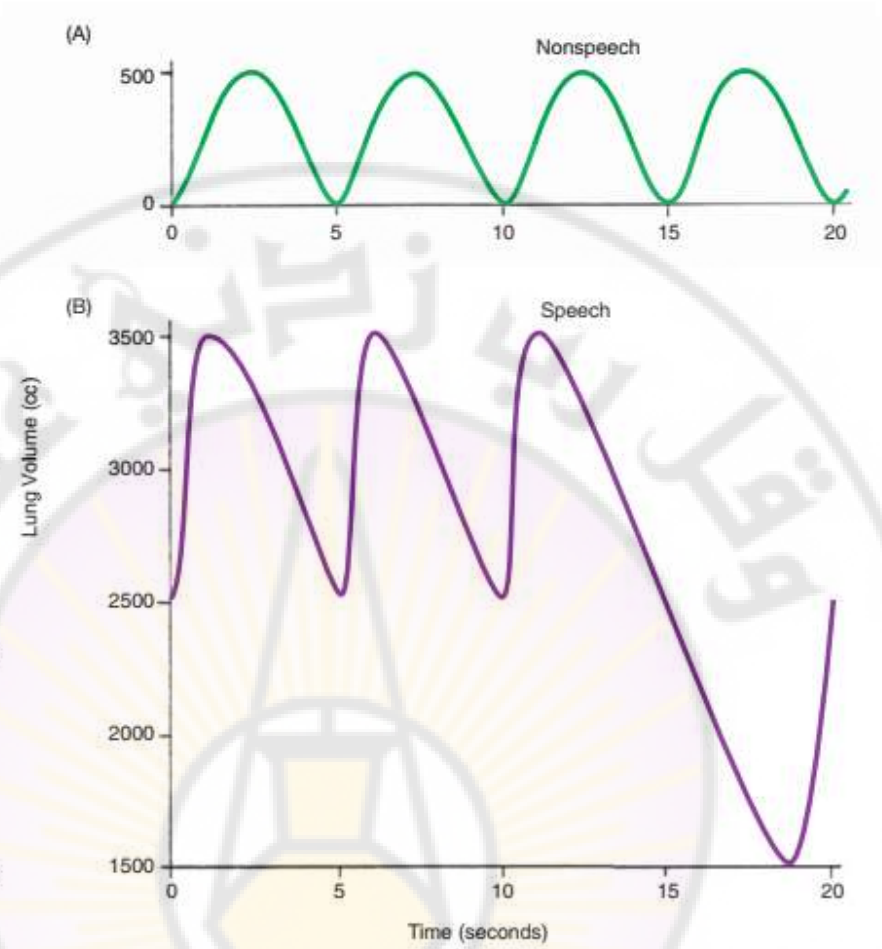


Figure 3-13. Modification of respiratory cycle during speech compared with nonspeech respiratory cycle. (A) This trace represents quiet tidal respiration, with volume related to resting lung volume. (B) This trace is related to total lung capacity. The speaker rapidly inhales a markedly larger volume than during quiet tidal inspiration and then slowly exhales the air during speech. Note that inspiration occurs with the same timing in both speech and nonspeech, but that the expiratory phase is proportionately longer during speech. In the final portion of the trace, the speaker is called on to speak on expiratory reserve volume.

Source: Delmar/Cengage Learning

- يجدر الذكر أنه في هذا النموذج المعدل للتنفس الكلامي لا تتغير الحجوم التنفسية المأخوذة واللازمة للحاجات الاستقلابية وإنما التعديل زمني فقط. مما سبق تكتمل الصورة الكاملة لفيزيولوجيا التنفس الكلامي وتبقى نقطة الحفاظ على ثباتية الضغط تحت المزمار.
- **تمرين:** بعد شهيق مناسب قم بإجراء زفير عفوي وتحدث (يمكنك ذكر كلمتين ليس أكثر)، الآن حاول أن يكون الزفير أطول بدون تأمين استرخاء كامل للعضلات الشهيقية. في هذه الحالة يمكن أن تلاحظ بسهولة الجهد العضلي المبذول لتقييد جريان الهواء المزفور.
- تسمى عملية ضبط خروج الهواء أثناء الزفير الكلامي بفعل التفحص checking action وهي تعني مقاومة خروج الهواء بعد تمدد الرئة الشهيقي وذلك من خلال استمرار تقلص العضلات الشهيقية وعدم استرخائها.

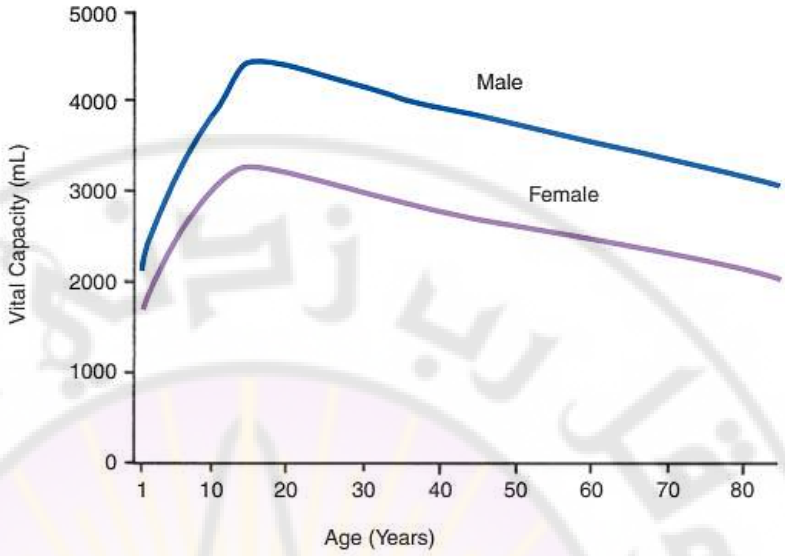
- يعتبر فعل التفحص هاما جدا في التحكم بالتنفس أثناء الكلام لأنه يحدد بشكل مباشر إمكانية التحكم بجريان الهواء المزفور عند الشخص. وعند حدوث ضعف عضلي تنفسي او شلل يضطرب هذا الفعل بشكل كبير ويصبح الشخص غير قادر على التحكم بالزفير لتأمين كلام فعال ويتحول الكلام إلى انفجارات سريعة وقصيرة. إذ يقوم فعل التفحص بتأمين الحفاظ على جريان ثابت للهواء الخارج والمطبق على الحبال الصوتية والذي من خلاله يتم التحكم بشكل أساسي بالضغط تحت المزمار اللازم للتصويت Phonation.

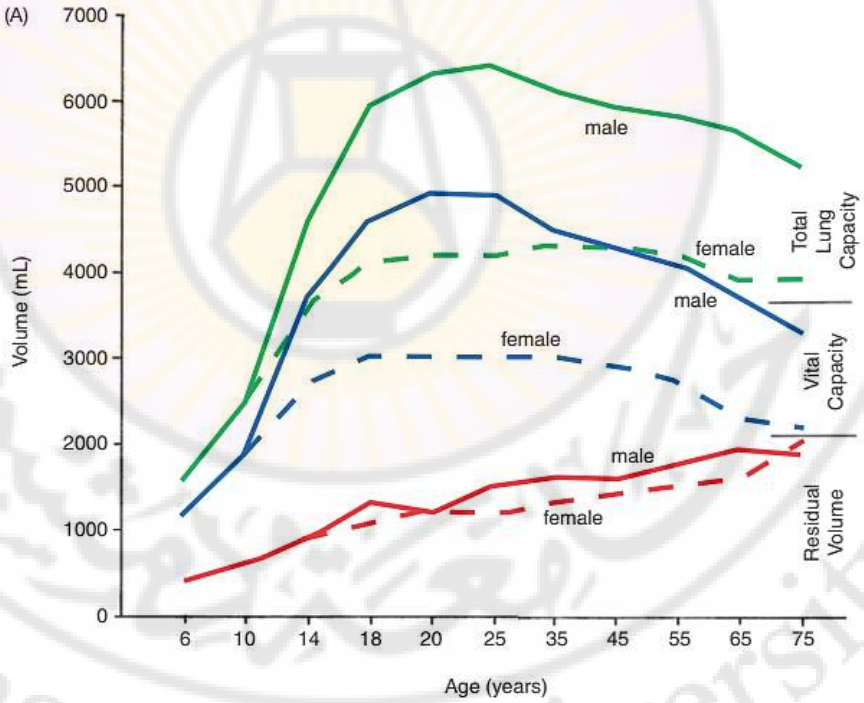
- من خلال فعل التفحص يمكن تأمين كلام هادئ وسلس من خلال أخذ شهيق مناسب وحفظ نسبة 38% الأساسية للكلام ويتم تأمين ذلك كما أسلفنا من خلال تقلص العضلات الشهيقية ولكن عند الحاجة للاستمرار بالكلام لفترة أطول وتتجاوز بذلك نسبة ال 38% فعلينا تأمين جهد زفيري إضافي يؤمنه تقلص العضلات الزفيرية لنكون بذلك نعمل على حساب الحجم الزفيري الاحتياطي. وهنا تنقص سلاسة الكلام.

- **قم بالتجربة التالية لفهم ما سبق :** قم بأخذ شهيق عميق ثم أصدر الصوت A بشكل ممتد دون استخدام العضلات البطنية وإنما فقط عضلات الصدر. ثم قم بتكرار نفس التجربة ولكن في هذه المرة يمكنك استخدام العضلات الزفيرية حيث ستلاحظ ان زمن التصويت ازداد بمقدار 40-50% بفضل استخدام المخزون الزفيري الأمر الذي يمارسه معظم المحاضرين والمعلمين والمغنيين أيضا.

- علينا التذكر دائما أن استخدام المخزون الزفيري لا يمر بدون تكلفه فهناك جهد مبذول لهذه العملية ويزداد هذا الجهد بمقدار ازدياد حجم الشهيق المأخوذ بسبب ازدياد حجم القوى التي يتوجب على فعل التفحص التغلب عليها والتحكم بها.

- ادرس بتروي المخططات التالية: قارن تأثير العمر والجنس على السعة الحيوية وبالتالي على وظيفة التنفس لأجل التصويت، هل لارتفاع الجسم (الطول) أثر ايضا؟


Vital Capacity (mL)
5000
4000
3000
2000
1000
0
Male
Female
1
10
20
30
40
50
60
70
80
Age (Years)


(A)
Volume (mL)
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
male
female
male
female
male
female
Total Lung Capacity
Vital Capacity
Residual Volume
6
10
14
18
20
25
35
45
55
65
75
Age (years)

جامعة دمشق
كلية العلوم الصحية

فيزيولوجيا التمفصل والرنين 1 + 2

Physiology of Articulation & Resonation

مقرر تشريح وفزيولوجيا السمع والنطق

2022 - 2021

د سامر محمد محسن

نظرية المنبع – مرشح في إنتاج الصوائت
Source-Filter Theory in Vowels Production

- تقوم النظرية على مبدأ أساسي هو أن الصوت يتم توليده من منبع التصويت (اهتزاز الطيات الصوتية) ثم يعبر في المسار الصوتي vocal tract ليعطيه شكل الصوت الكلامي.
- إن أي تغير في شكل أو تموضع المسار الصوتي (اللسان – الحنك الرخو – الفك وغيرها من أعضاء التمفصل) تسبب تغيرا في رنين الصوت العابر للمسار.
- يتألف المسار الصوتي vocal tract من مجموعة أنابيب مفتوحة على بعضها الأخر وهي التجويف الفموي – جوف البلعوم – و جوف الأنف.
- تجربة النفخ بالزجاجة (قنينة) وتغير تواتر الصوت الصادر كلما ازداد امتلاؤها.
- التواتر الطنيني أو تواتر الرنين لجوف معين: وهو تواتر الصوت الذي يستجيب له هذا الجوف أفضل ما يمكن.

resonant frequency: *frequency of stimulation to which a resonant system responds most vigorously*

Damascus University

نظرية المنبع – مرشح في إنتاج الصوائت
Source-Filter Theory in Vowels Production

- يمكن اعتبار الجوف بأنه هو الفلتر الذي يسمح لتواتر واحد بالعبور في حين يرفض التواترات الأخرى أو لا يعززها.
- عند تجربة النفخ في الزجاج، تم تقديم طيف واسع من التواترات في جريان الهواء المزفور في حين تم اختيار تواتر واحد للعبور وهو الذي يناسب التواتر الطنيني للزجاجة.
- فيزيائيا يتعلق التواتر الطنيني لجوف بحجمه وطوله.
- ماذا يجري لو نفخنا في زجاجتين الأولى ذات تواتر طنيني منخفض والأخرى ذات تواتر مرتفع؟؟؟

(سوف يندمج التواترين مع بعض – لحن مركب)

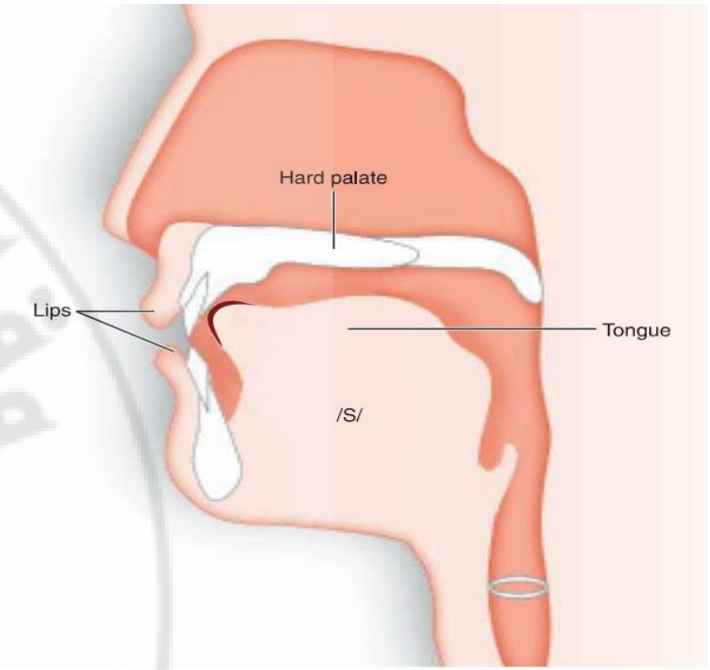
- فكر ماذا يفعل تحريك اللسان داخل جوف الفم بالاتجاهات المختلفة – وماذا يحدث عند تغيير شكل جوف الفم؟؟

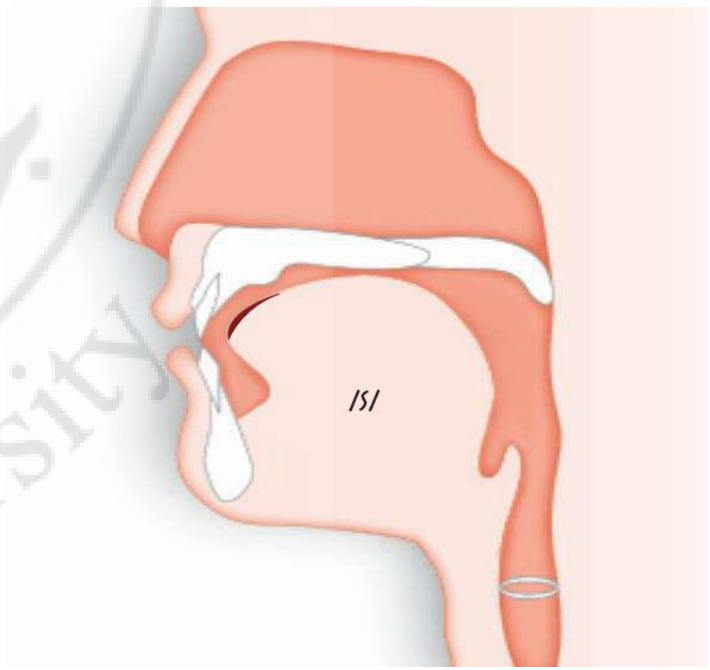
نظرية المنبع – مرشح في إنتاج الصوائت
Source-Filter Theory in Vowels Production

- إذا تقوم النظرية على المبدأ التالي: يتم توليد الصوت من الحبال الصوتية على شكل نغمة شبه دورية Quasi-periodic tone والتي تعبر المسار الصوتي الذي يقوم بدور المرشح الذي يغير شكله ويؤثر على هذه النغمة ويقوم بإحداث تغيير فيها.
- التواتر الطنيني هو الذي يتحكم بإدراكنا للصوائت.
- كيف يمكن إثبات أن الطيات الصوتية ليست هي من تقوم بهذا الدور؟؟

  قم بهمس كل من who , he وانظر إلى الفرق. هنا لم تقوم الحبال الصوتية بالاهتزاز ولكن الفلتر (التجويف الفموي) قام بدوره في اعتراض الجريان المنتج بالهمس ليمكنك من التمييز بين الصائتين.
- يمكن أن تشمل هذه النظرية توليد كافة الفونيمات الأخرى. هنا قد يكون المنبع واحدا للصوائت ويختلف المرشح أما بالنسبة للصوامت consonant قد يختلف المنبع أويصبح توليد الاضطراب turbulence هو المنبع كالاحتكاك وغيره وتبقى الحصيلة توليد حزمة من التواترات الصوتية التي تعبر المرشح لتأخذ شكلها.

Look at Figure 6-2, and notice the difference between production of the /s/ and /ʃ/ phonemes. Sustain an /s/ and realize that when you produce it, your tongue is high, forward, and tense. You pass a compact stream of air over the surface of the tongue, and then between the tongue tip and the upper front teeth. Now produce the /ʃ/ and recognize that the tongue is farther back in your mouth, much as in the figure. The source in both cases is the turbulence associated with the airstream escaping from its course between your tongue and an immobile structure of your mouth (front teeth or roof of your mouth). The turbulence excites the cavity in front of the constriction and you have a recognizable sound. Which of the two phonemes has the larger cavity distal to the constriction? The /ʃ/ has a larger resonant cavity than the /s/, so its resonant frequency will be lower, following our discussion of bottles. Now make the /s/ again, but without stopping, slide your tongue back in your mouth until you reach the /ʃ/ position. As you do this, you will hear the noise drop in frequency because the cavity is increasing in size. The source-filter theory dictates this change.





أعضاء التمفصل Articulators

- تقسم أعضاء التمفصل إلى ثابتة ومتحركة.
- في الكلام يتم تحريك أحد هذه الأعضاء باتجاه الآخر أو يتم مواجهة أحد الأعضاء المتحركة بسطح ثابت لعضو آخر.
- تشمل المتحركة اللسان وهو يملك الدور الأكبر، الفك السفلي، الشفتين، الحنك الرخو واللهاة، الشدق (الخدين) ويلعبان دورا في الرنين – وكذلك البلعوم والحلق – وأيضا يسهم كل من العظم اللامي والحنجرة في إعطاء بعض الوضعيات التمفصلية الخاصة.
- تشمل الأقسام الثابتة كل من الناتئ السنخي لعظم الفك والحنك الصلب وأيضا الأسنان التي تستخدم في إنتاج العديد من الأصوات الكلامية.
- تتم عملية تمفصل الكلام بشكل أتوماتيكي كاملا.

أعضاء التمفصل Articulators

- لنجرب معا التغير الذي يطرأ على الكلام عند تغيير أعضاء التمفصل.
- قم بنطق الجملة التالية في ثلاثة حالا متتالية:

الجملة: "تريد أن تعرف كل شيء عن أمي وأبي"

الحالات: - وضع خافض لسان بين الأضراس والعض عليه في أحد الجهات.

- وضع اللسان بين الأسنان والعض عليه.
- تبعيد الشدقين بالأصابع وشدها للخارج.

- يمكنك تعلم أمرين من هذه التجربة:

1. الأول: يحدث تغيير في تمفصل الكلام والرنين عندما يطرأ تغيير على أعضاء التمفصل، لقد قمت بتقييد بعض أعضاء التمفصل مما يسبب صعوبة في فهم ما تقول.
2. الثاني: استطعت التغلب على هذا التقييد وإصدار كلام شبه مفهوم من خلال مقاومة هذا التغيير، وهذا دليل على التعديل الاتوماتيكي لعملية التمفصل في حال وجود أي من المعيقات للتمفصل.

Of these mobile and immobile articulators, the tongue, mandible, teeth, hard palate, and velum are the major players, although all surfaces and cavities within the articulatory/resonatory system are contributors to the production of speech.

وظيفة الكلام Speech Function

- تتطلب وظيفة الكلام تنفيذ سلسلة من الحوادث العصبية الحركية neuromotor بدقة عالية ومنظمة للغاية.
- راقب كيف تقوم بانتاج كلمة tube:

لإنتاج صوت ال t يجب حبس النفس للحظة ورفع اللسان باتجاه الحافة السنخية وبالوقت ذاته سترتفع أيضا موترة شراع الحنك ويتجمع ضغط الهواء خلف اللسان من ثم ينخفض اللسان لاطلاق ضغط الهواء وعند اطلاق الهواء يجب ان يتراجع اللسان بسرعة وتستدير الشفتان لانتاج صوت ال u ولانتاج صوت ال b تلتصق الشفتان ببعضهما لكي تجعل الهواء خلفهما ومن ثم انطلاق هذا الهواء وتنتهي الكلمة خلال اقل من ثلاثة أعشار الثانية.

Movable Articulators
الشفتان Lips

- الشفاه هي نواطق بسيطة ولكن خادعة بنفس الوقت.
- العضلة الدويرية الفموية هي المسؤولة في المقام الأول عن ضمان الإغلاق الشفوي، ولكن هناك العديد من العضلات الوجهية التي ترتكز على هذه العضلة وتمارس قوى مختلفة عليها من زوايا مختلفة فيزيائيا، مسببة حركات مختلفة للشفتين بمساعدة هذه العضلات.
- من المفترض أن تكون وظيفتا الشفة العلوية والسفلية متشابهة ولكن في الحقيقة يبدو أو الشفة السفلى تقوم بحركات أكثر سرعة وإحكام مما يساعدها في تغيير وضعيتها وطريقة إغلاقها على الفك العلوي(الشفة العليا) لإنتاج أنواع مختلفة من الفونيمات.
- ما يساعد الشفة السفلية على هذا الاختلاف وجود العضلة الذقنية التي تمنحها قوة إضافية ليس لها مقابل في الشفة العلوية والأهم أيضا وجودها على الفك السفلي هذا العضو المتحرك الذي يساهم في الكثير من حركات تمفصل الكلام.

Movable Articulators
الشفتان Lips

- تمتلك الشفتان قدرة كبيرة أيضا على التكيف مع أي وضع طارئ أثناء الكلام، كما انها تتكيف مع التبدلات الشكلية أو التشريحية التي تتعرض لها.

مثال1: أثناء القاء كلمة اضغط بيدك على شفتيك وتابع الكلام وراقب ما يحدث.

مثال2: قم بنطق كلمة (puh) بشكل متكرر خلال 5 ثوان ثم كرر ذلك وانت تضغط قلم بين قواطعك وراقب دور الفك السفلي في كل مرة.

- يتم تنظيم هذه الوظيفة إراديا وانعكاسيا عن طريق:

1. التحكم القشري الإرادي.
2. مستقبلات الحس العمقي في العضلات الوجهية.
3. مستقبلات الضغط واللمس في الشفتين.
4. مستقبلات التمطيط في الشفة والمخاطية الفموية.
5. الضغط داخل الفموي

Movable Articulators
الفك السفلي Mandible

- يعتبر الفك السفلي البطل المجهول يقوم بعمله بكل هدوء وانتظام (يساعد الشفاه، يغير موضعه من اجل الحركة ويغلق بشدة عند الضرورة)
- يمكنك ان تذكر نفسك بتلك الحركات بوضع اصبع من يدك اليمنى على شفتك العلوية واصبع آخر على ذقنك، أغلق عينيك وعد للعشرين بسرعة، مرة بشكل طبيعي ومرة أخرى والفم مرتخي لايتحرك ولاحظ الفرق في وضوح الكلام.
- للفك السفلي دور هام في وضوح الكلام يمكن التأكد من ذلك عند الحديث والفك مرتخي.
- يقوم الفك السفلي بدور حاسم بجلب ما يحمل من أسنان وشفة ولسان إلى نظيراتها في الفك العلوي كالشفة العلوية والحافة السنخية والأسنان وغيرها ليساهم في إنتاج الكم الكبير من التنوع التمفصلي.
- يمكن التنبؤ بالخلل الذي يسببه شلل العضلات الماضغة على وضوح الكلام ومفهوميته.

Movable Articulators
الفك السفلي Mandible

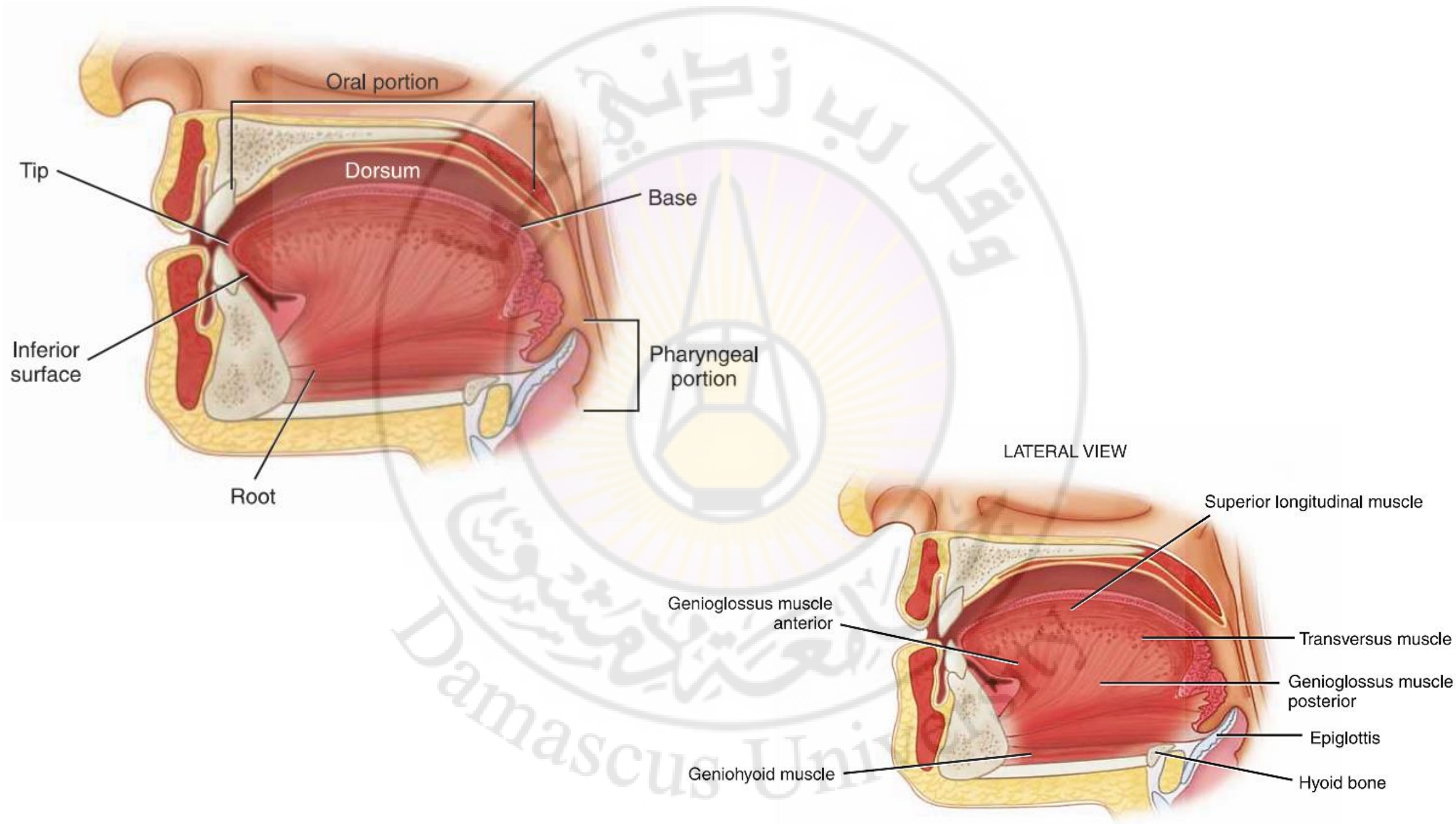
- يتم تنظيم حركات الفك السفلي من خلال مستقبلات الضغط الموجودة في المفصل الفكي الصدغي وأيضا المغازل العضلية المنتشرة بشكل أساسي في رافعات الفك السفلي أكثر من خافضاته. يضاف إليها مراكز تنظيم موجودة في جذع الدماغ مسؤولة عن الحركات الماضغة المنتظمة الدورية للفك أثناء المضغ (رفع وخفض – تدوير – طحن).
- أما أثناء الكلام يختلف الأمر قليلا حيث يحدث توازن ديناميكي بين العضلات المتعاكسة Antagonists بحيث تجري تعديلات سريعة ودقيقة في حركات الفم تخدم تمفصل الكلام.
- تذكر العضلات المسؤولة عن حركات الفك السفلي!
- من الملاحظ أن خفض الفك السفلي ليس مرهونا فقط بالعضلات خافضة الفك (ماهي؟) بل أيضا بالعضلات تحت اللامي التي تبدي نشاطا واضحا أثناء خفض الفك السفلي.

Movable Articulators

اللسان Tongue

- يعتبر اللسان هو الأهم من بين أعضاء التمفصل.
- يساهم اللسان في إنتاج غالبية الفونيمات في اللغتين الانكليزية والعربية.
- اللسان وظيفيا هو كتلة من العضلات الداخلية المحمولة على عضلات خارجية تتحكم الخارجية بالحركات الجذعية في حين تسهم العضلات الداخلية في الحركات الدقيقة التمفصلية.

Damascus University


Oral portion
Dorsum
Tip
Base
Inferior surface
Pharyngeal portion
Root
LATERAL VIEW
Superior longitudinal muscle
Genioglossus muscle anterior
Transversus muscle
Genioglossus muscle posterior
Epiglottis
Geniohyoid muscle
Hyoid bone

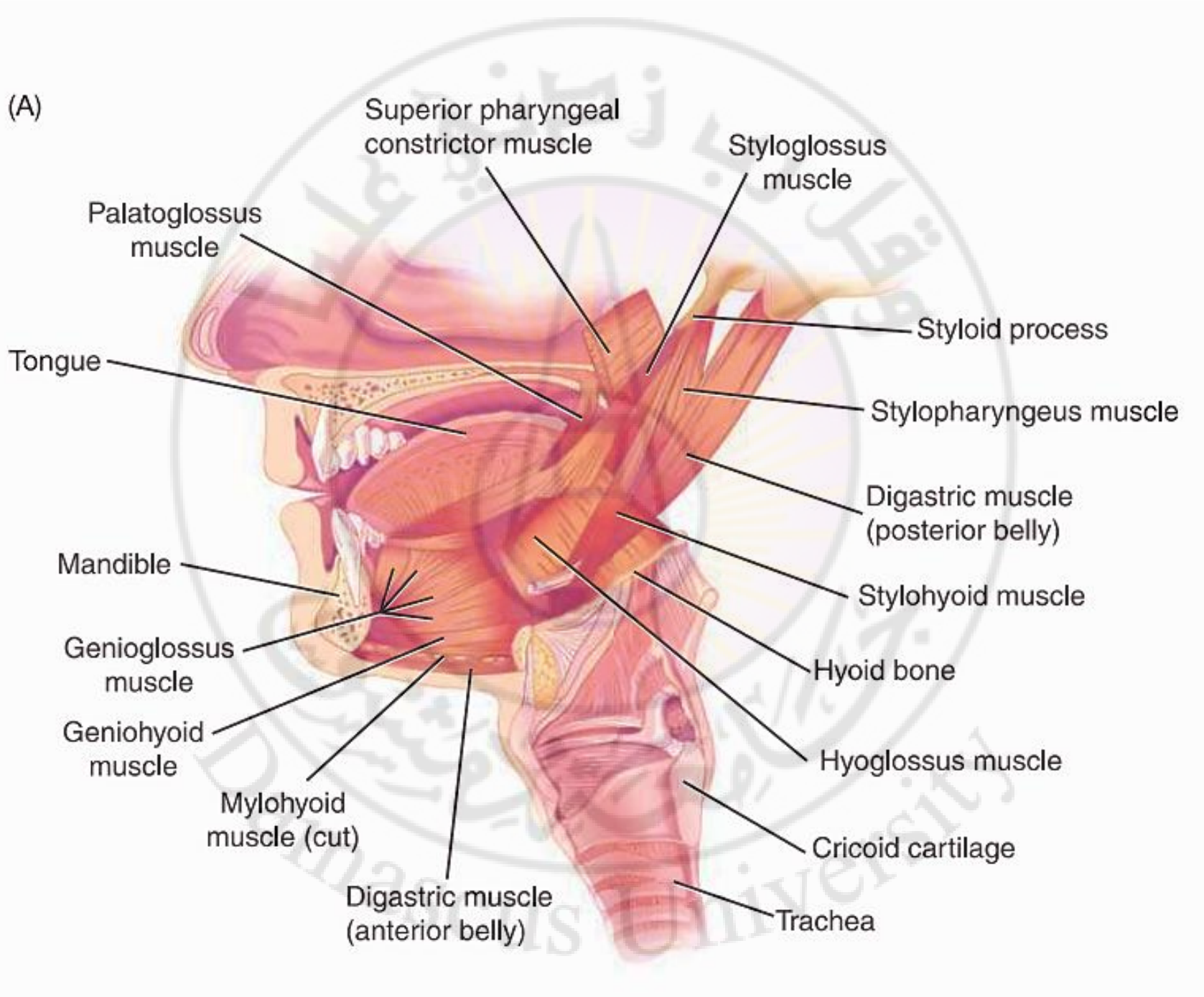

(A)
Superior pharyngeal constrictor muscle
Styloglossus muscle
Palatoglossus muscle
Styloid process
Tongue
Stylopharyngeus muscle
Digastric muscle (posterior belly)
Mandible
Stylohyoid muscle
Hyoid bone
Genioglossus muscle
Geniohyoid muscle
Hyoglossus muscle
Mylohyoid muscle (cut)
Cricoid cartilage
Digastric muscle (anterior belly)
Trachea

Table 7-1. Muscles of tongue movement.

MOVEMENT	MUSCLE
Elevate tongue tip	Superior longitudinal muscles
Depress tongue tip	Inferior longitudinal muscles
Deviate tongue tip	Left and right superior and inferior longitudinal muscles for left and right deviation, respectively
Relax lateral margin	Posterior genioglossus for protrusion; superior longitudinal for tip elevation; transverse intrinsic for pulling sides medially
Narrow tongue	Transverse intrinsic
Deep central groove	Genioglossus for depression of tongue body; vertical intrinsic for depression of central dorsum
Broad central groove	Moderate genioglossus for depression of tongue body; vertical intrinsic for depression of dorsum; superior longitudinal for elevation of margins

MOVEMENT	MUSCLE
Protrude tongue	Posterior genioglossus for advancement of body; vertical muscles to narrow tongue; superior and inferior longitudinal to balance and point tongue
Retract tongue	Anterior genioglossus for retraction of tongue into oral cavity; superior and inferior longitudinal for shortening of tongue; styloglossus for retraction of tongue into pharyngeal cavity
Elevate posterior tongue	Palatoglossus for elevation of sides; transverse intrinsic to bunch tongue
Depress tongue body	Genioglossus for depression of medial tongue; hyoglossus and chondroglossus for depression of sides if hyoid is fixed by infrahyoid muscles

Movable Articulators

الحنك الرخو Velum

- يمتاز الحنك الرخو بالقدرة على انجاز العديد من الحركات بمعدل متفاوت يساهم بشكل هام في تأمين متطلبات الوظيفة الكلامية والغير كلامية.
- عادة ينغلق الحنك الرخو أثناء نطق الكلام غير الأنفي وتساهم في ذلك العضلة رافعة شراع الحنك وهي المعاكس المباشر antagonist للعضلة الحنكية اللسانية.

In speech, the opening and closing of the velar port must occur precisely and rapidly, or the result will be hyper- or hyponasality.

- يفتح الحنك الرخو ويغلق بالتنسيق مع باقي أعضاء التمفصل لتنظيم الرنين الأنفي ولمعاكسة حدوث رنين أنفي لبعض الفونيمات التي لا تتطلب ذلك وبالتالي تجنب الإدغام Assimilation.
- إن سقف الحنك بقسميه الصلب واللين مزود بمستقبلات تؤمن التغذية الراجعة المتعلقة بالضغط، وقد اتضح أن هذه الحساسات تسهل وتثبط النشاط الحركي اللغوي.
- لقد وجد أن العضلة موترة شراع الحنك والحنكية اللسانية ورافعة شراع الحنك تحتوي هذه المستقبلات والتي تلعب دورا هاما في تأمين المنعكس البلعومي للبلع.

Damascus University

تطور القدرة اللفظية
Development of Articulatory Ability

- يتعلق تطور القدرة اللفظية عند الطفل بالمحاور التالية:

1. منعكسات الوليد: منعكس مونرو (فرط بسط).
2. القدرة الحركية الكلية للوليد (التطور الحركي للوليد من الولادة وحتى السنة ثم تباعا خلال سنوات الطفولة).
3. استكشاف المحيط – اختبار الجاذبية (استلقاء ظهر – تغيير وضعية – انبطاح – حبو – وقوف).
4. تخزين التجارب الحسية الحركية: النماذج التفاعل لحركة وتموضع الجسم مع المحيط تتطور من خلال التجربة والذاكرة إلى نماذج حركية إرادية تستخدم في تثبيت الجذع والعنق والأطراف.
5. التطور من الكلية إلى الجزئية بطريقة الفيدباك (التلقيم الراجع).
6. جهة التطور: رأسي- ذيلي و داني- قاصي.

Four vital elements of basic motor control support later-speech development:
experience with gravity, flexor–extensor balance, trunk control, and differentiation.

تطور القدرة اللفظية
Development of Articulatory Ability

- إن مقدرة الطفل على تثبيت الجذع وإيجاد توازن بين القابضات والباسطات تتيح له الفرصة على الوقوف والمشي والتكلم.
- من الطبيعي ان لا يتمكن الطفل من إنجاز حركات اللسان الناعمة والمركبة قبل أن يتم التحكم بثبات عضلات العنق والجذع.
- بعد التثبيت يبدأ الطفل بتطوير حركات متمايزة مضبوطة.
- إن تمايز هذه الحركات المضبوطة هو الأساس بتطور الحركات المركبة واللازمة لإنتاج الكلام.
- هنا يبدا تطور نموذج منبع – فلتر بأن يتم توليد أبسط المقاطع الكلامية المؤلفة من صائت وصامت CV بحيث يبدأ الطفل بان يستخدم شفتيه وحنكه ولهاته لانتاج نماذج من المكاغاة تسمى babbles.
- ثم بالتدريج مع بدء التحكم بحركات الفك يستطيع الطفل ان يبدأ بإنتاج المقاطع التي ترتبط بحركات اللسان على الفك السفلي.
- وبعد ذلك يبدأ الطفل بالتمييز بين حركات جذع اللسان وذروة اللسان وتزداد الحركات التي يقوم بها اللسان بالتعقيد لتخدم الامزيد من احتياجات توليد الكلام لديه.
- كما يبدو فإن التطور المرحلي والمتتالي هو الأساس في تطور القدرة اللفظية للطفل.

Damascus University

تطور السبيل الصوتي
Development of the Vocal Tract

- إن المسار الصوتي للطفل هو أصغر بشكل واضح من المسار الصوتي للبالغ.
- يبدأ تطور المسار الصوتي مع تقدم العمر حيث يبدأ البلعوم الأنفي بالتوسع بشكل ملحوظ ويأخذ شكل زاوية حادة مع البلعوم الفموي مترافقا مع ازدياد في حجم التجويف الفموي وانخفاض اللسان في أرض الفم الأمر الذي يعطي توسع في البلعوم الفموي.
- في العموم يصل التجويف الفموي عند الطفل إلى حجم البالغ بين السنة 7 والسنة 18 من العمر، حيث يزداد طول المسار الصوتي من 6-8 سم عند الولادة إلى حدود 15-18 سم عند البلوغ بحيث يكون مغظم هذه الزيادة على حساب البلعوم في حين يزداد طول الفك السفلي من 2 سم عند الولادة ليصل 5 سم في ال7 سنوات.
- يصل اللسان إلى 75% من حجم البالغ عند السنة السابعة للعمر ويكون نموه متوافقا مع تطور الفك والبلعوم الفموي.
- قد تكون سرعة التطور متفاوتة بين الأعضاء المختلفة ولكنها تصل إلى مراحل من التوافق في سنين معينة من العمر أحدها عمر ال7 سنوات ويكون لهذه التبدلات التشريحية التطورية دور هام في خصائص الرنين للمسار الصوتي أثناء الكلام.

تنسيق التمفصل

- يعتبر الكلام أكثر الحركات المتتالية المنسقة تعقيدا في جسم الانسان بلا منازع.
- هناك نظريات عدة وضعت لتفسير هذه الوظيفة آخرها ماوضعه Mackay 1982.
- أنظمة Mackay التسلسلية: وتشمل ثلاثة أنظمة وهي الإدراكي – الفونولوجي والعضلي الحركي.
  - في النظام الإدراكي conceptual system يتم أولا تحديد الهدف الذي يجب التعبير عنه، من ثم تحضير الفكرة التي ستتحول إلى جملة محكية، ثم يتم برمجة هذه الفكرة ضمن نظام متكامل ينشئ الصيغ اللغوية المناسبة للتعبير عن هذا المفهوم أو الفكرة، واختيار الكلمات اللازمة المناسبة للمحتوى والمفهوم.

تنسيق التمفصل

- في النظام الفونولوجي Phonological system:

lexical selections

1. يتم اختيار بنى المقاطع sellable structures من المخزون اللغوي lexicon.
2. يتم تطبيق القواعد الفونولوجية لتشكيل الفونيمات التي تشكل لاحقا الكلمات المطلوب نطقها.
3. ثم يتم تحديد خصائص كل فونيم وبعد ذلك يعاد تقسيم الفونيمات فونولوجيا حسب طرق التوليد دون التطرق للمستوى العضلي.

phonological specifications

مثال:

("Tomorrow" "is" "Monday") will be further broken into syllables, selected phonemes, and features for the phonemes. For instance, the /t/ in "tomorrow" will be defined as lingua-alveolar, stop, and voiceless.

Damascus University

تنسيق التمفصل

- في النظام العضلي الحركي muscle movement system:

1. يتم تحفيز العضلات لتنفيذ المراحل الوظيفية التي تم تعيينها في المرحلة السابقة.
2. مع العلم أن هناك نظرية تفترض أنه يكفي أن يتم تعلم نطق الفونيم لمرة واحدة ليتم لفظه بشكل متكرر كلما تطلب الامر دون تحضير لذلك وتسمى Associated chain theory ولهذا تعتبر هذه النظرية ان عضلات التمفصل لاتكون في حالة راحة ليتم تحفيزها وانما هي في حالة نشاط مستمر وتنتقل من وضع لاخر لانتاج الكلام المطلوب.

Damascus University

نظرية الضبط المركزي Central Control Theory

- تنص النظرية على وجود مركز مسيطر يقوم بالايعاز لعضلات النواطق بالحركة لتحقيق الاهداف اللغوية.
- الملفت في هذه النظرية هو وجود العلاقة المباشرة بين النظام الحركي والمعالج اللغوي.
- كل فونيم يتم التعبير عنه باطلاق الكثير من الكمونات الاستثارية العصبية.
- لضمان العمل الصحيح يبدو أن هذا النظام يتطلب وجود آلية التلقيم الراجع.

✓ *The articulatory act for any phoneme requires precise activation of an overwhelming number of neurons and muscle fibers, and the activation must be accurate, timely, and result in correct movement.*

نظرية التلقيم الراجع Feedback theory

- تنص النظرية على وجود حساسات تلتقط الاوامر المنفذة من قبل النواطق وتنقلها للمركز ليتم مقارنتها مع الهدف المطلوب وفي حال وجود عدم تطابق يتم إجراء تصحيح فوري.

- أي من النظريات السابقة لا تؤمن شرح كافي ووافي لآليات الكلام يفسر مرونة هذا النظام وقابلية تغيره وتكيفه المستمر مع الظروف المحيطة وقدرته على الانتقال من وضع تمفصلي لوضع اخر بعيد تماما عنه دون اي تداخل او خطأ.

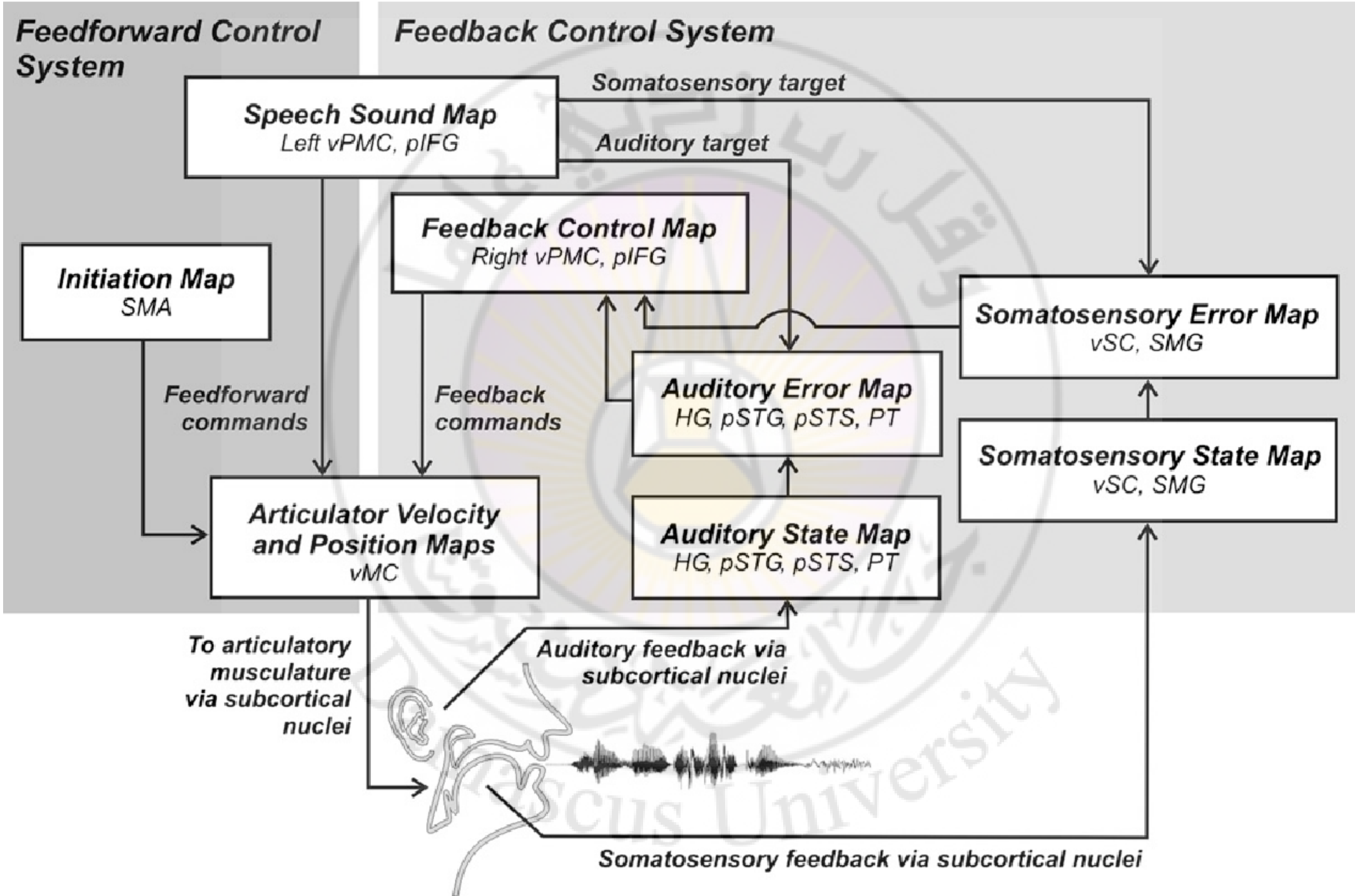
Damascus University

النظرية الديناميكية Dynamic or Action Theory Models

- تفترض النظرية وجود نظام مؤثر effector system يعد المسؤول عن بدء وإنهاء الحركات التمفصلية بمرونة واتقان ومجال واسع لحدوث التغيير بحيث لايتم اتمام حركة معينة مرتين بنفس الطريقة فكل حركة تبدأ من حيث تنتهي الحركة السابقة وبالتالي يمكن تفسير مايحدث من نطق تشاركي co-articulation دون خطأ أو مقاومة الاضطراب الطارئ أثناء التمفصل perturbation.
- الوحدة الوظيفية في هذه النظرية هي البنى المساهمة أو المنسقة coordinative Structures وهي مجموعة العضلات التي تتحفز معا وتنجز حركات معينة لتحقيق هدف كلامي معين.
- أما السبل الحركية ال Trajectories فهي التي تحدد هدف الحركة وهي المسؤولة عن تغيير المسار في حال حدوث أي خطأ وإصلاحه دون الحاجة لأوامر مركزية.

The DIVA Model of Speech Production

- يقوم هذا النموذج على مبدأ التلقيم الراجع الضروري لإصلاح الخطأ والدقة في الكلام.
- مصادر التلقيم الراجع في انتاج الكلام قد تكون:
  1. سمعية: نسمع مانقول.
  2. لمسية أو حركية.
  3. خارجية قد تظهر في ردود فعل الآخرين لما نقول.
- نموذج ديفا يقترح وجود آليات تلقيم راجع وتلقيم أمامي DIVA (Directions Into Velocities of Articulation)
- يقترح النموذج وجود مرحلتين الأولى تعليمية من خلال التلقيم الراجع والثانية تأتي بعد التعلم وتفترض التمكن من انتاج كلام دقيق وصحيح بسلاسة بناء على الخبرات المتعلمة.


Feedforward Control System
Feedback Control System
Speech Sound Map
Left vPMC, pIFG
Somatosensory target
Auditory target
Feedback Control Map
Right vPMC, pIFG
Initiation Map
SMA
Somatosensory Error Map
vSC, SMG
Auditory Error Map
HG, pSTG, pSTS, PT
Feedforward commands
Feedback commands
Somatosensory State Map
vSC, SMG
Articulator Velocity and Position Maps
vMC
Auditory State Map
HG, pSTG, pSTS, PT
To articulatory musculature via subcortical nuclei
Auditory feedback via subcortical nuclei
Somatosensory feedback via subcortical nuclei

خصائص مرحلة التعلم في نموذج ديفا

- تتم من خلال تجارب واقعية في الزمن الحقيقي real-time يتم من خلالها مواجهة الفزيولوجيا العصبية مع المتطلبات الواقعية وتطويرها اعتمادا على التلقيم الراجع.
- عادة يستغرق وصول الإشارة السمعية إلى القشر ليتم الارتكاس لها حدود ال75-150 مل ثانية. في حال اعتماد خريطة تصحيح الخطأ لضبط الكلام فإن الكلام سيستغرق وقتا أطول بحدود 100 مل ثانية إضافية للتأكد من ان الكلام ينتج بشكل صحيح. ولكن في الحقيقة نحن ننتج الكلام بسرعة أكثر من ذلك خصوصا الكلام غير العروضي وبدون تشديد.
- بالتالي يمكن القول أن مرحلة التعلم تتميز بإنتاج بطيء للكلام (ما نلحظه عند الأطفال في أول مراحل تكلمهم) وهذا ما يفسر بعدم الطلاقة في هذه المراحل العمرية.
- **تمرين:**
  - ✓ الاستماع لمقاطع صوتية لأطفال في أعمار مختلفة من سنة إلى 5 سنوات.
  - ✓ الاستماع إلى طفل يتحدث عن درس تلقاه في المدرسة ويحاول تذكره.
  - ✓ التكلم باللغة الانكليزية من شخص غير متحدث بها ومقارنة الطلاقة مع شخص لغته الأم هي الانكليزية.
- يمكن تطبيق هذا النموذج أيضا على تعلم اللغات الأخرى غير اللغة الأم.

Damascus University

The DIVA Model of Speech Production

In the DIVA model, motor learning is established through the feedback system of error correction, but significantly, once the target is accurately learned, the feedback system takes the back burner to the feedforward system. That is to say, we no longer use the output of the feedback system to correct our speech continually, but rather we count on our learned accuracy to carry us through the task of talking. We do not stop monitoring our speech.

- مرحلة التعلم:
  1. تقوم على التلقيم الراجع.
  2. يتم إضافة نتيجة التلقيم خريطة تصحيح الكلام بالتلقيم الأمامي.
  3. يتم استخدام مخرجات هذه العملية بشكل مستمر في تصحيح الكلام.
  4. لا تتوقف عملية مراقبة الكلام مطلقا.

Damascus University

The DIVA Model of Speech Production

*Guenther hypothesizes that **mirror neurons** in the* cerebrum may play an important role in the process. Mirror neurons fire when we perform an action, but which also fire when we see someone else perform the action. They are, in effect, a sort of environmental monitoring system that could be responsible for a number of phenomena, including empathy and motor learning.

- الأسس الفزيولوجية العصبية لمرحلة التعلم:
  1. دور فاعل للعصبونات المرآتية والتي تفيد في التفاعل مع المحيط والمدخلات الحسية المختلفة.
  2. التآزر العصبي.
  3. التعلم والتكيف العصبي الحركي.

Damascus University

أي سؤال؟؟

جامعة دمشق
كلية العلوم الصحية

فيزيولوجيا التصويت 1+ 2

مقرر تشريح وفزيولوجيا السمع والنطق

2022 - 2021

د سامر محمد محسن

وظائف الحنجرة الغير كلامية:

- السعال:

تعريف السعال: هو تنظيف الطريق التنفسي, يتضمن عملية شهيق عميق(اجباري) و من ثم توتر الطيات الصوتية المقربة و ارتفاع الحنجرة و يتبعها زفير اجباري .

ا) اخراج (طرد) الأجسام الغريبة المزعجة.

ب) السعال المزمن يؤدي الى تخرش الحبال الصوتية.

- تنظيف الحنجرة: تشبه السعال و لكن أقل قوة.

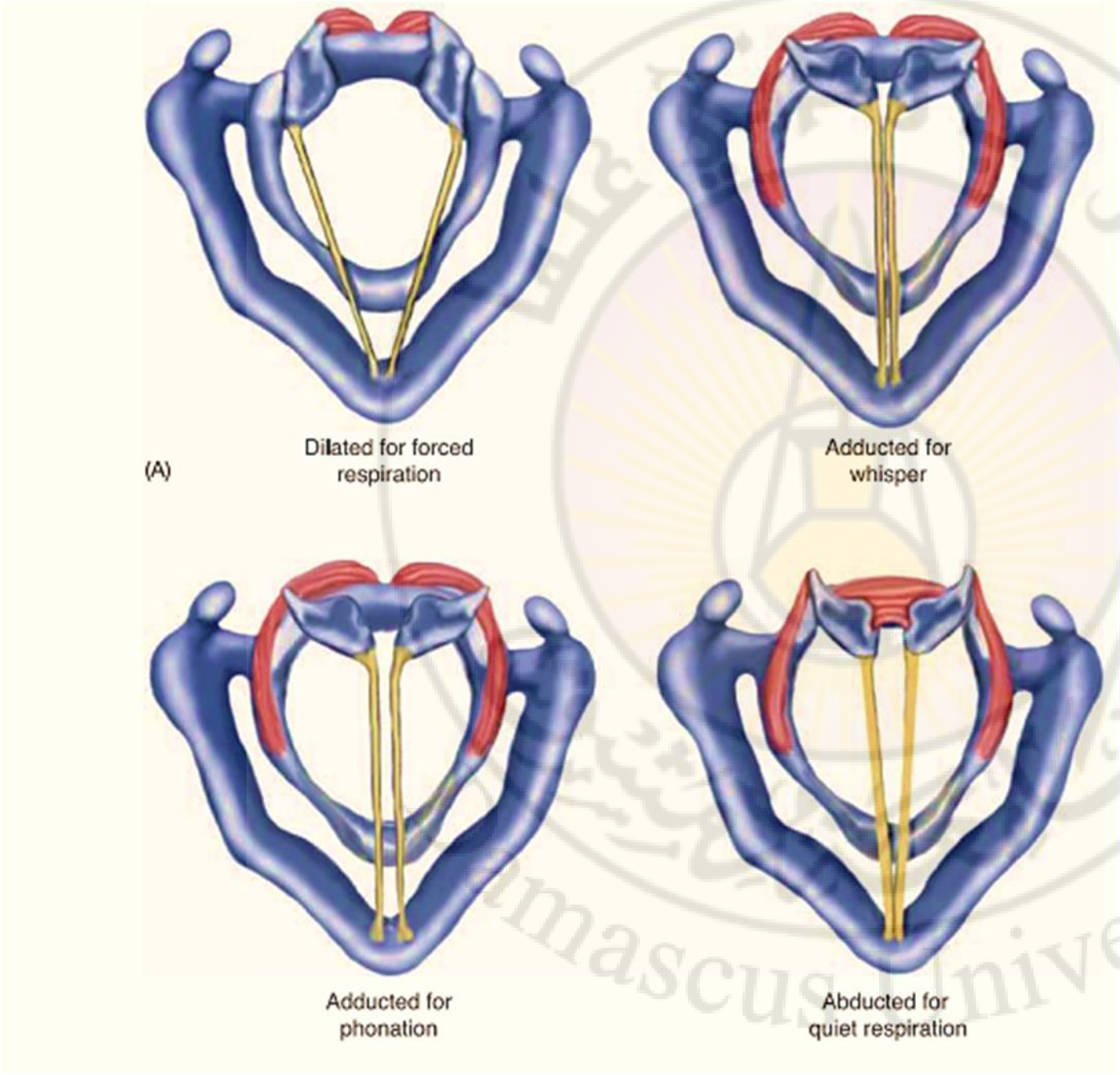
- التنظيف المتكرر يسبب أذى في الصوت.

- يمكن استخدام الآليتين سريريا لتأهيل مرضى الضعف العضلي. يمكن أن تساعد عملية التقريب و اغلاق الحبال الصوتية بتحقيق وضعية مناسبة للتصويت.

هذا يعني استخدام عضلات التقريب. (الحلقية الطرجهالية, الطرجهالية, العضلة الدرقية)

وظائف الحنجرة الغير كلامية:

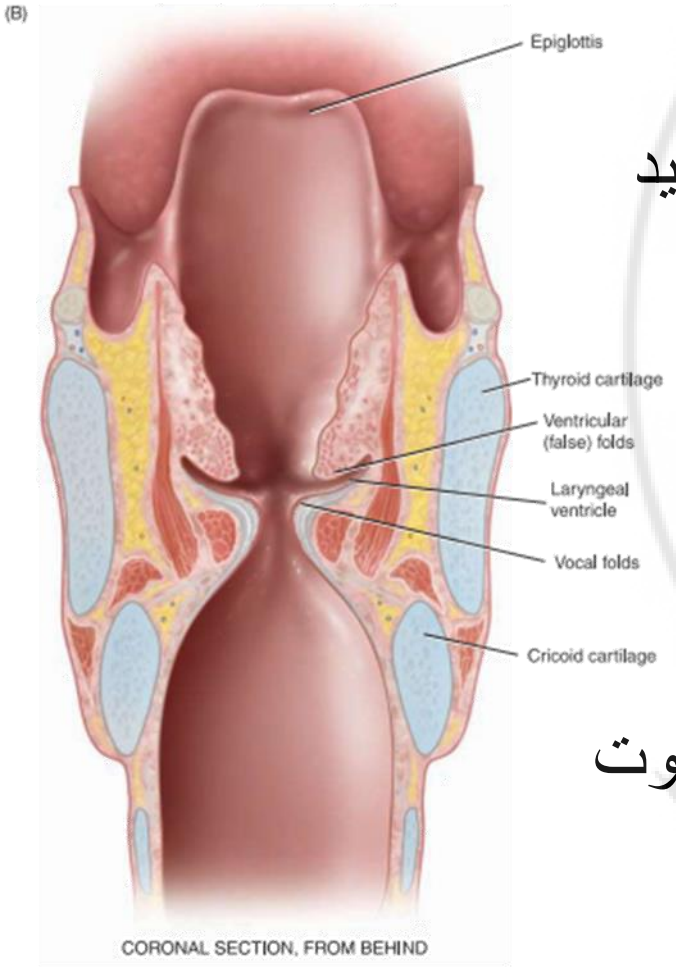
- تثبيت البطن: التثبيت البطني هي عملية حبس الهواء في الصدر لتثبيت الجذع.
- يتمثل بتطبيق ضغط على كل من الساق أو الصدر، حسب اتجاه الضغط.
- من أشكاله:
  ا) مناورة فالسالفا
  ب) رفع (حمل) أشياء ثقيلة.
  ج) ولادة طفل (عملية الولادة).
  د)عملية الاطراح(التغوط).
  ه) التقيؤ.
- استرخاء أو انفتاح الحنجرة: التنفس القسري خلال ممارسة التمارين الرياضية.
- عملية البلع.



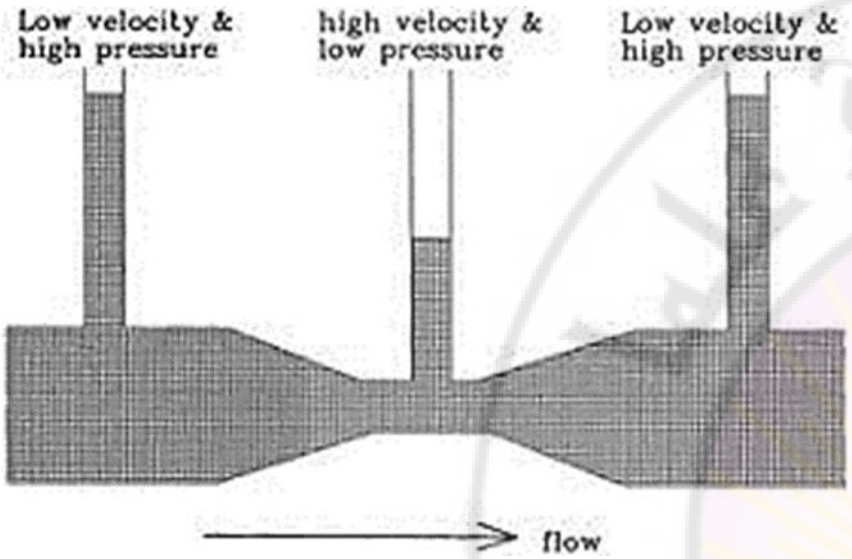
وضعيات الحنجرة في وظائف عديدة.

خلال عملية التقريب في التصويت, الطيات الصوتية متقاربة. لتنفس صامت تكون الطيات متباعدة باعتدال, و لكن للتنفس القسري يكونان متباعدين كثيرا. التقريب للهمس يتضمن تقريب الطيات الصوتية مع الحفاظ على مسافة بين الغضروفين الطرجهاليين.

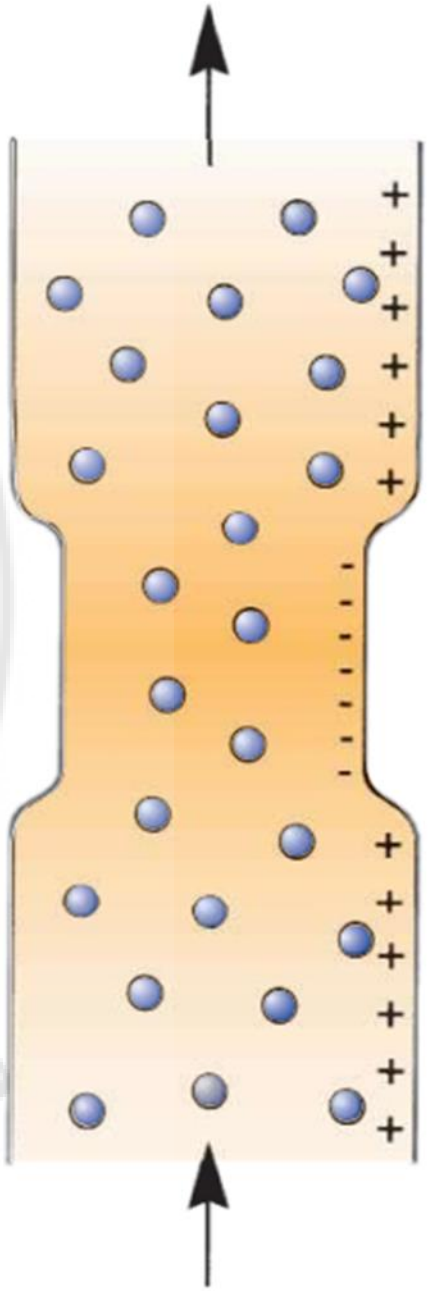
الوظيفة الكلامية للحنجرة:

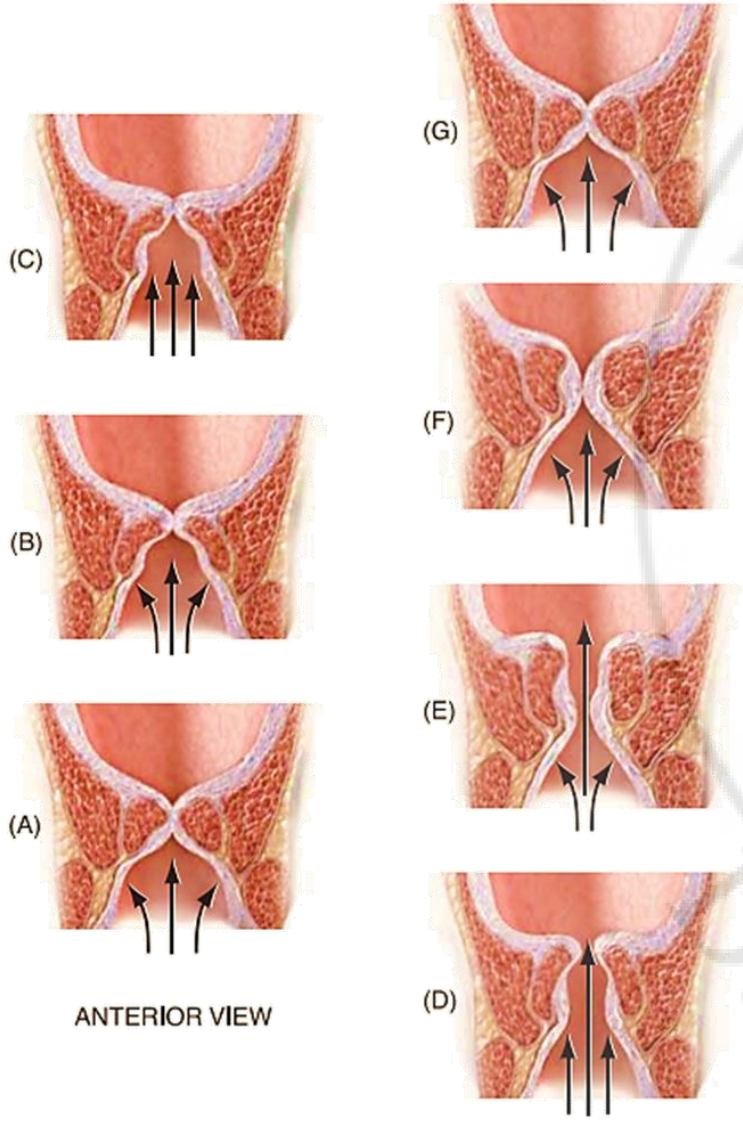


- تأثير برنولي: في حال حجم جريان ثابت للهواء أو لسائل, سيكون هناك نقصان في الضغط العامودي عند نقطة التضيق في مسير الجريان، و تزايد في سرعة الجريان.
- الحبال الصوتية تعمل كمصرة.
- الطيات الصوتية تسبب التفاف الهواء حولها.
- اضطراب مجرى الهواء turbulence أثناء عبوره من المزمار.
- مثال: اخراج اليد من السيارة، يتغير الاحساس بالضغط المطبق على اليد حسب جهة اليد المعارضة لمجرى الهواء أو المائلة أفقيا ويمكن سماع صوت هذا الاضطراب.



- يتزايد جريان الهواء.
- ينخفض ضغط الهواء.





- هذين العاملين الرئيسيين لتأثير برنولي يساعدان بفهم اهتزاز الطيات الصوتية. بالعودة الى فكرة أن الطيات الصوتية تعمل دور المصرة (المضيق) في الأنبوب، كما موضح في الشكل 5-4.
- الطيات الصوتية هي نسيج رقيق، مكون من العضلات و النسيج الظهاري. بسبب هذا التركيب، الطيات أيضا قادرة على التحرك عندما تكون القوة الفاعلة مطبقة عليهما، كما عندما تخرج يدك من شباك السيارة.
- ما تسمعه من تصويت هو نتيجة تكرار عملية فتح و إغلاق الطيات الصوتية وليس تحرك الحبال.
- حركة النسيج و تيار الهواء الناتج تسبب اضطراب في جزيئات الهواء، مسببة الظاهرة التي ندعوها الصوت.
- التقريب adduction: هو عملية التقاء أو تقريب الطيات الصوتية على بعضها للتصويت.
- التبعيد abduction: هو عملية ابعاد الطيات الصوتية عن بعضها لانهاء التصويت.
- كما يمكننا أن نرى كلا هاتين الحركتين يتحققان باستعمال عضلات محددة، و لكن الاهتزاز الفعلي للطيات الصوتية ناتج عن تفاعل تيار الهواء مع النسيج في غياب الانقباض العضلي المتكرر.

مختصر مفيد

- التصويت ينتج عن اهتزاز الطيات الصوتية داخل الحنجرة.
- تهتز الطيات الصوتية أثناء مرور الهواء، ظاهرة برنولي و مرونة النسيج تساعد على بقاء التصويت.
- إن التعامل بين الضغط تحت المزماري و مرونة النسج elasticity و التضيق في تيار الهواء الناتج عن الطيات الصوتية ينتج الحفاظ على التصويت طالما أن الضغط و الجريان و تقارب الطيات الصوتية محافظ عليها.
- التصويت هو عامل مهم جدا في الكلام.
- لتحقيق التصويت علينا تحقيق ثلاثة عمليات (تعديلات) حنجرية أساسية وهي بدء التصويت attack التصويت voicing وختم التصويت termination

مراحل التصويت

- للبدء بالتصويت علينا تقريب الطيات الصوتية، تحريكها لتعترض مجرى الهواء، تسمى هذه العملية (الهجوم الصوتي) vocal attack.
- ثم نبقي الطيات الصوتية في وضعية ثابتة بحيث تتحكم الديناميكية الهوائية الصوتية بالاهتزاز الفعلي لتؤمن التصويت المستمر sustained phonation .
- أخيرا نبعد الطيات الصوتية لإنهاء التصويت.

Vocal attack: هو حركة الطيات الصوتية لتعترض تيار الهواء لبدء التصويت.

Sustained phonation: التصويت الذي يستمر لفترات طويلة نتيجة التقلصات النشطة لمقربات الطيات الصوتية.

بدء التصويت Attack

- خارج فترة التصويت، تكون الطيات الصوتية مبعدة بشكل كافي لمنع حدوث اضطراب جريان الهواء في الطريق الهوائي ومنع الاهتزاز المسموع للطيات الصوتية.
- لبدء التصويت، نقرب الطيات الصوتية من بعضها بحيث أن قوى اضطراب الهواء قد تسبب اهتزاز الطيات الصوتية.
- Attack:هي عملية تقريب الطيات الصوتية لبعضها البعض لبدء التصويت, و هذا يتطلب حركة عضلية.
- ال vocal attack يحدث كثيرا في الكلام الجاري.
- ان كنت ستقول جملة "anatomy is not for the faint of heart" قد تكون جلبت الطيات الصوتية معا و أبعدتهم على الأقل 6 مرات في ثانيتين لتنتج فونيمات مهموسة و مجهورة.

هناك ثلاثة أنواع أساسية من الattack:

- الهجوم الصوتي المتزامن:هو الهجوم الصوتي الذي يحدث فيه الزفير و تقريب الطيات الصوتية في وقت واحد.
- الهجوم الصوتي الصخب (اللاهث): يحدث فيه الزفير قبل تقريب الطيات الصوتية.
- الهجوم الصوتي المزماري: يحدث فيه الزفير بعد تقريب الطيات الصوتية.

- عندما نبدأ التصويت باستخدام الهجوم المتزامن, نقوم بتنسيق التقريب مع بداية الزفير بشكل متزامن. الطيات الصوتية تصل الى درجة حرجة (حاسمة) من التقريب في نفس الوقت الذي يكون فيه تدفق الجهاز التنفسي كافي لدعم التصويت. قد تستخدم الهجوم المتزامن عند قول كلمة "zany" لأن بدأ جريان الهواء قبل التصويت قد يضيف الصوت المهموس "s" في بداية الكلمة, بينما عند تقريب الطيات الصوتية قبل انتاج الصوت الأول قد يضيف صوت مزماري انفجاري للإنتاج.
- الهجوم التنفسي(الصاخب) يتضمن بدء تيار هواء محدد قبل تقريب الطيات الصوتية. هذا يحدث في أغلب الأحيان خلال الكلام الجاري, لأننا نبقي جريان الهواء خلال انتاج سلاسل طويلة من الكلمات. قل هذه الجملة بينما تلاحظ جريان الهواء فوق لسانك و شفتيك: "harry is my friend". اذا قمت بهذا, شعرت بتيار الهواء الثابت مما يدل على أن بعض متضمنات التقريب انتجت و الهواء قد بدأ بالجريان أساسا.

- النوع الثالث هو الهجوم المزماري: في هذا النوع، يحدث تقريب الطيات الصوتية قبل اطلاق تيار الهواء، كما في السعال. جرب هذا. قرب طياتك الصوتية برفق كما في السعال، لكن بدل فتح طياتك الصوتية بينما تدفع الهواء خلال الطيات، ابقهم مقربين و قل "a". هذا كان هجوم مزماري. قد تكون أحسست القليل من التوتر أو تهيج بسبب هذا التمرين، يجب التذكير بحساسية آلية التصويت. نستخدم الهجوم المزماري عند بدء الكلمة بصائت مشدد. قل هذه الجملة و انتبه جيدا لطياتك الصوتية خلال انتاج أول فونيم من كلمة: okay, I want the car. اذا لاحظت تشكل توتر و ضغط لهذه الكلمات, كنت تجرب الهجوم المزماري.
- جميع هذه الأنواع من الهجمات وظيفية في الكلام و هي ليست مرضية أبدا. تحدث المشاكل عند سوء استخدامها. اذا أصبح الهجوم المزماري هجوم مزماري حاد , المتحدث يمكن أن يؤذي النسج الميكانيكية الصوتية الحساسة و الدقيقة. اذا قرب المتحدث الطيات الصوتية بشكل غير كافي , قد يهرب الهواء بينهما لانتاج تصويت صاخب تنفسي, ظاهرة أكثر انتشارا هي الصوت الصاخب الناتج عن تغير فيزيائي للنسيج الذي يعيق التقريب.

Ventricular phonation:(التصويت البطيني)

الطيات الصوتية الكاذبة أو the ventricular vocal folds هي فعليا غير قادرة على الاهتزاز للتصويت، و لكن في بعض الأحيان, البعض قد يستخدمها لهذا الهدف. نشهد الحالات التي يستخدم فيها المريض التصويت البطيني كاستجابة اعتيادية للاختلال الوظيفي الحاد للطيات الصوتية، مثل وجود الزوائد على الطيات. على ما يبدو أن المرضى يقومون باجبار الجدران العلوية الوحشية قريبا من بعضها خلال حركة التقريب، بالسماح للطيات بالاتصال و الاهتزاز.

ان الطيات الصوتية البطينية سميكة, والتصويت بها يكون عميقا و خشنا أحيانا. الطيات الكاذبة قد تتضخم (ازدياد في الحجم), مسهلة التصويت البطيني.

Laryngitis: هو التهاب في الحنجرة.

Aphonia: فقدان القدرة لانتاج التصويت للكلام.

Vocal hyperfunction: استعمال اليات التصويت بشكل مفرط, للكلام أو للوظيفة الغير كلامية, و هذا من المحتمل ينتج organic pathology.

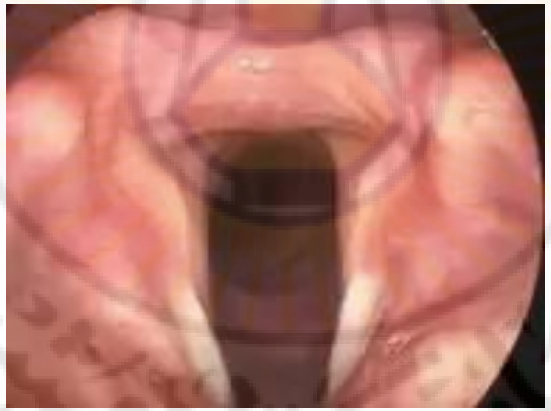
الإنـهاء:Termination

- نقرب الطيات الصوتية و نبدأ التصويت، و انهاء التصويت يتطلب ابعادهما عن بعضهما. نجذب الطيات الصوتية بعيدا عن تيار الهواء كفاية لتقليل الاضطراب، باستخدام القوة العضلية. عندما يقل الاضطراب بشكل كافي و فعال، تتوقف الطيات الصوتية عن الاهتزاز.
- كما في الهجوم الصوتي أيضا يمكن ان ننهي التصويت مرات عديدة خلال الكلام الجاري ليوفق بين الأصوات الكلامية المهموسة و المجهورة.
- كلا عمليات التقريب و التبعيد تحدثان بسرعة كبيرة. العضلات المسيطرة على هاتين الوظيفتين يمكنها اكمال التقلصات خلال 9 ميلي ثانية (ms).
- في الكلام الجاري، يمكن رؤية دورات مختصرة من اهتزاز الطيات الصوتية (ثلاثة دورات من الاهتزاز : تقريبا 25 مل ثا) للأصوات الغير مشددة، مما يجعل مجموع وقت التقريب، التصويت، و التبعيد فقط 53 على 1000 من الثانية.

التصويت المستمر Sustained phonation:

- الهجوم الصوتي يتطلب الفعل العضلي, كما الانهاء الصوتي. في المقابل, التصويت المستمر ببساطة يتطلب بقاء الوضعية الحنجرية من خلال انقباض مستمر للجهاز العضلي.
- هذه نقطة مهمة جدا. اهتزاز الطيات الصوتية تتحقق بتموضع و امساك الطيات الصوتية في التيار الهوائي بالطريقة التي تسمح للنواحي الفيزيائية التفاعل مع جريان الهواء, و بالتالي تسبب الاهتزاز. ان الطيات الصوتية تبقى مكانها في التصويت المستمر, و اهتزاز الطيات الصوتية ليس ناتج عن التقريب و التبعيد المتكرر للطيات الصوتية.
- مغازل العضلات هي مسؤولة عن بقاء المقوية العضلية. هذه الحساسات تؤمن المدخلات للجهاز العصبي عن طول العضلة التي في وضع الراحة, و عندما تتحرك العضلة بعيدا عن الوضعية المختارة من دون انقباض, يكون مغزل العضلة هو المسؤول عن تصحيح الخطأ.
- لذا خلال التصويت المستمر تبقى الطيات الصوتية في وضعية ثابتة من خلال التقلص المقوي للعضلات الصوتية لتحافظ على التواتر الاساسي للتصويت والشدة الثابتة ولا تتبدل ألا عند تبدلهما.

Phonation actually begins a few milliseconds prior to vocal fold approximation. As the vocal folds are brought together during attack, they begin vibrating as the turbulence increases, and this vibration is sustained as long as the folds are approximated and there is sufficient subglottal air pressure. Incidentally, vocal folds need not be touching to vibrate, as you can demonstrate for yourself. Begin the word *hairy* by stretching out the /h/ sound, and then let that breathiness carry forward into the vowel. The vocal folds very likely are not touching or are making only very light contact if you hear a breathy quality.



- الحبال الصوتية ليست بحاجة ان تتلامس فهي فقط تتقرب بشدة
- مخاطية الحبال الصوتية هي التي تعمل والتصويت مرتبط بها ارتباط تام اي ليس هناك اي ارتباط للعضلات ابدا.

دورة التصويت

- تساهم كل من كتلة ومرونة الحبال الصوتية في اطلاق اهتزاز دوري لها periodic vibration.
- اهتزاز الحبال الصوتية يسبب موجات من انضغاط وتخلخل جزيئات الهواء الخارج من المزمار. هذا الاهتزاز يكون مسموعا ويسمى بالصوت voice.
- للحبال الصوتية تواتر واحد بدئي أو رئيسي للاهتزاز يسمى التواتر الأساسي.
- يطلق التواتر الاساسي على عدد مرات دورات cycles اهتزاز الطيات الصوتية في الثانية.
- لكل تواتر أساسي مجموعه من التعزيزات، تؤمن هذه التعزيزات معلومات صوتية هامة تساعد في تمييز المقاطع الصوتية المختلفة.
- فلو افترضنا جدلا أن الحبال الصوتية تهتز بتواتر أساسي فقط دون تعزيزات لما كان بالإمكان تمييز حرف صوتي من آخر.

أنماط التصويت
Vocal Registers

- تهتز الحبال الصوتية وفق أنماط مختلفة تعبر عن الفعالية التي تخضع لها الحبال خلال دورة الاهتزاز الواحدة.
- يتم تسجيل دورة اهتزاز كاملة عندما يبدأ الاهتزاز من نقطة معينة ويعود لنفس النقطة ليتم دورة كاملة.
- يشار الى التبدلات المختلفة التي تبديها الحبال الصوتية أثناء دورة الاهتزاز بالRegister .
- هناك ثلاث أنواع رئيسة وهي: Glottal fry - Modal register – و Falsetto.

Damascus University

Modal Register
(النمط النسقي)

- هو نموذج التصويت الذي يستخدم عادة في المحادثة اليومية.
- يتم دراسة دورة الاهتزاز حسب الشكل المرفق على المستويين العمودي والأفقي.
- في المستوى العمودي تبدأ الحبال بالانفتاح من الأسفل إلى الأعلى Bottom – top وتبدأ بالانغلاق كذلك بنفس الترتيب.
- يفسر هذا الأمر بأن الانفتاح والانغلاق يتم نتيجة **تأثير الضغط تحت المزمار** على الطيات الصوتية التي تتحرك بشكل موجي.
- تعتبر كل من مرونة الحبال وكتلتها العامل الأساسي في هذا الاختلاف الفازي (اختلاف الطور) في دورة الاهتزاز وهو السبيل إلى استمرار الدورة الاهتزازية أو إعادة تشكلها عند عودة الضغوط.

Modal Register

(A) ANTERIOR VIEW

(A)

(D)

(C)

(G)

(F)

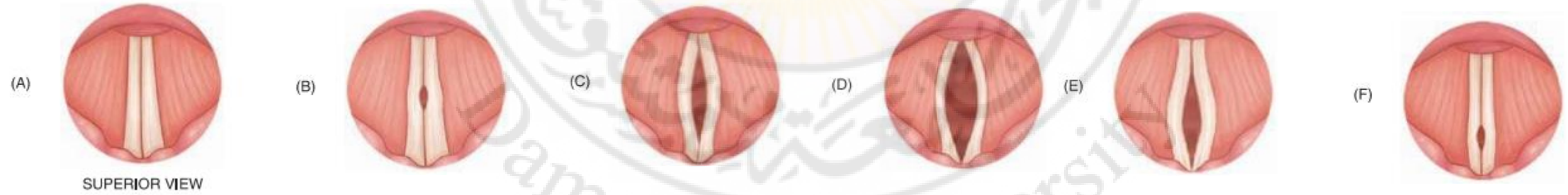
(B)

(E)

Modal Register

المنظر العلوي (الأمامي الخلفي):

- تتم دورة الاهتزاز بالمستوى الأمامي الخلفي بشكل أقل نمطية من المستوى العمودي، حيث أن انفتاح المزمار يبدأ أقرب إلى الخلف وصولا إلى الملتقى الأمامي أما في الانغلاق يختلف الوضع نسبيا حيث يبدأ التقاء الحواف المخاطية الأنسية للطيات الصوتية من الأمام وينتهي في الخلف.
- في هذا النمط من التصويت يجب توفير ضغط تحت المزمار يتجاوزأو يساوي 3-5 سم زئبق ويستمر على الأقل ل5 ثوان لنتمكن من توليده.



Damascus University

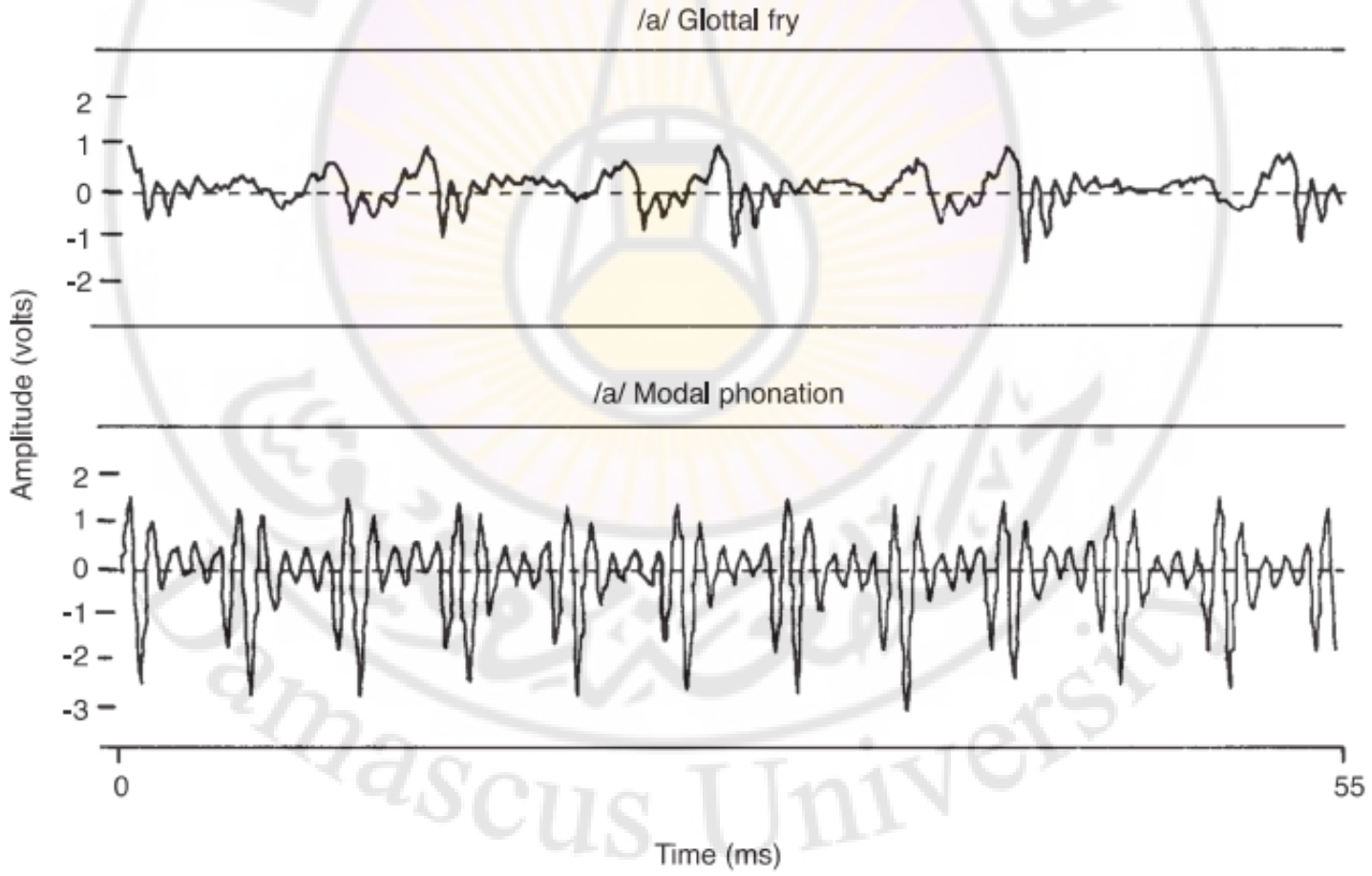
Modal Register

- ✓ عادة يسمى النمط النسقي بالنمط الصدري وهو النمط الاكثر استخداما في الحديث العادي وفي الغناء كما يمكن استخدام نمط آخر منه ويسمى النمط الرأسي حيث تستخدمه النساء عادة وهو ذو تواتر أعلى ويشعر به في الرأس.
- ✓ يمكن التحكم بعامل المرونة للحصول على درجة توتير معينة ثابتة للحبال تساعد في توليد صوت حنجري (نغمة) ثابت نسبيا قد يكون منخفض يسمى الصدري chest لأننا نشعر به في الصدر أو يكون حاد أو مرتفعا نسميه الرأسي Head ونشعر به في الرأس، كما يمكن أن يسمى الأول مودال 1 والثاني مودال 2.

Glottal Fry

- النمط الثاني لفعالية الحبال الصوتية أثناء التصويت يسمى بالقلي fry أو النابض pulse أو القشي straw bass وكل ذلك نسبة للنمط الفرقعي Crackly (popcorn) للصوت الذي يولده.
- غالبا يكون هذا الصوت منخفض الرقعة بشدة Low pitch وخشن كصوت قلي البيض في المقلاة. بعض المختصين أطلقوا عليه اسم "صوت أنا مريض" I`m sick voice كدلالة إلى الصوت الضعيف الخشن المنخفض الذي تستخدمه عندما تريد أن تبرر غيابك عن العمل.
- يتم توليد هذا النمط من خلال تبدلات معقده في الطيات الصوتية وبتواترات منخفضة جدا 30 هرتز أو 70-80 هرتز ويكفي ضغط منخفض تحت المزمار لتوليده واستمراره بحدود 2 سم زئبق.
- يعتبر هذا النوع نمط ثانويا رخيما syncopated للتصويت وكأنه يمثل النبض Beat المرافق لكل دورة تواتر أساسي بحيث تمضي الحبال الصوتية 90% من الدورة الاهتزازية في وضعية التقريب.

- تكون وضعية الطيات الصوتية مشدودة من الجانب الوحشي وطريه من الجانب الأنسي (أقل توتيرا من النمط الأول Modal) وتبقى حواف الطية مضغوطة للأنسي ثخينه وقصيرة مع ضغط منخفض تحت المزمار ولو شدت أكثر من ذلك لتوقف إصدار هذا النمط المفرقع.



Falsetto

- وهو النمط الثالث الأكثر ارتفاعا في أنماط التصويت ويتميز بنمط اهتزاز مختلف عن الشكل الأصلي Modal.
- في الفالسيتّو تتطاول الطيات الصوتية بشكل كبير وتصبح رقيقة جدا كحواف المشط Reed like.
- عندما تبدأ بالاهتزاز تميل الطيات الصوتية في هذا النمط لأن تهتز على طول الحواف المشدودة والمنحنية بشكل مختلف عن الانماط الاخرى السابقة.
- يكون تماس الطيات هنا قصيرا جدا ومطال الحركة الاهتزازية صغيرا بعكس النمط النسقي ويميل الملتقى الخلفي لأن يكون منخفضا لكي لايسمح باستخدام كامل طول الطيات ويبقى التصويت محصورا بجزء محدود أمامي على عكس زيادة طبقة الصوت التي تستوجب تطويل كامل الطية الصوتية.

Falsetto

- يتم إدراك الفالسيتو على شكل صوت رفيع عالي التواتر بشدة كأن يصل تواتره إلى 300 أو 600 هرتز وبالرغم من ذلك يمكن للأنماط الأخرى للتصويت أن تطغى عليه.
- النمط الصفيري Whistle register: وهو نمط أكثر ارتفاعا من الفالسيتو ولكن لا يمكن اعتباره نمطا من انماط التصويت الاهتزازية وانما ينجم عن الاضطراب turbulence على حواف الطية الصوتيه لينتج صوتا حادا يصل تواتره الى 2500 هرتز بشكل أساسي عند النساء ويسمى بالصفير.

The shift from modal register to glottal fry or falsetto is clearly audible in the untrained voice. If you perform an up-glide of a sung note, reaching up to your highest production, you may hear an audible "break" in the voice as you enter that register. Trained singers learn to smooth that transition so that it is inaudible.

Falsetto types: Pressed & Breathy Phonation

التصويت المضغوط والتنفسي (اللاهث)

- المضغوط : وفيه يتم تقريب الحواف الأنسية للطيات الصوتية بشكل مبالغ فيه بحيث يتم زيادة كل من حدة Stridency وقساوة Harsh الصوت وأيضا زيادة الاجهاد الصوتي وسوء استخدام الصوت voice abuse. نتيجة هذا النموذج هي إصدار صوت مرتفع وقوي كجلب للانتباه مثلا وهذا التقريب الشديد للطيات الصوتية يؤذي الحبال عادة.
- التنفسي أو اللاهث : وهو النمط المعاكس للنموذج المضغوط حيث يكون انغلاق المزمار مناسب بحيث يسمح بهروب المزيد من الهواء عبره مسببا التصويت التنفسي وهو نمط غير فعال عادة ويسبب هروب الهواء بسرعة ولكنه غير مؤذي في نفس الوقت لميكانيكية التصويت.
- ملاحظة هامة: بالرغم من سلامة التصويت التنفسي يجب الانتباه انه قد يكون دالا على وجود آفة عضوية في المزمار تمنع الانغلاق الكافي له كالعقيدات الصوتية والبوليبات والتنشؤات. كما أن محاولة الشخص المصاب بآفة عضوية بشكل مستمر للتغلب على هروب الهواء واغلاق المزمار بالقوة سيؤدي إلى عسرة تصويت وأذية voice abuse.

Whispering
الهمس

- لا يعتبر الهمس أحد أشكال التصويت حيث أنه لايولد صوتا ولكن يبقى هناك تموضع خاص للحنجرة أثناء الهمس ولكنه لايشمل على الاهتزاز. جرب نطق (ها) بعد زفير وانتبه الى الشد الحاصل في حنجرتك.
- في الهمس تنتقل الحبال من وضعية التبعيد التنفسية إلى وضعية تقريب وشد للحبال لإحداث اضطراب turbulence في مسير الهواء الجاري.
- تدور الغضاريف الطرجهارية نحو الأنسي ولكنها تبقى مبتعده في الخلف مسببة بقاء انفتاح في البنى الغضروفية وليس فقط في المزمار.
- بالرغم من أن الهمس لايحتوي صوت ولكنه يوتر الحنجرة ويسبب تعب صوتي vocal fatigue.
- لا يساعد الهمس في حفظ الضغط التنفسي للتصويت بل على العكس يهدر كمية كبيرة من الهواء!
- جرب ذلك باصدار (آا) بوضعية الهمس ووضعية التصويت ولاحظ الفرق الجسيم.

Frequency, Pitch, and Pitch change

- طبقة الصوت: هي المرادف الإدراكي للتواتر.

  وهما مرتبطان جدا وقريبان من بعضهما البعض.

- عندما يرتفع التواتر ترتفع طبقة الصوت وكذلك عندما تنخفض وهي مسألة مهمة جدا في إدراك الكلام.

- تهتز الحبال الصوتية بفعل قوى الكتلة والمرونة بتواتر معين، وهي تميل لحفظ هذا التواتر طالما بقيت هذه المتغيرات ثابتة ومع ذلك يمكن أن يتغير التواتر بتغيير معدل الاهتزاز.

frequency: *number of cycles of vibration per second*

pitch: *the psychological (perceptual) correlate of frequency of vibration*

Damascus University

Optimal Pitch

- وهو مصطلح يشير إلى طبقة الصوت الأكثر ملائمة للشخص وهو يتناسب مع مرونة وكتلة الحبال لكل فرد.
- يمكن تقديرها من قبل خبراء الصوت من خلال المجال التواتري للتصويت للفرد (عادة تحسب الطبقة كونها ربع **اوكتاف** الحد الادنى للمجال التواتري لاهتزاز الحبال الصوتية)، كما يخمنها البعض الآخر من خلال صوت السعال أو صوت تنظيف الحلق حيث تمثل التواتر الامثل لاهتزاز الحبال دون تدخل المحتويات الادراكية للتصويت المستخدمة في التواصل الكلامي.
- تختلف (تتبدل) الطبقة المثالية حسب العمر والجنس (؟؟؟ - الكتلة – تبدلات البلوغ).

optimal pitch: *the perceptual characteristic representing the ideal or most efficient frequency of vibration of the vocal folds*

Optimal pitch varies as a function of gender and age. You can expect an adult female to have a fundamental frequency of approximately 212 Hz during a reading task, whereas the optimal fundamental frequency for an adult male will be much lower, around 132 Hz, for the same task. Mean fundamental frequency will tend to be lower for spontaneous speech, and it tends to increase with each decade of life.

The reason for the difference in fundamental frequency between males and females has everything to do with tissue mass and length of the vocal folds. During puberty, males undergo a significant growth of muscles and cartilages, resulting in greater muscle mass in males than in females. The laryngeal product of this growth is the prominent Adam's apple you can see in boys, as well as a significant drop in fundamental frequency arising from the increased mass of the folds (see Figure 5-8). Children will have a fundamental frequency in the vicinity of 300 Hz, but that rapidly changes in both boys and girls during puberty. Take a look at the Clinical Note on puberphonia to

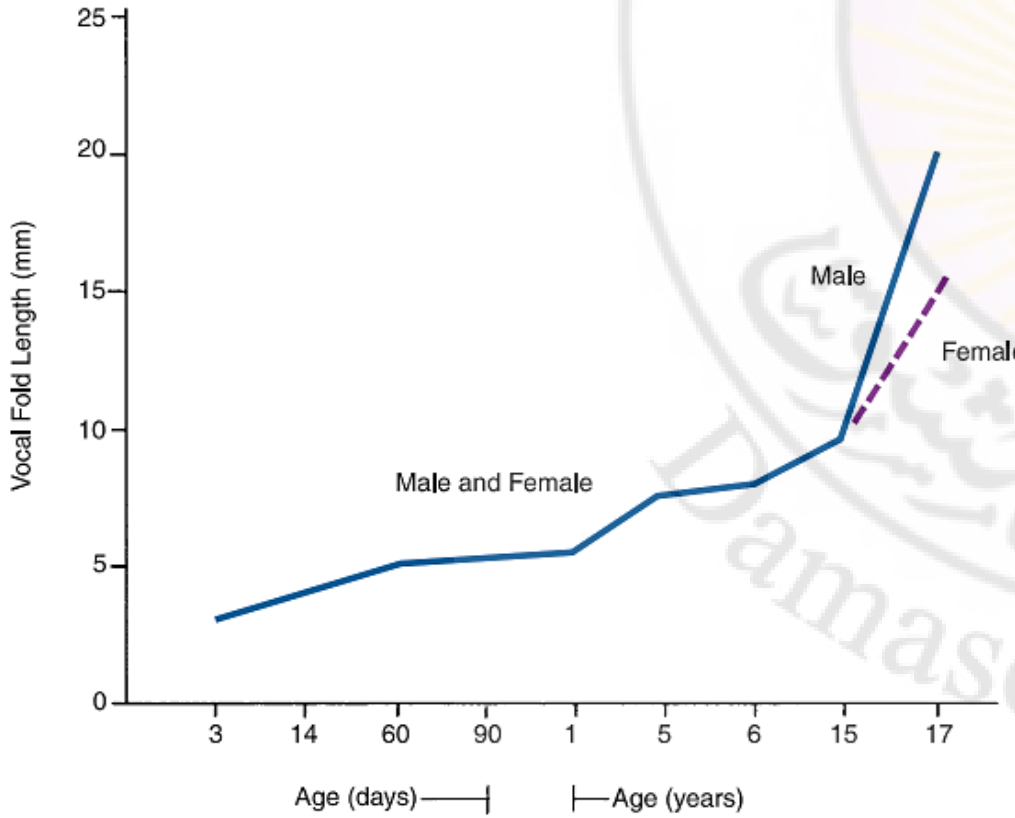


Figure 5-8. Changes in vocal fold length for males and females as a function of age. Note that males and females have essentially the same length of vocal folds until puberty, at which time both genders undergo marked physical development. (Data of Kaplan, 1971.)

Source: Delmar/Cengage Learning

Habitual Pitch

- وهو يشير إلى طبقة الصوت (تواتر الاهتزاز) الذي يستخدم عادة في الكلام العادي.
- قد يكون هو نفسه التواتر الأمثل أو غيره حيث أن هناك مبررات كثيرة لدى الشخص لاستخدام طبقة مختلفة عن الطبقة الأمثل لعمره أو جنسه أو مقاسه حتى.
- رغم أن لجوء الشخص لاستخدام طبقة أعلى أو أدنى من التواتر الأساسي لصوته لا يعتبر قرارا صائب دائما حيث أن يترك أثرا على فعالية التصويت وجهده.
- عندما تجبر الحبال على الاهتزاز بتواتر أعلى من تواترها الأساسي يتم بذل جهد إضافي للحفاظ على استمرارية التصويت يسبب تعبا فيزيائيا.
- يمكن تحري هذه الطبقة من خلال الطلب من الشخص التصويت المستمر لأحد الأحرف الصوتية بمفرده أو داخل كلمة محكية، مثلا آاا أو داااار.

Average Fundamental Frequency

- هو متوسط تواتر اهتزاز الحبال الصوتية خلال التصويت المستمر.
- يمكن تقديره من خلال تقدير طبقة الصوت العادية او تواتر الاهتزاز خلال **حديث** مطول للشخص ومستمر وهي قد تعبر بشكل أفضل عن التواتر الاساسي اكثر من نطق حرف صوتي مطول.

Damascus University

Pitch Range

- وهو المجال الذي يتبدل فيه التواتر الاساسي للتصويت بين اقل قيمة واعلى قيمة ممكنة له.
- عادة تستطيع الحنجرة العادية ان تنتقل بالتواتر على مجال 2 اوكتاف بين اقل واعلى تواتر اهتزاز.
- مثلا اذا كان التواتر الاساسي للشخص 90 هرتز يمكن ان يصل أعلى تواتر ممكن عنده الى ؟؟؟؟
- لنجرب معا كم اوكتاف يمكن ان نبدل من طبقة صوتنا.
- طبعا يتحدد هذا المجال ويضيق في امراض الحنجرة كالعقيدات الصوتية وبالعكس يزداد المجال بالتمرين المستمر.

Vocal Intensity
شدة الصوت

- شدة الصوت: تشير إلى القوة أو الضغط النسبي للإشارة الصوتية وتقاس بالديسبل dB.
- الشدة: تتعلق بمستوى ضغط الصوت Sound pressure level (SPL).
- وظيفيا في التصويت تنجم شدة التصويت بشكل مباشر عن الضغط المطبق من قبل الموجة الصوتية (المولدة من قبل الضغوط التنفسية).
- كلما زادت هذه الضغوط كلما زادت القوة المؤثرة في اهتزاز الطيات الصوتية كلما ازدادت شدة التصويت بالنتيجة.

intensity: *magnitude of sound, expressed as the relationship between two pressures or powers*

vocal intensity: *sound pressure level associated with a given speech production*

الشدة وتغيراتها

- حدة الصوت Loudness: هي المقابل الإدراكي Psychological لشدة الصوت Intensity.
- إذا الشدة هي القياس الفزيائي للقوة أو الضغط أما الحدة فهي تعني كيف ندرك هذا الضغط أو نشعر باختلافه.
- لزيادة شدة الصوت يجب إحداث تغيير في القوى التي تفتح وتغلق المزمار وهي في التصويت المستمر تتعلق فقط بضغط الهواء المطبق تحت الحبال وبجريان الهواء عبر المزمار.
- الضغط تحت المزمار وجريان الهواء هي القوى الأساسية المتحكمة بعملية التصويت ولزيادة شدة الصوت يجب تعديل هذه القوى.
- جرب ذلك بنفسك: استعد لكلام عالي – تكلم – لاحظ التغيير.
- زيادة الضغط تحت المزمار و الانضغاط الأنسي هما الخطوتان الأساسيتان لهذه العملية.

الشدة وتغيراتها

- في زيادة الشدة لايقتصر الامر فقط على تغيير توتر الحبال كتغيير الطبقة وإنما يتطلب زيادة في الضغط تحت المزمار (القوة المصدرة للتصويت).
- لنفهم دور الانضغاط الأنسي في عملية زيادة الشدة لنسترجع معا مراحل دورة التصويت بين الانفتاح والانغلاق حيث أنه يمكن تقسيمها إلى ثلاث مراحل:
  1. مرحلة الانفتاح opening stage (phase): حيث تكون الحبال منفتحة.
  2. مرحلة الاغلاق closing stage (phase): حيث تكون الحبال في طور العودة إلى وضع التقريب.
  3. مرحلة الإنغلاق التام closed phase: حيث لايكون هناك أي جريان هوائي بين الحبلين.
- تمضي الحبال 50% من وقت دورة التصويت في طور الانفتاح و37% في طور الاغلاق وهناك فترة تقارب 13% من الدورة الصوتية تكون فيها الحبال منغلقة تماما في الطور الثالث.
- لوحظ أنه عندما تكون الحبال متقاربة باحكام لزيادة شدة التصويت فإنها تميل لأن تعود بسرعة إلى طور الاغلاق وتمضي وقتا أطول في الطور الثالث closed phase. (علل؟)

عند زيادة شدة التصويت ينقص طور الانفتاح لما دون 33% من دورة التصويت في حين يزداد طور الإغلاق التام لما يزيد عن 30% من الدورة.

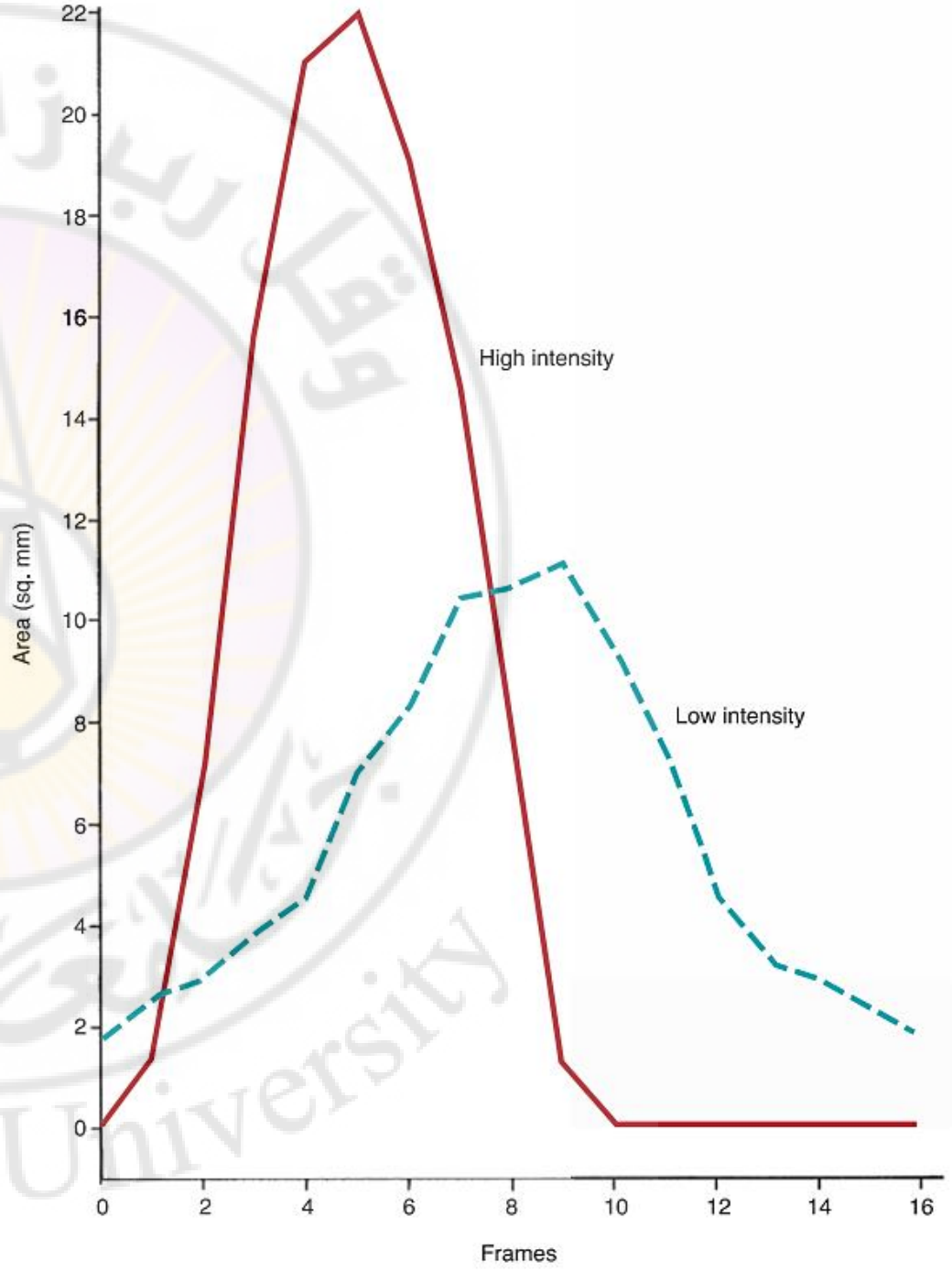


Figure 5-11. Effect of vocal intensity on vocal fold vibration. During low-intensity speech the opening and closing phases occupy most of the vibratory cycle, as revealed in the area of the glottis. During high-intensity speech the opening phase is greatly compressed, as is the closing phase, while the time spent in the closed phase is greatly increased. (Data from Fletcher, 1950.)

Source: Delmar/Cengage Learning

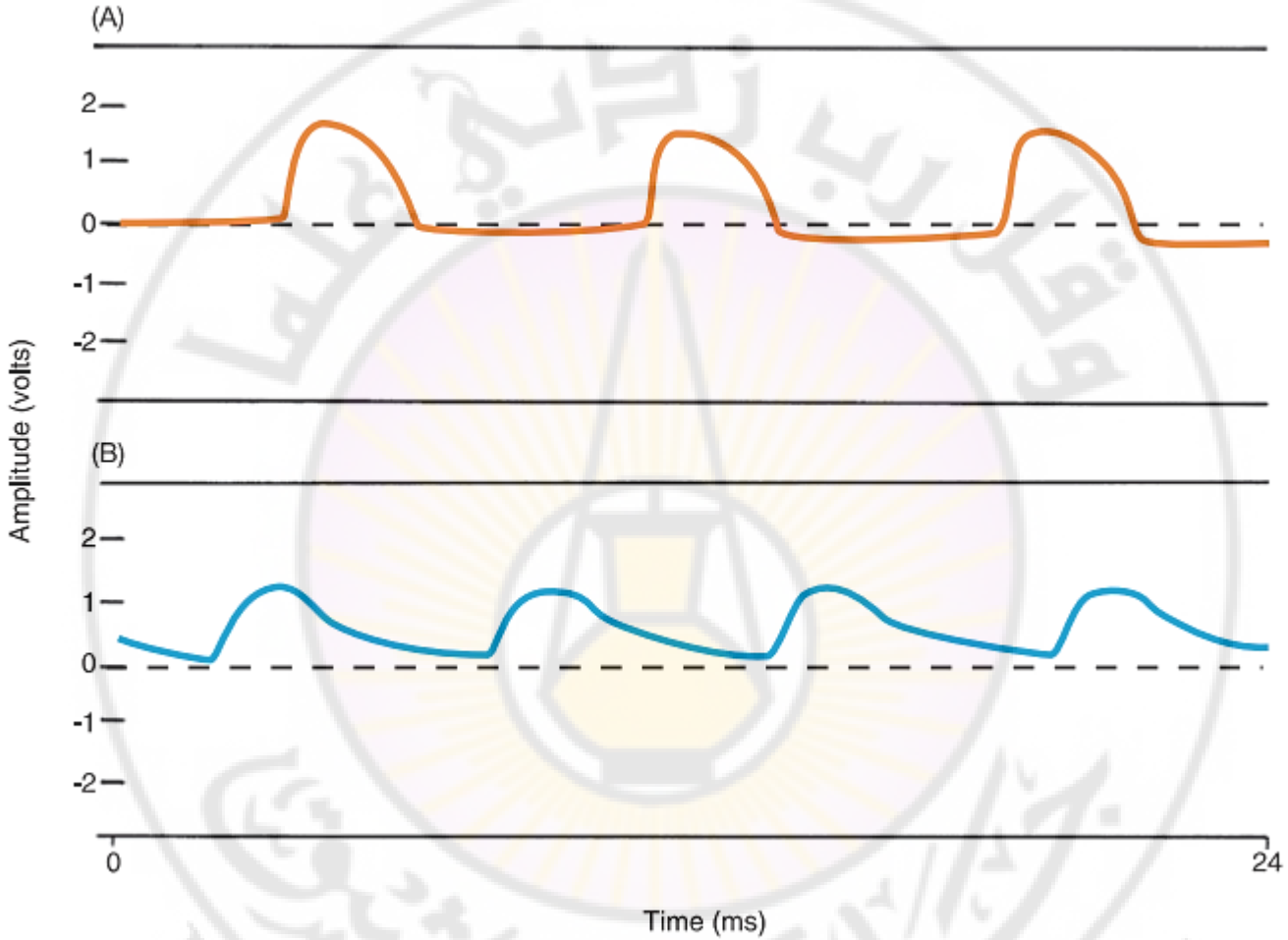


Figure 5-12. Effect of vocal intensity, as shown through electroglottographic trace. The electroglottograph measures impedance across the vocal folds, and the peak represents the closed phase of the glottal cycle. (A) Conversational-level sustained vowel. (B) High-level sustained vowel.

Source: Delmar/Cengage Learning

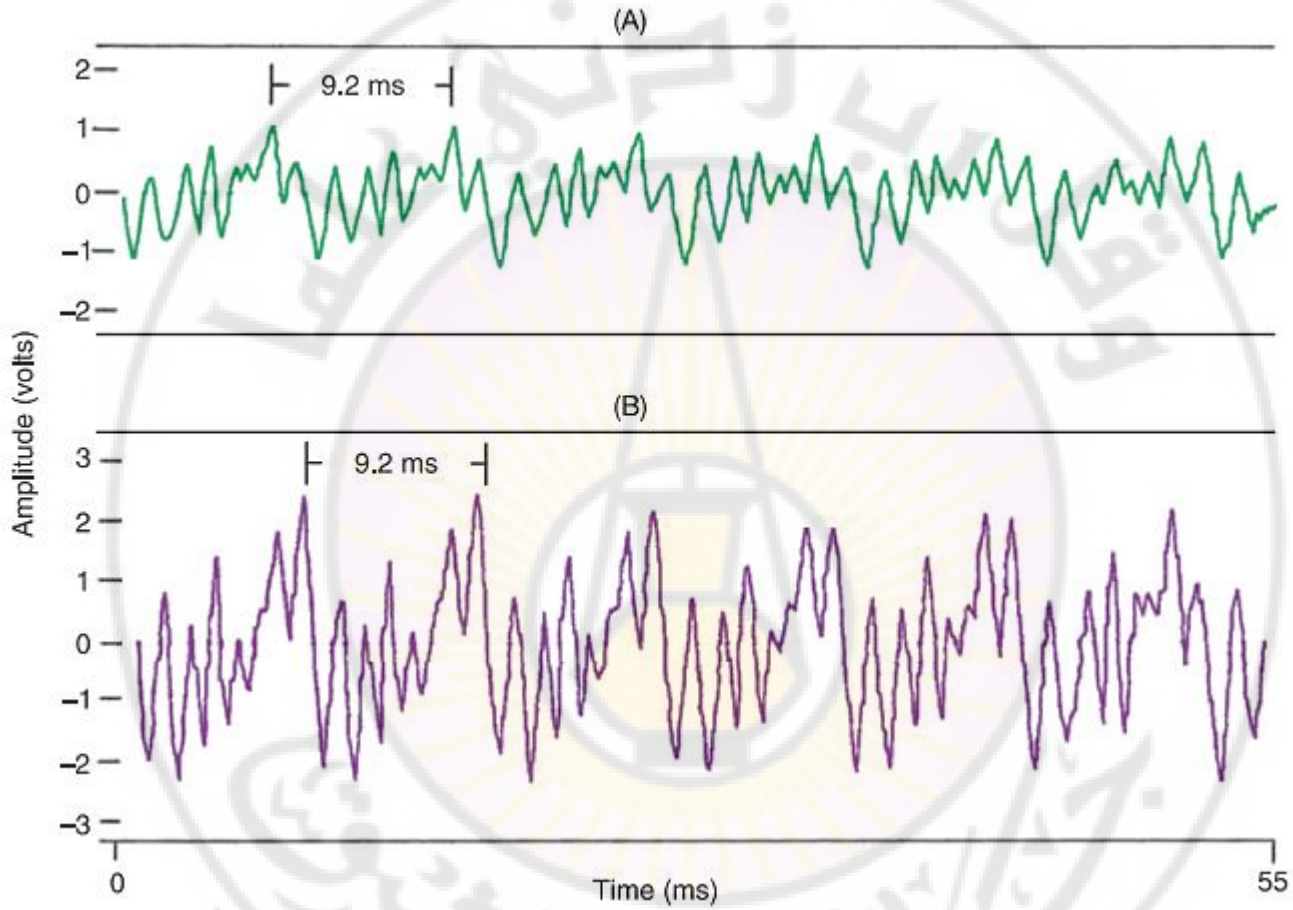


Figure 5-13. Oscillogram of sustained vowel at two vocal intensities. (A) Sustained vowel at conversational level. (B) Sustained vowel at increased vocal intensity. Although the vocal intensity increases, the period of each cycle of vibration remains constant at 9.2 milliseconds.

Source: Delmar/Cengage Learning

الشدة وتغيراتها

- كلا المسارين في الشكل السابق يظهران عدم تغير في التردد بين الصوت المنخفض والمرتفع حيث تبقى مدة دورة التصويت ثابتة.
- قاعدة: كل من التردد (الطبقة) والشدة (الحدة) هما متغيران مستقلان يتم التحكم بهما كل على حدة.
- هناك تناقض واضح Paradox حول هذه القاعدة: إن القوى المتحكمة بالتواتر والشدة هي الضغط تحت المزمار ومستوى شد الحبال في وضعية التقريب وبالتالي يبدو من الصعب جدا تغيير شدة الصوت بزيادة الضغط والتوتير دون تأثر طبقة الصوت. طبعا هناك أشخاص مدربين بشكل جيد يمكنهم القيام بذلك.
- جرب ذلك بنفسك: اصرخ بشدة متزايدة وراقب طبقة صوتك كيف ترتفع. جرب مجددا ذلك مع محاولتك ضبط طبقة الصوت دون تغيير.
- العلاقة بين مستوى شدة الصوت وشدةالضغط تحت المزمارتتعلق بالمتحدث ذاته ولكن تقديريا عندما يتضاعف الضغط تحت المزمار ترتفع شدة صوت المتحدث بما يعادل 8-12 ديسبل.

اعتبارات سريرية

- تتأثر عملية التصويت بشكل مهم جدا بالحالة الصحية للشخص المتحدث.
- كما رأينا أن عملية التصويت تتطلب جهدا عضليا للقيام بها وهذا الجهد يتأثر بالامراض التي يتعرض لها الشخص كالأمراض العصبية العضلية.
- كما أن الأمراض التنفسية تعتبر من أهم العوامل المؤثرة في التصويت حيث أنها تسبب انخفاض في شدة التصويت وتضيق في المجال الترددي (pitch range).
- هناك العديد من الوسائل السريرية والاختبارات التي تساعد في قياس اضطرابات التصويت وثباته ويعتمد عليها سريريا بشكل متزايد مؤخرا.

اضطراب التردد Frequency perturbation

- هو قياس تبدلات التصويت دوره بدورة.
- الاضطراب أو نرفزة التصويت voice jitter هي دليل مهم على قوة وثباتية العضلات وتتطلب أدوات لقياسها.
- يطلب إلى الشخص أن يقوم بإصدار صائت بشكل مستمر ويسجل صوته ثم يحلل كمبيوتريا على محور الزمن، ويقارن البرنامج مدة أول دورة تصويت ثم يقيس الثانية بطرح الأولى وهكذا يقيس كل دورة ثم يقيس الاختلاف بين كل دورة وأخرى وفي النهاية يتم حساب متوسط الاختلافات والذي يسمى مشعر الاضطراب أو ال jitter index حيث أنه يمكن قبول اضطراب بحدود 1-2% أما أكثر من ذلك فيتم تفسيره بشكل بحة في الصوت hoarse (صوت أجش أو عريض أو خشن) (لماذا؟؟)
- يصلح هذا المشعر لقياس صوت الشخص نفسه في زيارات متعددة ولايصلح للمقارنة بين الأشخاص.

vocal jitter: *cycle-by-cycle variation in fundamental frequency of vibration*

العوامل المؤثرة في اضطراب التردد

- يكون مشعر الاضطراب أقل ما يمكن عند الأصحاء.
- يزداد الاضطراب عند مرضى الاضطرابات العصبية العضلية neuromuscular dysfunction.
- يزداد الاضطراب بازدياد الكتلة (مثلا العقيدات الصوتية).
- ينقص الاضطراب مع تطبيق العلاجات التي تنقص الكتلة (المعالجة الكلامية).

زمن التصويت الأعظمي
Maximum phonation time

- وهي الفتره التي يستطيع خلالها الشخص أن يستمر بالتصويت.
- يفيد هذا المقياس بسبر كل من الآليات التصويتية والتنفسية معا.
- يمكن قياس التنفس باختبار طول الزفير القسري بدون تصويت ومن ثم قياس مدة التصويت الاعظمي لتعطي فكرة عن الوظيفة الحنجرية.

Maximum phonation time: The maximum amount of time a person can sustain phonation of "ah" is timed. Typically, adult females sustain phonation of "ah" from 15 to 25 seconds; while males range from 25 to 35 seconds.

معدل تناوبية الحركات
Diadochokinetic

- ويسمى أيضا المعدل الحركي التناوبي alternating motor rate وهو يدل على عدد المقاطع المفردة أو المركبة syllable التي يستطيع الشخص أن ينتجها في الثانية.
- يعتبر هذا المقياس مشعرا هاما لوظيفة جهاز التمفصل articulator.
- وفي نفس الوقت يمكن أن يكون مشعرا جيدا للتنسيق بين كل من جهازي التصويت والتمفصل.
- يجرى الاختبار بأن نطلب من الشخص إصدار مقطع معين عادة (puh, tuh, kuh) ، أي صوت فموي – لساني – حركي وبعد التدريب على إصدارها نحصي عدد المقاطع القادر على تكرارها في وحدة الزمن (الثانية مثلا) وهي تعطي مشعر التناوبية DDK.
- هناك مقادير طبيعية معممة للأطفال والبالغين ولكل مرحلة عمرية.
- يستخدم هذا المشعر كثيرا في اضطرابات الكلام واللغة والاضطرابات المعرفية والعصبية.

الجوانب اللغوية لطبقة وشدة الصوت

suprasegmental: *parameters of speech that include prosody, pitch, and loudness changes for meaning*

prosody: *the system of stress used to vary the meaning in speech*

intonation: *the melody of speech, provided by variation of the fundamental frequency during speech*

stress: *the product of relative increase in fundamental frequency, vocal intensity, and duration*

- تسهم كل من طبقة وشدة الصوت في العناصر العليا للكلام.
- العناصر العليا أو suprasegmentals هي محددات الكلام التي تتجاوز مستوى المقطع الكلامي phonetic level.
- يشار بهذا المصطلح عادة إلى عناصر العروض Prosody.
- عناصر العروض هي: الطبقة – الحدة – التنغيم intonation – التشديد stress – المدة duration – والريتم Rhythm.
- تساعد هذه العناصر في إضافة المشاعر والمراد من الكلام كما تساعد كثيرا في رفع الغموض عن معنى الكلام.
- يقصد بالتنغيم فزيولوجيا تغيير الطبقة أثناء الحديث.
- يقصد بالتشديد التأكيد على مقطع أو كلمة من الكلام دون باقي مكوناته.

التنغيم

- يمكن تنغيم الجملة بطريقة تغير القصد من الجملة. مثلا صيغة الأمر أو صيغة الدهشة.
- يفيد التنغيم في تعيين نمط الجملة (استفهامية – خبرية – آمرة ...).
- عادة يميل التنغيم للانخفاض في آخر الجملة الخبرية falling intonation في حين يأخذ النمط المرتفع في الجملة الاستفهامية Rising intonation.
- عند قراءة الجملة التالية بصيغة الخبر وبصيغة السؤال: Bev bombed Bob و Bev bombed Bob?.
- لاحظ دور العضلات الحنجرية (الحلقية الطرجهارية – الحلقية الدرقية – الدرقية الصوتية) في إحداث هذا التغيير.

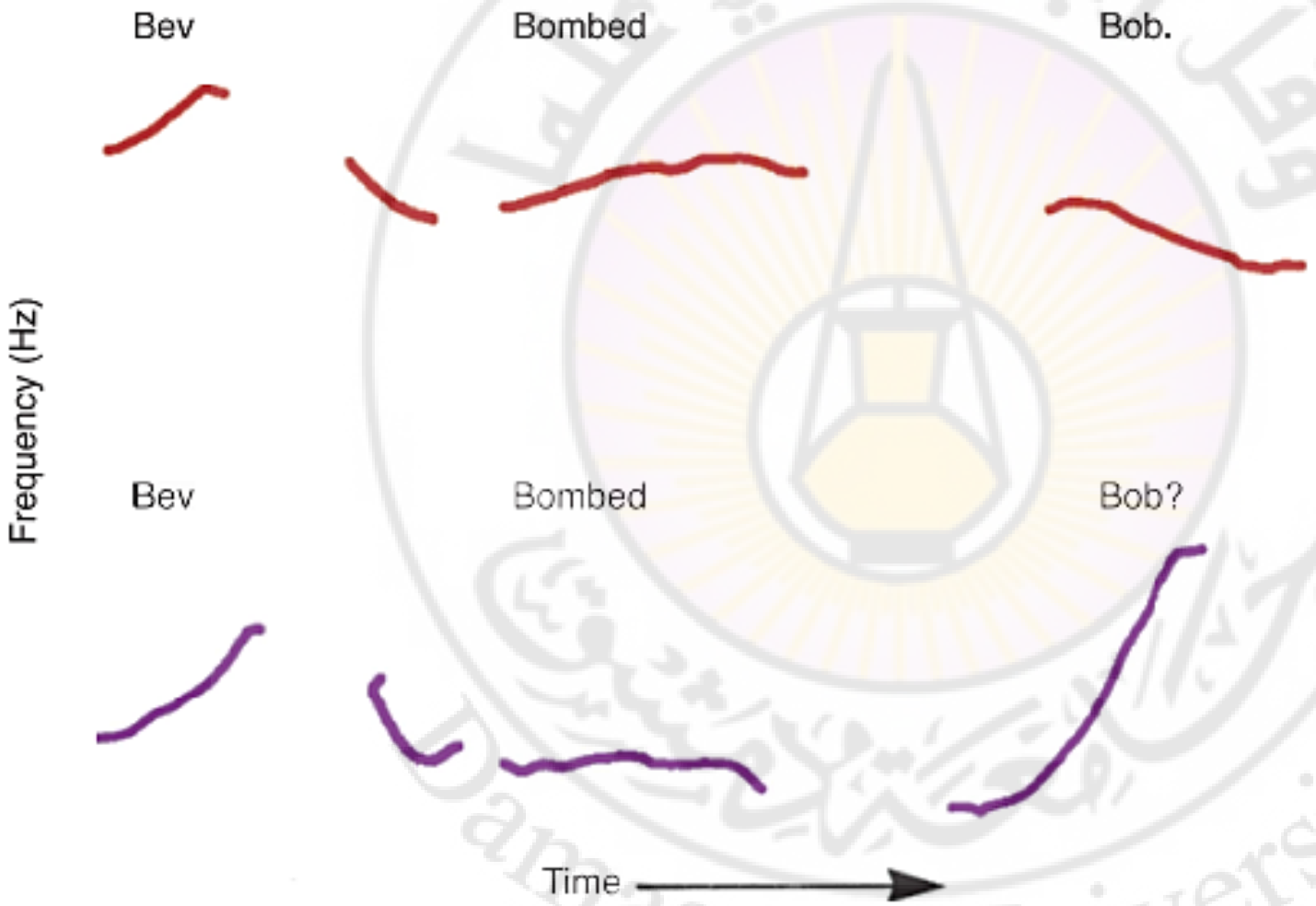


Figure 5-14. Fundamental frequency fluctuation for declarative statement and question form. Note the difference in falling and rising intonation between these two sentence forms.

Source: Delmar/Cengage Learning

Damascus University

التشديد أو النبر

- يفيد التشديد في تنقيط الكلام. من خلال التشديد على بعض المقاطع أو الكلمات في الحديث باستخدام تغيير الشدة والتواتر.
- لزيادة التشديد في الكلام نقوم بزيادة التواتر الأساسي أو شدة الصوت من خلال زيادة الضغط تحت المزمار وزيادة الانضغاط الأنسي وأيضا توتير الحنجرة.
- كما ذكرنا سابقا عادة ما يترافق التغيير بالطبقة مع تغيير الشدة بسبب ارتباط آلياتهما الفزيولوجية ولذلك نتوقع عند تغيير التشديد حدوث تغيير في كل من الطبقة والشدة.
- لايختلف دور العضلات الحنجرية كثيرا بين التنغيم والتشديد حيث تسهم كل من العضلات الحلقية الطرجهارية الجانبية والدرقية الصوتية والحلقية الدرقية في احداث التموضع الحنجري المناسب للتشديد ولكن يجب أن لا يغفل دور زيادة الضغط تحت المزمار الذي يحدث بشكل انفجارات سريعة وسط الكلام من زيادة الضغط معتمدا حتما على دور العضلات الزفيرية.

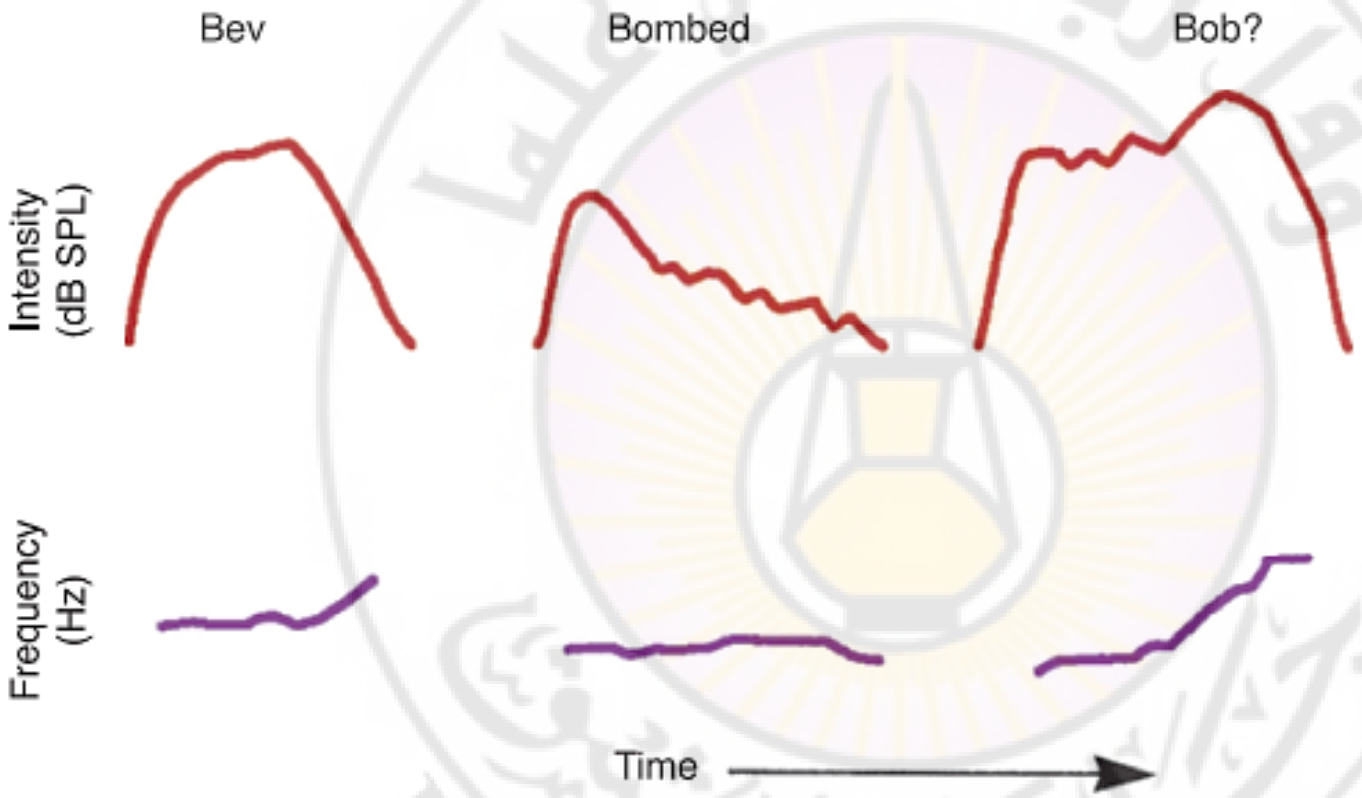


Figure 5-15. Fundamental frequency and intensity changes during production of a question form.

Source: Delmar/Cengage Learning

Damascus University

Although stress and intonation are not *essential* for communication, they *are* essential for naturalness. Clearly you can speak in a **monopitch** (unvarying vocal pitch) or **monoloud** voice (unvarying vocal loudness), but the effect is so distracting that it certainly interferes with communication. You may find individuals with neurological impairments who show both of these characteristics. Treatment directed toward increasing muscular effort at points requiring stress will greatly enhance the naturalness of speech, because increasing vocal effort at these points will inevitably increase both fundamental frequency and vocal intensity.

monopitch: *without variation in vocal pitch (the perception of frequency)*

monoloud: *without variation in vocal loudness (the perception of vocal intensity)*

Natural , training , skill , or disease: Parkinson disease and Pseudobulbar palsy

نظريات التصويت
Theories of Phonation

- Helmholtz 1800: أول من وضع نظرية التصويت واستمر التحديث في نظريات التصويت إلى يومنا هذا. المتفق عليه بين كل النظريات هو أن اهتزاز الحبال الصوتية هو مصدر التصويت.
- the Myoelastic- Aerodynamic theory: وتنص هذه النظرية على أن التصويت ينجم عن اهتزاز الحبال الصوتية المتعلق بمجموعة من القوى والعوامل المذكورة في اسم النظرية.
العضلات الحنجرية من (myo) والنسج المرنة للحنجرة وأربطتها (elastic) يضاف إليها العنصر الحركي الديناميكي لجريان الهواء عبر هذا الانبوب المتضيق (aerodynamic).
- Van den Berg 1958 هو أول من وصف دور مرونة الأنسجة في عودة الحبال الصوتية إلى وضعيتها بعد التقريب ودور أثر برنوللي في إحداث الضغط المنخفض.

Bernoulli effect helps promote the vocal folds return by dropping the pressure at the constriction

نظريات التصويت
Theories of Phonation

- Hirano 1983 and Titze 1994: قاما بتوضيح المزيد من الخصائص الدقيقة والرائعة التي تبديها أداة التصويت هذه. وهما أول من أوضح أن الارتباط غير المحكم loosely بين البنى المختلفة للطية الصوتية : الغطاء cover المتمثل بالمخاطية والجسم body المتمثل بالحبل الصوتي والقوى المرنة المتمثلة بالعضلات. هذه البنى المختلفة والعلاقة الدقيقة بينها هي التي تعطي للحبال الصوتية هذه القدرة اللامتناهية أو الغير قابلة للعد على الأقل لانتاج هذا الطيف الواسع من أنماط التصويت المختلفة.

[redacted] Titze recognized that this complex vibration arises from the loosely bound masses associated with the membranous **cover** of the vocal folds (the epithelium and superficial layer of the lamina propria) and the **body** of the vocal folds (the intermediate and deep layers of lamina propria and thyrovocalis muscle). The loosely bound elastic tissue supports oscillation, and viewing the soft tissue as an infinite (or at least uncountable) number of masses reveals that a very large number of modes of vibration is possible. [redacted]