مسار التمثيل الرقمي للصوت اللغوي

دراسة تحليلية في إطار علم اللغة الحاسوبي

Digitization pathway of speech

Analytical study within the scope of computational linguistics

د.محمد رأفت محمود فرج (*)

الملخص:

يأتي هذا البحث في إطار نسق علمي يعتمد في رؤيته على الأثر المهم للتمثيل الرقمي في النهوض بالمعالجات الحاسوبية على صعيد الأصوات اللغوية التي تمثل أساس المنظومة اللغوية وجوهرها وأكثر الرموز اللغوية الحاملة للمعنى استعمالاً وأهمية على الإطلاق، ومن بين مسارات معالجة الصوت اللغوي حاسوبيًا يتناول البحث مسار التمثيل الرقمي للمعطيات الصوتية لما له من أثر جلي في توجيه الدراسات الحاسوبية للصوت اللغوي بصورة تُمهد الطريق أمام مطوري التطبيقات الحاسوبية لمعالجات أفضل وأكثر كفاءة في ظل نظام من الترميز أساسه الواحد والصفر(1/0) يتوافق مع طبيعة الحواسيب الآلية القائمة على ثنائية الوصل والفصل (On/Off)، ومن ثمَّ تتبع البحث المراحل التنفيذية لمسار تمثيل الأصوات رقميًا بداية من إنتاج الصوت مرورًا بانتقاله عبر وسيط مادي وصولاً بآلية استقباله في صورة تقبلها الآلة وتتعامل معها تمهيدًا لمعالجة أفضل بواسطة الأنظمة والتطبيقات الحاسوبية بغرض القيام بمهام متعددة.

الكلمات المفتاحية:التمثيل الرقمي– علم اللغة الحاسوبي– علم الأصوات النطقي– علم الأصوات الأكوستيكي – علم الأصوات السمعي – الاهتزازات الصوتية – الصوت

* مدرس علم اللغة الحاسوبي بقسم اللغة العربية– كلية الآداب – جامعة بني سويف.

التماثلي – الصــوت الرقمـي – نظام العـد الثنائي – أخــذ العينات – التكميـم – الترميز.

Abstract :

This research comes within the framework of a scientific approach that has a vision that depends on the important impact of digital representation to improve computer processing of linguistic sounds, which represent the basis and essence of the linguistic system and the most widely used and important linguistic symbols, Here, the research deals with the path of the digital representation of the audio input as one of the computer processing paths for the linguistic sound; Due to its clear impact in directing computer studies of linguistic sound in a way that paves the way for computer application developers to better and more efficient processors based on a system of coding base one and zero (0/1); In order to comply with the nature of computers based on the bi-connection and disconnection (On/Off), Therefore, the research traces the executive stages of the process of representing sounds digitally, starting with the production of the sound through its transmission through a physical medium to the mechanism of receiving it in a form that the machine accepts and deals with, in order to better handle it by computer systems and applications with the aim of carrying out multiple tasks.

Keywords:

Digitization- Computational Linguistics – Articulatory Phonetics - Acoustic Phonetics - Auditory Phonetics - voice vibrations - analog voice - digital voice - Binary Number System - Sampling - Quantization - Coding .

المقدمة :

تحظى اللغة الطبيعية بوصفها الوسيلة الأساسية للإنسان في التفكير والتواصل بمكانة كبيرة في الفكر الحاسوبي المعاصر الذي يسعى إلى تقديم تطبيقات حاسوبية ذات تقنيات ذكية تُحاكي العقل البشري – قدر المستطاع – وقد أحدث توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في دراسة اللغة نقلة نوعية مهمة خلال السنوات القليلة الماضية على صعيد المستويات اللغوية كافة، وأثمرت المعالجات المنطقية والرياضية للظواهر اللغوية في تطوير تطبيقات حاسوبية متعددة كتطبيقات النطق الآلي والتعرف على الأصوات، وتطبيقات التحليل الصرفي وتوليد الصيغ، وتطبيقات التدقيق الإملائي والنحوي والسياقي، والتشكيل الإملائي وتنسيق الخطوط، والتحليل الإعرابي، والترجمة الآلية والبحث الدلالي، وتلخيص النصوص وتحليل الأسلوب وكشف الاقتباسات الأدبية .. وغير ذلك من التطبيقات الحاسوبية التي كانت حلماً يراود الجميع في الماضي وأصبحت اليوم واقعًا ملموسًا تجني الإنسانية ثماره.

ومع كل ما تحقق وما تم إحرازه من تقدم في مجال معالجة اللغات الطبيعية حاسوبيًا يظل تطوير التقنيات الرقمية أمرًا ضروريًا وهدفًا جوهريًا من أجل الارتقاء بالتطبيقات اللغوية وتحسين أدائها خاصة فيما يتعلق بتطبيقات اللغة العربية .

وبنظرة فاحصة إلى المعالجات الحاسوبية للغة خلال العقود السابقة يتبين أن المنطلق الحقيقي المجدي نفعًا لتطوير تلك المعالجات هو التناول الرقمي للغة من خلال صورتها الأصلية المتمثلة في الصورة الصوتية المنطوقة التي تستقبلها الحواسيب الآلية عبر أجهزة الإدخال وتحولها إلى إشارات كهربائية تماثل الصوت الطبيعي تمهيدًا لتمثيلها في قيم رقمية يمكن إجراء مئات الملايين من العمليات الحسابية والمنطقية عليها في الثانية الواحدة من أجل القيام بمهام محددة، أما الرموز اللغوية المكتوبة فمهما بلغت من ضبط وإتقان فلن تكون قادرة على تمثيل اللغة تمثيلًا حاسوبيًا صحيحًا؛ لأن قيمها الرقمية في حقيقتها قيم افتراضية يتم وضعها وفق نظام تكويد معين (Coding System) كنظام التكويد الأمريكي (ASCII) ونظام الترميز الموحد يونيكود (Unicode).

وانطلاقًا من تلك الرؤية جاء هذا البحث ليُلقي الضوء على قضية التمثيل الرقمي للصوت اللغوي وأهميتها بوصفها من أبرز القضايا التي يهتم بها الدرس اللغوي المعاصر للوصول إلى نماذج رقمية ومنطقية تسمح لمطوري التطبيقات اللغوية ببناء معالجات أفضل وأكثر كفاءة على صعيد المستويات اللغوية كافة.

ويعتمد البحث في تناوله لتلك القضية على المنهج التحليلي لدراسة الصوت اللغوي بصورة – أكثر عمقًا– تُعين على فهم طبيعته، وتُسهم في وضع أفضل الحلول لمشكلات تمثيله رقميًا، ومن هنا كان اقتراحي تقسيم النسق العام للبحث على قسمين رئيسيين: جعلت القسم الأول منطلقًا نظريًا يختص بتناول الصوت اللغوي ومكانته في منظومة اللغة، ودوافع دراسته حاسوبيًا، وتحديد مسارات المعالجة الحاسوبية له بالإضافة إلى بيان المراحل التنفيذية لكل مسار من تلك المسارات.

أما القسم الثاني من البحث؛ فتناولتُ فيه مسار تمثيل المعطيات الصوتية عبر مراحله الثلاث المتمثلة في عمليات إنتاج الصوت اللغوي وانتقاله عبر وسيط مادي ثم عملية استقباله سواء أكانت بالآلية الطبيعية المتمثلة في جهاز السمع عند الإنسان أم بالآلية الاصطناعية المتمثلة في تحويل الاهتزازات الصوتية إلى حركة ميكانيكية، ثم إلى إشارات كهربائية تماثلية، ثم إلى قيم رقمية ثنائية تتوافق مع طبيعة الحاسبات الآلية القائمة على ثنائية الوصل والفصل.

مكانة الصوت في منظومة اللغة ودوافع دراسته حاسوبياً :

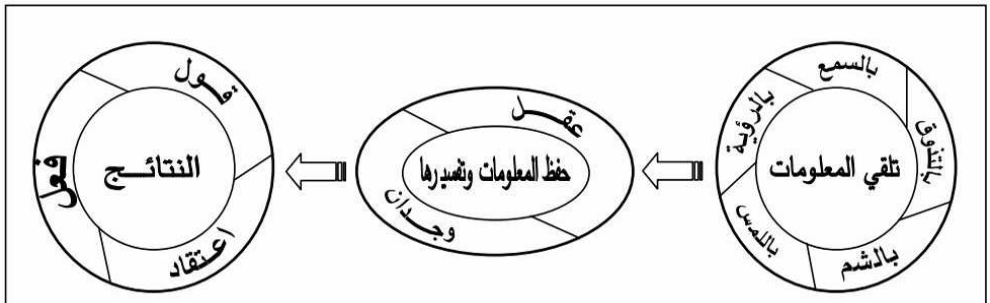
اصطفى الله ﷻ الإنسان ليكون خليفة له في الأرض؛ فخلقه في أحسن الصور وأكرمها، وسخر له ما في الكون لخدمته وإعانته على تحمل الأمانة [i] ومنحه حرية الاختيار التي

---

[i] ذكر أبو جعفر الطبري أنه أُختلف في تأويل المقصود بالأمانة في قوله تعالى:﴿ إِنَّا عَرَضْنَا ٱلْأَمَانَةَ عَلَى ٱلسَّمَٰوَٰتِ وَٱلْأَرْضِ وَٱلْجِبَالِ فَأَبَيْنَ أَن يَحْمِلْنَهَا وَأَشْفَقْنَ مِنْهَا وَحَمَلَهَا ٱلْإِنسَٰنُ ۖ إِنَّهُۥ كَانَ ظَلُومًا جَهُولًا﴾ الأحزاب: ٧٢، ولعل أبرز ما ورد في تفسير تلك الآية الكريمة: " إن الله عرض طاعته وفرائضه على السموات والأرض والجبال على أنها إن أحسنت أثيبت وجُوزِيَت، وإن ضيَّعت عُوقِبت، فأبت حملها شفقًا منها أن لا تقوم بالواجب عليها، وحملها آدم (إِنَّهُ كَانَ ظَلُومًا) لنفسه (جُهولاً) بالذى فيه الحظُّ له" .. تفسير الطبري من كتابه جامع البيان عن تأويل آي القرآن : ٦ / ٢٠٤.

تتجلى مظاهرها في قدرته على إدراك كل ما يحيط به في الكون وتفسيره وفقًا لمنطلق عقلي وجداني يقود إلى فعل أو قول أو اعتقاد إن وافق ما أمر الله به فهو طاعة وإلا فهو معصية.

وبرؤية تحليلية يمكن وصف قدرة الإنسان على إدراك الأشياء بمنظومة ذات ثلاث مراحل تبدأ بتلقي المعلومات بصورتها الطبيعية سواء أكانت معلومات مسموعة تستقبلها الأذن أم معلومات مرئية تستقبلها العين أم معلومات تتطلب حواس أخرى لاستقبالها كاللمس والتذوق والشم، ثم تأتي مرحلة تفسير تلك المعلومات وحفظها عن طريق العقل والوجدان، فالعقل بما يمتلكه من ذاكرة وقدرة على تفسير الأشياء وتمييزها، والوجدان بما يمتلكه من قدرة على إدراك المشاعر والانفعالات والعواطف، وتأتي المرحلة النهائية بوصفها نتيجة لتلك المنظومة التي تتمثل في ثلاث صور، فهي إما أن تكون قولاً ينطق باللسان أو فعلاً تُجسده الأحداث أو اعتقادًا يَقِرُ في القلب، والشكل أدناه شكل(١-١) يعبر عن تصور تلك المنظومة :



شكل (١ - ١) تصور لمراحل الإدراك الإنساني للأشياء

وتستحوذ اللغة على المكانة الأبرز في تلك المنظومة انطلاقًا من كونها وسيلة المرء في التفكير والتعبير عن أغراضه، وقد ذكر ابن جني حدها بقوله:" أما حدها: فإنها أصوات يعبر بها كل قوم عن أغراضهم"(١) ، ومن هنا فإن أكثر المعلومات التي يتلقاها العقل البشري عبر الحواس هي معلومات ذات طبيعة لغوية سواء أكانت في صورة أصوات لغوية أم في صورة رموز مرئية أم في صور أخرى يدركها المرء من خلال حواس اللمس والتذوق والشم.

وقد ذكر العالم اللغوي ماريو باي (Mario Pei) تعريفات كثيرة للغة، منها : " تلك التي تحمل معنى، أو كل شيء له معنى مفيد، أو كل شيء ينقل المعنى من عقل إنساني لآخر"

وقـد خلص مـن كل تلك التعريفات إلـى أن اللغة " لا تقتصر على صورتها المتكلمة (الملفوظة) فقط، وإنما تحوي إلى جانب ذلك الإشـارات، والإيماءات، وتعبيرات الوجه، والرموز من أي نوع، مثل إشارات المرور، والأسهم، وحتى الصور والرسـوم، وكذلك دقات الطبول .. وإطلاق الدخان .. كل هذه الأشكال للنواقل المعبرة تلقي اهتمام عالم المعنى الذي يهتم بكل رمز له معنى معين بغض النظر عن أصله وطبيعته ودلالته"[٢] .

وهكذا فإن اللغة في جوهرها مجموعة من الرموز يستقبلها المرء عبر حواسه المختلفة تمهيدًا لإدراكها بالعقل والوجدان بغرض التواصل والتفاهم وحفظ التراث الإنساني من الاندثار، وانطلاقًا من تلك الرؤية يمكن وصف اللغة بنظام متكامل يسمح للمرء بالاستعمال اللامحدود لوسائل ورموز محدودة[٣].

ومن هنا فإن اللغة تمثل عنصرًا أساسيًا لا يمكن الاستغناء عنه في أي مجال من مجالات الحياة البشرية، ولعل هذا ما يُفسر تعامل بعض اللغويين مع ملكة اللغة على أساس كونها عضوًا من أعضاء الجسد – ضمن العمارة الأوسـع للعقل – قادرًا على التفاعل مع أجهزة الجسم الأخـرى مـن أجـل التفكير والفعل[٤]، ويرى نعوم تشومسكي (Noam Chomsky): "إن ملكة اللغة بشكل عام تدخل في كل مجال مـن مجالات الحياة البشرية والتفكير والتفاعل البشريين .. ويمكن اعتبار ملكة اللغة بشكل معقول بمثابة عضو لغة بالمعنى الذي يتحدث به العلماء عن الجهاز البصري أو جهاز المناعة أو جهاز الدوران بوصفها أعضاء من الجسم"[٥].

ومن خلال علم الرموز(Semiology) يتم دراسة جميع الأنظمة المتعلقة بالعلامات والرموز الحاملة للمعنى والتي يدركها الإنسان عبر حواسه المختلفة، وينبثق من علم الرموز علم اللغة(Linguistics) الذي يهتم بدراسة اللغة وبنيتها على نحو علمي يوزع على أربعة

مستويات وفقًا لرؤية كثير من اللغويين المحدثين[i] هي: الأصوات – والصرف (بناء الكلمة) – والنحو (بناء الجملة) – والدلالة، ولكل مستوى من تلك المستويات مجالاته وقضاياه التي يُعالجها(٦).

فعلى صعيد أصوات اللغة بوصفها أساس البنيان اللغوي هناك علم الأصوات الذي تدرس الأصوات اللغوية(Phonetics) جانبًا منه، فيبين مخرج كل صوت منها وخصائصه النطقية والفيزيائية والسمعية بمعزلٍ عن المعاني التي يؤديها هذا الصوت، ويصنف العلماء هذا الجانب من علم الأصوات وفق ثلاثة تقسيمات بالنظر إلى دورة الخطاب بين المتكلم والسامع والوسط الناقل، فعندما يكون الاهتمام بالناطق نفسه تكون دراسة الصوتيات دراسة فسيولوجية، وعندما يكون الاهتمام بدراسة الموجات الصوتية تكون الدراسة من خلال الصوتيات الفيزيائية، أما عندما يكون الاهتمام بدراسة ما يتلقاه السامع تكون الدراسة من خلال الصوتيات السمعية، وهناك جانب آخر من علم الأصوات (Phonology) يهتم بإبراز الوظائف (المعاني) اللغوية التي تؤديها تلك الأصوات في الاستعمال اللغوي(٧).

وعلى صعيد كلمات اللغة فيتناول علم الصرف (Morphology) الكلمة ويهتم بدراسة بنيتها واشتقاقها وبيان معانى الصيغ وما لحروفها من تجرد وزيادة وصحة وإعلال.. وغيرها، كما يدرس علم المعجم (Lexicology) المعاني المتعددة للكلمات، ويُرتبها حسب حروفها أو منهجها الذي سارت عليه(٨)، أما الجمل والتراكيب اللغوية فيدرسها علم النحو (Syntax) ويتناول نظام بنائها وطبيعته، كما يبين وظائف كل ركن في الجملة وعلاقته بغيره من الأركان وما ينتابه من تقديم وتأخير وإظهار وإضمار مع الاهتمام بعلامات الإعراب والبناء، كما يدرس هذا العلم المعاني الوظيفية التي قد تؤديها بعض الأدوات كالتوكيد والنفي والاستفهام .. وغيرها (٩).

---

[i] اتفق كثير من اللغويين المحدثين على ترتيب مسارات اللغة ومجالاتها من الوحدات الأصغر إلى الوحدات الأكبر كالآتي : (الأصوات – بناء الكلمة – بناء الجملة – الدلالة)، أما سيبويه وجمهور النحاة فترتيبهم لتلك المسارات جاء انطلاقًا من دراسة الجملة والإعراب مرورًا بالبنية الصرفية وصولاً إلى الأصوات، أي من الوحدات الكبيرة إلى الوحدات الصغيرة.. انظر مدخل إلى علم اللغة لمحمود فهمي حجازي: ١٨.

أما الغاية التي يسعى إلى تحقيقها النظام اللغوي فتتمثل في المعنى، ومن خلال علم الدلالة (Semantics) يتم دراسة المعنى على صعيد المستوى الصوتي والصرفي والنحوي والمعجمي والسياقي، حيث يُدرس من خلال علم الدلالة المعنى الصوتي وما يتعلق به من نبر وتنغيم وإمالة، كما يُدرس المعنى الصرفي وما يتعلق به من قضايا كالصيغة وما تحمله من معانٍ متعددة، ويُدرس المعنى النحوي وما يتعلق به من معان تؤديها كل وظيفة نحوية في الجملة، ومن خلال هذا العلم يُدرس أيضًا المعنى المعجمي والمعنى السياقي والتعبيرات اللغوية المسكوكة [i] ، وهكذا فإن علم الدلالة بمثابة الوعاء الذي تنصهر فيه مستويات اللغة جميعها(١٠).

وتُعد الدراسة الصوتية أساس المنظومة اللغوية وجوهرها، ويجب أن تسبق غيرها من المسارات في التناول، فالأصوات هي اللبنة الأولى في البناء اللغــوي العام، ولا تقــوم المسارات الأخرى إلا عليها(١١)، وهذا ما عبر عنه الدكتور احمد مختار عمر بقوله :" إن الأصوات هي اللبنات التي تُشكل اللغة، أو المادة الخام التي تبنى منها الكلمات والعبارات، فما اللغة إلا سلسلة من الأصوات المتتابعة أو المتجمعة في وحدات أكبر ترتقي حتى تصل إلى المجموعة النفسية. وعلى هذا فإن أي دراسة تفصيلية للغة ما تقتضي دراسة تحليلية لمادتها الأساسية"(١٢).

وهكذا فإن الدرس الصوتي يسهم بصورة أساسية في التحليل العلمي للغة، كما يُسهم في تعليم الأداء والنطق السليم سواء أكان للغة الأم أم للغات الأجنبية الأخرى، بالإضافة إلى أثره المهم في علاج اضطرابات النطق وعيوب السمع ووضع أبجديات بعض اللغات التي لا

---

[i] التعبيرات المسكوكة: هي بناء لغوي لا يقبل التحليل الذي تخضع له التراكيب اللغوية الأخرى، فلا يتحصل معناه بالاعتماد على تراكيبه وإنما يتحصل من خلال دلالته، ومن أبرز خصائص التعبيرات المسكوكة إيجاز اللغة، وإصابة المعنى وحسنه، وجودة التشبيه، وهي عبارات مغلقة على نفسها ذات صياغة ثابتة لا يجوز تغييرها بحذف أو إضافة .. انظر التعابير المسكوكة ودورها في الخطاب السياسي: ١٣ ، ١٤.

تزال غير مكتوبة، ومن جانب آخر؛ فإن معرفة الأصوات اللغوية وخصائصها أمر لابد منه لتطوير وسائل الاتصال الحديثة[١٣]، ولعل إنجازات العلماء وجهودهم قديمًا وحديثًا في ميدان الأصوات اللغوية تُبرز الأثر المهم للدرس الصوتي في سلامة المنظومة اللغوية والارتقاء بها على الأصعدة كافة.

وعلى جانب آخر فقد حظي الصوت اللغوي بعناية كبيرة من قبل المهتمين بمعالجة اللغات الطبيعية بوصفه أبرز الرموز اللغوية الحاملة للمعنى وأكثرها استعمالاً وأهمية في منظومة الاتصال اللغوي على الإطلاق، يقول العالم اللغوي ماريو باي(Mario Pei):"..ولكن الحقيقة الباقية حتى الآن أن لغة الحديث هي أهم وسائل الاتصال الإنساني وأوسعها انتشارًا، ومتوسط ما ينتجه الإنسان من حديث أكثر بكثير مما ينتجه من كلام مكتوب وإيماءات وإشارات .. إن اللغة المتكلمة لتمتد إلى كل مجالات الحياة البشرية بدون استثناء أو تمييز. كل الناس تتفاهم أساسًا عن طريق الأصوات الكلامية"[١٤].

ومن هنا فإن تحقيق التواصل اللغوي الفعال سواء أكان بين الإنسان وغيره من البشر أم بين الإنسان والآلة يُعد من أهم الدوافع الأساسية لدراسة الصوت اللغوي حاسوبيًا[١٥]، فعلى صعيد التواصل بين الإنسان وغيره من البشر هناك ثلاثة أنواع أساسية تُسهم معالجة الصوت حاسوبيًا فيها بدور أصيل وفعال، وهي:

- **التواصل داخل الجماعة اللغوية الواحدة:** وهنا تُعد التطبيقات الحاسوبية للصوت اللغوي أحد أبرز الوسائل المستخدمة في نقل الصوت بين مرسل ومستقبل، ويوصف هذا النوع من التواصل بالتواصل غير المباشر، ويكون بين طرفين يُتقن كلٌ منهما لغة الآخر.
- **التواصل مع الجماعات اللغوية الأخرى:** في هذا النوع من التواصل لا يُجيد أي من طرفي عملية التواصل لغة الآخر ولا يُتقنها، لذلك تتم عملية التواصل في هذه الحالة من خلال معالجة حاسوبية للصوت اللغوي تمكن الآلة من القدرة على الترجمة الفورية للكلام المنطوق من لغة المتحدث إلى لغة المستمع.

- **التواصل مع فاقدي السمع:** تُسهم معالجة الصوت حاسوبيًا في هذا النوع من التواصل في إنشاء تطبيقات حاسوبية يمكنها تحويل الكلام المنطوق إلى إشارات وحركات معينة يستوعبها أصحاب الإعاقة السمعية ويفهمونها.

وعلى صعيد التواصل بين الإنسان والآلة فهناك التواصل الكلامي مع الآلات الذي شغل فكر العلماء وحظي باهتمامهم منذ عقود بوصفه أحد أهم وسائل التواصل الآلي بجانب التواصل الآلي عبر مستشعرات الرؤية واللمس والحركة، ويحقق هذا النوع من التواصل – بصورة ما – الهدف المنشود من المعالجة الحاسوبية للغات الطبيعية عن طريق جعل اللغة الطبيعية للإنسان نفسه هي وسيلة التعامل مع الحواسيب والآلات المختلفة[١٦]، وهذا يؤدي إلى تواصل أفضل مع الحواسيب الآلية يتسم بالسرعة واليسر والمجهود الأقل.

كما تسهم المعالجة الحاسوبية للصوت اللغوي من خلال توظيف تكنولوجيا المعلومات في خلق مجالات عديدة لها مردودها الإيجابي على الإنسانية، منها:

- **التعليم الإلكتروني الفعال:** حيث تسهم المعالجات الحاسوبية للصوت اللغوي في الارتقاء بالمتعلم وتنمية مهاراته اللغوية والتكنولوجية المتعددة عن طريق خلق بيئة تفاعلية يتواصل فيها المتعلم مع التطبيقات التعليمية باستخدام الكلام المنطوق؛ مما يُعزز فكرة التوجيه والتقييم الذاتي دون الاعتماد على الآخر[١٧].
- **فك اللبس والغموض اللغوي:** وهنا تسمح المعالجة الحاسوبية السليمة للصوت اللغوي بوضع حلول علمية لكثير من المشكلات اللغوية التي يُقابلها مطورو البرمجيات عند معالجتهم للغة على صعيد مستوياتها اللغوية الأخرى كالمستوى الصرفي والنحوي والدلالي.
- **دراسة اللغات واللهجات:** وذلك عن طريق الإدراك الحاسوبي للظواهر الصوتية للغات واللهجات المختلفة وبيان أوجه التشابه والاختلاف بينها من خلال النماذج والتقنيات المختلفة.

- **علاج اضطرابات النطق وعيوبه: حيث يُمكن من خلال معالجة الصوت اللغوي حاسوبيًا تشخيص أمراض النطق بكفاءة وتحديد موضعها وأسبابها بدقة كبيرة؛ مما يجعل الوصول إلى طرق علاج أكثر فاعلية لتلك الاضطرابات أمرًا ممكنًا بأقل مجهود من خلال ما يقدمه الحاسب من أساليب ذكية للتدريب والتقييم الآلي.**

وهكذا يمكننا القول إن المعالجات الحاسوبية الناجعة للغة الطبيعية [i] تقوم في الأساس على معالجة حاسوبية سليمة للأصوات اللغوية تُمكن الباحثين من الوصول إلى نماذج رقمية ونظم منطقية تُمهد الطريق أمام مطوري التطبيقات اللغوية لمعالجات أفضل وأكثر كفاءة على صعيد المستويات اللغوية كافة.

ومن هنا فإن المعالجة الحاسوبية للصوت اللغوي تُعد أبرز المعالجات الآلية للغة وأهمها على الإطلاق[ii]، حيث يمتلك هذا النوع من المعالجات قدرة على توظيف التقنيات ذات الطبيعة الرقمية في تمثيل الصوت البشري تمثيلاً أدق يسمح بالتعامل معه وتحليله تحليلاً أكثر عمقًا بطرق تتسم بالسرعة في الأداء والبساطة في الاستعمال والجودة في النتائج، وهذا ما عبر عنه الدكتور أحمد راغب بقوله : " الكمبيوتر اليوم هو من أكثر الأدوات سهولة واستخدامًا؛ فعن طريقه تُعد عملية التحليل الصوتي أبسط كثيرًا وأسرع عادة إذا ما قورنت بالأدوات الأخرى، مع الحفاظ على جودة النتائج وإمكانية جمع كل الأدوات في برنامج واحد"(١٨).

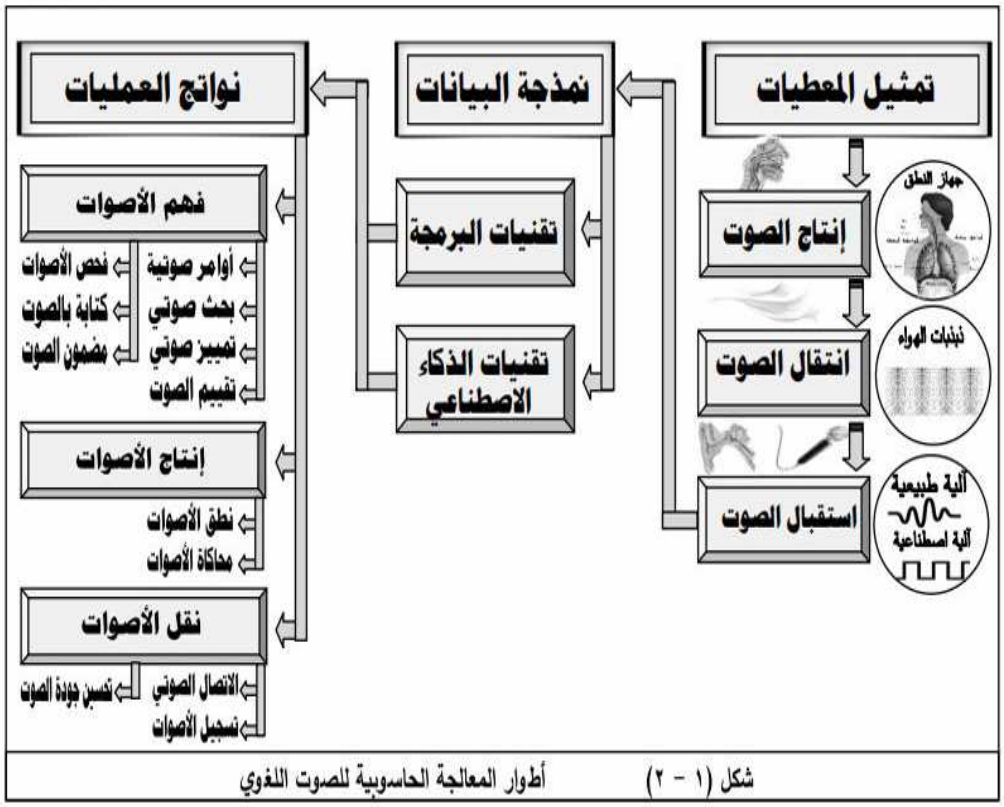
ومن هنا فإن التمثيل الرقمي يُعد المنطلق الحقيقي نحو معالجة حاسوبية أفضل للصوت اللغوي تُمهد السبيل إلى توظيف تقنيات ووسائل تُمكن الحواسيب الآلية من فهم الأصوات

---

[i] يسعى الباحثون في مجال المعالجة الحاسوبية للغة بوجه عام إلى تمثيل الرموز الحاملة للمعنى تمثيلاً رقميًا تقبله الآلة ويسمح لها بإجراء العمليات الحسابية والمنطقية اللازمة لفهم تلك الرموز وتفسيرها من أجل القيام بمهام آلية محددة بصورة تُحاكي العقل البشري قدر المستطاع

[ii] تُصنف المعالجات الآلية للغة في أربعة أقسام وفقًا لمخرجاتها كالآتي: (المعالجات الميكانيكية، المعالجات الكهروميكانيكية، المعالجات التماثلية، المعالجات الحاسوبية) .. انظر تقنيات المعالجة الآلية للعة وتطورها: ٥٤٠ – ٥٨٢

اللغوية وإنتاجها ونقلها، وبنظرة فاحصة لما سبق يتبين لنا أن أطوار المعالجة الحاسوبية للصوت اللغوي ثلاثة أطوار تبدأ بطور تمثيل المعطيات الصوتية – وهو ما يعنينا في هذا البحث– مرورًا بنمذجة البيانات وتنتهي بنواتج العمليات، وذلك كما يتضح من الشكل الآتي شكل(١-٢):



شكل (١ - ٢) أطوار المعالجة الحاسوبية للصوت اللغوي

تمثيل المعطيات الصوتية:

يأتي أهمية هذا الطور من كونه يتناول الأصوات اللغوية من خلال منظور نوعي يُعين على حصر خصائصها وتتبعها من أجل وضع نظام ترميز لها يتوافق مع طبيعة الحواسيب الآلية القائمة على ثنائية الوصل والفصل (On/Off) أو الواحد والصفر (1/0)؛ ولتمثيل أدق

للأصوات اللغوية يلزم الوقوف على محاور ثلاثة هي في حقيقتها مسار الصوت البشري بداية من إنتاجه عبر أعضاء النطق حتى تمثيله في صورة رقمية تقبلها الآلة وتتعامل معها بغرض القيام بمهام معينة، وهي كالآتي:

٢-١: إنتاج الصوت اللغوي:

يختص علم الأصوات النطقي (Articulatory Phonetics)[i] دون غيره من ميادين الدرس الصوتي بتناول هذا المحور الذي يهتم بدراسة عملية النطق عند المتكلم، وملاحظة الجهاز النطقي، وتتبع حركة أعضائه، وبيان دور كل عضو ووظيفته في أثناء إنتاج الصوت الكلامي؛ مما يُسهم في تحليل ميكانيكية إصدار تلك الأصوات وتوصيف خصائصها النطقية توصيفًا علميًا يسمح بتحديد الفروق بين تلك الأصوات في المخرج (لثوية / شفهية ..إلخ)، وكيفية النطق (انفجارية/ احتكاكية)، والصفة (مجهورة/مهموسة)، والنوع (فموية/أنفية)، وغير ذلك من الأمور(١٩).

ويعتمد الصوت الكلامي في حدوثه على تيار الهواء (الزفير) الصادر من الرئتين بمساعدة الحجاب الحاجز الذي يعين الرئتين على التمدد في أثناء عملية الشهيق والاسترخاء في أثناء عملية الزفير(٢٠)، ويرى الدكتور أحمد مختار عمر أن : " العملية الكلامية تتم في شكلها الأساسي عن طريق التحكم في هواء الزفير الصاعد من الرئتين. ولا نعلم لغة تعتمد على هواء الشهيق في إنتاج الصوت، وإن أمكن أن تنتج أصوات خلال عملية الشهيق أيضًا، ولكن هذا إن حدث يكون استثناء فقط "(٢١) .

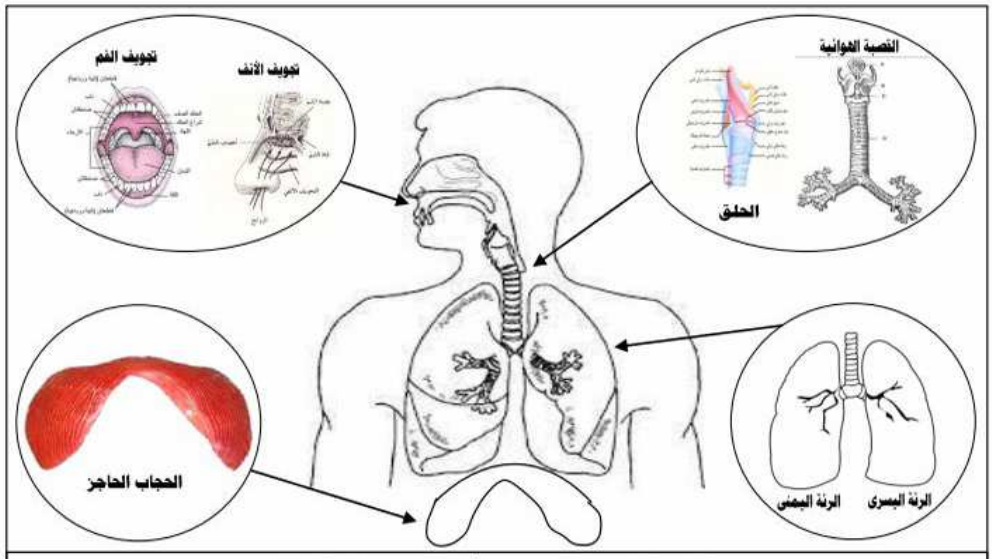
ويمر الهواء المندفع من الرئتين عبر القصبة الهوائية نحو أعضاء النطق الأخرى لتبدأ العملية الكلامية باعتراض هذا الهواء وضغطه وكبحه وتعويقه في أوضاع معينة مما يُسفر عنه

---

[i] يُعد علم الأصوات النطقي أحد الميادين الثلاثة للدرس الصوتي بجانب علم الأصوات الأكوستيكي وعلم الأصوات السمعي، ويختص بدراسة الجانب العضوي أو الفسيولوجي لعملية إنتاج الأصوات اللغوية، ويتميز هذا العلم بطابعه الوصفي القائم على الملاحظة الذاتية؛ مما جعله أقدم ميادين دراسة الصوت الكلامي وأكثرها انتشارًا .. انظر الأصوات اللغوية لعاطف فضل : ٤٥.

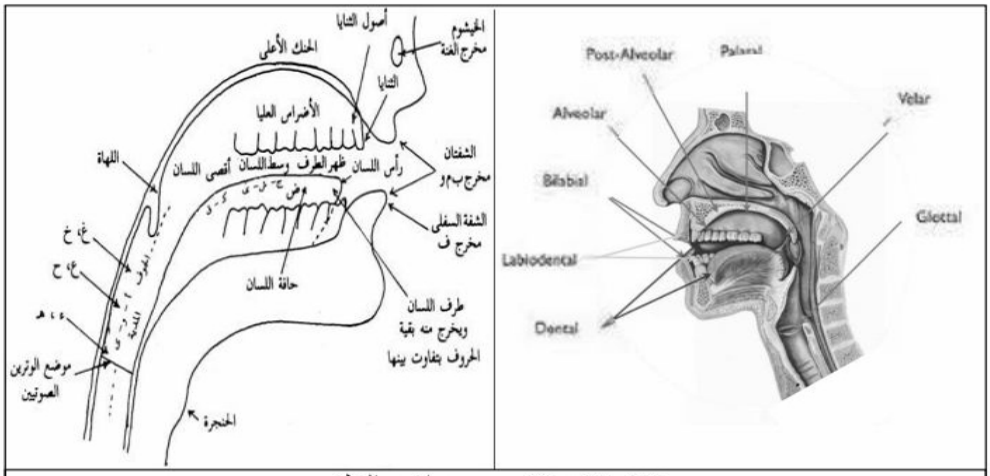
توليد الأصوات اللغوية وفق نظام محدد من العمليات النوعية، ويتميز الجهاز النطقي للإنسان عن غيره من الكائنات بمرونته العالية وقدرته الهائلة على التشكل والتغير مما يسمح بتوليد الأصوات الكلامية بصورها المتنوعة(٢٢).

ويتطلب الصوت الكلامي لحدوثه أن يعمل جهاز النطق شكل(٢-١) من خلال منظومة متناسقة الأركان تتكامل فيها وظائف أعضائه عبر ثلاث مراحل تبدأ بتوفير طاقة الهواء اللازمة لإنتاج الصوت اللغوي، وتقوم الرئتان بهذا الدور بمساعدة الحجاب الحاجز، ثم يأتي دور الحنجرة في تنظيم تدفق تيار الهواء اللازم لاهتزاز الوترين الصوتيين المتصلين بالبروز الداخلي للنسيجين الهرميين للحنجرة من جانب وبالزاوية الأمامية للغضروف الدرقي في الحنجرة من جانب آخر، وأخيرًا يأتي دور حجرات الرنين المتمثلة في الحلق والتجويفين الفموي والأنفي والتي تتم فيها تشكيل معظم الأصوات المستعملة في الكلام، وهناك أيضًا تجويف رابع له دور مهم في تهيئة الصوت الكلامي ينشأ عن طريق إبراز الشفتين(٢٣).



شكل (٢ - ١) أعضاء جهاز النطق

وعلى امتداد الجهاز النطقي تكثر مواضع تنـوع الضغط؛ مما يجعله جهازًا قادرًا علـى إنتـاج أصـوات كثيـرة لا حصـر لها، وتستعمل كل لغة مـن اللغات عددًا معينًا مـن الأصوات المتباعدة في مواضع النطق؛ ليسهل التعرف عليها بالأذن البشرية[٢٤]، والشكل الآتي شكل(٢-٢) يوضح أبرز مواضع النطق في اللغات الطبيعية.



شكل (٢ - ٢) مواضع النطق

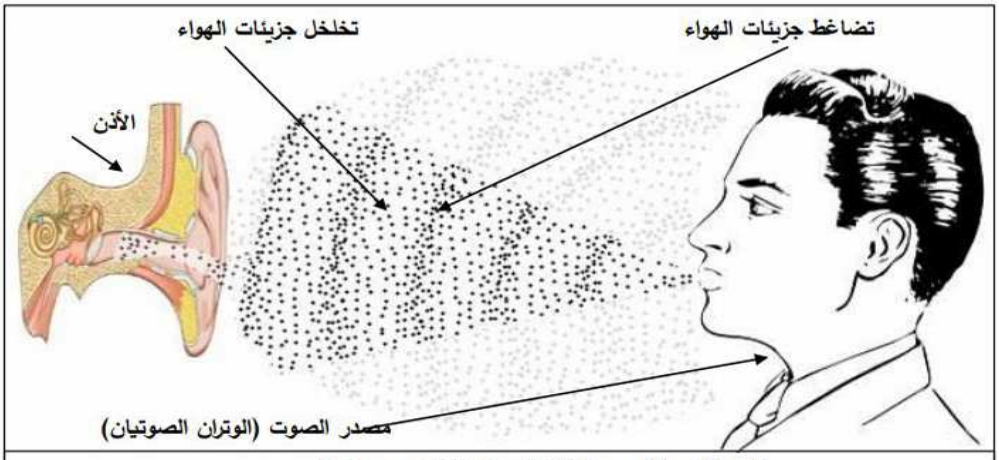
ويُعد محور التعرف على طبيعة الصوت اللغوي وتحليل ميكانيكية حدوثه من الأمور المهمة ذات الأثر الجلي الواضح في معالجة الكلام حاسوبيًا، فعلى صعيد أنظمة فهم الأصوات ونقلها يمثل الصوت الناتج من الجهاز النطقي المادة الأولية الخام للعمليات المنطقية والرياضية التي تقوم بها تلك الأنظمة الرقمية؛ ومن ثمَّ فإن هذا المحور يُعد الركيزة الأساسية والمنطلق الحقيقي لأي بناء رقمي يختص بفهم الكلام ونقله.

أما على صعيد أنظمة إنتاج الأصوات اللغوية فإن التعرف على مصدر الصوت ومواطن تخليقه وتشكيله ثم إصداره بالهيئة التي تستقبلها الأذن البشرية يسـهم بصـورة ناجعة في تطوير أنظمة رقمية لنطق الأصوات وتقليدها، فمن خلال دراسة آلية عمل الجهاز النطقي يتمكن المطورون من ابتكار نماذج رياضية وطرق منطقية تُسهم في إنشاء تطبيقات حاسوبية متنوعة تُحاكي السلوك البشري – قدر المستطاع – في توليد الأصوات اللغوية ونطقها.

٢-٢: انتقال الصوت اللغوي:

يعول على معطيات علم الأصوات الأكوستيكي (Acoustic Phonetics) في الدراسات اللغوية التي تهتم بالنظر في تحليل الموجات الصوتية التي تُحدثها الأصوات في الهواء بوصفها نتيجة طبيعية لذبذبات جزيئات الهواء في الجهاز النطقي المصاحبة لحركة أعضاء هذا الجهاز، وهكذا فإن مجال اهتمام علم الأصوات الأكوستيكي وميدان دراسته يتمثل في دراسة طبيعة الصوت اللغوي وخصائصه الفيزيائية (المادية) في أثناء انتقاله في الهواء من المتكلم إلى السامع[٢٥].

ويتطلب الصوت اللغوي ليصل إلى أذن السامع بعد إصداره من جهاز النطق وسطًا ماديًا كالهواء لينتقل من خلاله عبر اهتزاز جزيئات هذا الوسط شكل (٢ – ٣)، حيث تنتقل طاقة حركية (ميكانيكية) إلى جزيئات الوسط المادي نتيجة اهتزاز مصدر الصوت الملامس؛ مما يجعل تلك الجزيئات في حالة اضطراب وتذبذب حول موضع سكونها؛ لتنتقل تلك الطاقة الحركية بعد ذلك إلى الجزيئات المجاورة فتجعلها أيضًا في حالة اضطراب، وهكذا تنتقل طاقة الصوت في الوسط المادي – دون أي انتقال لجزيئات هذا الوسط – من نقطة إلى أخرى في صورة موجات على هيئة كرات من التضاغطات والتخلخلات تنتشر في جميع الاتجاهات حول مصدر الصوت[٢٦].



شكل (٢ – ٣) انتقال الصوت اللغوي عبر الهواء

ويوصف الصوت بمنظور فيزيائي بموجة ميكانيكية لا تنتقل في الفراغ وتحتاج إلى وسط مادي (غازي– سائل–صلب) لتنتقل من خلاله حيث تنتقل بصورة طولية ذات حركة توافقية بسيطة في اتجاه الانتشار إذا كان الوسط غازيًا أو سائلاً وبصورة مستعرضة ذات حركة توافقية في اتجاه عمودي على اتجاه الانتشار إذا كان الوسط صلبًا، وتنشأ موجة الصوت عند اهتزاز جسم (مصدر اضطراب) في الوسط المحيط به فيحدث أمواجًا تنتقل طاقتها من نقطة إلى أخرى في هذا الوسط دون أي انتقال لجزيئاته[٢٧]ويعرف الدكتور أحمد مختار عمر الموجة الصوتية بأنها: " مجموعة من الذبذبات الصوتية المتعاقبة التي تنتج إحداها عن الأخرى.. وأن مصدر الصوت يسبب تحركات لأجزاء الهواء المجاور له، وأن هذه الأجزاء تضغط على الذرات الهوائية المجاورة لها، وتلك بدورها تضغط على الذرات المجاورة لها... وهكذا"[٢٨].

وتختلف الموجات الصوتية في شكل ذبذباتها تبعًا لمواقع أعضاء النطق، فكل موقع من مواقع أعضاء النطق له ما يقابله من ذبذبات في الهواء، وهكذا ترتبط دراسة الموجات الصوتية وطبيعتها الفيزيائية ارتباطًا وثيقًا بدراسة الجانب المخرجي (النطقي) المتعلق بآلية عمل الجهاز النطقي ومراحل إنتاجه للصوت الكلامي بداية من تخليقه عبر اهتزاز الأوتار الصوتية نتيجة اندفاع الهواء الصادر من الرئتين بمساعدة الحجاب الحاجز، ثم تشكيله بمساعدة حجرات الرنين في القناة الصوتية، ثم إصداره عبر الهواء في شكل موجات صوتية تستقبلها الأذن تمهيدًا لإرسالها بعد ذلك إلى الدماغ لتفسيرها[٢٩].

وينتقل الصوت اللغوي بوصفه حركة موجية في وسط مادي فهو يسلك سلوك الموجات ويوصف من خلال خصائصها المتمثلة في الآتي[٣٠]:

- **سرعة الصوت:** يُقصد بها المسافة التي يقطعها الصوت في وحدة الزمن، وتتفاوت السرعة التي ينتقل بها الصوت تبعًا لنوع الوسط الذي ينتشر فيه، فسرعة الصوت في الهواء تُقدر بـ (٣٣١م/ث) في الظروف العادية للضغط ودرجة الحرارة، وفي مياه البحر ينتقل الصوت بمقدار (١٥٣٣م/ث)، وتتضاعف السرعة في الأجسام الصلبة، وذلك كما يتضح من الجدول الآتي :

الوسط	درجة الحرارة	السرعة (m/sec) v
الهواء	(0^o)	331
الهواء	(20^o)	343
الهيدروجين	(0^o)	1286
الأُكسجين	(0^o)	317
الهيليوم	(0^o)	972
الماء	--	1493
مياه البحر	--	1533
الألمنيوم	--	5100
النحاس	--	3560
الحديد	--	5130
الرصاص	--	1322
المطاط	--	54

وكما تتفاوت سرعة الصوت من وسط لآخر تتفاوت أيضًا في الوسط الواحد؛ فلا تتساوى جميع الغازات في سرعة انتقال الصوت بها، وكذلك الحال في الأوساط السائلة أو الصلبة، ويرجع ذلك لأن سرعة انتقال الصوت في الوسط المادي تتوقف على كثافة الوسط[i] ومرونته [ii].

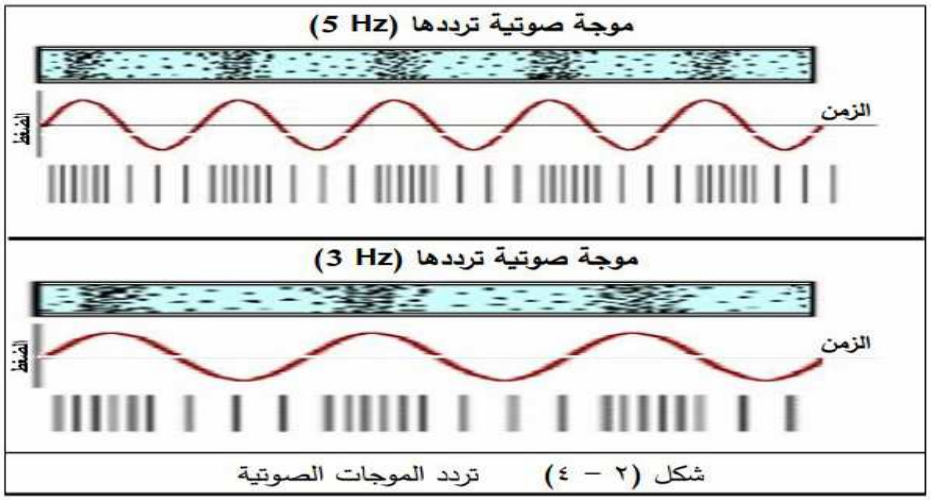
- **<u>تردد الصوت:</u> يُقصد به عدد الموجات الصوتية التي يُحدثها اهتزاز مصدر الصوت وتجتاز نقطة ما في وحدة الزمن (الثانية)، ويكتسب الصوت وفقًا لتردده صفة الحدة أو الارتفاع [iii]، فكلما كان الصوت اللغوي ذا تردد عالٍ كلما كان أكثر حدة، وكلما كان تردده منخفضًا كلما كان أقل حدة** شكل (٢ – ٤)**، وبهذا يمكننا التفريق بين صوت المرأة الحاد وصوت الرجل الأقل حدة.**

---

[i] كثافة الوسط : الكثافة هي مقدار كتلة جزيئات الوسط في وحدة الحجوم.

[ii] مرونة الوسط : قوة الترابط بين جزيئات الوسط.

[iii] يُطلق أيضًا على حدة الصوت مصطلح درجة الصوت أو طبقة الصوت.



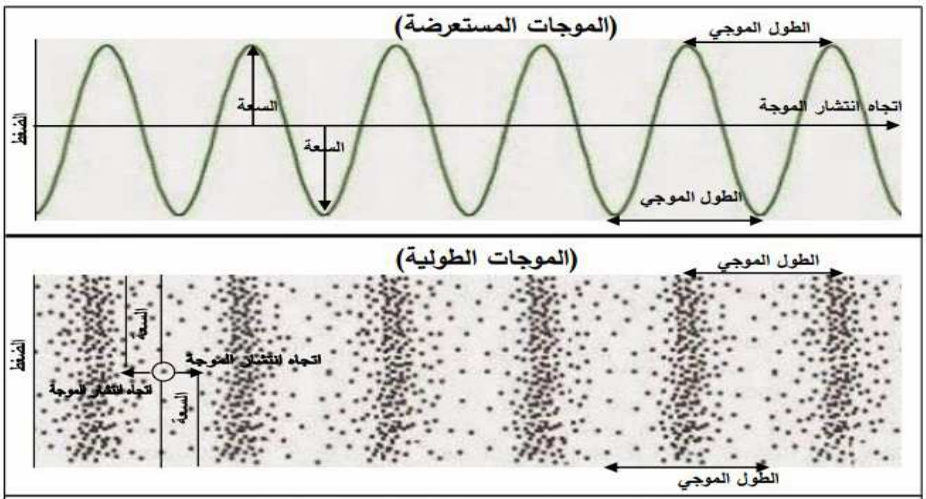
شكل (٢ – ٤) تردد الموجات الصوتية

ويُقاس التردد بوحدة الهرتز (Hz)[i] والذي يُعادل دورة واحدة/الثانية ($f = \frac{1}{T}$)، ووفقًا لتردد الموجات الصوتية تُصنف إلى ثلاثة أقسام:

- **موجات تحت صوتية:** تتمثل في الموجات التي يكون ترددها أقل من٢٠Hz، ولا تستطيع الأذن البشرية سماع موجاتها في حين تستشعرها بعض الحيوانات كالفيلة والحيتان الزرقاء والحمام الزاجل وتستعملها في التواصل والإنذار المبكر.
- **موجات صوتية:** هي الموجات التي يسمعها الإنسان الطبيعي، وتقع ترددها بين ٢٠ Hz و ٢٠.٠٠٠Hz .
- **موجات فوق صوتية:** يكون تردد هذا النوع من الموجات أكثر من ٢٠.٠٠٠Hz ولا تستطيع الأذن البشرية سماعها، وتستطيع بعض الحيوانات التعامل بتلك الموجات كالخفافيش وبعض الأسماك والكلاب، وتستخدم تطبيقات الترددات فوق الصوتية في كثير من المجالات كتشخيص الأورام، وتفتيت حصوات الكلى والمرارة، ومعرفة أماكن الألغام الأرضية، وتعقيم الماء والسوائل .. وغيرها.

[i]سُميت وحدة قياس التردد بالهيرتز نسبة إلى الفيزيائي الألماني هاينريش رودولف هيرتز(Heinrich Rudolf Hertz).

- **<u>الطول الموجي</u>: هو المسافة الواقعة بين النقاط المتماثلة بين موجتين متتابعتين، ومن ثمَّ فيُقاس الطول الموجي في الموجات المستعرضة بالمسافة بين مركزي قمتين متجاورتين أو المسافة بين مركزي قاعين متجاورين** شكل(٢-٥)**، وفي الموجات الطولية كموجات الصوت في الهواء فيُقاس الطول الموجي بالمسافة بين مركزي تضاغطين متجاورين أو المسافة بين مركزي تخلخلين متجاورين، ويُمثل الطول الموجي بالقانون: $\lambda = v/f$**[i]**، وهكذا يرتبط الطول الموجي بالتردد فكلما زاد التردد قل الطول الموجي.**
- **<u>سعة الموجة</u> : يُراد بها أقصى إزاحة تصل إليها جزيئات الوسط المهتز عن موضع السكون** شكل(٢-٥)**، ومن ثمَّ تُقدر السعة في الموجات المستعرضة بمقدار الارتفاع العمودي في الموجة عن اتجاه الحركة الأفقي، وفي الموجة الطولية تُقدر السعة بمقدار ابتعاد الجزيئات عن موضع توازنها**[ii]**.**



شكل (٢ – ٥) سعة الموجات وطولها الموجي

[i] يشير الرمز(λ) إلى الطول الموجي الذي يُقاس بوحدة المتر، والرمز (v) يشير إلى سرعة الموجة التي تُقاس بوحدة المتر، والرمز (f) فيشير إلي التردد ويُقاس بوحدة الهيرتز

[ii] في الموجة الطولية يكون ابتعاد جزيئاتها في صورة اندفاع بسبب الانضغاط، وقد يكون في صورة انجذاب بسبب التخلخل

- **شدة الصوت:** يُقصد بتلك الخصيصة كمية الطاقة الصوتية المتدفقة بوحدة الزمن عبر وحدة المساحات العمودية على اتجاه انتشار الموجة، وتُقاس بوحدة الوات لكل متر مربع، أما وحدة قياس مستوى قدرة الأذن البشرية على السماع فتُقاس بالديسبيل، حيث تُعد القيمة (0db) أقل قيمة يمكن للإنسان سماعها، والقيمة (30db) للهمس، وقيمة (60db) للكلام الطبيعي، أما أكثر من القيمة (90db) تُصاب الأذن البشرية بأضرار سمعية، وتعتمد شدة الصوت على عدة عوامل كالمسافة بين مصدر الصوت وكاشفه، وسعة اهتزاز المصدر،وكثافة الوسط، ومساحة سطح الوسط المهتز،واتجاه الريح.
- **نوع (طابع) الصوت :** من خلال تلك الخصيصة تميز الأذن البشرية بين الأصوات من حيث طبيعة مصدرها – حتى وإن كانت متماثلة في الدرجة والشدة – اعتمادًا على الأصوات التوافقية المصاحبة للصوت الأساسي والتي تكون أعلى منه في الدرجة وأقل منه في الشدة.
- **كثافة الصوت:** هي مقدار الطاقة الصوتية الموجودة في حدود السمع البشري، وتتأثر كثافة الصوت بالمسافة بحيث تقل كلما زادت المسافة من مصدر الصوت.
- **انكسار الصوت:** يحدث انكسار الصوت بسبب تغيير مسار الموجات الصوتية نتيجة اختلاف سرعتها عند انتقالها بين وسطين مختلفين في الكثافة، فعندما تتحرك موجة صوتية في وسط ما وتقابل وسطًا آخر مختلفًا فإن جزءًا من طاقة الموجة ينكسر في الوسط الثاني والجزء الآخر يمتصه الوسط الأول أو ينعكس فيه، وذلك وفقًا للكثافة النسبية للوسطين وزاوية السقوط .
- **انعكاس الصوت:** هو ارتداد الصوت عندما يقابل وسطًا عاكسًا ذا كثافة أكبر من الوسط الناقل له، ولانعكاس الصوت أثر مهم في تكوين العديد من الظواهر الصوتية كظاهرة صدى الصوت المتمثلة في تكرار سماع الصوت الأصلي .

- **تداخل الصوت:** يحدث تداخل الصوت عند تركيب موجتين أو أكثر بالسعة والتردد وجهة الانتشار نفسه.
- **حيود الصوت:** يُراد بحيود الصوت تغيير في مسار الموجة الصوتية أو انحنائها بسبب مجابهتها لعوائق لا تتناسب مع طولها الموجي، ومن نماذج حيود الصوت سماع رجل يتحدث من وراء حاجز دون رؤيته وهنا تحيد موجات الصوت عن مسارها عند حافة الحاجز وتدخل منطقة أخرى تُسمى منطقة الظل الهندسي .

وهكذا أحدث علم الأصوات الفيزيائي ثورة في الدرس الصوتي بما يقدمه من وسائل جديدة لدراسة الصوت اللغوي وآلية انتقاله، حيث كان لهذا العلم عظيم الأثر في اكتشاف حقائق صوتية لم تكن معروفة من قبل، وأصبح تحليل الأصوات أكوستيكيًا علمًا يقدم خدمات جليلة للبشرية في مجالات متعددة كمجال علاج اضطرابات النطق، ومجال البحث التاريخي في الأصوات وتطورها .. وغيرها [٣١].

وفيما يتعلق بمجال معالجة الكلام حاسوبيًا – وهو ما يعنينا هنا – فإن المعرفة الجيدة بخصائص الصوت اللغوي في أثناء انتقاله عبر وسط ما من متكلم إلى مستمع تُعد من الأمور المهمة من أجل معالجة حاسوبية أفضل للصوت اللغوي، حيث تُسهم تلك المعرفة بصورة أساسية في نجاح عملية التمثيل الرقمي للكلام البشري؛ ومن ثمَّ الوصول إلى بناء نماذج حاسوبية متعددة تُعالج كثيرًا من جوانب النقص على صعيد فهم الأصوات اللغوية وإنتاجها، يقول الدكتور كمال بشر: "ولم يكتف الباحثون في علم الأصوات الفيزيائي بهذا الدور المحدود الذي يقوم به هذا العلم في مجال البحث اللغوي وغيره من ميادين المعرفة. إنهم يتوقعون ثورة ثانية أعظم أثرًا وأبعد من سابقتها، إذا قدر لهم أن ينجحوا في إخضاع اللغة لثلاث عمليات مختلفة، يجري العمل على إنجازها ومحاولة تحقيقها في المستقبل القريب أو البعيد. فهناك محاولات جادة تهدف إلى الوصول إلى إمكانية تحويل الكلام المنطوق إلى كلام مكتوب آليًا...والمتوقع أن يؤدي نجاح هذه الخطوة إلى تحقيق العملية الثانية، ونعني بها تحويل اللغة المكتوبة إلى كلام منطوق تلقائيًا...أما الخطوة الثالثة...يكون فيها الإنسان قادرًا أن يتكلم في مكبر الصوت (Microphone) بلغة معينة ويحصل في الحال على ترجمة لهذا الكلام إلى لغة أخرى في صورة مكتوبة أو منطوقة على سواء...وليست هذه

العمليات مجرد آمال أو أحلام، وإنما العمل يجري بحماسة ونشاط ظاهرين في سبيل تحقيقها...وليس من شك في أن هذه البحوث الجبارة إنما تستمد العون والمساعدة المباشرة من علم الأصوات الفيزيائي"[٣٢].

٢- ٣ : استقبال الصوت اللغوي:

يتم استقبال موجات الأصوات الكلامية المنتشرة في جميع الاتجاهات حول مصدرها بآليتين متباينتين، إحداهما آلية طبيعية عبر عضو السمع في الإنسان والقادر على الاستشعار بموجات الصوت التي يتراوح ترددها في الهواء بين ٢٠ Hz و ٢٠.٠٠٠Hz، ومن ثمَّ يقوم بإرسالها في صورة إشارات عصبية إلى الدماغ الذي يقوم بتفسير تلك الإشارات العصبية إلى ما يُسمع من أصوات مختلفة.

والآلية الأخرى لاستقبال الصوت اللغوي هي الآلية الاصطناعية، وتعتمد على محولات الطاقة كالميكروفون الذي يعمل على تحويل الموجات الصوتية المنتشرة في الهواء إلى ما يناظرها من طاقة كهربائية تنتقل عبر وسيط كالأسلاك أو موجات الراديو إلى مستقبل تمهيدًا لمعالجتها بصورة تمكن الآلة من التعامل معها سواء أكان بغرض تحليلها أم بغرض نقلها أم لإعادة إنتاجها بصورة أكثر جودة وكفاءة.

٢-٣-١ :الآلية الطبيعية في استقبال الأصوات اللغوية:

يعول في فهم طبيعة الصوت البشري وعمليات استقباله وإدراكه طبيعيًا على دراسة الجهاز السمعي للإنسان وتحديد وظائف أعضائه في أثناء استقبال الذبذبات الصوتية المنتشرة في الهواء، ويختص علم الأصوات السمعي (Auditory Phonetics) بوصفه أحدث فروع علم الأصوات– نسبيًا– بتناول هذا الجانب الذي يهتم بتحليل وقع آثار الموجات الصوتية على أذن السامع سواء من الناحية العضوية المتمثلة في ميكانيكية عمل الجهاز السمعي أم من الناحية النفسية المتمثلة في بيان أثر الذبذبات الصوتية في عمليات الإدراك المختلفة[٣٣].

والأذن هي عضو السمع الطبيعي في الإنسان شكل (٢-٦) بجانب دورها الأساسي في حفظ التوازن، ويقسمها علماء التشريح إلى ثلاثة أقسام [٣٤] كالآتي:

- **الأذن الخارجية**: وتتألف من:

- **صيوان الأذن**[i]: هو الجزء الغضروفي المرن والبارز من الأذن على جانبي الرأس والمغطى بطبقة رقيقة من الجلد، ويسهم شكله القُمعي الذي يشبه البوق – إلى حد ما – في تجميع الموجات الصوتية لتضخيمها وتركيزها على طبلة الأذن عبر القناة السمعية الخارجية، كما تسهم التواءات سطحه في تحديد جهة الصوت، وهناك جزء سفلي من الصيوان ذو طبيعة دهنية يسمى شحمة الأذن.
- **القناة السمعية الخارجية**: أنبوب تسلكه الموجات الصوتية إلى الأذن الوسطى، ويبلغ طول تلك القناة تقريبًا (٢.٥ سم) وقطرها تقريبًا (٠.٧ سم)، وتمتد من صيوان الأذن حتى طبلة الأذن، وتحتوي على شعيرات وغدد تفرز مادة شمعية تسمى الصملاخ لحماية الأذن من البكتيريا والفطريات.
- **طبلة الأذن**: غشاء مائل رقيق ذو شكل مخروطي تتجه ذروته نحو الأذن الوسطى، ويبلغ قطره (١٠ مم)، وهذا الغشاء يفصل بين الأذن الخارجية والأذن الوسطى[ii] ويتأثر بفعل الموجات الصوتية القادمة إليه عبر القناة السمعية الخارجية؛ فيهتز وتهتز معه عظيمات الأذن الثلاث في الأذن الوسطى، وهكذا تنتقل الاهتزازات الصوتية إلى الأذن الوسطى، ولغشاء الطبل دور مهم أيضًا في الحفاظ على الأذن الوسطى من الأتربة والجراثيم.

- **الأذن الوسطى**: تتمثل وظيفتها في معالجة الموجات الصوتية وتضخيمها قبل نقلها إلى محيط الأذن الداخلية، وهي عبارة عن تجويف صغير مملوء بالهواء داخل العظم

---

[i] لصيوان الأذن دور كبير في كفاءة حاسة السمع بوصفه الجزء الأول المستقبل للصوت، ويتضح ذلك من خلال ملاحظة صيوان الأذن في بعض الطيور والحيوانات البرية حيث يكون لشكل الصيوان وحجمه وموضعه في الرأس وقدرته على الحركة من عدمه أثر واضح في تحديد قدرة تلك الحيوانات على استقبال الأصوات والتعامل معها.

[ii] يوجد غشاء الطبل بين نهاية القناة السمعية الخارجية وعظيمات الأذن الثلاث في الأذن الوسطى.

الصدغي مبطن بغشاء مخاطي، وتتصل الأذن الوسطى مع البلعوم عبر قناة تُسمى قناة نفير أوستاش (أستاكيوس) والتي تلعب دورًا مهمًا في الحفاظ على تعادل الضغط على جانبي غشاء الطبل، بالإضافة إلى دورها في تصريف إفرازات الأذن الوسطى في حالة إصابتها بالالتهاب أو الحساسية، ويشتمل تجويف الأذن الوسطى على عظيمات ثلاث متناهية الصغر وقابلة للحركة تُسمى عظيمات السمع، وهي:

- **المطرقة:** تتصل المطرقة بغشاء الطبل وهي أكبر عظيمات الأذن الوسطى.
- **السندان:** يتوسط السندان بين المطرقة والركاب حيث يتصل من أحد طرفيه بالمطرقة ومن الطرف الآخر بالركاب.
- **الركاب:** هو أصغر عظيمات الأذن الوسطى، ويتصل الركاب بالسندان من أحد طرفيه ويتصل من الطرف الآخر بالنافذة البيضية.

وتتصل تلك العظيمات ببعضها بواسطة المفاصل الزلالية، ويعمل هذا التواصل العظمي على نقل الحركة الاهتزازية لغشاء الطبل إلى الأذن الداخلية وتضخيمها، كما يعمل اختلاف الحجم بين غشاء الطبلة والجزء المتصل بجدار الأذن الداخلية من عظم الركاب على زيادة الضغط عشرات المرات على النافذة البيضاوية.

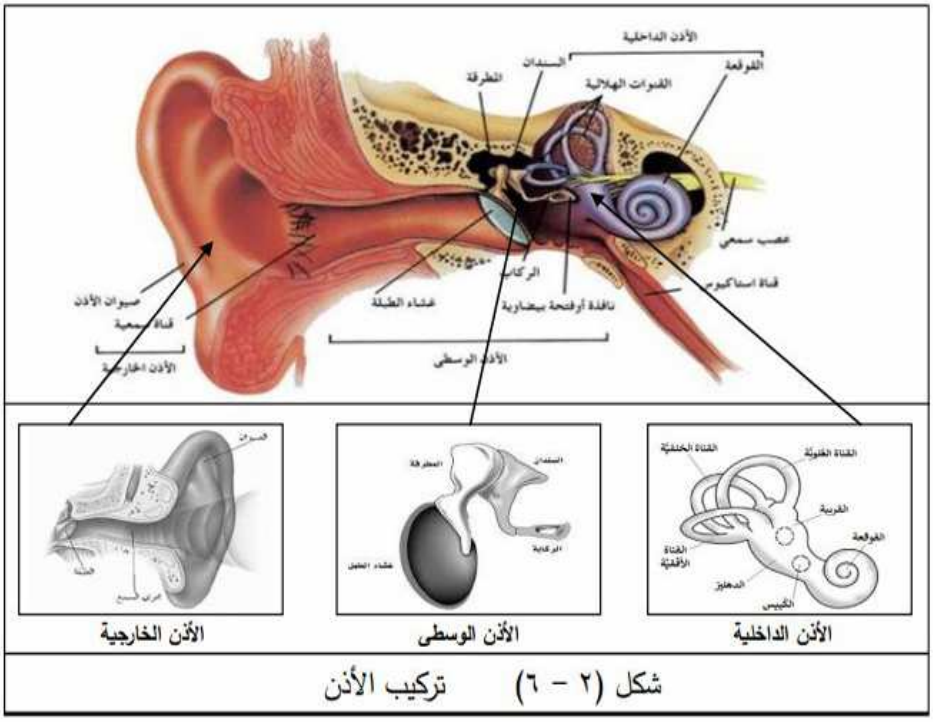
وهناك عضلتان تتصلان بتلك العظيمات، إحداهما تسمى العضلة الشادة الطبلية ووظيفتها سحب المطرقة ومعها غشاء الطبل نحو الداخل، والعضلة الأخرى تُسمى العضلة الشادة الركابية وتقوم بسحب الركاب نحو الخارج، وما تقوم به هاتان العضلتان يعمل على تقارب عظيمات السمع مما يكون له عظيم الأثر في حماية الأذن الداخلية من الأصوات عالية الشدة.

- **الأذن الداخلية**: توجد داخل العظم الصدغي وتتكون من تجاويف غشائية وممرات ذات تركيب معقد بها سائل ذو طبيعة خاصة يسمى اللمف، ويقسمها علماء التشريح إلى ثلاثة أجزاء، كالآتي:

- **الحلزون:** ويسمى القوقعة، وهو عبارة عن حلزون يدور حول نفسه مرتين ونصف المرة، ويتصل بالعصب السمعي، وله دور مهم في عملية السمع حيث

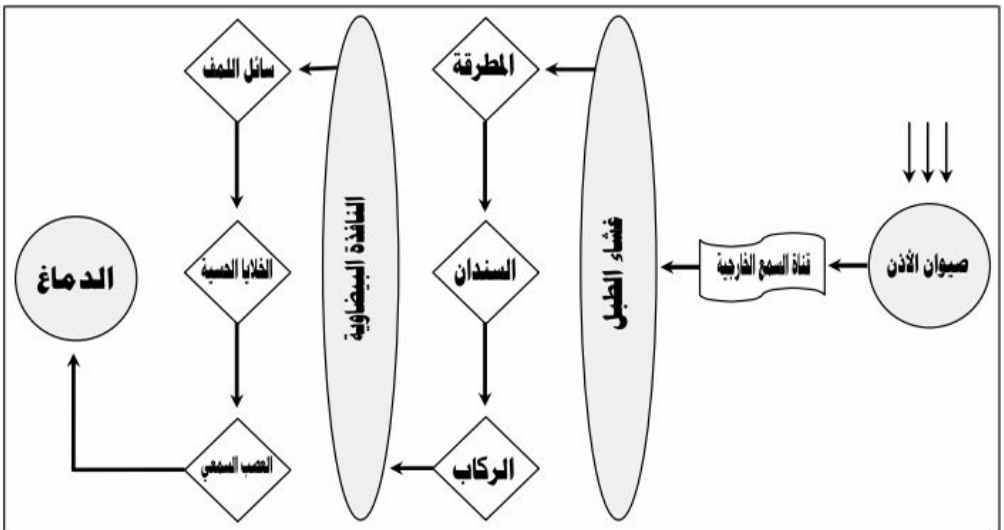
يحتوي على الغشاء القاعدي الذي يتكون من آلاف الخلايا الشعرية المكونة لعضو كورتي وهو عضو السمع الفعلي.

- **الدهليز:** هو الجزء الأوسط من الأذن الداخلية، ويتألف من ممر به انتفاخان يسميان (القُرَيْبَة والكُيَيْس)، وله غشاءان صغيران يواجهان الأذن الوسطى هما النافذة البيضاوية المتصلة بعظم الركاب والنافذة المدورة الواقعة أسفل النافذة البيضاوية.
- **القنوات الهلالية:** تقع خلف الدهليز، وهي مكونة من ثلاث قنوات ذات ترتيب خاص، وتُسمى الجانبية والعليا والخلفية، ولتلك القنوات دور مهم في حفظ توازن الجسم.



شكل (٢ – ٦) تركيب الأذن

وتعتمد آلية عمل الأذن البشرية على مسار محدد[شكل (٢-٧)] يبدأ باستشعار الموجات الصوتية المنتشرة في الهواء عبر صيوان الأذن الذي يعمل على تجميع تلك الموجات وتوجيهها إلى قناة السمع الخارجية مما يؤدي إلى اهتزاز غشاء الطبل بفعل الأمواج الصوتية التي تصله، ثم تنتقل تلك الاهتزازات إلى عظيمات السمع الثلاث المتمثلة في المطرقة فالسندان ثم الركاب المتصل بالنافذة البيضية للأذن الداخلية؛ ليتم بعد ذلك تضخيم تلك الاهتزازات ونقلها عبر سائل معين إلى جميع أجزاء الأذن الداخلية حتى تصل إلى القوقعة التي يؤدي تموج خلاياها المهدبة إلى تشكيل سيالة عصبية تُنقل بواسطة العصب السمعي إلى الدماغ الذي يدرك تلك الموجات كأصوات ويفسرها.



شكل (٢ - ٧) مسار عمل الأذن

٢-٣-٢ : الآلية الاصطناعية في استقبال الأصوات اللغوية:

حظي الصوت اللغوي باهتمام العلماء والمختصين بتطوير المعالجات الآلية للغات الطبيعية بوصفه أبرز الرموز اللغوية الحاملة للمعنى وأكثرها استعمالاً وأهمية، وهو المنطلق الحقيقي نحو معالجة فعالة للغة تحقق للبشرية ما تسعى من أجله وتتطلع إليه، وخلال القرن التاسع عشر وبعد عدة عقود من قيام الثورة الصناعية في أوروبا تمكنت البشرية من امتلاك أدوات تحليلية ووسائل معرفية سمحت لها بدراسة الصوت اللغوي بصورة أكثر دقة وواقعية.

ويستلهم مبتكرو تلك الأدوات الاصطناعية فكرتها من آلية عمل الأذن البشرية، فكما أن الأذن البشرية تستقبل الصوت اللغوي من خلال تحويل موجاته إلى ذبذبات ميكانيكية ومن ثمَّ إرسالها كإشارات عصبية عبر العصب السمعي إلى الدماغ لتفسيرها كأصوات فإن الأدوات الاصطناعية تستقبل أيضًا موجات الصوت الطبيعية بوصفها قوى مُحرِّكة وتحولها إلى ما يناظرها من حركة ميكانيكية أو طاقة كهربائية أو قيم رقمية تمهيدًا لتوظيفها بعد ذلك في أداء مهام معينة تتعلق بنقل الكلام وتحليله أو بإعادة إنتاجه وتسجيله.

وهكذا يمكن وصف تلك الأدوات الاصطناعية التي تعمل على استقبال الأصوات اللغوية تمهيدًا لمعالجتها بمحولات الطاقة (Transducers) حيث تقوم فكرتها على تحويل الاهتزازات الصوتية إلى صورة أخرى من الطاقة مكافئة لها قدر المستطاع [i]، وبرؤية تصنيفية يمكن تقسيم أدوات استقبال الصوت اللغوي وفقًا لمخرجاتها من الطاقة وبالنظر إلى مراحل تطورها إلى ثلاثة أنواع أساسية جميعها – تقريبًا – يستخدم غشاءً حاجزًا (Diaphragm) يهتز تحت تأثير موجات الصوت المنتشرة في الهواء، وبيان تلك الأنواع كالآتي:

❖ **٢-٣-٢-١ : تحويل الاهتزازات الصوتية إلى حركة ميكانيكية:**

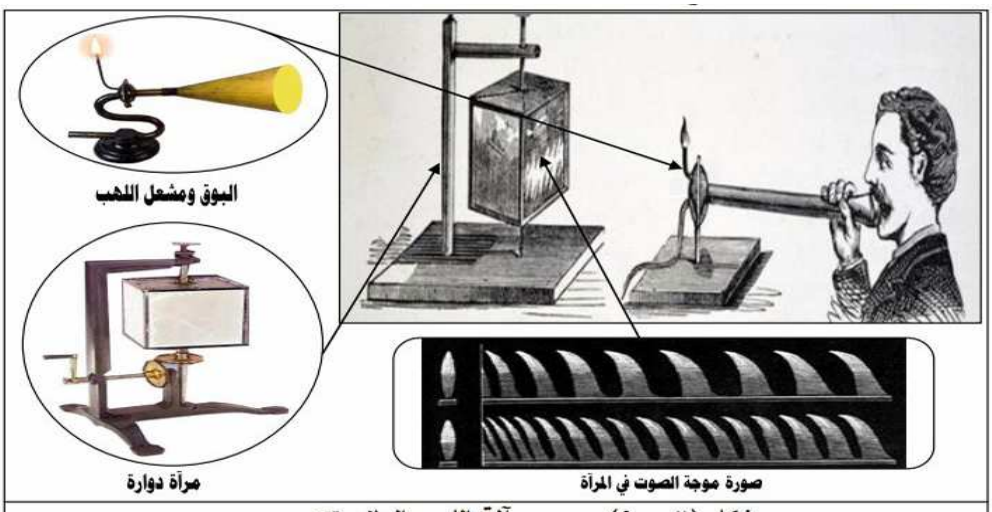
أحدث ظهور هذا النوع من الأدوات نقلة نوعية في التعامل مع الأصوات الكلامية سواء على صعيد تمثيلها طيفيًا أم على صعيد تسجيلها وإعادة إنتاجها، فعلى صعيد تمثيل الأصوات اللغوية طيفيًا فقد أثمرت جهود العالم الفرنسي إدوارد ليون سكوت دي مارتينفيل (Edouard-Leon Scott de Martinville) عن اختراع آلة الفونوتوغراف (Phonautograph)شكل (٢-٨) عام ١٨٥٧م، وهي آلة قادرة على استقبال الأصوات الطبيعية وتسجيل ذبذباتها بخطوط رسومية على قرص متحرك من الورق باستخدام قلم خفيف مثبت على غشاء مرن يهتز تحت تأثير الصوت، وقد عمل ليون سكوت بمساعدة آخرين على تطوير الفونوتوغراف الذي كان له أثر واضح في الدراسات العلمية للصوت اللغوي حيث أتاح لأول مرة صور مرئية يمكن الاعتماد عليها في تحليل الأصوات اللغوية وتفسيرها(٣٥).

---

[i]يرى بعض الخبراء أنه لا يوجد محول للطاقة فعال بنسبة 100 % ، فدائمًا هناك فقد لبعض الطاقة في عملية التحويل .. e3arabi.com.

شكل (٢ - ٨) آلة الفونوتوغراف ورسم الذبذبات الصوتية

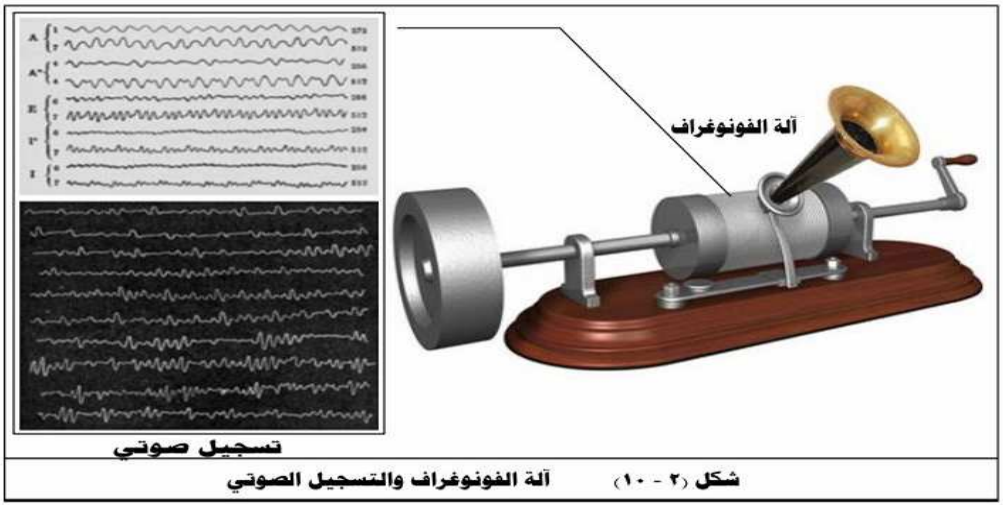
وفي عام ١٨٦٢م تمكن العالم الألماني رودولف كونيغ (Rudolph Koenig) من تطوير آلة اللهب المانومتري(Manometric flame) شكل (٢- ٩) لدراسة الخصائص الصوتية للموجات، وتقوم فكرة تلك الآلة على تصوير التغيُّرات التي تطرأ على شعلة لهب نتيجة تأثرها بحركة موجات الصوت عبر مرآة دواره، حيث يتم استقبال الصوت الطبيعي من خلال بوق مخروطي الشكل يتصل بغشاء مرن يهتز تحت تأثير الصوت؛ مما يتسبب في تغيُّرات تدفق الغاز يعقبه تغيُّرات في ارتفاع شعلة اللهب، ومن خلال مرآة دوارة يتسنى رؤية اللهب يتصاعد وينخفض مع تغيُّر الضغط على الغشاء المرن[٣٦].



شكل (٢ – ٩) آلة اللهب المانومتري

ونظرًا لإسهامات التصوير الطيفي في تفسير الظواهر الصوتية؛ عمل المطورون على ابتكار آلات أخرى أكثر كفاءة ودقة في تصوير الذبذبات الصوتية منها ما قدمه العالم الأمريكي دايتون كلارنس ميلر (Dayton Clarence Miller) عام ١٩٠٨م وأطلق عليه الفونوديك (Phonodeik) لدراسة الخصائص الفيزيائية للأصوات من خلال التصوير الطيفي للموجات الصوتية، وهكذا توالت الابتكارات وتعددت من أجل الوصول لتمثيل مرئي يطابق – قدر الإمكان – الموجة الطبيعية للصوت اللغوي[٣٧].

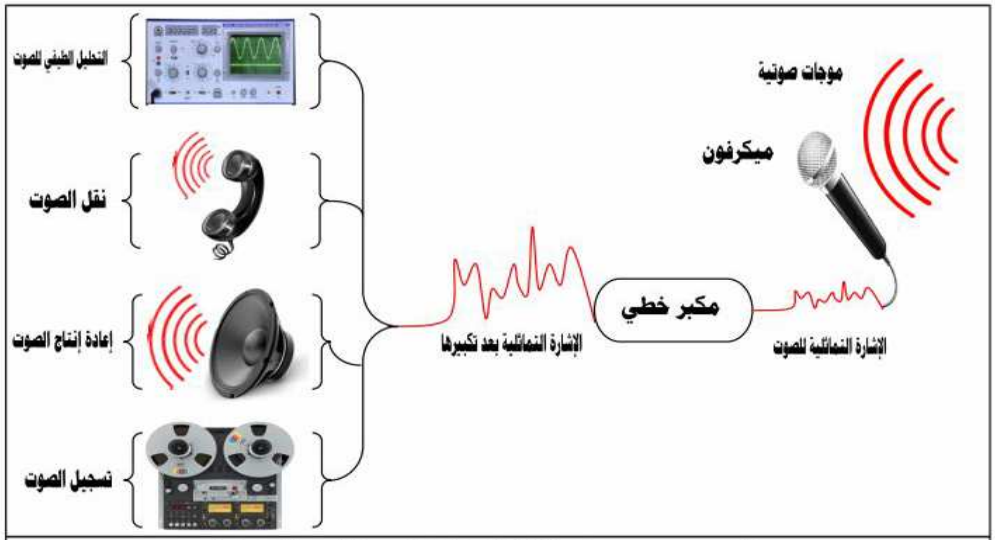
أما على صعيد تسجيل الأصوات وإعادة إنتاجها فقد تمكن العالم الأمريكي توماس إديسون(Thomas Edison) عام ١٨٧٧م من اختراع آلة الفونوغراف (Phonograph) القادرة على تسجيل الأصوات وإعادة إنتاجها مرة أخرى شكل (٢- ١٠)، وذلك باستخدام غشاء مطاطي موصول بإبرة مدببة، فلتسجيل الصوت – على سبيل المثال – يتم التحدث أمام الغشاء المطاطي فتعمل موجات الصوت المنتشرة في الهواء على اهتزاز هذا الغشاء وبالتالي تحريك الإبرة المسئولة عن إحداث نقاط حلزونية محفورة على أسطوانة دائرية مغطاة بورق القصدير، ولإعادة الاستماع إلى الصوت مرة أخرى يتم تحريك الأسطوانة الدائرية بالحركة نفسها عند تسجيل الصوت؛ فتتحرك الإبرة بسبب مرورها خلال النقاط المحفورة؛ فيهتز الغشاء المطاطي وفقًا لذلك؛ فيحدث صوت مماثل– إلى حد ما – للصوت الأصلي[٣٨].



شكل (٢ - ١٠) آلة الفونوغراف والتسجيل الصوتي

❖ **٢-٣-٢-٢ : تحويل الاهتزازات الصوتية إلى إشارات كهربائية تماثلية :**

أثمرت جهود العلماء في مجال الكهرباء خلال القرن التاسع عشر في الوصول إلى إنجازات بحثية وابتكارات علمية أسهمت في الارتقاء بالحياة البشرية على صعيد مجالات عديدة أبرزها مجال معالجة الصوت اللغوي، حيث تمكن العلماء باختراع المِصْدَح (Microphone) من تحويل الأصوات الكلامية من صورتها الطبيعية – المتمثلة في كونها كمية فيزيائية متتالية ذات قيم متغيرة ومتصلة زمنيًا – إلى ما يماثلها من إشارات كهربائية تتغير باستمرار بصورة مناظرة لشدة الصوت الطبيعي وتردده، ومن ثمَّ يتم تكبير تلك الإشارات الكهربائية عن طريق مكبر خطي (Linear amplifier) ونقلها عبر وسيط كالأسلاك (Wires) أو موجات الراديو (Radio waves) إلى وحدات استقبال (Receiver Units)[٣٩]؛ ليتم توظيفها بعد ذلك في دراسة خصائص الموجات الصوتية وتحليلها أو لنقل تلك الأصوات وتسجيلها[شكل (٢ – ١١)]، وعن هذه التطورات يقول الدكتور عصام نور الدين: "عرف علم الأصوات تطورات مهمة جدًا، أدت إلى استعمال الأجهزة الكهربائية والالكترونية، وقامت مختبرات للصوت مجهزة بالآلات الدقيقة لضبط الأجزاء والكليات ولتسجيل بنية الصوت وتواتره وذبذباته، فتطبعه على أشرطة مسجلة وتجمع بصماته"[٤٠].



شكل (٢ - ١١) مجالات الأنظمة التماثلية للصوت اللغوي وآلية عملها

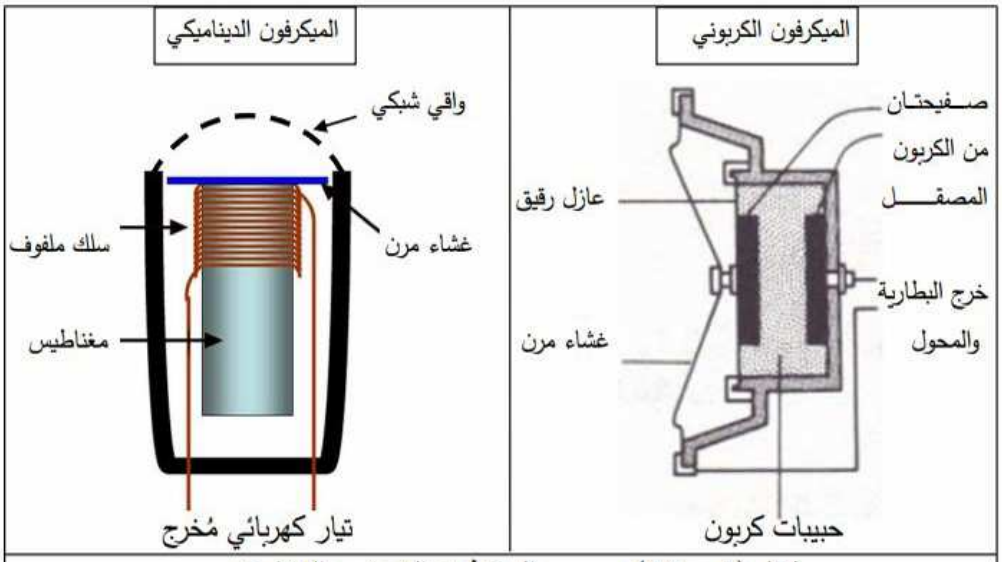
وهكذا تعتمد آلية عمل أدوات الصوت التماثلية في أبسط صورها على منظومتين أساسيتين بينهما وسيط ناقل، حيث تختص المنظومة الأولى باستقبال الأصوات الطبيعية وتحويلها إلى إشارات كهربائية مماثلة عن طريق محول طاقة (Transducer) يُطلق عليه المِصْدَح أو الميكرفون (Microphone) شكل (٢ - ١٢) وتُعرف النسخة الأولى منه بالميكرفون الكربوني (Carbon Microphone) حيث يعتمد على عنصر الكربون في تحويل الاهتزازات الصوتية إلى إشارات كهربائية.

ويرجع الفضل في تطوير الميكرفون الكربوني إلى العالمين الأمريكي توماس إديسون (Thomas Edison) والألماني إميل برلينر (Emil Berliner) عام ١٨٧٧م، وهو يتكون من وعاء عازل مثبت في قاعه صفيحة من الكربون المصقول، وتوجد صفيحة أخرى من الكربون المصقول في أعلى الوعاء متصلة بغشاء مرن يهتز تحت تأثير الصوت، وبين الصفيحتين حبيبات من الكربون، ومن ثمَّ يعمل الميكرفون الكربوني كمقاومة متغيرة، فنتيجة لضغط موجات الصوت؛ يهتز الغشاء المرن، فتهتز معه صفيحة الكربون المصقول مما يؤدي إلى تعرض حبيبات الكربون لضغط متغير يتسبب في تغير المقاومة الكهربائية بين الصفيحتين، وبمرور تيار كهربائي مباشر بين الصفيحتين في أثناء تلك العملية؛ يُنتج تيار كهربائي يتغير بصورة تماثل موجة الصوت الأصلي، وهذا النوع من الميكرفونات مخصص للهواتف وأجهزة الاتصال لقدرته على التقاط الموجات الصوتية الضئيلة نسبيًا(٤١).

وهناك نوع آخر من الميكرفونات تم تطويره لتحويل موجات الصوت الطبيعية إلى إشارات كهربائية مماثلة يُعرف بالميكرفون الديناميكي (Dynamic Microphone)شكل(٢ - ١٢)، وهو الميكرفون الأشهر والأكثر استعمالاً، ويعتمد في عمله على مبدأ الحث الكهرومغناطيسي [i] الذي اكتشفه العالم الإنجليزي مايكل فاراداي (Michael Faraday) عام ١٨٣١م، ويتكون الميكرفون الديناميكي من قطب مغناطيسي مُحاط بسلك ملفوف متصل بغشاء مرن، وعند

[i]يقوم مبدأ الحث الكهرومغناطيسي على فكرة أن المغناطيسية المتغيرة مع الزمن تنتج قوى كهربائية محركة، ومن ثمَّ يؤدي تحريك مغناطيس داخل ملف من سلك نحاسي إلى توليد تيار كهربائي ... انظر تقنيات المعالجة الآلية للغة : ٥٥١.

التحدث أمام هذا الغشاء يهتز بفعل ذبذبات الصوت محركًا السلك المحاط بالمغناطيس للأمام والخلف مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي مماثل لذبذبات الصوت الأصلي[٤٢].

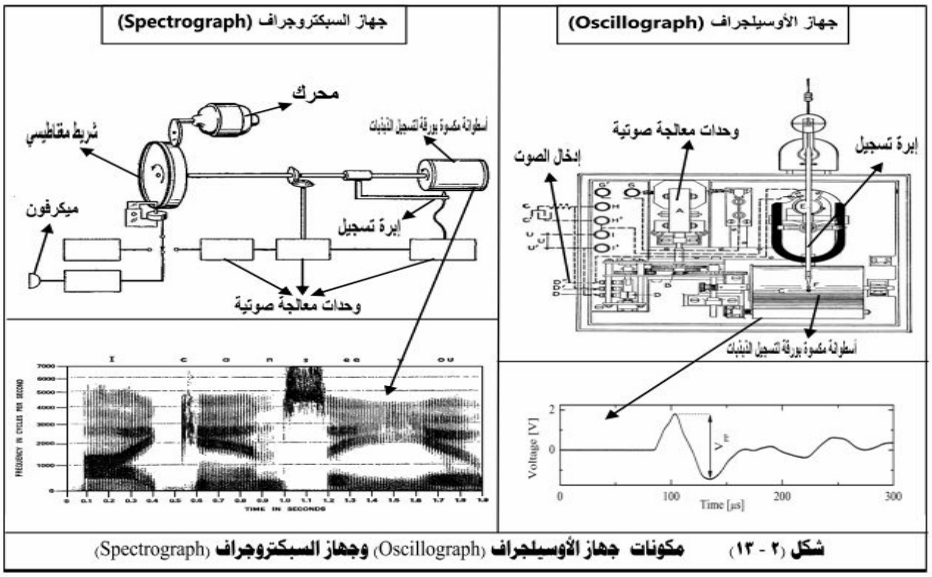


شكل (٢ - ١٢) الميكرفون الكربوني والديناميكي

ونظرًا لأهمية الميكروفونات ودورها المهم في منظومة معالجة الأصوات الكلامية؛ عكف المطورون على ابتكار أنواع جديدة منها أكثر دقة وكفاءة في تمثيل الأصوات تمثيلاً كهربائيًا يتطابق – قدر الإمكان – مع طبيعتها الأصلية كالميكرفون السعوي أو المكثف (Condenser Microphone) والميكرفون البلوري (Crystal Microphone) والميكرفون الشريطي (Ribbon Microphone) وغير ذلك، وكل نوع من تلك الأنواع له تقنيته الخاصة لتحويل موجات الصوت الطبيعية إلى تيار كهربائي مماثل .

وتخضع الإشارات الكهربائية بعد استقبالها من الميكرفون لعملية تضخيم بواسطة المكبر الخطي (Linear amplifier)، ثم تنتقل عبر وسيط ناقل كالأسلاك (Wires) أو موجات الراديو (Radio waves) إلى منظومة أخرى تختص بتفسير تلك الإشارات ومعالجتها بصورة ما بغرض القيام ببعض المهام، أبرزها:

✓ **<u>التحليل الطيفي للصوت:</u> حظي التحليل الطيفي للصوت اللغوي باهتمام العلماء، ومع أواخر القرن التاسع عشر وبدايات القرن العشرين طور العلماء أدوات متعددة لرسم موجات الصوت وتمثيلها طيفيًا كجهازي الأوسيلجراف(Oscillograph)[i] والسبكتروجراف (Spectrograph) [ii] شكل(٢ – ١٣)، وقد تمكن العلماء بواسطة تلك الأدوات من معـرفة الفروق النوعية للأصـوات اللغـوية،وإدراك التغيرات التي تطرأ علـى الأصـوات نتيجة تجاورها مـع بعضها لبعض، كما تمكن العلماء بفضل التحليل الطيفـي للصـوت مـن دراسـة ظـواهر صوتية كثيرة كتأثير السواكن على العلل وغيرها (٤٣).**



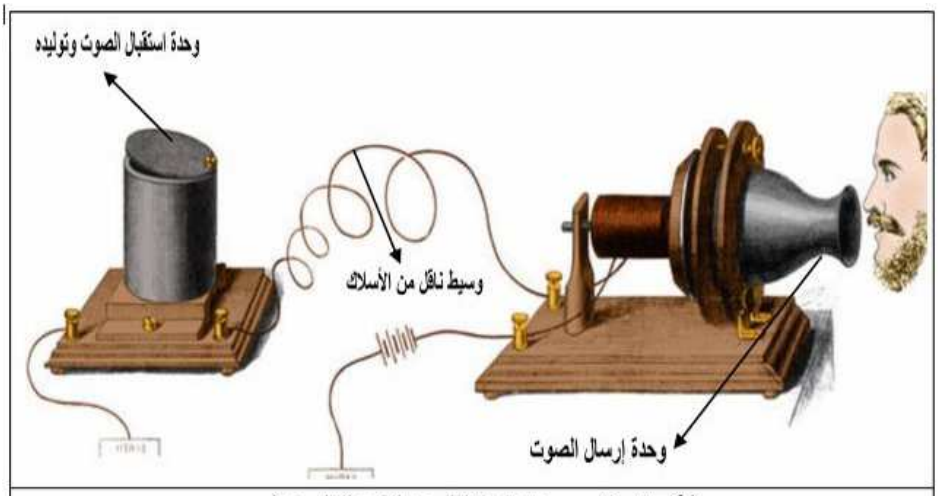
شكل (٢ - ١٣) مكونات جهاز الأوسيلجراف (Oscillograph) وجهاز السبكتروجراف (Spectrograph)

---

[i] **الأوسيلجراف (Oscillograph): هو جهاز كهربائي لتمثيل الموجات الصوتية طيفيًا، حيث يستقبل الإشارات الكهربائية المتغيرة مع الزمن ويحولها إلى رسم مرئي ثنائي الأبعاد محوره العمودي يمثل الجهد أو الكمية المتغيرة (Voltage) والمحور الأفقي يمثل الزمن (Time) .. انظر علم أصوات العربية : ١٠**

[ii] **السبكتروجراف (Spectrograph): يُستخدم هذا الجهاز لرسم الموجات الصوتية بيانيًا بصورة تسمح بإظهار العلاقة بين الزمن والشدة والتردد، وعبر العقود السابقة قدم هذا الجهاز صورًا طيفية للصوت اللغوي مكنت العلماء من التفريق بين الأصوات المختلفة والوصول إلى فكرة البصمة الصوتية التي من خلالها يتم تمييز أصوات الرجال والنساء والأطفال بعضها من بعض .. انظر علم أصوات العربية : ١٠ ، علم الأصوات اللغوية (الفونيتيكا) لعصام نور الدين : ١٤٢.**

✓ **نقل الصوت: شهد عام ١٨٧٦م الظهور الفعلي للهاتف** (Telephone) شكل(٢ - ١٤) **على يد العالم الأسكتلندي ألكسندر غراهام بل** (Alexander Graham Bell)[i]**، ومنذ هذا الحين والهاتف يعد الوسيلة الأساسية لنقل الأصوات الكلامية وتبادلها من مكان إلى آخر، ويعتمد الهاتف في عمله على استقبال موجات الصوت الطبيعية عبر وحدة الإرسال وتحويلها إلى إشارات كهربائية مماثلة يتم تكبيرها ونقلها عبر وسيط ناقل؛ لتقوم وحدة أخرى تُسمى وحدة الاستقبال بتحويل تلك الإشارات الكهربائية إلى ذبذبات صوتية مرة أخرى تمهيدًا لإعادة توليد الصوت اللغوي بصورة مماثلة لطبيعته عبر سماعة الهاتف** (Telephone Headphone)[٤٤].



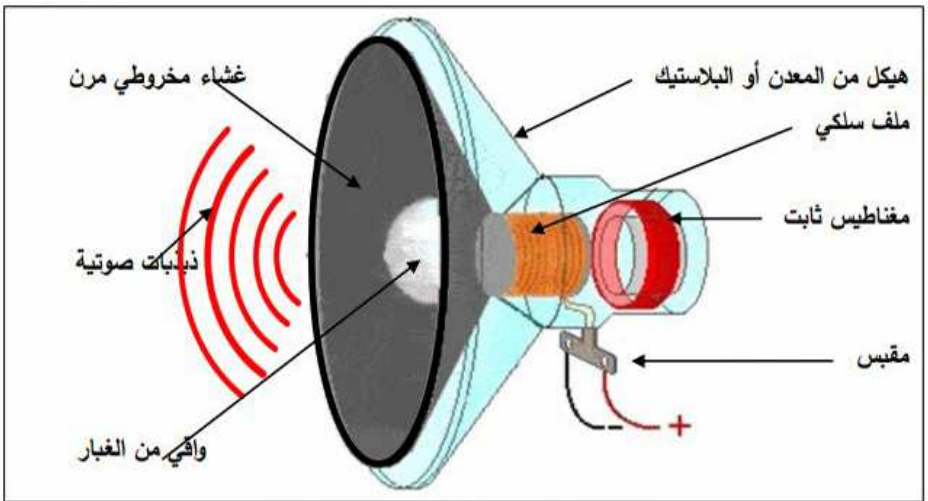
شكل (٢ - ١٤) نموذج لهاتف من القرن التاسع عشر

✓ **إعادة إنتاج الصوت: تتم عملية إعادة إنتاج الصوت الكلامي في الأساس بغرض تحسينه وتضخيمه بصورة تُلبي رغبات المستمع، وتختص مكبرات الصوت** (Loudspeakers) **بتلك العملية حيث تقوم بتلقي الإشارات الكهربائية الواردة إليها**

---

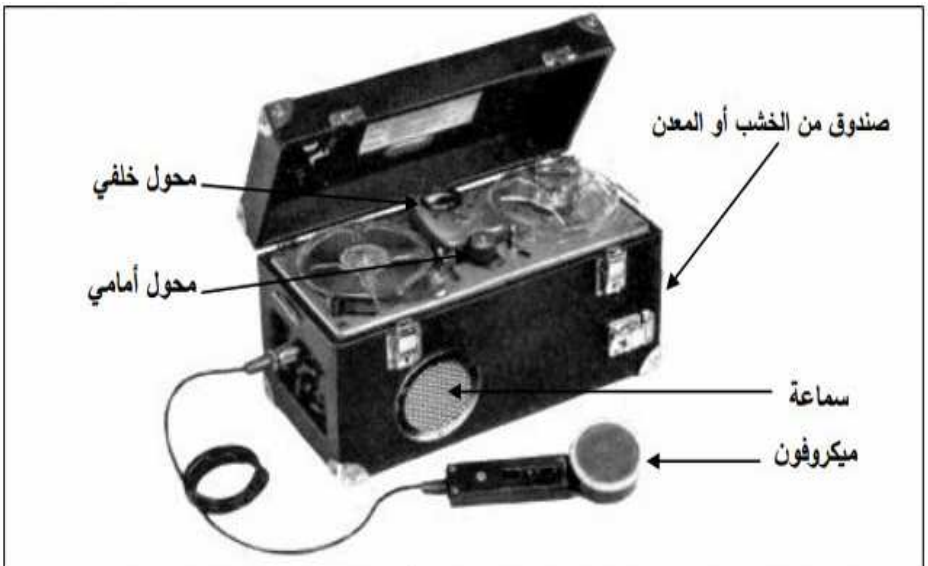
[i] أعلن مجلس النواب الأمريكي (Congress) رسميًا في عام ٢٠٠٢م أن العالم الإيطالي أنطونيو ميوتشي (Antonio Meucci) هو المخترع الحقيقي للهاتف وليس غراهام بل (Graham Bell) .. انظر تاريخ العلوم: ١٣٨.

من الميكرفون وتحويلها إلى ذبذبات صوتية تنتشر في الهواء لتستقبلها الأذن البشرية كأصوات مسموعة، ويرتبط ابتكار مكبر الصوت ارتباطًا وثيقًا بتطوير الهاتف والراديو، حيث يُعد مكبر الصوت جزءًا أصيلاً من فكرة نقل الصوت من مكان إلى آخر، وقد تم تقديم أول نموذج بسيط لمكبر صوتي عام ١٨٦١م على يد العالم الألماني يوهان فيليب ريس (Johann Philipp Reis) مـن أجل تطوير هاتفه، وفي عام ١٨٧٦ حصل العالم الأسكتلندي غراهام بل (Alexander Graham Bell) على براءة اختراع لنموذج خاص بهاتفه، واستمرت منظومة تطـوير مكبرات الصـوت علـى يد علماء كثر كالألمانـي فيرنر فـون سيمنز(Werner von Siemens) والأمريكـي توماس إديسون (Thomas Edison) والبريطاني أوليفر لودج(Oliver Lodge)، وذلك حتى الربع الأول من القرن العشرين عندما ظهر المكبر الصوتي شكل(٢ – ١٥) الذي يعتمد في عمله على اكتشاف العالم الدنماركي هانز أورستد(Hans Orsted) عام١٨٢١م لتوليد مجال مغناطيسي متغير عند مرور تيار كهربائي في ملف، ومن ثمَّ فإن مرور الإشارات الكهربائية داخل الملف السلكي الموجود في السماعة يحول هذا الملف إلى مغناطيس يتنافر ويتجاذب مع المغناطيس المثبت بالسماعة؛ مما يُسبب اهتزاز الملف؛ فيهتز الغشاء المخروطي المتصل به؛ فيتولد الصوت(٤٥).



شكل (٢ - ١٥) نموذج لسماعة ديناميكية

✓ **<u>تسجيل الصوت</u>: يُقصد بالتسجيل الصوتي هنا الكتابة الكهربائية لموجات الصوت بصورة تسمح بتخزين الأصوات في الوقت الحاضر لإعادة الاستماع إليها في المستقبل، وتُعد البداية الحقيقية لتسجيل الأصوات بصورة كهربائية عام ١٩٢٤م عندما قدمت شركة تسجيلات كولومبيا بالتعاون مع شركة فيكتور للآلات الناطقة نموذجًا لمسجل صوت كهربائي يعتمد في عمله على مضخِّمات إلكترونية وميكروفونات وحفارات للأقراص الكهرومغناطيسية، وفي عام ١٩٣٣م قدمت مجموعة AEC بالتعاون مع شركة I.G.farben فكرة المسجل الشريطي ماغتنوفون (Magnetophon)، ومع منتصف القرن العشرين أصبحت المسجلات الشريطية** شكل(٢-١٦) **الوسيلة الأساسية للتسجيل الصوتي في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية(٤٦).**



شكل (٢ - ١٦) مسجل صوتي شريطي استخدمته هيئة الأذاعة البريطانية في منتصف القرن العشرين

❖ **٢-٣-٢-٣ : تحويل الاهتزازات الصوتية إلى قيم رقمية :**

أسهمت المعالجات التماثلية للصوت اللغوي في الارتقاء بالحياة البشرية عبر عقود من الزمن ولكنها في الوقت نفسه لم تكن كافية لتحقيق مزيدٍ من الطموحات والآمال، فالنظام

التماثلي وإن كان يتفق مع طبيعة الموجات الصوتية من حيث كونها كمية فيزيائية متتالية ذات قيم متغيرة ومتصلة زمنيًا إلا أنه غير ناجع مع طبيعة عمل الآلات الكهربائية القائمة على ثنائية الوصل (ON) والفصل(OFF)، وربما هذا يُفسر القصور الذي يعتري أنظمة الصوت التماثلية خاصة فيما يتعلق بالتشويش والضجيج عند نقلها للصوت إلى مسافات بعيدة أو عند حفظها له بصورة متكررة.

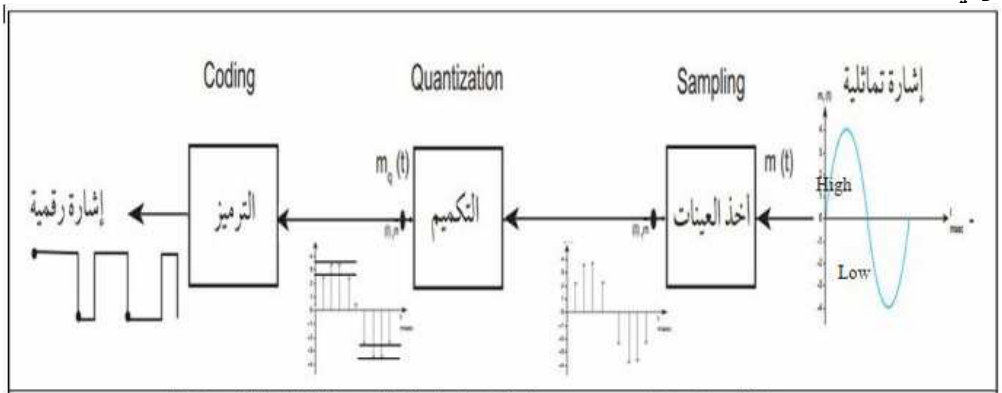
وهكذا بات الأمر في حاجة ضرورية إلى تقنية أخرى تتوافق مع طبيعة عمل الآلات الكهربائية وتكون بديلاً عن التقنية التماثلية في معالجة الصوت اللغوي، ومع نهاية العقد الثالث من القرن العشرين توصل العلماء إلى طرق للمعالجة الآلية قائمة على نظام العد الثنائي (Binary Number System) الذي اكتشفه جوتفريد لبينيز (Gottfried Leibniz) عام ١٦٧٩م من خلال معرفته بالأعداد ودرايته بطرق كتابتها في الحضارات القديمة منذ آلاف السنين وخاصة في الحضارة الصينية،وقد شهدت المعالجات الرقمية(Digital processing) تطورًا عمليًا ملحوظًا مع الظهور الفعلي للحواسيب الآلية (Computers) في منتصف عقد الأربعينيات من القرن العشرين، ومع مطلع الثمانينيات من القرن نفسه حدثت نقلة نوعية في استعمال التقنيات الرقمية التي لم يقتصر تأثيرها على مجال بعينة بل امتد إلى مجالات متعددة؛ مما أسهم في تطور المجتمعات الإنسانية وتقدمها(٤٧).

ويستعمل نظام العد الثنائي رمزين لا أكثر هما: (0 , 1)؛ وذلك لتمثيل القيم العددية وفقًا للعلاقة (2^{n-1})، حيث تمثل القيمة (2) أساس النظام الثنائي، وترمز (n) إلى موضع العدد الثنائي، فعلى سبيل المثال يتم التمثيل الثنائي للرقم العشري(٢١٣)بتوزيعه وفق العلاقة(2^{n-1}) على ما يساويه من قيم مواضع العدد الثنائي من أسفل إلى أعلى، ولتحويل العدد نفسه من النظام الثنائي إلى النظام العشري يتم جمع قيم مواضع العدد الثنائي التي تساوي واحد كما يتضح من الجدول الآتي:

العدد في النظام الثنائي	توزيع العدد	قيم مواضع العدد	2^{n-1}	n−1	N	العدد في النظام العشري
11010101	1	1	2^0	0	1	=213
	0	2	2^1	1	2	
	1	4	2^2	2	3	
	0	8	2^3	3	4	
	1	16	2^4	4	5	
	0	32	2^5	5	6	
	1	64	2^6	6	7	
	1	128	2^7	7	8	

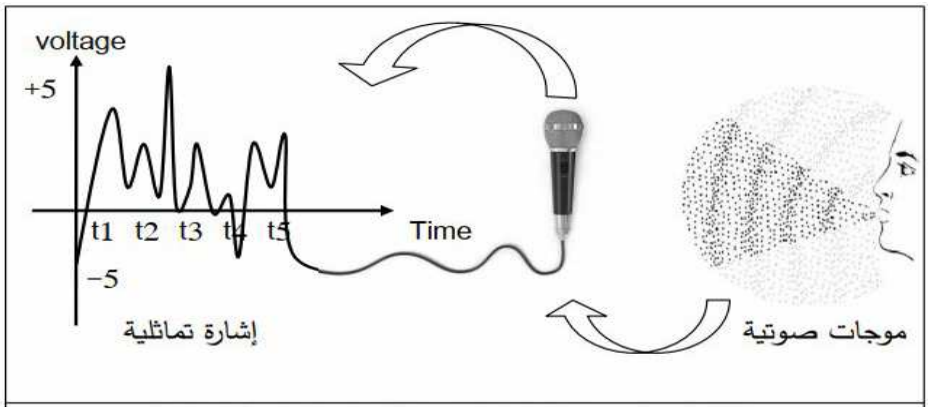
وبالنظر إلى الجدول السابق يُلاحظ أن الرقم العشري $_{10}$(٢١٣) يتم تمثيله ثنائيًا بالرمز (11010101) وهو رمز مكون من شفرة (Code) ذات ثماني (8) خانات، وتُعرف كلٌ منها في الدوائر الرقمية بالبيت (Bit)، وبها الرمز (0) ويُقابل الجهد المنخفض (Low) أو الرمز (1) ويُقابل الجهد العالي (High).

وهكذا فإن نظام العد الثنائي هو الأكثر ملاءمة لطبيعة الآلات الكهربائية القائمة على ثنائية الوصل (ON/High/Yes) والفصل (OFF/ Low/No)، ومن ثمَّ يُعد هذا النظام الركيزة الأساسية التي يعتمد عليها مطورو المعالجات الآلية حتى اليوم في تمثيل الرموز اللغوية الحاملة للمعنى سواء أكانت أصوات لغوية منطوقة أم كانت رموز مكتوبة، وعلى صعيد ما يتعلق بالأصوات اللغوية – وهي ما تعنينا هنا– فإن مسار تمثيلها رقميًا في صورة سلسلة من نبضات ذات حالتين من الجهد (LOW = 0 / HIGH =1) يجتاز العمليات الآتية [٢-١٧]:



شكل (٢ - ١٧) مسار التمثيل الرقمي للإشارة الصوتية

- ✓ **<u>تحويل الصوت إلى إشارة تماثلية</u>: عقب إنتاج الصوت من المتكلم في صورة موجات صوتية منتشرة فـي الهواء تبدأ عملية استقبال تلك الموجات عبر الميكرفون لتحويلها إلى إشارات كهربائية تناظرية(Analog signal)تماثل الموجة الطبيعية للصوت الأصلي**شكل(٢-١٨) **حيث تتغير قيمها بصـورة متتالية ومستمرة في إطار من الزمن.**



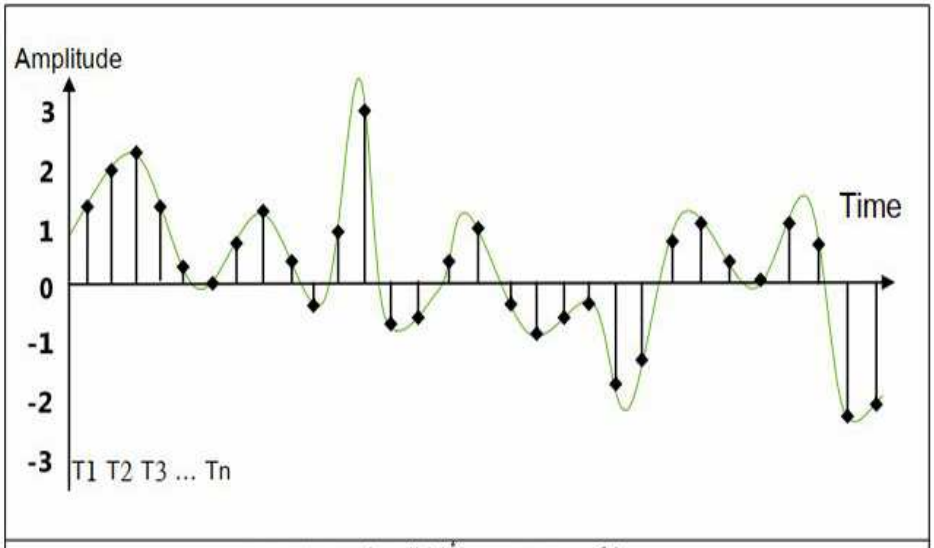
شكل (٢ - ١٨) تحويل الموجات الصوتية إلى إشارات كهربائية تماثلية

- ✓ **<u>أخذ العينات (Sampling)</u>: تأتي هذه العملية بهدف اختزال القيم اللانهائية للإشارة التماثلية**[i] **في نطاق محدود من العينات المتتابعة على فترات زمنية متقطعة**شكل(٢-١٩)**، وهكذا تتحول الإشارة التماثلية إلى إشارة منفصلة في مجال الزمن، ولتحديد عدد العينات المناسبة في كل ثانية من أجل تمثيل الإشارة التماثلية تمثيلاً صحيحًا تفرض نظرية أخذ العينات (Sampling theory) أن يكون معدل أخذ العينات أكبر من أو يساوي ضعف أكبر تردد في الإشارة التماثلية وفقًا للعلاقة($fT=2w_{max}$)**[ii] **حيث ترمز(fT) إلى معدل أخذ العينات وترمز(w_{max}) إلى أعلى تردد للإشارة التماثلية**(٤٨)**.**

---

[i]**توصف الإشارة التماثلية بأنها إشارة متصلة زمنيًا؛ مما يجعلها إشارة ذات قيم غير قابلة للحصر أو العد.**

[ii]**على سبيل المثال لو هناك إشارة تماثلية ترددها (10) كيلوهرتز فإن معدل أخذ العينات لها يكون أكبر من أو يساوي (20) كيلوهرتز.**



شكل (٢ - ١٩) أخذ العينات (Sampling)

✓ **التكميم (Quantization): تُعد عملية التكميم من العمليات الأساسية في الحصول على القيمة الرقمية التقريبية للإشارة التماثلية من خلال تمثيل قيم العينات بكميات محدودة شكل (٢-٢٠) وذلك تبعًا لعدد مستويات التكميم (Quantization Levels)[٤٩]، ويعني هذا أن عملية التكميم تُعد عملية تقريب لقيم العينات (Sampling) التي تم تنظيمها في المرحلة السابقة (مرحلة أخذ العينات) إلى مستويات يتم تحديد عددها من خلال العلاقة (2^n) حيث ترمز (n) إلى عدد الخانات الثنائية(Bit Rate) المستخدم في تحديد المستوى،ولمزيد من التوضيح فإن قيم العينات الممثلة في المخطط السابق شكل (٢-١٩) تتطلب لتكميمها القيام بثلاث خطوات، تتمثل الخطوة الأولى في تحديد متطلبات التكمية من خلال العناصر الآتية:**

- **تحديد عينات الإشارة بالترتيب وعددها وأعلى قيمها وأقلها،وذلك على النحو الآتي:**

– العينات بالترتيب:

(1.5/2/2.5/1.5/.5/0/1/1.5/.5/-.5/1/3/-.5/-.5/.5/1/-.5/1/-.5/-.5/-2/-1.5/1/1/.5/0/1/.5/-2/-2)

- عدد العينات : 30 عينة
- أعلى قيمة عينة : 3
- أقل قيمة عينة : 2-

- تحديد عدد الخانات الثنائية (Bit Rate) لتمثيل المستويات:
  - عدد الخانات المطلوبة : 2 Bits
- تحديد مقدار خطوة التكمية: وهي (1.24) وذلك من خلال العلاقة :
  - $S = (T_{MAX} - T_{MIN}) / (2^n) - 0.01$
  - $S = (3 - (-2)) / (2^2) - 0.01$
  - $S = 5 / 4 - 0.01$
  - $S = 5 / 4 - 0.01$
  - $S = 1.24$

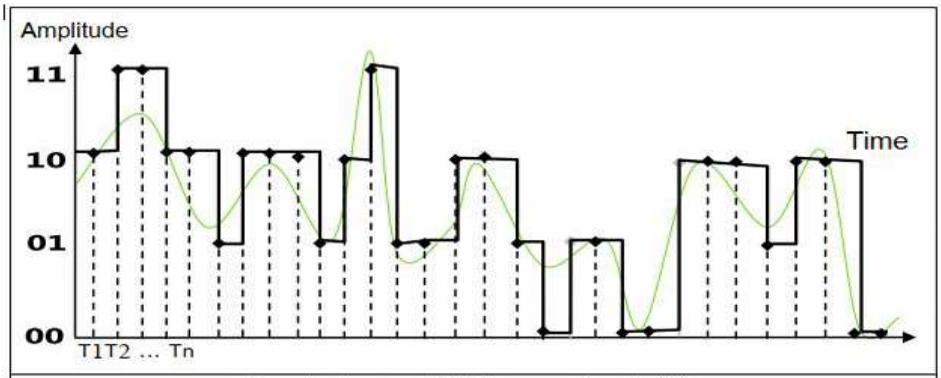
أما الخطوة الثانية من خطوات تكميم الإشارة الصوتية فتتمثل في تقسيم المستويات وتصنيفها تمهيدًا لترقيمها وفق نظام التنسيق الثنائي للأعداد (Binary Number System)، وذلك كما يتضح من خلال الجدول الآتي:

مستويات التكمية	خطوة التكمية	التنسيق الثنائي للخطوة
1	من (-2) إلى (-0.74)	0 0
2	من (-0.75) إلى (0.49)	0 1
3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
4	من (1.75) إلى (3)	1 1

وتأتي الخطوة الثالثة والأخيرة من خطوات تكميم الإشارة الصوتية لتختص بتنظيم قيم العينات وترتيبها تمهيدًا لترقيمها بنظام الترقيم الثنائي وفقًا لمستوى التكميم التابعة له قيمة العينة كما يتضح من الجدول الآتي:

ترتيب العينة	قيمة العينة	مستويات التكمية	خطوة التكمية	التنسيق الثنائي للخطوة
1	1.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
2	2	4	من (1.75) إلى (3)	1 1
3	2.5	4	من (1.75) إلى (3)	1 1
4	1.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
5	0.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
6	0	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
7	1	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
8	1.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
9	0.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
10	−0.5	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
11	1	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
12	3	4	من (1.75) إلى (3)	1 1
13	−0.5	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
14	−0.5	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
15	0.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
16	1	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
17	−0.5	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
18	−1	1	من (−2) إلى (−0.74)	1 0
19	−0.5	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
20	−0.5	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
21	−2	1	من (−2) إلى (−0.74)	0 0
22	−1.5	1	من (−2) إلى (−0.74)	0 0
23	1	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
24	1	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
25	0.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
26	0	2	من (−0.75) إلى (0.49)	0 1
27	1	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
28	0.5	3	من (0.50) إلى (1.74)	1 0
29	−2	1	من (−2) إلى (−0.74)	0 0
30	−2	1	من (−2) إلى (−0.74)	0 0

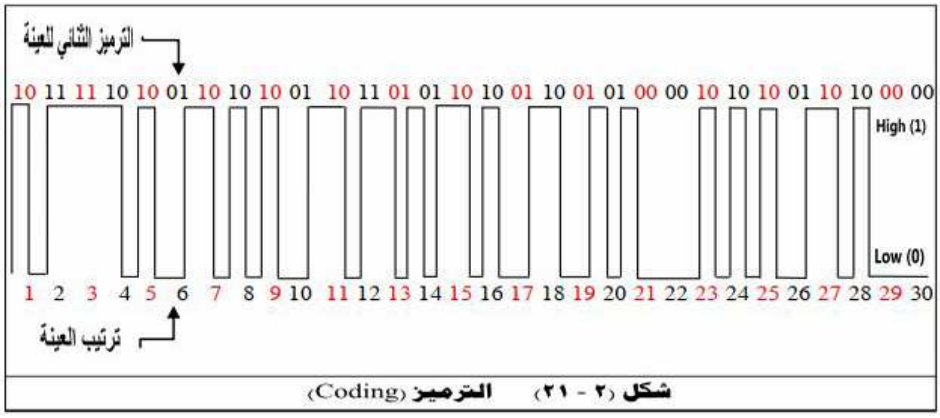
ويتم تمثيل عملية تكميم الإشارة الصوتية بيانيًا كما بالشكل الآتي:



شكل (٢ - ٢٠) عملية التكميم (Quantization)

وبالنظر إلى الإشارة الصوتية بعد عملية تكميمها في مستويات محددة يتبين تأثرها – إلى حد ما – بنسبة من التشويش والتغيير(Quantization Noise)[شكل (٢-٢٠)] والتي يمكن عن طريق زيادة عدد العينات والمستويات تقليلها بصورة واضحة، ويتم حساب معدل هذا التشويش من خلال بيان مجموع فرق حاصل طرح قيم متوسط المستويات من قيم عينات الإشارة الأصلية.

- ✓ **الترميز (Coding)**: يُقصد بعملية الترميز تشفير كل عينة عند مستوى تكميمها برموز رقمية مكونة من أصفار ووحايد وفقًا لنظام التكويد الثنائي(Binary Coding)، ومن ثمَّ يتم تحويل الإشارة التماثلية للصوت اللغوي إلى إشارة رقمية يتم تمثيلها في الدوائر الإلكترونية بسلسلة من النبضات الكهربائية المتدفقة[٢-٢١].



شكل (٢ - ٢١) الترميز (Coding)

وبالانتهاء من عملية ترميز العينات عند مستوى تكميمها (Coding) تكتمل عملية تحويل الإشارة التماثلية للأصوات اللغوية إلى إشارات رقمية حيث يمكن من خلال إجراء بعض المعالجات المحوسبة عليها توظيفها بصورة تسمح للأنظمة الرقمية بالقيام بمهام متعددة بآلية أكثر كفاءة وأقل تكلفة من الأنظمة التماثلية ذات الأداء المحدود والتكلفة المرتفعة.

ويسهم تمثيل الإشارات بالنسق الرقمي في جعل الأنظمة الصوتية قادرة على مقاومة التشويش (Noise) والتداخل بين الموجات (Interference between Waves)، كما يجعلها تحظى بقدرة كبيرة في الحفاظ على قوة الإشارة وجودتها والتحكم بظاهرة الصدى (Echo Control)، كما يتيح التمثيل الرقمي إمكانية تخزين(Storage) معلومات الإشارة الصوتية على وسائط تخزين مختلفة وإعادة إنتاجها بجودة عالية[٥٠].

وفي مجال الاتصالات تمكنت الأنظمة الرقمية من نقل الأصوات الكلامية بجودة وكفاءة إلى مسافات أبعد باستخدام وسائط الألياف الضوئية (Optical Fiber)، وذلك بخلاف الأنظمة التماثلية التي تقل جودة إشاراتها كلما زادت المسافة بين المرسل والمستقبل، كما يتيح التمثيل الرقمي نوعًا من التشفير للإشارات الصوتية يجعلها قابلة للحماية والتأمين (Security) بصورة تسمح باستخدامها في أغراض كثيرة تتطلب نوعًا من السرية كبعض الأغراض العسكرية وعمليات البنوك وغيرها[٥١].

ومع كل ما تحقق في مجال التمثيل الرقمي للأصوات اللغوية تظل الحاجة قائمة إلى تبني تصورات ورؤى يمكن من خلالها الإسهام في تطوير الأنظمة الرقمية بصورة تجعلها أكثر كفاءة وسرعة وأقل تكلفة.

نتائج البحث وتوصياته :

تناول البحث مسار التمثيل الرقمي للصوت اللغوي بوصفه أحد المسارات المهمة في دراسة الصوت اللغوي حاسوبيًا بجانب مساري النمذجة الصوتية ونواتج المعالجات، وقد حرص البحث خلال تناوله لهذا المسار على إبراز الأثر المهم للصوت اللغوي في توجيه المعالجات الحاسوبية للغة الطبيعية؛ لكونه المنطلق الحقيقي لتلك المعالجات وأكثر الرموز

اللغوية استعمالاً وأهمية وتوافقًا مع مسار التمثيل الرقمي الذي يُعد الخطوة الأولى والأكثر أهمية في بناء أنظمة ذكية أكثر كفاءة وقدرة على تحليل الأصوات اللغوية تحليلاً علميًا دقيقًا، وهكذا فإن المعالجات الناجعة للغة الطبيعية بوجه عام وللصوت اللغوي بوجه خاص تعتمد في الأساس على تمثيل رقمي سليم للأصوات اللغوية.

وتقوم رؤية البحث لدراسة مسار تمثيل المعطيات الصوتية على تحديد مكانة هذا المسار بين مسارات المعالجة الحاسوبية للصوت اللغوي وبيان أثره المهم في وضع نظام ترميز ثنائي لتمثيل الصوت يتكون من الواحد والصفر(1/0)؛ ليتوافق ذلك مع طبيعة الحواسيب الآلية القائمة على ثنائية الوصل والفصل (On/Off)، ومن ثمَّ إيجاد معالجات حاسوبية تُسهم بفاعلية في تطوير تطبيقات صوتية متعددة كتطبيقات: تعليم الأداء والنطق السليم، وعلاج اضطرابات الصوت وعيوب السمع، وتطوير وسائل الاتصال الصوتي .. وغير ذلك من التطبيقات.

وقد تتبع البحث عند تناوله لمسار التمثيل الرقمي للصوت اللغوي المراحل التنفيذية له، وصنفها في ثلاث مراحل، وبيَّن دور كل مرحلة وأهميتها في عمليات التمثيل الرقمي بداية من مرحلة إنتاج الصوت مرورًا بانتقاله عبر وسيط مادي وصولاً بآلية استقباله في صورة تقبلها الآلة وتتعامل معها تمهيدًا لمعالجته من أجل القيام بمهام معينة.

فعلى صعيد إنتاج الصوت اللغوي فقد بيَّن البحث أن التعرف على طبيعة الصوت اللغوي وتحليل ميكانيكية حدوثه من الأمور المهمة ذات الأثر الجلي الواضح في معالجة الكلام حاسوبيًا، فمن المهم لمطوري تلك المعالجات الوقوف على مصدر الصوت ومواطن تخليقه وتشكيله ثم إصداره بالهيئة التي تستقبلها الأذن البشرية حتى يتسنى تطوير أنظمة رقمية تُحاكي آلية عمل الجهاز النطقي في توليد الأصوات اللغوية ونطقها.

أما على صعيد انتقال الصوت اللغوي فقد أكد البحث على ضرورة المعرفة الجيدة لخصائص الصوت اللغوي في أثناء انتقاله عبر وسط مادي من متكلم إلى مستمع من أجل الوصول إلى نماذج حاسوبية أفضل للصوت اللغوي تُعالج كثيرًا من جوانب النقص على صعيد تطبيقات فهم الأصوات اللغوية وإنتاجها.

وعلى صعيد استقبال الصوت اللغوي فقد أوضح البحث أن فهم الآلية الطبيعية لاستقبال الصوت اللغوي من خلال دراسة الجهاز السمعي للإنسان وتحديد وظائف أعضائه في أثناء استقبال الذبذبات الصوتية المنتشرة في الهواء له أثره الواضح في ابتكار أدوات تحليلية ووسائل معرفية لاتزال تحقق للبشرية ما تسعى من أجله وتتطلع إليه.

ويستلهم مبتكرو تلك الوسائل والأدوات الاصطناعية فكرتها من آلية عمل الأذن البشرية حيث تستقبل الأدوات الاصطناعية الموجات الطبيعية للصوت اللغوي وتحولها إلى ما يناظرها من حركة ميكانيكية أو طاقة كهربائية أو قيم رقمية تمهيدًا لتوظيفها بعد ذلك في القيام بمهام برمجية معينة تتعلق بنقل الكلام وتحليله أو بإعادة إنتاجه وتسجيله، وهكذا قسم البحث أدوات استقبال الصوت اللغوي وفقًا لمخرجاتها من الطاقة وبالنظر إلى مراحل تطورها ثلاثة أقسام تناولها البحث بالتفصيل مبينًا تطبيقاتها العملية ومجالات توظيفها، وهي : أدوات تحويل الاهتزازات الصوتية إلى حركة ميكانيكية، وأدوات تحويل الاهتزازات الصوتية إلى إشارات كهربائية تماثلية، وأخيرًا أدوات تحويل الاهتزازات الصوتية إلى قيم رقمية.

وفي ضوء ما تقدم يوصي البحث باستمرار جهود تطوير المعالجات الرقمية للصوت اللغوي والارتقاء بها بوصفها السبيل الحقيقي لبناء منظومة أكثر كفاءة لمعالجة اللغة حاسوبيًا، كما يؤكد البحث على أهمية التكامل بين علوم دراسة الصوت اللغوي كعلم اللغويات والفيزياء والتشريح والحاسوب والمنطق الرياضي؛ وذلك لفهم أكثر واقعية لطبيعته؛ مما يُسهم في بناء معالجات رقمية تمثل الصوت اللغوي تمثيلاً يناظر طبيعته الأصلية بصورة كبيرة.

وفي نهاية بحثي أحمد الله رب العالمين على توفيقه وتيسيره، وأسأله سبحانه وتعالى أن يكون اجتهادي فيه مفيدًا نافعًا لمن أراد أن ينتفع به، وأن يجعل خطئي فيه مغفورًا وإحساني فيه مأجورًا، وصل اللهم على نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين.

هوامش البحث:

(١) الخصائص : ٣٣/١ .
(٢) أسس علم اللغة لماريو باي : ٣٥ .
(٣) انظر مدخل إلى علم اللغة لمحمود فهمي حجازي:١٠ ،علم اللغة لحاتم الضامن:٣٢،آفاق جديدة في دراسة اللغة والعقل:٣٨.
(٤) انظر آفاق جديدة في دراسة اللغة والعقل: ٤٣ ، ٤٤ .
(٥) المرجع نفسه: ٣٤ ، ٣٥ .
(٦) انظر سيكولوجية اللغة والمرض العقلي:٢٤،علم الدلالة لأحمد مختار عمر:١٤، مدخل إلى علم اللغة لمحمود فهمي حجازي: ١٧.
(٧) انظر الصوتيات والفونولوجيا : ١٣ ، ١٤ ، مدخل إلى علم اللغة (لمحمود فهمي حجازي) : ٣٦ .
(٨) انظر همع الهوامع : ٤٤٩/٣ ، علم اللغة (لحاتم صالح الضامن) : ٧٩ ، ٨٠ .
(٩) انظر في النحو العربي .. نقد وتوجيه : ١٧ ، ١٨ .
(١٠) انظر علم اللغة (لمحمود السعران) : ٢٦١ ، علم الدلالة (أحمد مختار عمر) : ١٣ ، ١٤ .
(١١) انظر الأصوات اللغوية لعاطف فضل : ٣٩.
(١٢) دراسة الصوت اللغوي : ٤٠١.
(١٣) انظر المرجع نفسه : ٤٠١ : ٤٠٩.
(١٤) أسس علم اللغة لماريو باي : ٤٠ .
(١٥) انظر المعالجة الآلية للغة العربية .. جهود الحاضر وتحديات المستقبل : ١٧.
(١٦) انظر أسس بناء التطبيقات الحاسوبية لدراسة اللغة العربية: ٢٦ .
(١٧) انظر المرجع نفسه : ٤١ : ٤٥ .
(١٨) مقدمة في حوسبة اللغة العربية: ٧٥ .
(١٩) انظر علم الأصوات لكمال بشر : ٤١، ٤٧ ، الأصوات اللغوية لعاطف فضل: ٤٦.
(٢٠) انظر الأصوات اللغوية لعاطف فضل: ٦٩ .
(٢١) دراسة الصوت اللغوي لأحمد مختار عمر : ١١٢.
(٢٢) انظر الأصوات اللغوية لعاطف فضل: ٧٣ ، ٧٤ ، دراسة الصوت اللغوي لأحمد مختار عمر : ١١٢.
(٢٣) انظر دراسة الصوت اللغوي لأحمد مختار عمر : ١٠٠ – ١١٠ .
(٢٤) انظر المرجع نفسه : ١١٣ .
(٢٥) انظر علم الأصوات لكمال بشر : ٤٨، ٤٩.
(٢٦) انظر أساسيات الفيزياء العامة : ١٥٦، ١٥٧ .

(٢٧) انظر أساسيات الفيزياء الكلاسيكية والمعاصرة: ٢٨٤ ، ٢٨٥ .

(٢٨) دراسة الصوت اللغوي لأحمد مختار عمر : ٢٧.

(٢٩) انظر المرجع نفسه : ٣٦، ٣٧ .

(٣٠) انظر معجم مصطلحات الفيزياء : مصطلح (velocity of sound) : ٥١٥ ، ومصطلح (تردد سمعي audio-frequency) : ٣٨ ، ومصلح (سعة الموجة wave amplitude) : ٥٢٣ ، ومصطلح (شدة الصوت intensity of sound): ، ٢٣٦ ، ٤٤٩ ، ومصطلح (طابع الصوت quality of sound) : ٣٧٧ ، أساسيات الفيزياء الكلاسيكية والمعاصرة: ٢٩١ ، أساسيات الفيزياء العامة : ١٥٩، ١٩٧، ١٩٨، ٢٠٢ ، فيزيائية الصوت والحركة الموجية : ٥١٩ : ٥٢٢ .

(٣١) انظر علم الأصوات لكمال بشر : ٥٠، ٥١ .

(٣٢) المرجع نفسه : ٥٣ : ٥٥ .

(٣٣) انظر علم الأصوات العربية : ١٤ ، علم الأصوات لكمال بشر : ٨ .

(٣٤) انظر أساسيات الفيزياء العامة : ١٩٢ : ١٩٤ ، الأصوات اللغوية لإبراهيم أنيس: ١٥ ، ١٦ .

(35) .See sound recording: p2

(36) See The Science of Musical sounds : p 73 : 75 .

(37) .The previous reference : 78 : 84 See

(٣٨) انظر تاريخ العلوم : ١٤٢ ، See The Science of Musical sounds : p 76 : 78

(٣٩) انظر أساسيات النظم الرقمية: ١٧ ، تكنولوجيا الاتصال الحديثة في عصر المعلومات : ١٤٤.

(٤٠) علم الأصوات اللغوية (الفونيتيكا) لعصام نور الدين : ١٣٥ .

(41).See The Electric Telephone :P 90 : 100 , :P 182:187 See The Telephone &The Microphone &The Phonograph

(٤٢) انظر أساسيات الاتصالات الرقمية : ١٧.

(٤٣) See The Science of Musical sounds: p 75 ,76. انظر دراسة الصوت اللغوي لأحمد مختار عمر: ٤٣، ٤٤.

(44) : P 140. Nineteenth-Century Scientific Instruments See

(45) The Telephone & The Microphone & The Phonograph: P126:128. See

(٤٦) انظر قصة تكنولوجيا تسجيل الأصوات : ٩ .

(٤٧) انظر المعلوماتية وشبكات الاتصال الحديثة : ٢٨٢٩، انظر المعالجة الرقمية للإشارات : ١٣ .

(٤٨) انظر أساسيات الاتصالات الرقمية : ١٣ : ٢٢والمعالجة الرقمية للإشارات : ٣٣ .

(٤٩) انظر المعالجة الرقمية للإشارات : ٢٦، ٢٧٥٨ .

(٥٠) انظر أساسيات النظم الرقمية : ١٧ .

(٥١) انظر تكنولوجيا الاتصال الحديثة في عصر المعلومات : ١٥١ : ١٥٤ .

مراجع البحث

أولاً : **المراجع العربية** :

- أنيس، د.إبراهيم، **الأصوات اللغوية**، القاهرة، مطبعة نهضة مصر، د.ت.
- الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، **أساسيات الاتصالات الرقمية**، المملكة العربية السعودية، منشورات الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، د.ت.
- باي، ماريو، **أسس علم اللغة**، ط٨، ترجمة: د.أحمد مختار عمر ، القاهرة، عالم الكتب، ١٩٩٨م.
- بريزنسكي، كلود، **تاريخ العلوم .. اختراعات واكتشافات وعلماء**، ترجمة: سارة رجائي يوسف، القاهرة، مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة، ٢٠١٥م.
- بشر، د.كمال، **علم الأصوات**، القاهرة، دار غريب للطباعة والنشر والتوزيع، ٢٠٠٠م.
- بشير، أبو الحجاج محمد، وآخرون ،**المعالجة الآلية للغة العربية .. جهود الحاضر وتحديات المستقبل** : مجلة لغة العصرالعدد ٩٢، القاهرة٢٠٠٨م.
- بكرو، د.خالد، **أساسيات النظم الرقمية**، سوريا، شعاع للنشر والعلوم، ٢٠١٨م.
- تشومسكي، نعوم،**آفاق جديدة في دراسة اللغة والعقل**، ترجمة: عدنان حسن، سوريا، دار الحوار للنشر والتوزيع، ٢٠٠٩م.
- ابن جني، أبو الفتح عثمان بن عبد الله، **الخصائص**، تحقيق: محمد علي النجار، بيروت، عالم الكتب،د.ت.
- جونيور، ديفيد ل.مورتون، **قصة تكنولوجيا تسجيل الأصوات**، ترجمة: رفيق كامل غدَّار، بيروت، الدار العربية للعلوم ناشرون، ١٤٣٢هـ – ٢٠١١م.
- حجازي، د.محمود فهمي ، **مدخل إلى علم اللغة** ، القاهرة، دار غريب، ١٩٩٧م.

- حركات، مصطفى، **الصوتيات والفونولوجيا**، القاهرة ، الدار الثقافية، ١٤١٨هـ – ١٩٩٨م .
- أبو دعابس، محمد، **أساسيات الفيزياء العامة**، ط٢، عمان، مركز الكتاب الأكاديمي، ٢٠١٤م.
- رشوان، د.محسن وآخرون ، **مقدمة في حوسبة اللغة العربية**، مركز الملك عبد الله بن عبد العزيز لخدمة اللغة العربية ، ط١، الرياض، ٢٠١٩م.
- السعران، محمود. **علم اللغة.. مقدمة للقارئ العربي**، بيروت، دار النهضة العربية، د.ت.
- السيوطي ، أبو الفضل جلال الدين عبد الرحمن بن أبي بكر ، **همع الهوامع** ، تحقيق : عبد الحميد هنداوي ، القاهرة ، المكتبة التوفيقية ، د.ت .
- الضامن، حاتم صالح. **علم اللغة**، الموصل، مطبعة التعليم العالي، د.ت.
- العدوي،د.محمد إبراهيم، **المعالجة الرقمية للإشارات**، القاهرة، جامعة حلوان،٢٠٠٩م.
- عمر، أحمد مختار.

- **دراسة الصوت اللغوي**، القاهرة، عالم الكتب، ١٩٩٧م.
- **علم الدلالة**، ط٥، القاهرة، عالم الكتب، ١٩٩٨م.
- **معجم اللغة العربية المعاصرة**، القاهرة، عالم الكتب، ١٤٢٩هـ – ٢٠٠٨م.

- فضل، د.عاطف، **الأصوات اللغوية**، عمان، دار المسيرة للنشر والتوزيع، ٢٠١٣م.
- كرجية، د.أمجد عبد الرازق، **فيزيائية الصوت والحركة الموجية**، ط٢، الموصل(العراق)، دار الكتب للطباعة والنشر، ٢٠٠٠م.
- محمود، د.محمد رأفت محمود، **أسس بناء التطبيقات الحاسوبية لدراسة اللغة العربية**، بني سويف(مصر)، دار الكتاب الجامعي للطباعة والتوزيع، ٢٠١٩م.

- المخزومي ، د: مهدي، **في النحو العربي .. نقد وتوجيه** ، ط٢ ، بيروت ، دار الرائد العربي ، ١٤٠٦هـ – ١٩٨٦م .
- مكاوي، د.حسن عماد، **تكنولوجيا الاتصال الحديثة في عصر المعلومات**،ط٢،القاهرة، الدار المصرية اللبنانية، ١٩٩٧م.
- منشورات جامعة القدس المفتوحة، **علم الأصوات العربية**، مطابع جامعة القدس المفتوحة، عمان، ٢٠٠٧م.
- ميلاد،عبد المجيد،**المعلوماتية وشبكات الاتصال الحديثة**، https://archive.org/د.ت.
- نور الدين، د.عصام، **علم الأصوات اللغوية (الفونيتيكا)**، بيروت، دار الفكر اللبناني، ١٩٩٢م.
- واصف، د.رأفت كامل، **أساسيات الفيزياء الكلاسيكية والمعاصرة**، ط٣، القاهرة، دار النشر للجامعات، ١٤٢٦هـ – ٢٠٠٥م.
- يوسف، جمعة سيد. **سيكولوجية اللغة والمرض العقلي**، الكويت، عالم المعرفة، ١٩٩٠م.
- مجمع اللغة العربية بدمشق، **معجم مصطلحات الفيزياء**، مطبوعات مجمع اللغة العربية بدمشق، ١٤٣٦هـ – ٢٠١٥م.

ثانياً: **المراجع الأجنبية** :

- **Du Moncel ,Count,** The Telephone & The Microphone & The Phonograph**, fourth edition, London, SPOTTISWOODE AND CO., 1892.**
- **Houston, Edwin James,** The Electric Telephone**, New York, McGraw Publishing Company, 1906.**
- **Miller, Dayton Clarence ,** The Science of Musical sounds**, New York, the macmillan company , 1916.**
- **Morton ,David ,** Sound Recording**, Maryland(USA), Hopkins Press, 2006.**

- Northrop, Robert, **Analysis and Application of Analog Electronic Circuits to Biomedical Instrumentation**, Taylor & Francis Group, 2017.
- **Turner , Gerard L'Estrange ,** Nineteenth-Century Scientific Instruments **,USA, University of California Press, 1985.**

ثالثاً : مواقع شبكة المعلومات الدولية "Internet":

- www.akhbara24.news
- www.archive.org
- www.books.google.com
- www.e3arabi.com
- www.ibelieveinsci.com
- www.marefa.org
- www.mawdoo3.com
- www.physics.case.edu
- www.physicsmax.com
- www.soundeals.com
- www.soundrecordinghistory.net
- www.webteb.com
- www.wikipedia.org