الصّوتيات التّجريبيّة: نحو المعالجة الآليّة للصّوت اللّغوي.

Experimental phonetics: towards automatic processing of linguistic sound.

رزيق زيـان، دحماني حمزة

[1]المركز الجامعي مغنية، rezik.zeyyan@cumaghnia.dz

[2]المركز الجامعي مغنية، Hamza.dahmani@cumaghnia.dz

تاريخ الارسال 2024/01/01	تاريخ القبول 2024/02/22	تاريخ النشر 2024/04/15

الملخص

تعدّ الصّوتيات التّجريبية أداة أساسية لدراسة وفهم الصوت اللّغوي وخصائصه المختلفة من أجل دمجه في تقنيات الذّكاء الاصطناعي، وتكييفه مع متطلبات المعالجة الآلية، وعليه تهدف هذه الدراسة إلى دراسة الصّوت من جانبيه: اللغوي والفيزيائي، كما تسعى إلى إبراز فاعلية الصّوتيات التّجريبية في تطوير تقنيات المعالجة الآليّة للصّوت.

تهدف الصّوتيات التّجريبية إلى دراسة وتحليل الصّوت بطرق تجريبية عن طريق مختلف التّقنيات والأساليب لتحقيق أهداف معينة، وتعتبر المعالجة الآلية للصّوت إحدى الجوانب الرئيسة للصّوتيات التّجريبية، إذ توفر هذه الأخيرة الأساس النّظري والمعرفي لتطوير وتحسين تقنيات المعالجة الآلية، وتساهم الصّوتيات التّجريبية أيضا في تطوير تطبيقات مهمة في الصّوت حيث تمكّن من زيادة فاعليّة

Abstract

Experimental phonetics is an essential tool for studying and understanding linguistic sound and its various characteristics in order to integrate it into artificial intelligence techniques, and adapt it to the requirements of automated processing, and therefore this study aims to study sound from its linguistic side, as well as from the physical side, and also aims to highlight the effectiveness of experimental acoustics in developing automated sound processing techniques.

Experimental acoustics aims to study and analyze sound in experimental ways through various techniques and methods to achieve certain goals, and automatic sound processing is one of the main aspects of experimental acoustics, as the latter provides the theoretical and cognitive basis for the development and improvement of automated processing techniques, and experimental acoustics contribute to the development of important

applications in audio, as it enables increasing the effectiveness of communication techniques, improving the quality of automatic voice recognition and generation, and speaker recognition.		تقنيات الاتّصال، وتحسين جودة التّعرف الآلي على الصّوت وتوليده، والتّعرف على المتحدث.
Keywords :sound, linguistic, experimental, processing, automatic		**كلمات مفتاحية: الصوت، اللغوي، التجريبية، المعالجة، الآلية.**

المؤلف المرسل: **رزيق زيان**، الإيميل: **rezik.zeyyan@cumaghnia.dz**

1. مقدمة:

تعمل الصّوتيات التّجريبية على دراسة الصّوت اللّغوي وتحليله عن طريق تقنيّات وآليّات تختبر الصّوت وتستخرج خصائصه وسماته بأسلوب علمي يحوّل تلك السمات والخصائص إلى بيانات رقمية، ومن أجل تطوير تقنيات المعالجة الآلية للصّوت اللّغوي يجب تَوفُّر قاعدة بيانات مهمة ودقيقة من أجل أنظمة فعّالة، فالتّعرف الآلي على الصّوت وتوليده، ونظام التّعرف الآلي على المتحدّث يتطلّب قاعدة بيانات كبيرة عن الصّوت وسماته وكذلك الخصائص النّطقية للمتحدّث، وعلى هذا الأساس يمكن أن نتساءل: كيف تخدم مباحث الصّوتيات التّجريبية تطوير تقنيّات المعالجة الآلية للصّوت اللّغوي؟.

الصّوتيات التجريبية هي القاعدة الأساسية التي تبنى عليها أنظمة المعالجة الآلية للصّوت اللّغوي من خلال توفير قاعدة بيانات مهمة من أجل فاعليّة أكبر لأنظمة المعالجة الآلية للصّوت، يتم توفير هذه البيانات من قِبل الصّوتيات التّجريبية من خلال دراسة الخصائص اللّغوية والفيزيائية للصّوت اللّغوي وتحويلها إلى نماذج رياضية تُمكّن من دمج الصّوت اللّغوي في الآلة، وككل باحث يسعى إلى دراسة ما، إلا وله هدف معين ، فكان هدفي من وراء هذه الدّراسة الوقوف على الصّوتيات التّجريبية وإبراز علاقتها بالمعالجة الآلية للصّوت، وكذا تبيان فاعليّة الصّوتيات التّجريبية في تطوير أنظمة المعالجة الآلية. ومن أجل

معالجة وتحليل مسائل هذه الظاهرة استخدمت المنهج الوصفي الملائم لمثل هذه الحالات في هذه الورقة البحثية.

2.دراسة الصّوت باعتباره مبحثا لغويّا:

تعتبر اللغة أداة تواصل بين البشر، وبناء على هذا فهي نظام مركب ومعقد تشترك فيه مجموعة من العوامل التي حظيت باهتمام الباحثين والعلماء في ميدان اللغة منذ القديم، فالناظر إلى التراث العربي القديم يجده زاخرا بالمباحث اللغوية على غرار النّحو والصّوت باعتبارهما النواة الأساس في علوم اللغة العربية، فظهور علم الأصوات جاء تبعا لتأثُّره بالدرس النحوي، "فاتسم بسماته لأنه كان أحد عناصره المكونة، فقد كانت دراسة الأصوات وسيلة من وسائل فهم بنية الكلمة وما يلحقها من العوارض كالقلب والابدال والتضعيف والادغام"[1]، وعلى هذا الأساس اعتُبر الصوت ظاهرة وجب فحصها وإفرادها بالدراسة والبحث، بالإضافة إلى الاهتمام بالقراءات القرآنية مما قوّى الباعث على دراسة الصوت حفظا لكلام الله من اللحن، فأثرى الاهتمام بالقراءات القرآنية ـ على تنوعها ـ الدرسَ الصوتي ، وكانت البداية "بالخصائص المميزة للصوت العربي من مخارج وصفات، فاحترام قواعد ترتيب الأصوات التي تنتج كلمات دالة، ثم التركيب بين الكلمات"[2]، فالخليل بدأ الدرس الصوتي على هذا الأساس، فقد اعتبر الصوت النواة الأساس لفهم كل ما يتعلق باللغة، وبذلك كانت له القدرة على تفسير بعض الظواهر اللغوية بامتياز لأنه فهم طبيعة الحروف في انفرادها، وتفاعلاتها في التركيب، ومن مظاهر إيلاء الخليل اهتماما بالغا للصوت، ترتيبه لمعجم العين على أساس صوتي، رغم شيوع الترتيب الأبجدي والألفبائي وقتها، فاعتبر "الترتيب الأبجدي ترتيبا تعليميا يساعد على استظهار الحروف وحفظها، أكثر منه ترتيبا علميا يخضع لنظام معين، ...ومن ثَمَّ رأى أن الترتيب الصوتي لأصوات اللغة العربية وفق مخارجها ابتداء من أقصاها في الحلق إلى الشفتين هو الترتيب العلمي والطبيعي"[3].

أما سيبويه فقد درس الصوت في كتابه (الكتاب) من خلال التدقيق في مخارج الحروف، والوقوف على الظواهر الصوتية من نبر وتنغيم وغيرها، فكانت دراسته مقتصرة على ما يطلق عليه (علم الأصوات النطقي)، نظرا لنقص إمكانيات دراسة الصوت في مستويات أخرى منها المستوى الفيزيائي والسمعي، فكانت دراسته مقسّمة منهجيا إلى ضربين: دراسة مهتمة بمخارج الحروف وصفاتها، أي الصوت في حال انفراده، ودراسة مهتمة برصد الظواهر في التشكيل الصوتي، منها ظاهرة الإدغام، الإبدال، وغيرها، فقد

كان "سيبويه حصيلة أعمال الدارسين الأوائل من القرّاء والفقهاء واللغويين، ولذلك فإننا لا نستغرب كثافة المادة الصوتية عند سيبويه ونضج الدراسة الصوتية وفيها مادة ومفاهيم ومصطلحات، فقد تناول الحروف ومخارجها وصفاتها والإمالة وتسهيل الهمزة وهمزة بينَ بين، وغير ذلك من المظاهر الصوتية والتعاملية"[4]، فتعامل سيبويه وكل العلماء والدارسين القدامى مع الصوت تعاملا وصفيا، في كيفية حدوثه، وللظواهر المصاحبة له في التشكيل الصوتي.

1.2 الصوت حالَ الإفراد: يعتبر الصوت أوّل ما يجب أن يؤخذ في الدراسة اللغوية كونه العنصر الأساس في تركيب الكلام واللغة عموما، فلا فائدة من دراسة المستويات الأخرى من صرف ونحو ودلالة دون فهم الأصل الذي هو الصوت، وعليه، فما هي طبيعة الصوت؟ وكيف يتشكّل؟

الأصوات اللغوية ظواهر سمعية تحدث بسبب تيار النفس الخارج من الرئة يعرض له في الحنجرة أوفي الفم أو بين الشفتين عارض يضيّق طريقه، فلا يحدث الصوت إلا بعاملين، النَّفَس والعارض[5]، وبهذا يعتبر الصوت ظاهرة طبيعية وشكل من أشكال الطاقة، وهو يستلزم وجود جسم في حالة اهتزاز أو تذبذب، وهذه الاهتزازات أو الذبذبات تنتقل عبر وسط معين حتى تصل إلى أذن السامع، ... والصوت ما هو طبيعي يصدر باصطدام شيء بشيء، أو عن طريق الظواهر الطبيعية عموما، وهناك ما يصدر عن الإنسان دون غيره، فالجهاز النطقي للإنسان قادر على إنتاج أصوات كثيرة، فالأصوات الصادرة عنه تكون ذات معنى، فتنتقل رسالة محددة من عقل إنسان إلى آخر[6]، وقد اعتبر العلماء أن اللغة صوت ومعنى، "فاللغة مصممة في الذهن لتكون حلّا أمثل للربط بين الأصوات والمعاني"[7]، فدراسة الصوت هي دراسة للجانب الشكلي للغة، في مقابل المعنى الذي يتعلق بالجانب الذهني الإدراكي.

يتشكل الصوت اللغوي عبر مراحل، فالمرحلة الأولى هي مرحلة الإصدار ويمثلها الجانب النطقي للمتكلم أي خروج الأصوات من الجهاز النطقي للمتكلم، أما المرحلة الثانية فهي مرحلة الانتشار وتتمثل في الذبذبات والموجات الصادرة من فم المتكلم والمنتشرة في الهواء ليصل إلى المستمع، والمرحلة الأخيرة هي مرحلة الاستقبال وتتمثل في الجهاز السمعي للمتلقي[8].

دراسة الصوت في حال انفراده يعني دراسته في أثناء النطق به من جانبين، من جانب المخرج وجانب الصفة، وهذا المبحث برع فيه علماء اللغة القدامى، وخاصة المهتمين بالقراءات القرآنية.

- **مخارج الحروف:** تعتبر دراسة مخارج الحروف مبحثا ركنا في الدراسة الصوتية إذ به تحفظ فصاحة اللغة، وبه تصان من اللحن والتحريف، وبه تعرف الصفات المميزة لكل صوت، يقول ابن الجزري –رحمه الله–في المقدّمة الجزرية:[9]

إذ واجب عليهم محتّم ..... قبل الشّروع أولا أن يعلموا

مخارج الحروف والصفات .....لينطقوا بأفصح اللغات

والمخرج هو مكان خروج الحرف، والحرف هو صوت معتمد على مقطع محقق أو مقدر، فالمحقق ما اعتمد على جزء من أجزاء الحلق أو اللسان أو الشفتين، أما المقدّر فهو التجويف الحلقي الفموي، وهو مخرج حروف المدّ الثلاثة التي لا تعتمد على شيء من أجزاء الفم ولا الحلق[10].

اختلف العلماء في تحديد مخارج الحروف، فالقدامى اختلفوا على ثلاثة مذاهب:[11]

المذهب الأول: مذهب الفرّاء ومن تبعه، حصرها في أربعة عشر مخرجا، لأنه أسقط مخرج الجوف، وجعل للام والنون والراء مخرجا واحدا.

المذهب الثاني: مذهب سيبويه ومن تبعه كالشاطبي وابن بري –رحمهم الله–، فقالوا أنها ستة عشر، أسقطوا أيضا مخرج الجوف، وجعلوا الألف مع الهمزة من أقصى الحلق، الياء المديّة مع غير المديّة من وسط اللسان، وكذا الواو المدية مع غير المدية من الشفتين.

المذهب الثالث: مذهب مركب من مذهبي الخليل وسيبويه، جمعه ابن الجزري بأن أخذ من الخليل الجوف مخرجا لحروف المدّ واللين، وأخذ من سيبويه الستة عشر مخرجا.

ولم يرفع الخلاف في تحديد المخارج عند العلماء المحدثين، حتى اختلفوا هم كذلك في تحديدها وإن كان الخلاف لا يعدو أن يكون خلافا في التّسميات أو خلافا في بعض التفصيلات، سواء ما تعلق بالخلاف بين القدامى أنفسهم، أو بين القدامى والمحدثين، ومَردُّ الخلاف في ذلك أنَّ تحديد مخارج الحروف يعود إلى الذّوق والحس، وهي الطريقة المتوفرة طبيعيا لحد الآن، عن طريق نطق الحرف المراد معرفة مخرجه مسبوقا بهمزة، فحيث انقطع الصوت فذاك مخرجه، يقول ابن جنّي: "وسبيلك إذا أردت اعتبار صدى الحرف أن تأتي به ساكنا لا متحركا، لأن الحركة تقلق الحرف عن موضعه ومستقرة، وتجتذبه إلى جهة الحرف التي هي بعضه، ثم تدخل عليه همزة الوصل مكسورة من قبله لأن الساكن لا يمكن الابتداء به، فتقول: إق، إج، وكذلك سائر الحروف"[12].

- **صفات الحروف**: ويقصد بها الكيفية التي يوصف بها الحرف عند حلوله في مخرجه بحيث تميزه عن غيره من الحروف، وتكمن فائدة معرفة صفة الحرف في التمييز بين الحروف المشتركة في المخرج كالطّاء والتاء مثلا، فلولا انفراد الطاء عن التاء بصفة الاستعلاء والاطباق والجهر لكانت الطاء تاءً لاتّحادهما في المخرج، وتنقسم الصفات إلى صفات ذاتية لازمة للحرف، وصفات عارضة تعرض للحرف حينا وتفارقه حينا آخر[13]، وأكثر الدراسات اهتماما بمخارج الحروف وصفاتها تفصيلا وتمحيصا هي الدراسات القرآنية المتمثلة في علم التجويد، ولا يجد الباحث اختلافا كبيرا في تحديد صفات الحروف بين العلماء، سواء من علماء اللغة –عموما– المهتمين بعلم الأصوات، وبين علماء علم التجويد.

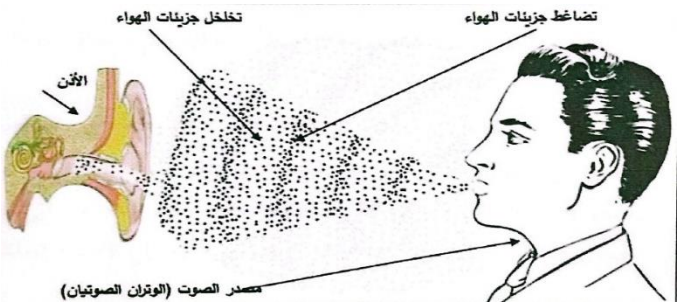
دراسة الصوت حال انفراده يتعلق بتعيين مخارج الحروف، وتحديد صفاتها، وما نخلص إليه هو أن العلماء قد اختلفوا في تعيين مخارج بعض الحروف بناء على اختلاف أذواقهم كما أسلفنا القول، والأمر نفسه على الصفات، فلم تتوفر لهم الإمكانيات العلمية الدقيقة في دراساتهم، رغم هذا لم يكن اختلافهم اختلافا كبيرا، ويمكن حصره في إطلاق التسميات أو في الاهتمام ببعض التفاصيل.

2.2 **الصوت حالَ التّركيب**: تعتمد دراسة الصوت في التركيب على النظر إلى الصوت حال وجوده مع صوت آخر في التشكيل الصوتي، والوقوف على التغيرات التي تطرأ عليه، والظواهر المصاحبة لذلك، وقياس سهولته وحسنه في مقابل استثقاله وتنافره، فالكلام البشري هو تتابع الأصوات في تركيب واحد يرتبط بعضها ببعض ارتباطا محكما، ليصل المتكلم إلى غاية التّعبير عن مكنوناته، ولا يمكن إيصال المقصود بأصوات منعزلة مقطّعة، بل يحصل الإفهام في اللغة المنطوقة بترابط الأصوات وتسلسلها، وعليه فالتشكيل الصوتي هو "تلك القواعد التي بواسطتها يتم التأليف بين أصوات اللغة الواحدة لإنتاج الكلمات وفق نظام تلك اللغة"[14] بمعنى دراسة الصوت في مجاورته لأصوات أخرى، وعلاقته بتلك الأصوات والنظر إلى موقعها، ورصد الظواهر المصاحبة لذلك وفق القواعد التي يقتضيها نظام تلك اللغة.

3.دراسة الصّوت باعتباره مبحثا فيزيائيّا:

يعتبر الصّوت ظاهرة طبيعيّة متمثلة في اهتزازات أو اضطرابات معينة تنتج في ضغط الهواء، وقد يكون مصدر الصّوت اصطدام شيء بشيء، أو يكون نتيجة اهتزاز الوترين الصّوتيين في حنجرة الإنسان، وعليه فالأوّل ينتج عنه صوت غير لغوي، والثاني ينتج عنه صوت لغوي، فالصّوتيات عموما لها ثلاثة أقسام: "الصوتيات النطقية وهي التي تهتم بالنّاطق، والصوتيات الفيزيائية تهتم بدراسة الموجات

الصوتية ومسار انتقالها في الهواء إلى أذن السامع، والصوتيات السمعية تهتم بتلقي تلك الأمواج وإدراك محتواها من قبل السامع"[15]، والمدقق في التّراث العربي يجد اهتمام العلماء أكثر بالصوتيات النطقية، غير أن الصوتيات الفيزيائية لم تكن محلّ دراسة واهتمام، أولا لعدم وجود الدّاعي لذلك كما هو الحال بالنسبة للصوتيات النطقية نظرا لاهتمامهم بعلم التّجويد، وثانيا عدم وجود الوسائل والإمكانيات لذلك، ولكن مع التّطور التّكنولوجي وظهور الآلات والحواسيب أصبح الأمر ممكنا وميسّرا لدراسة الصّوت على هذا المستوى.



الشكل 1: يمثل انتقال الصوت في الهواء[16]

يعرّف الصّوت فيزيائيّا على أنه موجات تتمثّل في تذبذب ذرّات الهواء المنتشرة فيه نتيجة وجود جسم متذبذب حتى تصل إلى آلة التلقي التي تكون آلة طبيعية كالأذن، أو آلة اصطناعية تقوم بوظيفة الأذن[17]، وحتى يصل الصّوت من المصدر إلى آلة التّلقي تحدث انضغاطات في الهواء مشكّلة الموجات الصّوتية.

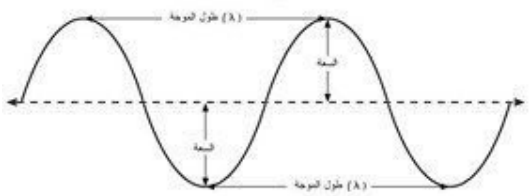
1.3 الموجة الصّوتية: تتمثل الموجة الصوتية في ذبذبات واهتزازات ميكانيكية تعمل على تخلخل وضغط لجزئيات الوسط التي تنتقل من خلاله (انظر الشكل 1)، ولا يمكن لهذه الموجات الانتقال في الفراغ فهي تحتاج إلى وسط مادي لتنتقل فيه، وتنتقل هذه الموجات في خط مستقيم، ويطلق عليها الموجات الطولية، لأن جزيئات الوسط من حولها الذي تنتقل من خلاله تتحرّك ذهابا وإيابا بشكل طولي خلافا للموجات المستعرضة التي تتحرك فيها جزئيات الوسط عموديا على اتجاه انتشار الموجة[18]، وتتميز الموجات الصوتية بخصائص فيزيائية نذكرها:[19]

أ– سرعة الصوت: سرعة الصوت هي السرعة التي ينتشر فيها الصوت عل شكل موجة صوتية في وسط ما، وتعتمد في ذلك على الوسط الناقل لها، ولا يمكن للموجات الصوتية أن تنتشر دون وسط كما

هو الحال في الفراغ، وتعتبر درجة الحرارة عامل مؤثر في سرعة الصوت، ويتم قياسه بوحدة المتر في الثانية (m/s).

ب- شدّة الصوت: تتعلق شدة الصوت بالطاقة والمساحة، فهي إذا المفهوم الذي يعبّر عن كمية الطاقة المتدفقة بوحدة الزمن عبر وحدة المساحة العمودية على اتجاه موجات الصوت المتحركة، ويتضح مفهوم الشدة بمثال: لو وضعنا حبات قمح على دف وضربنا الدف سترتفع حبات القمح، وكلما ضربنا بقوة أكبر ترتفع أكثر، وهذا الذي حركها هي الطاقة المتولدة أثناء الضرب، تقاس شدة الصوت بوحدة (الديسيبل db)، تعتمد شدة الصوت في نقطة معينة على عوامل: بُعد النقطة عن المصدر، سعة اهتزاز المصدر وتردده، المساحة السطحية للجسم المهتز، كثافة وسط الانتشار.

ت- تردد الصّوت: مفهوم لتكرار حدوث الموجة الصوتية خلال ثانية واحدة، ويقاس بـ (الهيرتزHz)، ويمثل التردد عادة حدّة الصوت، إذ كلما زاد تردد الصوت زادت حدّته، وكلما قلّ تردد الصوت زادت غلظته، يستطيع الإنسان سماع الأصوات التي ترددها بين 20 ـ 20000 هيرتز، ويقاس التردد (F)بالعلاقة التالية:التردد $F = 1/T$، حيث T يمثل الزمن الدوري.



الشكل 2: يمثل سعة الموجة والطول الموجي[20]

التّردد الأساس هو أحد العوامل التي عن طريقها يتم إنتاج أصوات يختلف الواحد منها عن الآخر، وحين تسمع صوتين يمكن أن تقارنهما ... ويعبر شكل الموجة عن قيم شكل الموجة أو التردد الأساس لهذا الصوت، فالصوت تنتجه الأحبال الصوتية ويكتسب سماته من خلال الأعضاء الأخرى، يتم رصد التردد الأساس للصوت المنطوق عن طريق عملية تحليل التنغيم، فمن خلاله تُعرف علاقة التلازم بين الصوت وصاحبه، بمجرد سماع جملة ندرك صاحبها لمعرفتنا بنغمة صوته، يظهر التردد الأساس في شكل منحنيات أفقية موازية لخط الزمن[21].

ث– **الطول الموجي**: يمثل المسافة بين قمّتين أو قاعين في موجتين متتاليتين من موجات الصوت، يرتبط الطول الموجي بالتردد، حيث إذا زاد التردد قلّ الطول الموجي والعكس، تتمثل العلاقة بينهما في: (**طول الموجي = سرعة الصّوت / التردد**)، ممثل الطول الموجي في الشكل (2) بالزمن الدوري (t).

ج– **سعة موجة الصوت**: قوة إشارة الموجة الصادرة عن المصدر الصوتي، وتمثل بطول الموجة، حيث كلما زاد الارتفاع زادت سعة الموجة، وعليه زيادة ارتفاع الصوت[22] (انظر الشكل 2).

2.3 الرّنين: اختلفت التعاريف لهذه الظاهرة، ولكن المبدأ واحد، يمكننا تعريفها انطلاقا من الإنتاج الطبيعي للكلام، حيث أثناء إنتاج الجهاز النطقي للصوت تتفاعل التجاويف المختلفة أثناء النطق مع الصوت المنتج، مثل الحنجرة والشفاه واللسان، هذه الأمواج الصوتية المنتَجة تمر عبر التجاويف المتعددة مثل التجويف البلعومي، التجويف الأنفي، التجويف الفموي، حيث كل تجويف له طول وشكل مختلف عن الآخر، وهذا ما يقوي انتقاله من تجويف إلى آخر، لنفرض أن التجاويف أجسام، فهذه الأجسام تتحرك انطلاقا من الذبذبات التي ينتجها الجسم الذي قبلها، وهكذا، "فإن كان توتر الجسم الطبيعي والخاص به يبلغ تواتر الموجة الصوتية ذاتها، قام الجسم بالتذبذب بدوره"[23]، إذا نقل التذبذب من جسم لآخر يسمى الرّنين.

3.3 الطّيف: يتم الحصول على الطيف الصوتي عندما يتم تحليل الإشارة الصوتية إلى الترددات التي تكونها، حيث يتم عرضها في شكل مخطط بياني، لكل شخص طيف صوتي خاص به وهذا نظرا للاختلاف الأشخاص في تركيبة الجهاز النطقي كحجم الحنجرة مثلا، يتم تحليل الطيف عن طريق محلل الترددات الطيفية وهي أداة تستخدم لدراسة تكوين الأطياف الصوتية، تكون الأجهزة المستخدمة إلكترونية ورقمية[24].

4.3 البواني الصّوتية: عند مرور الهواء عبر التجويفات فوق مزمارية يتسع هذا الأخير ويتعرض لتغيّرات مختلفة ترجع إلى درجات الانفتاح والانغلاق على مستوى كل تجويف حسب وضعية اللسان والشفتين ... تمتلك هذه التجويفات تواترات، ورنّات تقوّي بعض مناطق الطيف في المصادر المثيرة، للبواني الصوتية قيمة تواتر نسبية معاكسة لحجم التجويف، لكل صوت بواني مميزة له، حيث تظهر:

F1: في التجويف الرنان الموجود بين الحنجرة وظهر اللسان.

F2: في التجويف الرنان الموجود بين ظهر اللسان والشفتين.

F3: عند استدارة الشفتين[25].

تكمن فاعلية دراسة الصوت فيزيائيا بالنسبة للدرس الصوتي اللغوي في استخراج الخصائص الفيزيائية للصّوت التي تمكِّن من تحويل تلك الإشارات الصوتية إلى نماذج رياضية، هذه النماذج تسمح بدمج الصوت في الآلة، كون لغة الآلة لغة رمزية رياضية، وهذا ما يقدم خدمة جليلة لمجال المعالجة الآلية للغة، ومن خلالها التوجه نحو التعرف وإنتاج الآلة للغة، وما يهم الباحثين اللغوين هو نمذجة القواعد التي تحكم اللغة في كل مستوياتها لتصبح قابلة للمعالجة الآلية من أجل جعل الآلة تتفاعل وتتواصل لغويا، وباعتبار أن اللغة أصوات، كان للمستوى الصوتي أهمية بالغة في ذلك، هذا الهدف جعل العلماء يكثّفون الجهود من أجل دراسة الصوت اللغوي دراسة تجريبية، ممّا يُمكّن من إدخال الصوت اللغوي إلى المخابر، وهذا ما عمل عليه المختصون في إطار ما يعرف بالصوتيات التجريبية، فدراسة الصوت لغويا من خلال تحديد مخارجه وصفاته، ثم دراسة خصائصه الفيزيائية باستعمال التقنيات والآليات التّجريبية، تساعد على فهم الصوت اللغوي فهما علميا دقيقا مما يسهّل عملية حوسبته.

4. الصّوتيات التّجريبية والمعالجة الآلية للصّوت اللغوي:

تعتمد الدّراسة التّجريبية للصّوت على العمل المخبري القائم على التّجريب، وهذا يعتمد أساسا على وجود الآلات أو الوسائل المخبرية، تهتم الدّراسة التّجريبية بالصّوت حال النّطق به (الصّوتيات النطقية)، والصّوت حال انتقاله (الصّوتيات الفيزيائيّة)، وقد تهتم الدّراسة التّجريبية بالصّوت حالَ وصوله للمتلقي (الصّوتيات السّمعية)، ولكن بتركيز أقل بالنسبة إلى المراحل الصوتية الأخرى، وهذا راجع إلى دخول الصّوت مرحلة الدراسة العصبية، وهذه المرحلة يصعب معها التجريب والملاحظة المباشرة، نظرا لارتباطها مباشرة بدماغ الكائن البشري، وإن كانت الوسائل التقنية قد تطورت غير أن تتبع مسارات الأصوات في جانبها السمعي لا يكاد يتجاوز وصف الأذن، أما الجانب الإدراكي فلا يزال العمل عليه قائما من أجل فهم إدراك الدماغ للأصوات، نظرا لتعقيد تركيبة هذا الأخير، وعليه تعود صعوبة الدراسة التجريبية للصوت في جانبها السمعي الإدراكي إلى العامل الأخلاقي.

دراسة الصّوت من خلال التجريب باستعمال تقنيات مختلفة بهدف فهم وتصنيف وتوصيف الأصوات ووصف خصائصها النطقية، والفيزيائية، ورصد التغيرات التي تطرأ عليها عند النطق بها، وتحليل سماتها الفيزيائية باستعمال التقنيات وآليات التجريب والرصد، تسمى بالصّوتيات التجريبية.

1.4 الدّراسة التّجريبية للصّوت:

تهدف الصّوتيات التّجريبية إلى تطوير فهم الأصوات اللغوية ومعرفة كيفية تشكلها وإنتاجها وتركيبتها، وكذلك فهم كيفية استخدامها في التواصل البشري، والتواصل البشري مع الآلة، باستعمال التقنيات والوسائل اللازمة لذلك، في إطار المعالجة الآلية للصوت، وعليه فالصوتيات التجريبية هي الخيط الرابط بين علم الأصوات والمعالجة الآلية في إطار علم اللغة الحاسوبي.

تعتبر الصّوتيات التجريبية دعامة تقنية للصوتيات النطقية والفيزيائية من خلال استعمال الآلات التي بإمكانها تحليل وتقييم وفحص جهاز النطق، واستخراج سمات تلك الأصوات التي ينتجها باعتبارها موجات وذبذبات.

- **فحص جهاز النّطق**: يتم فحص جهاز النطق عن طريق جهاز رصد الحركة المزود بكاميرا أو ما يسمى بمنظار الحنجرة (laryngoscope) هذا الجهاز يرصد حركة وتركيبة أعضاء جهاز النطق كالأوتار الصوتية واللسان والشفتين وكذلك جهاز التّنفس الذي يعتبر العامل الرئيس في عملية النطق "فجهاز التنفس يؤمّن وظيفته الرئيسة المتمثلة في التنفس بالإضافة إلى تيسير التصويت والكلام في الوقت ذاته، وهو شبيه بأنبوب سُدَّ أحد طرفيه، يمتد بين الرئتين والشفتين والأنف، ويمكن تقسيمه إلى ثلاثة أقسام كبرى: الرئة والقصبة وهي قسم ما دون الحنجرة والحنجرة والمجرى الفموي والأنفي أو تجاويف ما فوق المزمار"[26]، كما يتم رصد حركة الأوتار الصوتية وفتحة المزمار، فمن خلال الرصد يتبيّن أن أوضاع فتحة المزمار تتغير ولا تثبت على حالة واحدة، ففي حالة التنفس العادي ترتخي الأوتار الصوتية وتنعطف على جانبين ويظل المزمار مفتوحا فيمر الهواء حرّا، أما في حالة التنفس من الرئتين لإصدار الأصوات اللغوية فانفتاح وانغلاق الأوتار الصوتية يكون حسب صفة الصوت المراد النطق به، فمثلا عند النطق بالصوت المهتوت (الحفيف) تكون الأوتار الصوتية قريبة من بعضها البعض، قدّرت ب (25 بالمائة) من الفتح العادي للمزمار، أما عند التصويت فتكون الأوتار منغلقة، منطبقا بعضها ببعض ليجتمع الهواء الصاعد من الرئتين تحتها، حتى إذا قوي ضغط الهواء انفتحت الأوتار الصوتية ويمر الهواء متذبذبا بسرعة (50 سنتم مكعب) في الثانية فما فوق، وهذا ما ينتج الصوت المجهور[27]، هذه المعلومات رصدت بجهاز منظار الحنجرة بالإضافة إلى جهاز الرسم الحنجري (laryngograph) الذي يمّكن من رصد حركة الفتح والإغلاق للأوتار الصوتية كما ذُكر سابقا وهذا عن طريق تسجيل اتجاه التيار من

أحد جانبي الحنجرة إلى الجانب الآخر، ويمكن تحويل هذا التسجيل إلى صوت يمثّل نتيجة عمل الأوتار الصوتية[28]، أما لمعرفة مخارج الحروف فيستعمل جهاز راسم الحنك الالكتروني (electropalatogrph) المطور عن راسم الحنك (palatograph)، يقوم جهاز راسم الحنك الإلكتروني برسم أجزاء الحنك التي يلامسها اللسان أثناء الكلام كل (1/ 100 من الثانية) ... يتم تثبيت الحنك الصناعي في الفم ملاصقا للحنك الطبيعي وموصلا بحاسوب، أثناء التجربة يعرض الجهاز الحوالب التي يلامسها اللسان أثناء التحدث إما على الشاشة أو بالطباعة على الورق، يمكن الاستفادة من هذا الجهاز في معرفة مخارج الحروف وكذلك دراسة النطق المشترك، ومشاكل النطق وظاهرة التبليغ[29].

هذه أمثلة عن دور الصوتيات التجريبية في فحص جهاز النطق والوقوف على آلية عمله، ورصد كيفية تشكل الصوت فيه، قد يُطرح سؤال هنا: كيف تخدم الدراسة التجريبية في الصوتيات النطقية المعالجة الآلية؟، وللإجابة عن هذا يمكن القول أن صناعة الآلات أو الذكاء الاصطناعي بصفة عامة ما هو إلا محاكاة لمبدأ عمل الأجهزة البيولوجية الطبيعية عند الإنسان، فالوقوف على تركيبتها –أقصد الأجهزة الطبيعية للإنسان– ومعرفة مبدأ عملها، سيكون عاملا مهما في تطوير الآلات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، فصناعة الآلة الناطقة المحاورة هو محاكاة لأجهزة الإدراك والنطق عند الإنسان عن طريق البرمجة الآلية.

- **تقنيات التّحليل الأكوستيكي**: ظهور تقنيات الذكاء الاصطناعي والثورة التكنولوجية الحاصلة في العالم خلق مسارا جديدا في الحياة البشرية، حيث أصبح الاعتماد على الآلات والتقنيات الحديثة بشكل كبير، في محاولة لتوفير جهد الكائن البشري، هذا ما جعل العلماء يفكّرون في صنع آلة تقوم مقام الكائن البشري وتقوم بوظائفه الحركية والتواصلية، فالحديث عن التواصل يعني أنّ الآلة تملك القدرة على التّعرف على اللّغة البشرية وإنتاجها، وبما أنّ اللّغة أصوات، صبّ العلماء اهتمامهم على دراسة الخصائص الصوتية للغة البشرية، وبما أن الآلة تبرمج بلغة رياضية، فكّر العلماء في تحويل تلك الخصائص إلى نماذج رياضية، من خلال الدراسة الفيزيائية للأصوات، وهذا عن طريق التحليل الأكوستيكي، الذي من خلاله يمكن تطوير أنظمة المعالجة الآلية للصوت، وقد اعتُمدت عدة تقنيات في التحليل الأكوستيكي للأصوات نذكر منها:

- **جهاز راسم الذبذبات (oscilloscope)**: جهاز شبيه بجهاز التلفزيون غير أنه يتلقى الإشارات من ميكروفون أمام فم المتكلم، ويقوم بتسجيل مرئي لذبذبات الأصوات، وقد زود بقلم صوتي

ومرشح وراسم طيفي ومكون كلامي[30]، يقوم راسم الذبذبات بتحويل الطاقة الصوتية (التغيرات في ضغط الهواء أو الموجات الصوتية) إلى طاقة كهربائية تعرض مع عامل الزمن على شاشة عرض صغيرة، حيث تظهر التغييرات في شدة الصوت، ومن العرض المبين على الشاشة يمكن تحديد زمن ذبذبة ما، وما إذا كان الصوت مجهورا أو مهموسا، كما أنه بالإمكان معرفة التردد الأساس للحبلين الصوتيين[31].

- **جهاز المطياف(spectrograph)**:جهاز المطياف من أفضل الأجهزة التي خدمت الصوتيات الأكوستيكية إن لم يكن أفضلها على الإطلاق، لأن عرض موجات الصوت اللغوية عن طريق راسم الذبذبات لا يقدم التفاصيل نظرا لتعقيد تركيبة موجات الصوت اللغوية، ولكن المطياف يقدم موجة الصوت موسومة بالتردد، الشدة والزمن، وهذا يعين على معرفة زمن الصوت وتردده وشدته، ولهذا الدراسات الأكوستيكية للصوت تعتمد جهاز المطياف، تطور هذا الجهاز عبر مراحل حتى وصل إلى المطياف الحاسوبي (computerized)، الذي يتكون من حاسوب شخصي، مع اللواحق البرمجية، وكذلك الأدوات (hardware)، يتوفر المطياف الحاسوبي على إمكانيات قياس النطق الرنينية بدقة عن طريق (linear productive coding) المعروف اختصارا بـ lpc، فبتحديد نقطة ما من زمن الموجة يمكن قياس lpc، كما يمكّن الجهاز من دراسة الصوائت، وتحديد مشعرات الصوت الصامت المجاور لصوت صائت، وتحديد ذبذبة الأصوات الاحتكاكية، كما يعرض الجهاز الذبذبة بتحديد التردد الأساس، كما يكشف زمن الصوت وما إذا كان مجهورا أو مهموسا، كما يفيد الباحثين في مجال الدراسة فوق مقطعية للأصوات اللغوية[32].

2.4 تطوير تقنيات المعالجة الآلية للصّوت اللّغوي من خلال نتائج الصّوتيات التّجريبية:

يهدف مجال التعرف الآلي على الصوت إلى تطوير تقنيات قادرة على تحليل وفهم المنطوق، وحتى يتم ذلك لابد من جمع البيانات اللازمة عن الصوت اللغوي، وهذا باستخراج الخصائص الصوتية عن طريق أخذ عينات صوتية واستخراج السمات المميزة لها مثل المستوى الطيفي الذي من خلاله يتم التمييز بين شدّة الأصوات، والترددات المميزة لكل صوت، وإحصاء الأزمنة المختلفة لكل صوت، هذه الخصائص وأخرى تساعد في تطور تقنيات التعرف الآلي على الصوت من خلال تحسين جودة الصوت في الآلات، وكذلك المقارنة بين اللغات واللهجات، وتعزيز التفاعل والأداء الصوتيين، فمن خلال البيانات التي تقدمها الصوتيات التجريبية يمكن تدريب الآلة على تقنيات معالجة الإشارة، وكلما كانت

البيانات كبيرة ودقيقة ومتنوعة كانت نتيجة التعرف دقيقة، وبهذا تتنوع التطبيقات الآلية في التعرف على الصوت اللغوي وإنتاجه.

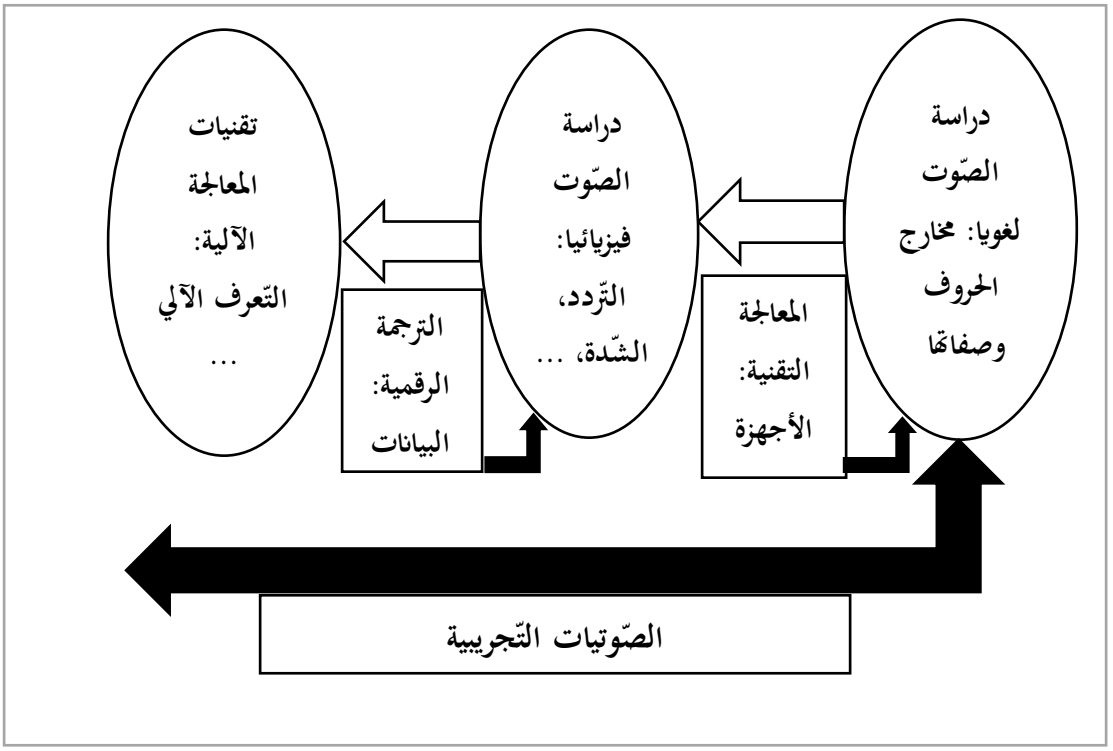
تعمل تقنيات المعالجة الآلية للصوت اللغوي على تطوير ثلاث تقنيات تعتبر ركائز المعالجة الآلية للصوت متمثلة في **التعرف الآلي** على الكلام **وتوليده**، و**التعرف على المتحدّث**، وهي تقنيات تشكّل تحديا كبيرا للباحثين والمطوّرين، لأنها تتطلب جمع كمية كبيرة من البيانات التي تساعد على تطوير نماذج ومن خلالها برامج تمكّن من تحقيق هدف مخاطبة الآلة والتفاعل معها، وتسهيل الوصول إلى البيانات الشخصية من خلال بصمة الصوت، هذه البيانات المهمة تؤخذ من نتائج الدراسة التّجريبية للصوت كما سنبين في تفصيل مبدأ عمل هذه التقنيات الثلاث المتمثلة في:[33]

- **التّعرف الآلي على الصّوت اللّغوي**: يهتم هذا المجال بتطوير نظم وتقنيات قادرة على التعرف وفهم الصوت اللغوي، من خلال تحويل الموجة الصوتية إلى نص، تستخدم هذه التقنية خوارزميات تمكّن من تحويل الصوت المسجل إلى تمثيل رقمي حتى يتمكّن الحاسوب من التعامل معها، ليتم تحديد الفواصل أي الحدود بين كل صوت وصوت على الموجة الصوتية، ثم استخراج الخصائص الأكوستيكية للأصوات بين الفواصل باستخدام تقنيات التحليل الطيفي لاستخلاص التردد والمدة والشدة الصوتية وغيرها من السمات والخصائص، ليتم بعدها مقارنتها مع الخصائص الصوتية المخزنة كبيانات لديه، ثم تبدأ عملية اختيار المقارب لكل صوت حسب أعلى احتمالية ممكنة ليصل إلى نتيجة أن هذه الموجة مكوّنة من الأصوات الآتية مثلا: ف/ا/س/ت/ق/م: ك/م/ا/: أ/م/ر/ت، فعند تحويل الموجة الصوتية إلى نص مقروء، أي تمت عملية التعرف على الصوت اللغوي، تكون مهمة تقنية التعرف الآلي قد انتهت، ولكن حتى يتم هذا الأمر بدقة عالية يقتضي توفر مجموعة من الشروط متمثلة في تجهيز قاعدة بيانات صوتية لكلام مجموعة من المتحدثين تكون الموجات الصوتية فيها مقطعة ومرمّزة ومصنفة، كذلك من شروط الدقة استخدام أدوات حاسوبية كنموذج ماركوف المخفي (HMMTH)، يقوم بناء نموذج أكوستي من قاعدة البيانات باستخلاص السمات الأكوستية لكل صوت، لتقوم لاحقا بمقارنة ما يصلها من كلام بما هو مخزن لديها في النموذج الأكوسيكتي للوصول إلى النص المقابل للموجة كما هو الحال في المثال السابق.
- **التوليد الآلي للصوت اللغوي**: تتم عملية توليد الآلة للكلام البشري عن طريق تطوير نماذج محولة آليا تأخذ النصوص كمدخلات وتولد الصوت المقابل لها، تعتمد عملية توليد الآلة للكلام البشري

على تقنيات متطورة مثل الشبكات العصبية الاصطناعية، وخوارزميات معالجة الصوت، وغيرها، حيث تحوّل النّص المكتوب إلى موجات كلام مسموعة، وتتم عملية تقويم هذه الموجات بناء على وضوح الصّوت، أي مدى فهم الإنسان للكلام المنتج من قبل النّظام، وكذلك طبيعة الصّوت المنتج، أي مدى قربه من الكلام الطبيعي الذي ينتجه الإنسان، وهذان المعياران يضعهما المطوّرون نصب أعينهم عند صنع أي نظام.

- **التّعرف الآلي على المتحدّث:** تقنية تمكّن الآلة من تحديد هوية المتحدث، نظرا لوجود نبرة صوتية تميز كل إنسان عن غيره، وكل فرد له جهازا صوتيا يختلف عن الآخر، يعتمد التعرف الآلي على المتحدث تقنيات كالمعالجة الاكوستيكية للصوت من خلال تحليل التردد، واستخراج السمات المميزة لكل صوت، باعتبار أن لكل شخص سمات تميز صوته مثل النغمة، الإيقاع، التنغيم، الشدة وغيرها، كل هذه السمات تعتبر عوامل يتم تحليلها، ثم يقارن نظام التعرف على المتحدث البيانات هذه مع البيانات المخزّنة الخاصة بهذا الشخص عن طريق خوارزميات التعرف على الصوت أو أدوات حاسوبية مساعدة في بناء النظام مثل أنموذج خليط غاسيون (gaussian mixture) الذي يقوم ببناء أنموذج أكوستي خاص بكل متحدث في قاعدة البيانات الصوتية لكي يتعرف عليه من خلال صوته عندما يعرض عليه صوت جديد لنفس المتحدث.

تعتبر الصّوتيات التّجريبية القاعدة التي يُبنى عليها صرح المعالجة الآلية للصّوت اللّغوي، فالدّراسة التجريبية للصوت اللغوي تنطلق من تحديد مخارجه وصفاته، وحالاته في التركيب، ليتم بعد هذا عملية تحليل كل صوت فيزيائيا واستخراج سماته الخاصة به، والسمات التي يضفيها عليه ناطقُه، يتم كل هذا عن طريق أجهزة وتقنيات تسمح بفحص جهاز النطق، وتحليل الأصوات الناتجة عنه، واستخراج خصائصها وسماتها، وترجمتها إلى بيانات رقمية، ما يتم التّوصل إليه يعتبر قاعدة بيانات لتقنيات التعرف الآلي على الصوت اللغوي وتوليده، والتعرف على المتحدث من خلال بصمة صوته.



الشكل 3: يبرز المعالجة الآلية للصّوت اللغوي من خلال الصوتيات التّجريبية من إنشاء الباحث

المخطط يبرز فاعلية الصوتيات التجريبية في تطوير أنظمة المعالجة الآلية، حيث تعتبر الطريق الممهد للمعالجة الآلية، من خلال دراسة الصوت بطرق تجريبية وتقنيات وأجهزة لتأسيس قاعدة بيانات تخدم تطور أنظمة المعالجة الآلية للصوت اللغوي، حيث أن منطلق الدراسة التجريبية يبدأ باكتشاف مخارج الحروف ومعرفة صفاتها باستعمال الأجهزة الكاشفة، ثم الدراسة الأكوستيكية المعتمدة كذلك على التقنيات والأجهزة التي تكشف الخصائص الفيزيائية للصوت (التردد، الشدّة ...)، التي من خلالها توضع قاعدة بيانات رقمية يمكن للآلة التعامل معها، وعليه تسهل عملية المعالجة الآلية للصوت اللغوي.

5. خاتمة:

تعتمد الصوتيات التجريبية على التقنيات التي تسمح باستخراج سمات وخصائص الصوت اللغوي من خلال دراسة خصائصه اللغوية والفيزيائية لوضع قاعدة بيانات تساعد في تطوير أنظمة المعالجة الآلية للصوت اللغوي، وعليه نستنتج من هذه الدراسة أنّ:

-الصوتيات التجريبية تعمل على دراسة الصوت بشكل تجريبي عملي.

-تعمل الصوتيات التجريبية على تحليل الصوت اللغوي ونمذجته في شكل قواعد رياضية.

-تساهم الصوتيات التجريبية في تأسيس قاعدة بيانات تدعم تطوير أنظمة المعالجة الآلية للصوت.

-تعتمد أنظمة المعالجة الآلية للصوت اللغوي على نتائج الصوتيات التجريبية.

التوصيات التي نختم بها هذه الدراسة هي:

- الاهتمام بالصوتيات التجريبية أكثر.
- التركيز على الدراسة التجريبية للصوت وعدم الاكتفاء بالجانب النظري فقط.
- تطوير تقنيات الدراسة التجريبية للصوت من أجل أنظمة حوسبة فعّالة ودقيقة للصوت اللغوي.

7. الهوامش:

1 عبد الفتاح ابراهم، مدخل في الصوتيات، دار الجنوب للنشر، تونس، دط، ص 07.

[2] ينظر: فوزية سرير عبد الله، الدرس الصوتي العربي النشأة وتطورا إلى القرن الخامس هجري، المجلد 4، العدد 3، مجلة دراسات لسانية جامعة البليدة، سبتمبر 2020.

[3] حلمي خليل، مقدمة لدراسة التراث المعجمي العربي، دط، ص 128.

[4] عبد الفتاح ابراهم، مدخل في الصوتيات، مرجع سابق، ص 14.

[5] ينظر: صبيح حمود التميمي، علم الأصوات عند سيبويه للمستشرق الألماني أرتور شاده محاضرة برؤية استشراقية ومراجعة حديثة، مجلة آداب الرافدين، العدد 58، ص 14.

[6] ينظر: راضية بن عريبة وعادل محمد مخلوف، بصمة الصوت دراسة لغوية جنائية تطبيقية لإثبات الجريمة، منشورات ألفا للوثائق، ط1، عمان، الأردن، ص 28.

[7] شمس الدين الرحالي، مشكلات حوسبة المعنى رمزيا وعصبيا في الذهن/الدماغ البشريين، مجلة الفكر اللساني، العدد 1، منوبة، تونس، ص 1

[8] ينظر راضية بن عريبة وعادل محمد مخلوف، بصمة الصوت، مرجع سابق، ص 30.

[9] الزهرة بلعالية دومة، أنوار المطالع في أصول رواية ورش عن نافع، دار الإمام مالك، ط2، الجزائر، 2013م، ص 31.

[10] الزهرة بلعالية دومة، أنوار المطالع في أصول رواية ورش عن نافع، مرجع نفسه31.

[11] ينظر: الزهرة بلعالية دومة، أنوار المطالع، مرجع نفسه، ص 32.

[12] أبو الفتح عثمان بن جني، سر صناعة الإعراب، تح: حسن هنداوي، دار الكتب العلمية، ط1، ج1، بيروت، 2000م ص 6،7.

[13] ينظر: الزهرة بلعالية دومة، أنوار المطالع، مرجع سابق، ص 45.

[14] محمد الأنطاكي، المحيط في أصوات العربية ونحوها وصرفها، دار الشروق العربي، ط3، لبنان، ص 30.

[15] ينظر: محمد رأفت محمود فرج، مسار التمثيل الرقمي للصوت اللغوي دراسة تحليلية في إطار علم اللغة الحاسوبي، مجلة رسالة المشرق، ص 55.

[16] محمد رأفت محمود فرج، مسار التمثيل الرقمي للصوت اللغوي دراسة تحليلية في إطار علة اللغة الحاسوبي، مجلة رسالة المشرق، دع، ص 64.

[17] ينظر: عبد الفتّاح ابراهم، مدخل في الصوتيات، مرجع سابق، ص 25.

[18] ينظر: فاطمة أحمد، ماهي الخصائص الفيزيائية لموجات الصوت؟، https://www.feeziaa.com، نشر في 30 سبتمبر 2021، آخر تحديث 05 أكتوبر 2021.

[19] ينظر: ظافر صباح، أمجد خليل، عمر أبو حسن، تقنيات الصوت وتطبيقاته، مركز المنهاج، الطبعة التجريبية، فلسطين، 2019م، ص ص 13.10

[20] ينظر: فريق عمل ويكي هاو، الموقع الإلكتروني https://ar.wikihow.com، كيفية حساب الطول الموجي، 23 ديسمبر 2023، الساعة: 09:08.

[21] ينظر: أحمد راغب وآخرون، مقدمة في حوسبة اللغة العربية (التحليل الصوتي: الدراسة التحليلية للصوت اللغوي في العصر الحديث)، مركز الملك عبد الله الدولي لخدمة اللغة العربية، الطبعة الأولى، الرياض، 1440هـ، ص 70.

[22] ينظر: ظافر صباح، أمجد خليل، عمر أبو حسن، تقنيات الصوت وتطبيقاته، مرجع سابق، ص 14، 15.

[23] بسّام بركة، علم الأصوات العام، بيروت، مركز الإنماء القومي، دط، دت، ص 56.

[24] ينظر: الموقع الإلكتروني https://www.marefa.org، تحليل الطيف، تعديل بتاريخ 24 نوفمبر2019، على الساعة: 13:02.

[25] ينظر: راضية بن عريبة، عادل محمد مخلوف، بصمة الصوت، مرجع سابق، ص 105.

[26] ينظر: عبد الفتّاح ابراهم، مدخل في الصوتيات، مرجع سابق، ص 45.

[27] عبد الفتاح ابراهم، مدخل في الصوتيات، مرجع سابق، ص 51،53.

[28] ينظر: أحمد مختار عمر، دراسة الصوت اللغوي، عالم الكتب، بيروت، 1997م، ص 59.

[29] ينظر: منصور بن محمد الغامدي، الصوتيات العربية، مكتبة التوبة، ط1، الرياض، 2001م، ص 181، 182.

[30] أحمد مختار عمر، دراسة الصوت اللغوي، مرجع سابق، ص 55.

[31] منصور بن محمد الغامدي، الصوتيات العربية، مرجع سابق، ص 183.

[32] ينظر:منصور بن محمد الغامدي، الصوتيات العربية، مرجع سابق، ص 185.

[33] ينظر: منصور بن محمد الغامدي وآخرون، مدخل إلى اللسانيات الحاسوبية، مركز الملك عبد الله لخدمة اللغة العربية، دار وجوه للنشر والتوزيع، ط1، الرياض، 1448هـ، ص ص 28. 32.

8. المصادر والمراجع:

المؤلفات:

- أحمد راغب وآخرون، مقدمة في حوسبة اللغة العربية (التحليل الصوتي: الدراسة التحليلية للصوت اللغوي في العصر الحديث)، مركز الملك عبد الله الدولي لخدمة اللغة العربية، الطبعة الأولى، الرياض، 1440هـ.
- أحمد مختار عمر، دراسة الصوت اللغوي، عالم الكتب، بيروت، 1997م.
- بسّام بركة، علم الأصوات العام، بيروت، مركز الإنماء القومي، دط، دت.
- حلمي خليل، مقدمة لدراسة التراث المعجمي العربي، دط.
- راضية بن عريبة وعادل محمد مخلوف، بصمة الصوت دراسة لغوية جنائية تطبيقية لإثبات الجريمة، منشورات ألفا للوثائق، ط1، عمان، الأردن.
- الزهرة بلعالية دومة، أنوار المطالع في أصول رواية ورش عن نافع، دار الإمام مالك، ط2، الجزائر، 2013م.

- ظافر صباح، أمجد خليل، عمر أبو حسن، تقنيات الصوت وتطبيقاته، مركز المنهاج، الطبعة التجريبية، فلسطين، 2019م.
- عبد الفتاح ابراهم، مدخل في الصوتيات، دار الجنوب للنشر، تونس، دط.
- أبو الفتح عثمان بن جني، سر صناعة الإعراب، تح: حسن هنداوي، دار الكتب العلمية، ط1، ج1، بيروت، 2000م
- محمد الأنطاكي، المحيط في أصوات العربية ونحوها وصرفها، دار الشروق العربي، ط3، لبنان.
- منصور بن محمد الغامدي، الصوتيات العربية، مكتبة التوبة، ط1، الرياض، 2001م.
- منصور بن محمد الغامدي وآخرون، مدخل إلى اللسانيات الحاسوبية، مركز الملك عبد الله لخدمة اللغة العربية، دار وجوه للنشر والتوزيع، ط1، الرياض، 1448هـ.

المقالات:

- شمس الدين الرحالي، مشكلات حوسبة المعنى رمزيا وعصبيا في الذهن/الدماغ البشريين، مجلة الفكر اللساني، العدد 1، منوبة، تونس.
- صبيح حمود التميمي، علم الأصوات عند سيبويه للمستشرق الألماني أرتور شاده محاضرة برؤية استشراقية ومراجعة حديثة، مجلة آداب الرافدين، العدد 58.
- فوزية سرير عبد الله، الدرس الصوتي العربي النشأة وتطورا إلى القرن الخامس هجري، المجلد 4، العدد 3، مجلة دراسات لسانية جامعة البليدة، سبتمبر 2020.
- محمد رأفت محمود فرج، مسار التمثيل الرقمي للصوت اللغوي دراسة تحليلية في إطار علم اللغة الحاسوبي، مجلة رسالة المشرق، دع.

المواقع الالكترونية:

- فاطمة أحمد، ماهي الخصائص الفيزيائية لموجات الصوت؟، https://www.feeziaa.com، نشر في 30 سبتمبر 2021، آخر تحديث 05 أكتوبر 2021.
- دون اسم الكاتب، الموقع الإلكتروني https://www.marefa.org، تحليل الطيف، تعديل بتاريخ 24 نوفمبر2019، على الساعة: 13:02.
- فريق عمل ويكي هاو، الموقع الإلكتروني https://ar.wikihow.com، كيفية حساب الطول الموجي، 23 ديسمبر 2023، الساعة: 09:08.