دور الخصائص فوق القطعية
في تطوير أداء أنظمة التعرف الآلي على الكلام العربي

د٠ إيمان توفيق الشرهان (*)

المقدمة :

تعاني الساحة العلمية العربية قصورا في الدراسات اللسانية الحاسوبية التي تهدف إلى إدخال اللغة في مجال التقنيات الإلكترونية وجعلها طيعة لأدوات التحليل الحاسوبي. وتقنية التعرف الآلي على الكلام تعد إحدى التقنيات المتطورة والمهمة في مجال المعالجة الآلية للغات الطبيعية والذكاء الاصطناعي؛ إذ تعنى هذه التقنية بتحويل الكلام المنطوق إلى نص مكتوب باستخدام آليات وخوارزميات مختلفة. لهذه التقنية تطبيقات حياتية مفيدة، نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر: تطوير واجهات المستخدم الصوتية والتحاور الرقمي، والمساعدة على أرشفة البيانات عبر تحويل الكلام المنطوق إلى مكتوب، وتطوير برامج استرجاع البيانات، وتطوير أدوات لإملاء البيانات شفويا، وغيرها من التطبيقات. ومن شأنها كلها أن توفر الاستغلال الأمثل للوقت وتُقلِّل المجهود البشري عن طريق الاعتماد على الآلة.

ولأن اللغة العربية تواجه العديد من التحديات والصعوبات، التي تعيق تطوير أنظمة تعرف آلي على الكلام العربي؛ تعالج الدراسة الحالية مشكلة عدم التطابق ما بين النصوص الكتابية المقدّمة والإشارات الصوتية، الأمر الذي يؤدي إلى تردي أداء النظام. يتصدى البحث إلى هذه المشكلة من خلال تضمين الخصائص فوق القطعية للكلام العربي في النصوص الكتابية لجعلها أقرب إلى الكلام الطبيعي، وذلك عبر تطوير نظام آلي يحتوي على مجموعة من القوانين

(*) أستاذ مساعد في قسم اللغة العربية وآدابها–كلية الآداب، جامعة الكويت.

الفنونولوجية الدقيقة التي تعمل بدورها على تزويد النظام بكتابة صوتية دقيقة تشمل معلومات عن مواضع النبر في الكلمات. ويسهم هذا النظام في تقليل الفجوة ما بين الكلام المنطوق والنص المكتوب في أثناء النمذجة الصوتية، ومن ثم تحسين أدائه، كما تهدف الدراسة إلى مقارنة أداء نظام التعرف الآلي على الكلام عند إضافة علامة النبر إلى كل الفونيمات المنبورة في المقطع الصوتي، وعند إضافة علامة النبر إلى الحركات القصيرة والطويلة المنبورة فقط.

يعد النبر من الخصائص فوق القطعية للكلام الناتجة من الضغط على مقطع خاص من كل كلمة لجعله أبرز وأوضح في السمع، وفي هذا، يقول الدكتور كمال بشر: "معنى هذا أن المقاطع تتفاوت فيما بينها في النطق قوة وضعفا؛ فالصوت أو المقطع المنبور ينطق ببذل طاقة أكبر نسبيا، ويتطلب من أعضاء النطق مجهودا أشد. لاحظ الفرق مثلا في قوة النطق وضعفه بين المقطع الأول في "ضَرَبَ" والمقطعين الأخيرين، تجد "ضَ" ينطق بارتكاز أكبر من زميليه في الكلمة نفسها"[١].

ومع أن النبر يعتبر ظاهرة غير فونيمية في اللغة العربية، أي أنها ظاهرة لا تسهم في تغيير المعنى كما هي الحال في بعض اللغات –كالإنجليزية، لا يمكن أن يكتمل الأداء الصحيح للغة دون الالتزام بالمعايير والأسس المتعارف عليها في الضغط على المقاطع المنبورة، وهو قد يجعل النطق غريبا وربما يُصعّب فهم مقصد الكلام.

وقد أكد الباحثون على أن التوظيف الجيد لقواعد النبر من الممكن أن يسهم في تحسين أداء مختلف تطبيقات معالجة الكلام العربي[٢]، كما أكدت أبحاث سابقة على أن الحركات القصيرة والطويلة، والتي تشكل ما يقارب ٤٠% من الكلام، يعبر عنها بشكل مختلف إذا كانت جزءا من مقطع منبور[٣].

عموما، يمكن التنبؤ بمواضع النبر في اللغة العربية وفقا للتركيب المقطعي للكلمة كما أشار إلى ذلك هولز(٤). لذلك، طورت هذه الدراسة أداة تعمل على تعيين مواضع النبر في الكلمة تلقائيا، وتكمن أهمية هذه الأداة المطورة في توظيفها لتوليد كتابة صوتية دقيقة –بشكل تلقائي– يمكن استخدامها لإنشاء معجم صوتي، وهو أمر ضروري عند تطوير مختلف تقنيات المعالجة الآلية للغة. وقد اختبرت فاعلية تضمين مواضع النبر في الكتابة الصوتية عبر مقارنة نماذج مختلفة لأنظمة تعرف آلي تستخدم نصوصا كتابية مختلفة، واختبرت فاعلية استخدام المعجم المطور من خلال عدة تجارب مبنيّة على نموذج ماركوف الخفي وتقنية التعلم العميق باستخدام الإصدار ٣.٥ من Hidden Markov model toolkit (HTK).

وتوصلت الدراسة إلى أن تحديد مواضع النبر في الكلام خلال النمذجة الصوتية له دور فعال في تحسين أداء أنظمة التعرف الآلي على الكلام العربي، وتوقعت الدراسة التأثير الإيجابي نفسه في تطبيقات اللغة الطبيعية الأخرى، كما توصلت إلى أن التخصيص الخطأ لمواضع النبر–مع أن النبر ظاهرة غير فونيمية في اللغة العربية– يؤدي إلى إنتاج كلام غير طبيعي.

١.الأبحاث السابقة:

تعد هذه الدراسة امتدادا لجهود سابقة دعت إلى تضمين المعلومات اللغوية خلال المعالجة الآلية للكلام وعدم الاعتماد على الخوارزميات الحاسوبية في تخمين هذه المعلومات(٥)، وقد حاول أخيرا عدة باحثين في هذا المجال دمج مصادر المعرفة اللغوية المختلفة لتحسين أداء أنظمة التعرف الآلي، وهذا المبحث يستعرض بعضا من هذه الأعمال، مع إيلاء اهتمام خاص للأعمال التي اهتمت باللغة العربية.

توصلت الدراسات المختلفة إلى أهمية تضمين الخصائص العروضية للكلام عند تطوير تطبيقات معالجة اللغة الطبيعية المختلفة، مثل نظام التعرف الآلي

على المشاعر ونظام تحديد لهجة المتحدث ونظام التوليد الآلي للكلام والتعرف على الكلام. وقد أجرت مجموعة من الباحثين دراسات تهدف إلى التحقق من تأثير تضمين الخصائص العروضية للكلام بأنظمة التعرف الآلي على المشاعر وتحليل الرأي العام؛ على سبيل المثال، استخرج الباحثان مفتاح ومانيبالي بعض الخصائص الصوتية المهمة من الكلام وقارناها للوصول إلى الميزة الصوتية الأكثر تأثيرا ولا بد من توظيفها في أنظمة التعرف الآلي على المشاعر، وأكدت نتائجهما على أهمية استخدام هذه الميزات الصوتية في تطوير أداء هذه الأنظمة وتحسينها[٦][٧].

وتوصلت دراسات أخرى إلى أهمية تضمين الخصائص العروضية للكلام في تطوير أدوات التعرُّف على اللغة؛ على سبيل المثال، استخرج الباحث ريدي بعض المعلومات الطيفية والخصائص العروضية لاستخدامها في تحليل المعلومات الخاصة باللغة كما توجد في الكلام، وتشمل هذه الخصائص التنغيم والإيقاع والنبر. وأكدت نتائج التقييم أن أداء نظام التعرُّف الآلي على اللغة تحسن بنسبة ٣% إلى ٦% عند توظيف الخصائص العروضية. على نحو مشابه، دمجت دراسة أخرى الخصائص العروضية والخصائص الأكوستية لبناء نظام توليدي لتحديد لغة المتحدث، وأظهرت وجود تحسُّن بنسبة ٥٠% تقريبا في أداء نظام تحديد اللغة عند إدراج المعلومات اللغوية[٨].

كان توظيف المعلومات العروضية للتعرُّف على اللهجات العربية موضوع عدد من الدراسات، مثل الدراسات التي أجراها لوناس وإبراهيم، استهدفت دراسة لوناس التمييز بين اللغة العربية الفصحى واللهجة الجزائرية ووجدت تحسنا بنسبة ١.٦٧% في الأداء عند دمج الخصائص العروضية مع الخصائص الأكوستية في النظام المصمم[٩]. أما دراسة إبراهيم فركزت على التعرف على لهجة المتحدثين الماليزيين عند تلاوة القرآن الكريم باستخدام مزيج من السمات الكلامية

الطيفية والسمعية بهدف تحديد تنوُّع اللهجات، وتوصل الباحثون إلى أداء أفضل بنسبة ٥.٥%-٧.٣% عند دمج الخصائص العروضية بالسمات الصوتية(١٠).

التحقق من دور توظيف خصائص الكلام العروضية في بناء أنظمة التعرف الآلي على الكلام لم يلق اهتماما كبيرا من الباحثين، إلا أن بعض الدراسات أكد على الدور البارز الذي يلعبه توظيف الخصائص العروضية لتعزيز التطبيقات التقنية للكلام العربي؛ فبحث أرموس في إسهام الميزات الصوتية والعروضية -مثل درجة الصوت والطاقة المبذولة في الكلام- في أنظمة التعرف الآلي على الكلام العربي، مستخدما أداة HTK محاكيا فيها ظروف الحياة الواقعية(١١). بينما تناول خليفة دمج الميزات التكميلية في نماذج ماركوف الخفية القياسية (standard HMMs)، وذلك بهدف بناء نظام متين للتعرُّف على الكلام. وأجريت سلسلة من التجارب مع مجموعات تحوي مميزات مختلفة في هذا البحث بهدف تحديد الميزات المتكاملة ذات التأثير الأكبر في أداء الأنظمة، وأظهرت الدراسة انخفاضًا ملحوظًا في معدل الخطأ(١٢).

٢.الفونولوجيا العربية:

مثل معظم اللغات السامية، يتألف النظام العربي في معظمه من مجموعة كبيرة من السواكن إلى جانب عدد محدود من الحركات؛ فبينما يتألف النظام الصوتي العربي من ٣٤ صوتا، نجد أن ستة أصوات فقط عبارة عن حركات (قصيرة وطويلة)، هذه الأصوات تتوزّع في مقاطع، ومن المعروف أن المقطع عبارة عن تتابع صوتي من السواكن والحركات، يتكون هذا التتابع الصوتي عادة من حركة واحدة هي نواة المقطع تحوطها بعض السواكن، تتألف الكلمات العربية في معظمها من عدد من المقاطع (متعددة المقاطع)، بينما نجد بعض الكلمات تتألف من مقطع واحد (أحادية المقطع) وبعضها من مقطعين اثنين فقط (ثنائية المقطع).

يحتوي النظام الفونولوجي العربي على قواعد واضحة لبنية المقطع. وفيما يلي، نقاط موجزة تلخِّص أهم هذه القواعد:

- لا يبدأ المقطع العربي بحركة.
- لا يتوالى ساكنان في بداية المقطع.
- لا يسمح بتوالي ثلاثة سواكن في أي موقع داخل المقطع.

إن فهم البنية المقطعية للكلمة العربية أمرٌ أساسيٌّ لفهم قواعد النبر؛ فدون فهم جيد للقوانين المقطعية لا يمكن لظاهرة النبر أن تفهم على الوجه الصحيح[١٣]، وقد أجمعت الدراسات المختلفة على أن النبر يتبع قواعد محددة لبنية المقاطع التي تتألف منها الكلمة[١٤] ، ذلك أن موضع النبر يعتمد أساسا على عدد المقاطع التي تتشكل منها الكلمة ووزن هذه المقاطع، ويمكن تصنيف المقاطع في اللغة العربية إلى ثلاث فئات: قصير، وطويل، ومغرق في الطول؛ ينتج من هذه الفئات ستة أشكال مختلفة من المقاطع كما يوضِّح الجدول التالي:

جدول ١ البنية المقطعية للكلام العربي

	مكونات المقطع	نوعه	مثال
١	ساكن+حركة قصيرة	مقطع قصير	ضَرَب /**a–ra–dˤ ba**/
٢	ساكن+حركة طويلة	مقطع طويل مفتوح	مَضرب/**ma** /**dˤ –rab**/
٣	ساكن+حركة قصيرة+ساكن	مقطع طويل مغلق	ضارِب/ **dˤ** – **a:** rib/
٤	ساكن+حركة قصيرة+ساكن+ساكن	مقطع مغرق في الطول	بِنت /**bint**/
٥	ساكن+حركة طويلة+ساكن	مقطع مغرق في الطول	دار /**da:r**/
٦	ساكن+حركة طويلة+ساكن+ساكن	مقطع مغرق في الطول	سارّ /**sa:rr**/

يمكن أن تأتي المقاطع الثلاثة الأولى في أي موقع داخل الكلمة دون قيود بعددها، بينما لا يمكن للكلمة أن تحتوي على أكثر من مقطع واحد مغرق في الطول، وبشترط أن يأتي هذا المقطع في نهاية الكلمة. لكن، من بين الحالات

الاستثنائية لهذه القاعدة، الكلمات التي تحتوي على حركة طويلة يليها ساكن مشدد، كما في كلمة سارٌ /sa:rr–run/ التي ظهر فيها المقطع المغرق في الطول ببداية الكلمة.

إن النبر من السمات الكلامية فوق القطعية التي تتمثل في الضغط على مقطع واحد داخل الكلمة. وقد عرفه الدكتور كمال بشر بأنه نطق مقطع من مقاطع الكلمة بصورة أوضح وأكثر جلاء نسبيا من بقية المقاطع التي تجاوره. كما أنه –النبر– ظاهرة غير فونيمية في اللغة العربية؛ ما يعني أنه لا يسهم في تغيير المعنى في اللغة العربية. ومع ذلك، لوضع النبر في موقعه الصحيح دور مهم في جعل الكلام طبيعيا ومقبولا من أفراد البيئة اللغوية، وقد أشار برتيل مالبرج في دراسته إلى أن النبر ظاهرة مهمة ذات تأثير في نسق اللغة المنطوقة، وألمح أيضا إلى الدور المهم الذي يمثله النبر في نظام أداء الكلام(١٥).

يعد المستشرق الألماني كارل بروكلمان أول من حاول وضع قواعد للنبر في اللغة العربية، وذلك في قوله: "في اللغة العربية، يدخل نوع من النبر تغلب عليه الموسيقا، ويتوقف على عدد المقاطع؛ إذ يسير من مؤخرة الكلمة نحو مقدمتها، إلى أن يقابل مقطعا طويلا فيقف عنده، فإذا لم يكن في الكلمة مقطع طويل، فإن النبر يقف على المقطع الأول منها"(١٦). واستنادا إلى كلام بروكلمان، نخلص إلى أن موضع النبر يعتمد تماما على التكوين المقطعي للكلمة بناء على الأساس الذي ذكر سابقا. وبخلاف بروكلمان، فقد قدم كثير من الباحثين قواعد تساعد على فهم مواضع النبر في الكلمات العربية؛ مثل الدكتور إبراهيم أنيس(١٧)، والدكتور تمام حسان(١٨)، والدكتور عبدالصبور شاهين(١٩)، والدكتور رمضان عبدالتواب(٢٠)، والدكتور أحمد مختار عمر(٢١)، وغيرهم.

وفيما يلي، تلخيص لقواعد النبر في اللغة العربية، التي وضعت بناء على بحث مكثف في الدراسات اللغوية المختصة، وأيضا بناء على ملاحظة الباحث لكيفية نطق الكلام العربي من قبل متحدثين مختلفين كما وجدت في قاعدة

البيانات المستخدمة في البحث. وقبل الشروع في بيان هذه القواعد، نود التذكير بحقيقتين مهمتين:

- الأولى: أن النبر دائما يقاس من نهاية الكلمة العربية إلى بدايتها. إضافة إلى ذلك، لا يمكن أن يقع النبر في مقطع يلي المقطع الثالث من الأخير(٢٢).

- الثاني: اللواصق، والتي تتضمن (ال) التعريف وحروف الجر الملاصقة للكلمة، لا توضع في الاعتبار عند حساب عدد مقاطع الكلمة؛ فعلى سبيل المثال، الكلمة "وَلم" /wa-lam/ تعد كلمة أحادية المقطع عند تحديد الضغط، بينما تعد كلمة "قلم" /qa-lam/ كلمة ثنائية المقطع. في المقابل، مع أن كلمتي "الولد" و "والولد" متعددتا المقاطع، تُعَدّان -عند تحديد موضع النبر- كلمتين ثنائيتي المقاطع، وذلك لأن اللاصقة (وَ) واللاصقة (ال) مهملتان عند حساب عدد القاطع.

الأنماط النبرية المقبولة في اللغة العربية والمتوافقة مع الدراسات السابقة هي:

١- يقع النبر في المقطع الأخير:

ا-إذا كان المقطع النهائي مغرقا في الطول، كما هو الحال في كلمتي "سديد" / sadi:d/ "أبواب" /ʔabwa:b/.

ب- في الكلمة أحادية المقطع، وعند قولنا "أحادية المقطع" فنحن نشمل أيضا الكلمات ثنائية المقطع المحتوية على لواصق، مثال على ذلك الكلمات: "لا" /la:/ ، "عن" /ʕan/ ، "ولن" /wa-lan/ ، "بكم" /bi-kam/ .

٢- يقع النبر في المقطع ما قبل الأخير، وذلك في الحالتين التاليتين:

ا- إذا كانت الكلمة ثنائية المقاطع، مثل: "سِوى" /**si**-wa:/ "سند" /**sa**-nad/ "السند" /ʔas-**sa**-nad/ "والسند" /was-**sa**-nad/.

ب- عندما تكون الكلمة متعددة المقاطع والمقطع ما قبل الأخير مقطع طويل، خذ على سبيل المثال:

"سديدٌ" /sa–**di**:–dun/ "بناتي" /ba–**na**:–ti:/ "خالاتي" /xa:–**la**:–ti:/ "كويتيٌّ" /ku–waj–**tij**–jun/ .

٣- يقع النبر على المقطع الثالث من الأخير وذلك في حال كان المقطع ما قبل الأخير مقطعا قصيرا في كلمة متعددة المقاطع، على سبيل المثال: "كَتَبَ" /**ka**–ta–ba/"كاتِبُ" /**ka**:–ti–bu/ "كَتَبَت" /**ka**–ta–bat/ "وَرَقةٌ" /wa– **ra**–qa–tun/ "مكتبةٌ" /mak–**ta**–ba–tun/ .

٤. وصف لنظام تحديد مواضع النبر:

تقدم هذه الدراسة نظامًا آليّا يعمل على تحديد مواضع النبر في النصوص الكتابية. وفي هذا القسم من البحث، نشرح الآلية التي اعتمدت عند تطوير هذه الأداة، والتي تتطلب عددا من الخطوات الأولية لتهيئة النصوص وتجهيزها لتحديد مواضع النبر فيها، وفي ما يلي تفصيل لهذه الخطوات:

٤.١ المعالجة المُسبَقة للنص:

المعالجة المسبقة للنصوص الكتابية متطلب أساسي للواجهة الأمامية لأي نظام يعمل على توليد النصوص الكتابية، ووظيفتها الأساسية استخراج المعلومات اللازمة من النص الكتابي لتهيئته للمعالجة التالية التي يجريها النظام. تشمل هذه المرحلة: استرجاع الحركات القصيرة، وحذف علامات الإعرابى، والتعامل مع بعض الرموز الكتابية (مثل الشدة والسكون)، وحذف الحروف التي تكتب ولا تنطق، وتوحيد الأشكال الكتابية للهمزة وللأصوات المتطابقة، وتمييز الأصوات الساكنة عن الحركات. وفيما يلي تفصيل لما ذكر:

١- استرجاع الحركات القصيرة:

من المعروف أن النظام الكتابي العربي يهمل كتابة الحركات القصيرة، وتكون مهمة القارئ استرجاع هذه الحركات في أثناء قراءته النص الكتابي استنادا إلى خصائص الكلمة والمعلومات السياقية، ويُعَد غياب علامات التشكيل عن

النص الكتابي مشكلة أساسية تواجه معظم المعالجات الآلية للنصوص الكتابية العربية، إذ إن تحديد موضع النبر يعتمد بشكل أساسي على البنية المقطعية للكلمة، ولأن الحركات تُشكِّل نواة المقاطع، فلا بد من استرجاعها من أجل تقطيع الكلمات، ومن ثم تحديد مواضع النبر.

بالإضافة إلى ذلك، لا يتألف نظام التشكيل من الحركات القصيرة فقط، بل من علامات أيضا، مثل الشدة والتنوين والسكون وغيرها، وهذه العلامات مهمة في تحديد نطق الكلمة، خصوصًا الكلمات ذات الأشكال المتشابهة؛ مثال على ذلك كلمة "عقد" التي يمكن أن تنطق بالأشكال التالية: "عُقْد"، "عِقد"، "عَقْد"، "عَقَدَ"، "عَقَّدَ"، "عُقَد". في هذه الدراسة، استخدمت أداة التحليل الصرفي (مادااميرا)[٢٣] لاسترجاع علامات التشكيل في النصوص الكتابية، وقد تمكنت هذه الأداة من تشكيل ما يقارب ٩٤.٣% من الكلمات الموجودة في قاعدة البيانات المستخدمة.

٢- حذف العلامات الإعرابية:

تظهر علامات الإعراب في نهاية الكلمة على شكل حركات قصيرة وتنوين، وتختلف باختلاف الوظيفة النحوية للكلمة داخل الجملة، ومن ثم يعتمد وضع علامة الإعراب الصحيحة كثيرا على فهم شامل للنظام النحوي العربي.

تظهر هنا مشكلتان أساسيتان: الأولى أن أداة التحليل الصرفي مادااميرا لا توَفَّق أحيانًا كثيرة في وضع علامة الإعراب الصحيحة، ويرجع ذلك إلى طبيعة النصوص المدخلة التي تعتبر نسخا للغة المنطوقة. ولأن معظم النصوص المنسوخة تعود إلى كلام عفوي غير منتظم، يمكننا أن نتوقع التعقيد الذي تواجهه هذه الآلة عند إخضاع هذه النصوص إلى التحليل النحوي. إضافة إلى ذلك، تحتوي قاعدة البيانات المستخدمة في هذه الدراسة على قدر كبير من التسجيلات الكلامية المنطوقة من متحدثين من مناطق جغرافية مختلفة بلهجات مختلفة، ومن

المعروف أن اللهجات العربية تختلف اختلافًا كبيرًا عن اللغة العربية الفصحى في جميع المستويات اللغوية.

المشكلة الثانية أن تعيين العلامات الإعرابية الصحيحة للكلمات يتطلب فهما شاملا ومعرفة دقيقة لقواعد النحو العربية والتي لا يملكها كثير من المتحدثين العرب، لذا، نجد أن المتحدثين العرب يميلون إلى إسقاط الحركات الإعرابية في نهاية الكلمة لتجنب الوقوع في الخطأ، وهذه ظاهرة معروفة في اللغة العربية وتُسمّى ظاهرة "التسكين". وقد وجدت دراسة سابقة أن إزالة العلامة الإعرابية من النص تخفض نسبة الخطأ بما يقارب ٤% عند بناء أنظمة التعرف الآلي.

٣-التعامل مع الشدة والسكون:

يتضمن النظام الكتابي العربي علامتي تشكيل ليس لهما تمثيل صوتي، وهما السكون والشدة؛ فوظيفة السكون تقتصر على الإشارة إلى أن الحرف الساكن، الذي ترتبط به، لا تتبعه حركة قصيرة، أما الشدة فوظيفتها تضعيف الحرف الذي ترتبط به، لذا، فإننا -في المرحلة الأولية لمعالجة النص- نحذف جميع مُدخَلات السكون، ونحذف الشدة ونعوض عنها بحرف مُضعّف، وهي خطوة ضرورية في سبيل الوصول إلى تقطيع دقيق للكلمات.

٤-توحيد التمثيل الكتابي للهمزة:

تظهر الهمزة في النصوص العربية بأشكال مختلفة اعتمادا على موضعها وعلى نوع الحركات المحيطة بها؛ فيمكن أن نجدها في النص بالأشكال التالية: ء، أ، إ، ؤ،ئ. مع ذلك، لا يؤثر اختلاف شكل الهمزة في طريقة نطقها، لذا نجد أنه من الأنسب أن نوحِّد التمثيل الكتابي للهمزة بأشكالها المختلفة بغض النظر عن طريقة كتابتها في النصوص العربية ما دامت أنها لا تؤثر في نطق الكلمة.

٥-تمييز الحركات الطويلة عن أشباه الحركات:

يحتوي النظام الكتابي العربي على حرفين يمثل كل منهما صوتين مختلفين، وهما حرفا الواو والياء؛ فحرف الواو يمكن أن ينطق كحركة طويلة، كما في "سور"

/su:r/ ، ويمكن أن ينطق كأشباه الحركات، مثل الواو في كلمة "ولد" /walad/. حرف الياء كذلك أيضا، فيمكن أن ينطق كحركة طويلة، كما في الكلمة "كبير" /kabi:r/، ويمكن أن يعامَل معاملة أشباه الحركات في النطق، مثل الياء في كلمة "يدرس" /jadrus/. ولأن أشباه الحركات تعامَل فونولوجيا معاملة السواكن، فتحتلّ المواضع التي تحتلها السواكن في المقطع، على عكس الحركات الطويلة؛ اهتمَّت الدراسة بتمثيل الصوتين المختلفين برموز مختلفة لتجنب الوقوع في أخطاء عند تقطيع الكلمة، وقد اعتمدنا في تحديد الصنف، الذي ينتمي إليه هذان الحرفان، على خصائص متعددة للسياق.

٦-حذف الأصوات التي تكتب ولا تنطق:

يحتوي النظام الكتابي العربي على بعض الحروف التي لا تُمثِّل أي صوت في نطق الكلمة؛ مثل الألف التي تلي واو الجماعة، والألف التي تأتي مع تنوين الفتح. من المهم حذف هذه الحروف التي لا تنطق، فوجودها قد يؤثر في دقة التقطيع الآلي للكلمات. تشمل هذه الخطوة أيضًا الحركات القصيرة التي تسبق حروف المد؛ فلا دور لها في نطق الكلمة، لكنها تكون موجودة في النصوص المشكَّلَة تلقائيًّا.

٤.٢ تحويل الحروف إلى فونيمات:

في هذه الخطوة، تُحوَّل كل الحروف، التي يتشكل منها النص الكتابي، إلى فونيمات برموز لاتينية قابلة للتحليل الحاسوبي، وذلك عبر تطبيق قوانين توصيل مباشرة تصل بين كل فونيم والحرف الذي يمثله. وفي النظام المُطوّر في هذه الدراسة، نستخدم نظام Buckwalter لتمثيل الحروف العربية، كما نستخدم نظام SAMPA لتمثيل الفونيماتز ويعود سبب تفضيل نظام SAMPA على نظام الأبجدية الصوتية الدولية IPA إلى عدة أسباب، أهمها توافق رموز SAMPA مع نظام ASCII.

٤.٣ تطبيق القواعد الفونولوجية:

في كتابة القواعد الفونولوجية، كان التركيز مقتصرًا على التغييرات التي تؤدي إلى تغيير في البنية المقطعية للكلمة؛ فهدف صياغة هذه القوانين الأساسي وتطبيقها التمكُّن من تقسيم الكلمة إلى المقاطع التي تتألف منها تلقائيا بدقة عالية، لذلك، فلا تهمنا القواعد الفونولوجية الخاصة بتبديل بعض الأصوات والتي ليس لها تأثير في بنية الكلمة وفيما يلي وصف لهذه القواعد:

أ- الحذف:

من أبرز حالات الحذف في اللغة العربية حذفُ همزة الوصل، تظهر همزة الوصل في النظام الكتابي العربي في مواقع مختلفة، مثل (ال) التعريف، وفي بعض الأبنية الصرفية للأسماء والأفعال مثل: افعل، افتعل، افتعال...، تسقط همزة الوصل نطقا عندما تُسبَق بحركة، كما في كلمة "وَادرس" التي تُنطَق /wadrus/.

ب- الإضافة:

تتمثل عملية الإضافة في إدخال عنصر صوتي خلال النطق دون وجود تمثيل كتابي له، وهي ظاهرة من الظواهر الفونولوجية في اللغة العربية تؤدي إلى تغيير في البنية المقطعية للكلمة. إن من القواعد المُتأصِّلة في النظام الفونولوجي العربي عدم توالي ساكنين في النطق، وذلك اتباعًا للقاعدة المعروفة: "لا نبدأ بساكن ولا نقف على متحرك". يمكن أن ينتج توالي الساكنين عندما تنتهي الكلمة بساكن وتبدأ الكلمة التي تليها بهمزة وصل، وفي هذه الحالة تتم إضافة حركة قصيرة قبل همزة الوصل يتبعها حذف لهمزة الوصل تبعا لقاعدة الحذف المذكورة سابقًا؛ مثال على ذلك عبارة "منْ القادم؟"، ففي مثل هذه الحالة تضاف حركة قصيرة (في هذا المثال كسرة) لمنع توالي ساكنين.

ج-تقصير الحركات الطويلة:

توجد سياقات محددة لعملية تقصير الحركات الطويلة، وهي السياقات التي تتوالى فيها كلمتان تنتهي الكلمة أولاهما بحركة طويلة وتبدأ الأخرى بهمزة وصل، وفي مثل هذه الحالة يجب تقصير الحركة الطويلة، فيبدل مد الواو بنظيره القصير (الضمة) ومد الياء بنظيره القصير (الكسرة) ومد الألف بنظيره القصير (الفتحة). يعود ذلك إلى طبيعة النظام الفونولوجي العربي الذي لا يقبل بوجود مقطع مغرق في الطول (صامت+حركة طويلة+صامت) بأي موضع سوى نهاية النطق، وفي الحالة المذكورة يتكون هذا المقطع نتيجة لحذف همزة الوصل؛ مثال على ذلك "في الكتاب" /fi: lkita:b/، إذ بدأت الكلمة بمقطع مُغرق في الطول، ينتج من تقصير الحركة الطويلة تغيّر في البنية المقطعية للكلمة لتتلاءم مع النظام الفونولوجي العربي، فيكون المقطع طويلا بعد أن كان مُغرقا في الطول.

٤.٤ التقطيع:

قبل إجراء قواعد تحديد مواضع النبر، يجب تقسيم الكلمة إلى المقاطع التي تتألف منها؛ فموضع النبر يعتمد بشكل أساسي على البنية المقطعية للكلمة، وذلك عبر تطبيق عدد من القواعد التي تتركز وظيفتها في التعرف على المكونات المقطعية في الكلمة. يحتوي النظام الفونولوجي العربي على قوانين واضحة تتعلق بالمقاطع المسموح بها في اللغة وتُحدِّد التتابع المقطعي المسموح به في الكلام المنطوق، وقد استعرضنا هذه القوانين في المبحث الثالث من هذه الدراسة.

في هذه الخطوة، تُتَّبع القيود الصوتية للغة العربية بهدف تطوير مجموعة من القواعد التي يمكن تطبيقها آليّا على النص، الذي وُلِّد من الخطوات السابقة، بهدف تقسيم الكلمة إلى لمقاطع التي تتألف منها، وتعتمد عملية التقطيع بشكل أساسي على نواة المقطع وهي الحركة، بالإضافة إلى الحركة، يتكون المقطع من

سواكن تسبق النواة أو تتلوها. وبعد تطبيق هذه الخطوة، يصبح النص الكتابي جاهزًا لتحديد مواضع النبر.

٤.٥ تحديد المقاطع المنبورة:

بعد تطبيق جميع الخطوات المذكورة سابقا، تُقدَّم مجموعة من القواعد تتمثل وظيفتها تفحص مقاطع الكلمة وتحديد المقطع المنبور عن طريق وضع علامة مميزة لجميع المقاطع المنبورة. وكما نلاحظ، تأتي هذه الخطوة بعد سلسلة من الخطوات المتتابعة التي تتضمَّن التهيئة الأولية للنص الكتابي وتطبيق القوانين الفونولوجية والتقطيع، ويرجع ذلك إلى حقيقة أن موضع النبر يعتمد اعتمادًا أساسيّا على البنية الداخليّة للمقطع التي يمكن أن تتأثر بدورها حسب السياق. قواعد النبر المُطَبَّقة في هذه الدراسة مبنية على النطق القياسي الفصيح للغة العربية.

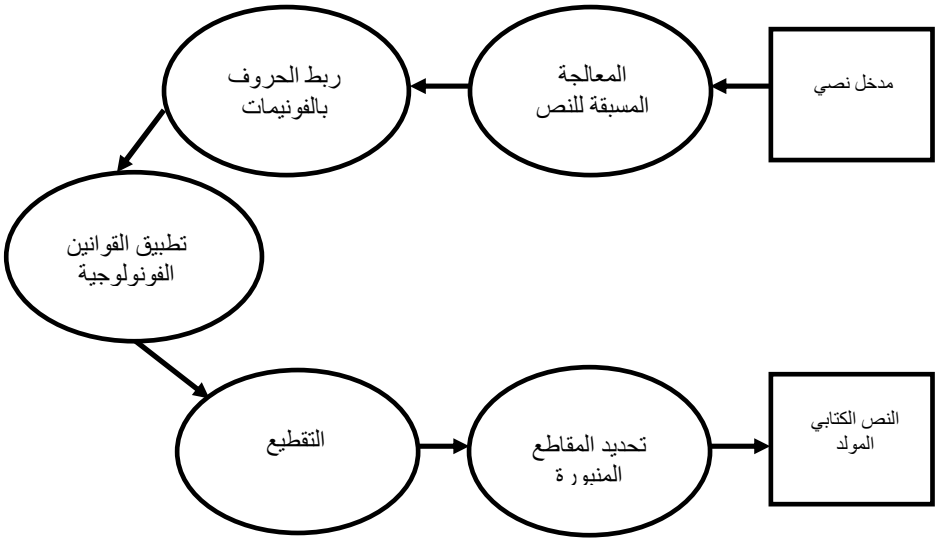
تعتمد الخوارزمية المطبقة في تحديد مواضع النبر بالنصوص الكتابية على مجموعة من القوانين التي تم عرضها في المبحث الثالث من هذه الدراسة، وبناءً عليها، تطبق القوانين الشرطية التالية بالتوالي:

- إذا كانت الكلمة أحادية المقطع، تكون الكلمة كلها منبورة.
- إذا كانت الكلمة تنتهي بمقطع مُغرِق في الطول (ساكن+حركة طويلة+ساكن) أو (ساكن+حركة قصيرة+ساكن+ساكن)، يكون هذا المقطع منبورًا.
- إذا كانت الكلمة ثنائية المقطع، يقع النبر على المقطع قبل الأخير.
- إذا كانت الكلمة متعددة المقاطع، وكان المقطع ما قبل الأخير مقطعًا طويلًا (ساكن+حركة طويلة) أو (ساكن+حركة قصيرة+ساكن) يقع النبر على المقطع قبل الأخير.
- عدا الحالات التي سبق ذكرها، يقع النبر على المقطع الثالث من نهاية الكلمة.

تشكل اللواصق (مثل حروف العطف "و" و "ف") تحديا أمام عملية التحديد التلقائي لمواضع النبر. لتفادي الوقوع في خطأ عند تحديد المواقع المنبورة،

استخدمت المعلومات، التي يتضمَّنها التحليل الصرفي المُتولد من أداة ماداميرا للتعرُّف على اللواصق، ومن تجاهلها في حساب عدد المقاطع المُكوِّنة للكلمة وتحديد موضع النبر.

يصور الشكل التالي هيكل نظام تحديد مواضع النبر الذي تقدَّم وصفه في هذا المبحث.



رسم توضيحي ١ يبين الخطوات المتبعة في تصميم أداة التوليد الآلي للكتابة الصوتية

٥-تصميم النظام:

صُمِّم نظام التعرُّف الآلي المُطور لأغراض هذه الدراسة اعتمادًا على النسخة ٣.٥ من Hidden Markov Model Toolkit (HTK)، وهي عبارة عن مجموعة من الأدوات والمكتبات الحسابية التي تعمل على بناء نماذج ماركوف المخفية (HMMs)، كما تضم هذه النسخة الحديثة وحدات الشبكة العصبية العميقة (DNNs) لاستخدامها في النمذجة الصوتية وفي أثناء استخلاص الخصائص الصوتية لتحويل الكلام إلى بيانات رقمية. استخدم نظام التشغيل Linux Ubuntu لإجراء التجارب المختلفة، كما استخدم البحث لغة البرمجة

Python بنسختها الثالثة في كتابة برامج تساعد في تطبيق خطوات تحضير الملفات وتشغيل الأدوات المطلوبة.

يقدم هذا المبحث شرحًا موجزًا لمكونات هذا النظام:

٥.١ قاعدة البيانات المستخدمة في بناء النظام واختباره

تستخدم الدراسة قاعدة البيانات الصوتية GALE التي يوفرها اتحاد البيانات اللغوية (LDC)، تحتوي قاعدة البيانات هذه على ما يقارب ٢٠٠ ساعة من التسجيلات الصوتية المستسقاة من قنوات إخبارية وبرامج حوارية من قرابة ٣٠ قناة عربية، كما تحتوي على النسخ المكتوبة من هذه الملفات الصوتية.

هذه البيانات ضرورية لبناء برنامج التعرف الآلي المطوَّر واختباره، وقد أجرينا بداية عددًا من الخطوات اللازمة لجعل هذه البيانات جاهزة للمعالجة الآلية، أبرزها:

أ- مراجعة النصوص الكتابية وإجراء بعض التعديلات على النظام الكتابي لتجنب بعض الأخطاء الموجودة.

ب- تقطيع النصوص الكتابية إلى أجزاء صغيرة لتجعل معالجتها الحاسوبية أسهل وأسرع.

ج- إعادة تسمية النصوص المُجتزَأة لتتطابق مع الملفات الصوتية التي تمثلها.

د-حذف جميع المُدخَلات المكرَّرة والتي لا تحمل معلومات لغوية، كالنصوص غير العربية.

٥.٢ تحويل الكلام إلى بيانات رقمية:

تُعد هذه الخطوة خطوة أولية أساسية يجري خلالها الحاسوب عمليات حسابية معقدة لتحويل الكلام إلى بيانات رقمية قابلة لتطبيق الأوامر الحاسوبية؛ لأن الأدوات الحاسوبية غير قادرة على التعامل المباشر مع الموجة الصوتية. تتضمَّن هذه العملية عددا من المراحل العلاجية التي تستهدف الموجة الصوتية، لتأخذ

بعدها عينات رقمية للصوت وتُزيل الضجيج غير المرغوب فيه، ومن ثم تقسم الصوت إلى حزم مختلفة من الترددات. في المرحلة الثانية، تقسَّم الإشارة الصوتية إلى مقاطع صغيرة بحجم أجزاء من المئة من الثانية، لتستخدم هذه المقاطع الصغيرة –في ما بعد– لبناء النموذج الصوتي للنظام. يستخدم النظام المطور في هذه الدراسة تقنية Mel–frequency cepstral coefficients (MFCCs) لاستخراج الخصائص الكلامية.

٥.٣ بناء النموذج الصوتي:

تسمح النسخة الحديثة من أداة HTK بتطبيق تقنية التعلم العميق باستخدام الشبكات المحايدة العميقة DNNs لبناء النماذج الصوتية. لن تخوض هذه الدراسة في التفاصيل التقنية لتطوير هذا النموذج الصوتي، إلا أنه من الضروري بيان الإعدادات التي استخدمت في بناء النظام (جدول ٢).

جدول ٢ الإعدادات التي استخدمت في بناء النموذج الصوتي

Hidden layers	١٠٢٤
Mini-batch size	٢٥٦
Learning rate	٠.٠٠١

٥.٤ النموذج النطقي:

يؤدي النموذج النطقي دور الرابط بين النموذج الصوتي والنموذج اللغوي. يؤثر النموذج النطقي الجيد كثيرا في تعزيز أداء أنظمة التعرُّف الآلي، ويتكون أساسًا من معجم صوتي يتضمَّن الكلمات الواردة في قاعدة البيانات ومقابلها الصوتي، وقد بُني هذا المعجم الصوتي باستخدام أداة التوليد الآلي للكتابة الصوتية، التي تحدثنا عنها في المبحث الثالث، كما يقوم البحث بتجربة المعجم الصوتي الذي طُوِّر في معهد قطر لبحوث الحوسبة، الذي يتألف من قرابة ال٥٢٦ ألف كلمة، ويتضمَّن أشكالًا نطقية مختلفة للكلمة الواحدة، وذلك بهدف

مقارنته مع الأداة المطورة، وُلِّدَت نسختان من المعجم آليا باستخدام أداة التوليد الآلي: النسخة الأولى مبنية على أساس فونيمي وُضِعت فيها علامة النبر على الحركات المنبورة فقط؛ أما النسخة الثانية فهي مبنية على أساس مقطعي أضيفت فيها علامة النبر إلى جميع المقاطع المنبورة.

٥.٥ النموذج اللغوي:

يُعَد النموذج اللغوي من المكونات الأساسية في نظام التعرف الآلي على الكلام، وهو يعمل على حصر خيارات البحث عبر الحد من الخيارات الكثيرة المحتملة. يدعم النموذج اللغوي عمل النموذج الصوتي من خلال احتساب احتمالية ورود الكلمة في السياقات المختلفة وترشيح الكلمة ذات الاحتمالية الأعلى، وذلك خلال مرحلة اختبار النظام، الأمر الذي يسهم كثيرًا في تحسين الأداء الكلي لنظام التعرف الآلي.

٣.النتائج والمناقشة:

يهدف العمل التجريبي، الذي تحدَّثت عنه هذه الدراسة، إلى الإجابة عن السؤالين التاليين:

١- هل يؤدي تحديد مواضع النبر في الكلمة إلى تحسين نظام التعرف الآلي على الكلام العربي؟

٢- ما أفضل طريقة لإضافة علامة مميزة للنبر في المعجم الصوتي: وضع علامة النبر على المقطع المنبور كاملا أم الحركات المنبورة فقط؟

تهدف المرحلة التجريبية الأولى إلى الإجابة عن السؤال الأول. وقد صُمِّم نظامان مختلفان؛ النظام الأول مبني على استخدام قاعدة البيانات كاملة مع المعجم الصوتي الأساسي دون استخدام أداة تحديد مواضع النبر، ومن ثم لم توضع علامات مميزة عند المقاطع المنبورة، أما الآخر فيوظف أداة تحديد مواضع النبر، ومن ثم يضيف علامات مميزة للمقاطع المنبورة في المعجم الصوتي.

والهدف من إنشاء هذين النظامين مقارنة أداء نظام التعرُّف الآلي عند تحديد مواضع النبر ودون تحديده.

أما الجولة التجريبية الثانية فتهدف إلى الإجابة عن السؤال الثاني وذلك من خلال مقارنة أداء النظام عند وضع علامة مميزة للنبر على كامل المقطع المنبور وعند وضع علامة النبر على الحركات المنبورة فقط. وفيما يلي تفصيل لأداء أنظمة التعرف الآلي المختلفة التي طَوَّرتها الدراسة:

٦.١ النظام الأساسي:

النظام الأساسي المُطور في هذه الدراسة مبني على استخدام المعجم الصوتي الذي طُوِّر في معهد قطر لبحوث الحوسبة[٢٤]. يحتوي هذا المعجم الصوتي على أشكال نطقية مختلفة لما يقارب ٥٢٦ ألف كلمة عربية، بالإضافة إلى ما يقارب مليوني تنوُّع نطقي بمعدل ٣.٨٣ تنوُّع نطقي لكل كلمة تقريبا. وقد حقَّق النظام الأساسي أداء جيدًا بنسبة دقة ٨٦.٦% كما هو مشار إليه في الجدول ٣.

٦.٢ تضمين علامة النبر لكل المقاطع المنبورة في النص الكتابي:

في هذه الجولة التجريبية، صُمّم نظام مبني على استخدام أداة تحديد مواضع النبر التي تحدثنا عنها في المبحث الثالث من الدراسة، وقد وُظِّفت مخرجات هذه الأداة في بناء معجم صوتي يحتوي على كتابة صوتية لكل الكلمات الموجودة في قاعدة البيانات، هذه الكتابة الصوتية تتضمَّن وضع علامة مميزة عند كل الأصوات المنبورة داخل المقطع، بما في ذلك السواكن. في هذا النظام، استخدمت المقاطع (عوضًا عن الفونيمات) كوحدات لغوية أساسية في بناء نظام التعرف الآلي واختباره، وكان الدافع وراء هذه الخطوة دراسات سابقة أكَّدت أن بناء أنظمة صوتية مبنية على المقاطع يُسهم في تقليل التأثير الناتج من التداخل النطقي، وقد توصَّلت هذه الدراسات إلى نتائج متفوقة عند استخدام المقاطع كوحدات

صوتية[٢٥]، أدى تطوير نظام تعرف آلي مبني على المقاطع إلى تحسين أداء النظام مقارنة بالنظام الأساسي بنسبة تحسن ٥.٦%.

٦.٣ تضمين علامة النبر للحركات المنبورة فقط في النص الكتابي:

كان الدافع وراء اختبار تحديد الحركات المنبورة فقط ما وجدناه في الدراسات اللغوية التي تشير إلى أن النبر لا يكون واضحا على السواكن الموجودة في المقطع بقدر ما يكون واضحا على الحركات. وفي هذا يقول الدكتور محمد الخولي عن النبر: "قوة التلفظ النسبي للصائت في كل مقطع من مقاطع الكلمة أو الجملة، وتؤثر درجة النبر في طول الصائت وعلو الصوت، ...، فإذا كان المقطع منبورا فإنه يتطلب طاقة زائدة من المتكلم تجعل نواة المقطع أكثر بروزا"[٢٦]. كما أكدت دراسة أخرى أن تأثير النبر على الحركات يفوق تأثيره على السواكن[٢٧]، وأن أنظمة التعرف الآلي على الكلام ستقدم أداء أفضل عند تحديد مواضع الحركات المنبورة[٢٨].

في هذا النظام، وضعت علامات مميزة للنبر ملاصقة لجميع الحركات المنبورة داخل المقطع الصوتي، ونتج من تضمين هذه العلامات تحسنًا ملحوظًا في أداء النظام بنسبة ٣.٥% مقارنةً بالنظام الأساسي، وهو ما يثبت صحة ما توصَّلت إليه الدراسات التي عُرضت مسبقا، إلا أن أداء النظام المبني على المقطع ما زال متفوقا على جميع الأنظمة التي قدَّمتها هذه الدراسة. الجدول ٣ يعرض نماذج من المعاجم الصوتية الثلاثة المستخدمة في هذه الدراسة، والجدول ٤ يوضِّح أداء الأنظمة الثلاثة، التي طوِّرت، من خلال استعراض نسبة دقة الأداء.

نستطيع أن نستنتج من التجارب السابقة أن لتضمين معلومات عن النبر خلال النمذجة الصوتية تأثيرًا إيجابيًّا ملحوظًا في تعزيز أداء نظام التعرف الآلي على الكلام العربي.

جدول ٣ مثال لمستويات مختلفة من الكتابة الصوتية لعبارة "السلام عليكم أعزاءنا المشاهدين"باستخدام معجم معهد قطر لبحوث الحوسبة وأيضا أداة توليد الكتابة الصوتية.

الكلمة	معجم معهد قطر	المعجم المبني على المقطع	المعجم المبني على الفونيم
السلام	A s a l A m	Qas sa laa^ mu	Q a s s a l aa^ m u
	A s a l A m a		
	A s a l A m i		
	A s a l A m u		
عليكم	E a l a y k u m	Ea lay^ kum	E a l a^ y k u m
أعزاءنا	G a E i z A G a n A	Qa Eiz zaa^ Qa naa	Q a E l z z aa^ Q a n aa
	G a E i z A G i n A		
	G a E i z A G u n A		
المشاهدين	A l m u $ A h i d i y n	Qal mu $aa hi diin^	Q a l m u $ aa h i d ii^ n
	A l m u $ A h i d i y n a		

جدول ٤ أداء نظام التعرف الآلي على الكلام باستخدام مستويات مختلفة من الكتابة الصوتية

وصف نظام التعرف على الكلام	نسبة الدقة
النظام الأساسي (دون تضمين للنبر)	%٨٦.٦
تضمين علامة النبر لكل المقاطع المنبورة في النص الكتابي	**%٩٢.٢**
تضمين علامة النبر للحركات المنبورة فقط في النص الكتابي	%٩٠.١

الخلاصة

قدَّم البحث وصفا لأداة مطورة تعمل على توليد كتابة صوتية دقيقة للنصوص، شاملة بعض المعلومات فوق–القطعية (النبر تحديدا). هذه الأداة مهمة من ناحيتين: الأولى أنها تغني عن المعاجم الصوتية التي يصعب توافرها للغةٍ غنيةٍ اشتقاقيًّا كاللغة العربية، وهذه المعاجم الصوتية تعد أساسية لبناء مختلف الأنظمة الآلية التي تعمل على معالجة النصوص العربية؛ والأخرى أنها تُحسِّن من أداء نظام التعرف الآلي على الكلام العربي وتعزز من قوته.

قدم البحث أيضا تقييمًا موسعًا لأداء عدد من أنظمة التعرف الآلي التي بُنِيت باستخدام مصادر لغوية مختلفة، وذلك بغرض اختبار فاعليتها ومقارنتها، وقد كان الهدف الأول من التقييم التأكد من فاعلية تضمين الأداة التي طوَّرناها في نظام التعرُّف الآلي، أما الهدف الثاني من التقييم فكان يتركز على التحقق من أفضل أسلوب يمكن اتباعه في توظيف الكتابة الصوتية الدقيقة، وقد وُظِّفت الكتابة الصوتية باستخدام أسلوبين مختلفين؛ الأول مبني على أساس مقطعي ويضم علامة مميزة لجميع المقاطع المنبورة في الكلام، أما الآخر فمبني على أساسي فونيمي ويضم علامة مميزة لكل حركة منبورة في الكلام.

توصلت الدراسة إلى وجود تحسُّن ملحوظ عند استخدام أداة توليد الكتابة الصوتية مقارنةً بالاستخدام القياسي للمعاجم الصوتية، كما وجدت أن بناء نظام تعرُّف آلي قائم على المقطع الصوتي كوحدة أساسية في التعرف، مع شمول علامات مميزة للمقاطع المنبورة، يؤدي إلى تفوق واضح مقارنة بالمعاجم القياسية ومقارنة باستخدام الفونيمات كوحدات لغوية أيضا. والنتائج، التي توصل إليها البحث، مهمة في تطوير مختلف تطبيقات المعالجة الآلية للكلام العربي؛ كتوليد الكلام، وتوظيف الحاسب في تعلم اللغة، وأنظمة التعرف الآلي على المشاعر.

هوامش البحث

(١) علم اللغة العام، الأصوات، كمال بشر، مؤسسة المعارف للطباعة والنشر، مصر، القاهرة، ١٩٨٠، ص ٢١٠

(٢) Arabic text to speech synthesis using Quran-based natural language processing module, Alsharif, B., Tahboub, R. and Arafeh, L., Journal of Theoretical and Applied Information Technology, ٢٠١٦, p.١٤٨.

(٣) Human Language Technology. Challenges for Computer Science and Linguistics, Vetulani, Z., Mariani, J. and Kubis, M., Springer, ٢٠١١.

(٤) Modern Arabic: Structures, functions, and varieties, Holes, C.,Georgetown University Press, ٢٠٠٤.

(٥) Improved Arabic speech recognition system through the automatic generation of fine-grained phonetic transcriptions, Alsharhan, E. and Ramsay, A., Information Processing & Management, ٢٠١٩.

(٦) Emotional speech recognition: A multilingual perspective, Meftah, A., Alotaibi, Y. and Selouani, S.A., In ٢٠١٦ International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART), ٢٠١٦, (pp. ١-٤).

(٧) Analysis of emotion recognition system for Telugu using prosodic and formant features Mannepalli, K., Sastry, P.N. and Suman, M., In Speech and Language Processing for Human-Machine Communications, ٢٠١٨. (pp. ١٣٧-١٤٤).

(٨) Prosodic features and formant modeling for an ivector-based language recognition system, Martinez, D., Lleida, E., Ortega, A. and Miguel, A., In ٢٠١٣ IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing, ٢٠١٣, (pp. ٦٨٤٧-٦٨٥١).

(٩) Automatic language identification for Berber and Arabic languages using prosodic features, Lounnas, K., Demri, L., Falek, L. and Teffahi, H., In ٢٠١٨ International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, ٢٠١٨, (pp. ١-٤).

(١٠) Robust feature extraction based on spectral and prosodic features for classical Arabic accents recognition, Ibrahim, N.J., Idris, M.Y.I., Yakub, M., Yusoff, Z.M., Rahman, N.N.A. and Dien, M.I., Malaysian Journal of Computer Science, ٢٠١٩, pp.٤٦-٧٢.

(١١) Prosodic Features and Formant Contribution for Arabic Speech Recognition in Noisy Environments, Amrous, A.I., Debyeche, M. and Amrouche, A., In Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, ٦th International Conference SOCO, ٢٠١١ (pp. ٤٦٥-٤٧٤).

(١٢) Constructing accurate and robust HMM/GMM models for an Arabic speech recognition system Khelifa, M.O., Elhadj, Y.M., Abdellah, Y. and Belkasmi, M.,. International Journal of Speech Technology, ٢٠١٧, pp.٩٣٧-٩٤٩.

(١٣) المصطلح اللساني وتحديث العروض، سعد مصلوح، مجلة فصول، العدد ٤، مصر، القاهرة، ١٩٨٦، ص١٩١.

(١٤) مقدمة في اللغويات المعاصرة، شحدة فارع وآخرون، دار وائل للطباعة والنشر والتوزيع، الأردن، عمان، ٢٠٠٣، ص ٩٥، وانظر كذلك الأصوات اللغوية لإبراهيم أنيس، مكتبة نهضة مصر، مصر، القاهرة، الطبعة الخامسة، ١٩٧٥، ص١٧٣ واللغة العربية معناها ومبناها، تمام حسان، دار الثقافة، المغرب، الدار البيضاء، ١٩٩٤، ص١٧٣.

(١٥) علم الأصوات، برتيل مالبرج، تعريب ودراسة الدكتور عبدالصبور شاهين، القاهرة، مكتبة الشباب.

(١٦) فقه اللغات السامية، كارل بروكلمان، ترجمة الدكتور رمضان عبدالتواب، جامعة الرياض، المملكة العربية السعودية، ١٩٧٧ ص ٤٥.

(١٧) الأصوات اللغوية، إبراهيم أنيس، ص١٧٣

(١٨) مناهج البحث في اللغة، تمام حسان، ، مكتبة الأنجلو المصرية، مصر، القاهرة، ص١٦٠، واللغة العربية معناها ومبناها، تمام حسان، ص١٧٠

(١٩) القراءات القرآنية في ضوء علم اللغة الحديث، عبدالصبور شاهين، مكتبة الخانجي، القاهرة، ط٣، ٢٠٠٧، ص ٣٠٨

(٢٠) المدخل إلى علم اللغة ومناهج البحث اللغوي، رمضان عبدالتواب، مكتبة الخانجي، مصر، القاهرة، الطبعة الثالثة، ١٩٩٧، ص١٠٣، والتطور اللغوي مظاهره وعلله وقوانينه، رمضان عبدالتواب، مكتبة الخانجي، مصر، القاهرة، ١٩٩٠، ص٨٧.

(٢١) دراسة الصوت اللغوي، أحمد مختار عمر، عالم الكتب، مصر، القاهرة، ١٩٩٧، ص٣٠٨.

(٢٢) *Arabic: A linguistic introduction*, Ryding, K.C., Cambridge University Press, ٢٠١٤.

(٢٣) Madamira: A fast, comprehensive tool for morphological analysis and disambiguation of Arabic, Pasha, A., Al-Badrashiny, M., Diab, M.T., El Kholy, A., Eskander, R., Habash, N., Pooleery, M., Rambow, O. and Roth, R., In *LREC* (Vol. ٠op١٤, No. ٢٠١٤, pp. ١٠٩٤-١١٠١).

(٢٤) https://alt.qcri.org/resources/msa-dictionary/

(٢٥) Syllable-based automatic Arabic speech recognition. In *Proceedings of WSEAS International conference of Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA'٠٨),* Azmi, M.M., Tolba, H., Mahdy, S. and Fashal, M., ٢٠٠٨, (pp. ٢٤٦-٢٥٠).

(٢٦) الأصوات، محمد علي الخولي، دار الفلاح للنشر والتوزيع، الكويت، ١٩٩٨، ص١٦٩.

(٢٧) Spoken Arabic dialect identification using phonotactic modelling, Biadsy, F., Hirschberg, J. and Habash, N., In *Proceedings of the EACL ٢٠٠٩ workshop on computational approaches to Semitic languages,* ٢٠٠٩, (pp. ٥٣-٦١).

(٢٨) Stress, duration, and intonation in Arabic word-level prosody, De Jong, K. and Zawaydeh, B.A., *Journal of Phonetics*, ٢٧(١), ١٩٩٩, pp.٣-٢٢.

* *

قائمة المراجع العربية:

- إبراهيم أنيس، الأصوات اللغوية، مكتبة نهضة مصر، مصر، القاهرة، الطبعة الخامسة، ١٩٧٥.
- أحمد مختار عمر، دراسة الصوت اللغوي، عالم الكتب، مصر، القاهرة، ١٩٩٧.
- برتيل مالبرج، علم الأصوات، تعريب ودراسة الدكتور عبدالصبور شاهين، مصر، القاهرة، مكتبة الشباب، ١٩٨٤.
- تمام حسان، اللغة العربية معناها ومبناها، دار الثقافة، المغرب، الدار البيضاء، ١٩٩٤.
- تمام حسان، مناهج البحث في اللغة، مكتبة الأنجلو المصرية، مصر، القاهرة، ١٩٩٠.
- رمضان عبدالتواب، التطور اللغوي مظاهره وعلله وقوانينه، مكتبة الخانجي، مصر، القاهرة، ١٩٩٠.
- رمضان عبدالتواب، المدخل إلى علم اللغة ومناهج البحث اللغوي، مكتبة الخانجي، مصر، القاهرة، الطبعة الثالثة، ١٩٩٧.
- سعد مصلوح، المصطلح اللساني وتحديث العروض، مجلة فصول، العدد ٤، مصر، القاهرة، ١٩٨٦.
- شحدة فارع وموسى عمايرة وجهاد حمدان، مقدمة في اللغويات المعاصرة، دار وائل للطباعة والنشر والتوزيع، الأردن، عمان، ٢٠٠٣.
- عبدالصبور شاهين، القراءات القرآنية في ضوء علم اللغة الحديث، مكتبة الخانجي، مصر، القاهرة، الطبعة الثالثة، ٢٠٠٧.
- كارل بروكلمان، فقه اللغات السامية، ترجمه من الألمانية الدكتور رمضان عبدالتواب، جامعة الرياض، المملكة العربية السعودية، ١٩٧٧.

- كمال بشر، علم اللغة العام، مؤسسة المعارف للطباعة والنشر، مصر، القاهرة، ١٩٨٠.

- محمد علي الخولي، الأصوات، دار الفلاح للنشر والتوزيع، الكويت، ١٩٩٨.

قائمة المراجع الأجنبية

- Alsharhan, E. and Ramsay, A., Improved Arabic speech recognition system through the automatic generation of fine-grained phonetic transcriptions. *Information Processing & Management*, ٥٦(٢), ٢٠١٩, pp.٣٤٣-٣٥٣.

- Alsharif, B., Tahboub, R. and Arafeh, L., Arabic text to speech synthesis using Quran-based natural language processing module. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, ٨٢(١), ٢٠١٦, p.١٤٨.

- Azmi, M.M., Tolba, H., Mahdy, S. and Fashal, M., Syllable-based automatic Arabic speech recognition. In *Proceedings of WSEAS International conference of Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA'٠٨),* ٢٠٠٨, (pp. ٢٤٦-٢٥٠).

- Amrous, A.I., Debyeche, M. and Amrouche, A., Prosodic Features and Formant Contribution for Arabic Speech Recognition in Noisy Environments. In *Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, ٦th International Conference SOCO ٢٠١١* (pp. ٤٦٥-٤٧٤). Springer, Berlin, Heidelberg.

- Biadsy, F., Hirschberg, J. and Habash, N., March. Spoken Arabic dialect identification using phonotactic modeling. In *Proceedings of the EACL ٢٠٠٩ workshop on computational approaches to Semitic languages,* ., ٢٠٠٩, (pp. ٥٣-٦١).

- De Jong, K. and Zawaydeh, B.A., Stress, duration, and intonation in Arabic word-level prosody. *Journal of Phonetics*, ٢٧(١), ١٩٩٩, pp.٣-٢٢.

- Holes, C., *Modern Arabic: Structures, functions, and varieties*. Georgetown University Press, ٢٠٠٤.

- Ibrahim, N.J., Idris, M.Y.I., Yakub, M., Yusoff, Z.M., Rahman, N.N.A. and Dien, M.I., Robust feature extraction based on spectral and

prosodic features for classical Arabic accents recognition. *Malaysian Journal of Computer Science*, ٢٠١٩, pp.٤٦-٧٢.

- Khelifa, M.O., Elhadj, Y.M., Abdellah, Y. and Belkasmi, M., Constructing accurate and robust HMM/GMM models for an Arabic speech recognition system. *International Journal of Speech Technology*, ٢٠(٤), ٢٠١٧, pp.٩٣٧-٩٤٩.

- Lounnas, K., Demri, L., Falek, L. and Teffahi, H., October. automatic language identification for berber and arabic languages using prosodic features. In ٢٠١٨ *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM),* ٢٠١٨, (pp. ١-٤). IEEE.

- Mannepalli, K., Sastry, P.N. and Suman, M., Analysis of emotion recognition system for Telugu using prosodic and formant features. In *Speech and Language Processing for Human-Machine Communications,* Springer, Singapore, ٢٠١٨, (pp. ١٣٧-١٤٤).

- Martinez, D., Lleida, E., Ortega, A. and Miguel, A., Prosodic features and formant modeling for an ivector-based language recognition system. In ٢٠١٣ *ieee international conference on acoustics, speech and signal processing,* ٢٠١٣, (pp. ٦٨٤٧-٦٨٥١).

- Meftah, A., Alotaibi, Y. and Selouani, S.A., Emotional speech recognition: A multilingual perspective. In ٢٠١٦ *International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART),* ٢٠١٦, (pp. ١-٤).

- Ryding, K.C., *Arabic: A linguistic introduction*. Cambridge University Press, ٢٠١٤.

- Vetulani, Z., Mariani, J. and Kubis, M. eds., *Human Language Technology. Challenges for Computer Science and Linguistics*. Springer, ٢٠١١.

* * *