مركز النشر العلمي والترجمة
جامعة القصيم
Center of Scientific Publishing and Translation
Qassim University

مجلة العلوم العربية والإنسانية
Journal of Arabic Sciences & Humanities
مجلة دورية علمية محكمة ربع سنوية

E-ISSN: 1658-9602
www.jahs.qu.edu.sa

18، (2)، ربيع الثاني، 1446
October, 2024

استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية لتدريب الآلة على تعلم القوانين الفونولوجية العربية

Using Neural Networks for Learning Arabic Morphophonological Rules

يحيى بن علي آل مريع عسيري

قسم اللغة العربية وآدابها، كلية الآداب والعلوم الإنسانية، جامعة الملك خالد، أبها، المملكة العربية السعودية

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى معرفة مدى قدرة نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (Neural Networks)، وتحديدًا النماذج المتسلسلة (Seq2seq models)، على إدراك التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الفعل الأصلية عند اتصاله باللواصق التصريفية، وقد ركزتْ هذه الدراسة على أربع ظواهر صوتية محكومة بقوانين الفونولوجيا العربية، وهي: حذف حركة فاء الفعل، وحذف المقطع الأول من الفعل، وإبدال حركة اللاصقة/السابقة، وإبدال حركة عين الفعل الثلاثي المزيد كسرة. وتكشف نتائج هذه الدراسة عن قدرة هذه النماذج على تعلم القواعد الفونولوجية لتلك التغيرات الصوتية والتعرف على السياقات المقيدة لكل قاعدة منها؛ فقد حقق النموذج المستخدم دقة عالية عند اختباره على بيانات جديدة لم يسبق أن تعرف عليها أثناء عملية التدريب. وهذه النتيجة تبين لنا قدرة النماذج المتسلسلة على تعلم القواعد الفونولوجية وتعميمها رغم اختلاف السياقات وتعقد نظام الفعل العربي، وهو ما يؤكد ما توصلتْ إليه دراسات سابقة على لغات أخرى من نتائج تبين قدرة هذه النماذج على تعلم القوانين اللغوية الصرفية والصوتية.

الكلمات المفتاحية: التغيرات الصوتية، القوانين الفونولوجية، الفعل العربي، الشبكات العصبية، نماذج المتسلسلات.

Abstract

This study aims to investigate the extent to which artificial neural network models, specifically sequence-to-sequence (Seq2seq) models, can recognize Arabic morphophonological changes that occur to the lemma. The study focuses on four phonetic changes governed by the rules of Arabic verbal phonology. The results of this study reveal the ability of these models to learn phonological rules and recognize the contexts that constrain them. The model achieves a high accuracy when we test it on new datasets not encountered during the training process. Such results demonstrate the ability of sequence-to-sequence (Seq2seq) models to generalize over the contexts and learn phonological rules, despite the variation and the complexity in Arabic verbal system. This confirms what has been pointed out by previous studies conducted on morphological and phonological phenomena from other languages.

Keywords: phonetic changes, phonological rules, Arabic verb, neural networks, sequence models.

الإحالة APA Citation:

عسيري، يحيى. (2024). استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية لتدريب الآلة على تعلم القوانين الفونولوجية العربية. *مجلة العلوم العربية والإنسانية*، *18*، (2)، 08-20.

اسْتُلم في: 08-10-1445/ قُبل في 03-11-1445/نُشر في 27-04-1446

Received on: 17-04-2024/**Accepted on:** 10-05-2024/**Published on:** 30-10-2024

CC BY NC

1. مقدمة

لقد تطورت أدوات معالجة اللغات الطبيعية (NLP) تطورًا كبيرًا بتطور خوارزميات تعلم الآلة، وتحديدًا نماذج التعلم العميق المبنية على مفهوم الشبكات العصية (Neural networks)، فقد اتسمت تلك النماذج بقدرتها على تحقيق درجة عالية من الدقة في مخرجاتها في كثير من التطبيقات مقارنة بغيرها من طرق التعلم التقليدية، ومن ذلك ما حققته على صعيد الترجمة الآلية والتوليد الصرفي للكلمات وغيرها من التطبيقات. ومن أشهر تلك النماذج نماذجُ الشبكات العصبية المعروفة بنماذج المتسلسلات (Sequence-to-Sequence models)، وهي إحدى النماذج العصبية التكرارية (RNNs) المختصة بمهمات التنبؤ بمخرجات أي متسلسلة نصية يتم تدريبها عليها. وأوضح مثال لتلك التطبيقات التي تستخدم فيها هذه النماذج تطبيقاتُ الترجمة الآلية حيث تتعامل هذه النماذج مع العنصر المدخل، أي الجملة المراد ترجمتها، بوصفها مُدخلا يتكون من سلسلة من العناصر (أي الكلمات)، ومهمة هذه النماذج التنبؤ بالسلسلة المقابلة التي تمثل سلسلة الكلمات المكونة للجملة في اللغة الهدف. وقياسا على الترجمة الآلية، استُثمرتْ هذه التقنية الفعالة في عملية توليد تصريفات الكلمة من الوحدة المعجمية ومن المعلومات الصرفية المصاحبة لها، وذلك على اعتبار أوجه الشبه بين هذه العملية وعملية الترجمة حيث إن مُدخل أي عملية منهما، الذي يمثل سلسلة من العناصر (الكلمات أو الأصوات/الحروف)، يتولد عنه، باستخدام تلك الخوارزميات، مُخْرَجٌ هو الآخر يتكون من سلسلة من العناصر سواء أكانت كلمات أم حروف (Klein et al., 2018; Kodner et al., 2022).

والمشكلة التي تسعى هذه الدراسة إلى مقاربتها هي مشكلة التغيرات الصوتية الفونولوجية التي تطرأ على بنية الكلمة العربية عند اتصالها باللواصق التصريفية، وتحديدًا بنية الفعل العربي. والهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو استكشاف قدرة نماذج المتسلسلات (Sequence-to-Sequence models)، والمعروفة اختصارًا بـ(seq2seq models)، على معرفة القوانين الفونولوجية التي تحكم هذه التغيرات الصوتية ومن ثم توليد الشكل الصوتي الصحيح للكلمة. وإذا كانت الدراسات الحاسوبية المعنية بحوسبة العربية قد أولتْ عناية كبيرة للمعالجة الصرفية سواء على مستوى التحليل الصرفي بما يشتمل عليه من تحديدٍ للأصل المعجمي (Lemmatization) وتحديد/تقطيع للواصق (Morphotactics) وربطها بمعانيها الصرفية، فإنّ مشكلة التوليد الصرفي، وما يصاحب ذلك من تغيرات صوتية محكومة بقوانين الفونولوجيا العربية، لم تلق عناية كبيرة كما سنرى في مبحث الدراسات السابقة. ومن هنا تأتي أهمية هذه الدراسة في محاولتها الكشف عن مدى قدرة نماذج الشبكات العصبية المشار إليها آنفا على إدراك التغيرات الصوتية التي تحدث للأصل المعجمي أثناء عملية التصريف، وهذا الهدف يأتي في سياق هدفٍ عامٍ مرتبط بالسؤال عن إمكانية الاستفادة من الشبكات العصبية الاصطناعية (Neural Networks)، وتحديدًا النماذج المتسلسلة (seq2seq models)، في تدريب الآلة على معرفة التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الكلمة العربية بشكل عام أثناء عملية تصريف الكلمة.

وقد اقتضتْ طبيعية هذه الدراسة أن تبدأ بشرحٍ مفصلٍ لطبيعة المشكلة التي تقاربها، وهو ما نجده في المبحث (2)، ويأتي بعده المبحث (3) ليقدم ملخصًا لما توصلت إليه الدراسات السابقة فيما يتعلق بالمشكلة التي تقاربها هذه الدراسة. أما المنهجية المتبعة في هذه الدراسة فقد خُصص لها المبحثُ (4)، وفيه تفصيل للإجراءات التي اتبعتها هذه الدراسة والتي تتمثل في إعدادِ البيانات وتهيئتها وفقا لمتطلبات هذه الدراسة، وبناءِ النموذج الحاسوبي المناسب وتدريبِه على البيانات المعدة مسبقا، وأخيرًا اختبار وتقييم قدرة هذا النموذج على توليد البنية السطحية للكلمة بشكل يتفق مع القوانين الفونولوجية المقيدة للسياقات.

2. مشكلة الدراسة

لتوضيح المشكلة التي تقاربها هذه الدراسة ننطلق من حقيقة لسانية هي أن تصريف الكلمة العربية يؤثر على بنيتها المعجمية الأصلية، حيث تعتريها بعضُ التغيرات الصوتية المحكومة بقوانين الفونولوجيا العربية، وذلك إما بحذف صوتٍ أو أكثر من أصوات الكلمة أو إبدال أحد أصواتها بصوت آخر أو إضافة صوت أو أكثر، لغرض صوتي خالص، إلى بنيتها المنطوقة. ولو أخذنا كلمتي " **وَعَدَ**" و " **وَصَلَ**" مثالين على ذلك، فإن استعمال هاتين الكلمتين في سياق التعبير عن الزمن المضارع يقتضي حذف المقطع الأول من الكلمة، أي حذف فاء الفعل وحركتها لتصبح الكلمة " يَعِد– نَعِد– تَعِد... يَصَل–نَصِلُ– تَصِلُ"، وبمفاهيم النظرية الفنولوجية التوليدية يمكن القول إن الكلمة لها بنيتان: بنية عميقة (deep structure)، وهي في هذا المثال الأصل المعجمي " وَعَدَ/وَصَلَ"، وأخرى سطحية أو ظاهرة (surface structure)، وهي الكلمة بعد إضافة اللواصق التصريفية لها، وهي في مثالنا " يَعِد/ نَعِد ... يَصِل–نَصِلُ "، وأحيانا تسمى هاتان البنيتان بالشكل الأصلي والشكل الظاهر، فالشكل الأصلي يمثل الأصل المعجمي أو الوضع الافتراضي الذي تكون عليه الكلمة قبل النطق، والشكل السطحي هو الشكل الذي تكون عليه الكلمة أثناء النطق. وترى هذه النظرية أن هذه التغيرات التي تطرأ على البنية العميقة/ الشكل الأصلي للكلمة إنما هي محكومة بقوانين صوتية تختلف من لغة إلى أخرى، وعلى هذا الأساس يمكن القول بأن النظام الصوتي لأي لغة من اللغات البشرية، وفقًا لهذه النظرية، يتكون من عدد نهائي من الوحدات الصوتية (phonemes) وعدد نهائي من القوانين الصوتية السياقية (phonotactics)، والمتكلم الأصلي للغة ما يمتلك ضمن معرفته اللغوية المعرفةَ بهذه القوانين الصوتية التي يمكن أن نسميها هنا بالنظام الصوتي.

ولو دققنا في المثال السابق للاحظنا: 1) اطراد حذف المقطع الأول من الفعل الثلاثي حينما تكون فاؤه واوًا، و 2)أن هذا التغير الصوتي محكوم بسياق محدد وهو عند اتصاله بحروف المضارعة، و 3) أن هذا التغير حدث للبنية السطحية المنطوقة. وهذا المثال ليس إلا مثالا واحدًا على عملية/ظاهرة فونولوجية واحدة، وهي ظاهرة الحذف، وهناك الكثير من العمليات الفونولوجية الأخرى التي تعتري البنية الصوتية للكلمة العربية أثناء عمليات التصريف كعملية القلب

والإضافة والمماثلة، وغيرها. والجدول [1] يقدم أمثلة لبعض تلك العمليات الفونولوجية التي تحدث لبنية الفعل أثناء عملية التصريف.

جدول 1

أمثلة لبعض العمليات الفونولوجية التي تحدث لبنية الفعل أثناء عملية التصريف.

الأصل المعجمي	البنية العميقة	البنية السطحية/ الشكل المنطوق	التغير الصوتي/ العملية الفونولوجية	نوع الظاهرة العامة
كَتَبَ	يَكْتَبَ	يكْتُبُ	حذف حركة الفاء	حذف حركة قصيرة
قامَ	يَقامَ	يَقومُ	قلب الألف واوًا	قلب حرف علة
وَعَدَ	يَوَعَدَ	يَعِدُ	حذف فاء الكلمة مع حركتها	حذف مقطع من أول الكلمة
أكْرَمَ	يَأكْرَمَ	يُكْرِمُ	حذف فاء الكلمة مع حركتها	حذف مقطع من أول الكلمة
أكْرَمَ	يَكْرِمَ	يُكْرِمُ	قلب حركة الياء ضمة	قلب حركة قصيرة إلى حركة قصيرة
وَصَلَ	يَصَلَ	يَصِل	قلب فتحة العين كسرة	قلب حركة قصيرة إلى حركة قصيرة

والمشكلة التي تسعى هذه الدراسة إلى مقاربتها تتموضع في سياق المعالجة اللسانية الحاسوبية التي تسعى إلى تطوير خوارزميات تقوم بتوليد/ تصريف الكلمة بطريقة تشبه طريقة الإنسان، بحيث يصاحب هذا التوليد معرفة بالتغيرات الصوتية التي تحدث للبنية الأصلية للكلمة العربية عند اتصالها باللواصق التصريفية أو الاشتقاقية. ولا شك أن الدراسات الحاسوبية المعنية بحوسبة العربية قد أولت عناية كبيرة للمعالجة الصرفية على مستوى التحليل الصرفي بما في ذلك تحديد الأصل المعجمي وتحديد اللواصق وبصور أقل على مستوى التوليد الصرفي الذي يسعى إلى توليد تصريفات الكلمة من الأصل المعجمي عند توفر معطيات عملية التصريف المرادة، ولكن نتائج توليد تصريفات الكلمة بطريقة آلية ما يزال يواجه صعوبة في تطبيق القوانين الفونولوجية التي تصاحب تلك العمليات التصريفية (Khalifa et al., 2022)، كتلك التغيرات المشار إليها في الجدول [1]، وجزء من المشكلة يعود إلى كثرة القوانين الفونولوجية التي تحكم بنية الكلمة العربية، وهي كثرة ناتجة عن الغنى الصرفي الذي تتسم به العربية مقارنة بغيرها من اللغات. والسؤال الذي تطرحه هذه الدراسة هو: كيف يمكن الاستفادة من الشبكات العصبية الاصطناعية (Neural Networks)، وتحديد النماذج المتسلسلة (seq2seq models)، في تدريب الآلة على معرفة تلك التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الفعل الثلاثي أثناء عملية التصريف؟ وهو سؤال لم يلق عناية كبيرة من الباحثين، كما سنرى في مبحث الدراسات السابقة، ورغبة في تحديد مجال البحث فقد اقتصرتْ هذه الدراسة على بعض التغيرات الصوتية التي تحدث لبنية الفعل، وتحديدًا اختبار قدرة الآلة على التنبؤ بالظواهر الصوتية الموضحة في الجدول الآتي:

جدول 2

العمليات الفونولوجية الأربع التي تمثل مشكلة الدراسة.

	التغير الصوتي	السياق الذي يحكمه		مثال
		الوزن الأصلي	الفعل بعد التصريف	
1	حذف حركة فاء الفعل المجرد	**فَعَلَ**	**يفْعَُِل**	ذَهَبَ –يَذْهَبُ كَسَرَ– يَكْسِرُ نَقَلَ– يَنْقُلُ
		فَعِلَ	**يفْعَِِل**	فَرِحَ– يفْرَحُ حَسِبَ – يَحْسِبُ
		فَعُلَ	**يفْعُل**	كَرُمَ – يَكْرُمُ
2	حذف المقطع الأول من الكلمة	**فَعَلَ**	**يَعِلُ**	وَصَلَ–يَصِلُ
		أَفْعَلَ	**يُفْعِلُ**	أَسْلَمَ–يُسْلِمُ
		انْفَعَلَ	**يَنْفَعِلُ**	انْكَسَرَ–يَنْكَسِرُ
		افْتَعَلَ	**يَفْتَعِلُ**	اقْتَرَبَ–يَقْتَرِبُ
		اسْتَفْعَلَ	**يَسْتَفْعِلُ**	اسْتَخْرَجَ– يَسْتَخْرِجُ
3	إبدال حركة اللاصقة/السابقة (حركة حرف المضارعة) ضمة	**أَفْعَلَ**	**يُفْعِلُ**	أَكْرَمَ–يُكْرِمُ
		فاعَلَ	**يُفاعِلُ**	شارَكَ–يُشارِكُ
		فَعَّلَ	**يُفَعِّلُ**	سَلَّمَ–يُسَلِّمُ
4	إبدال حركة عين الفعل الثلاثي المزيد كسرة	**أَفْعَلَ**	**يُفْعِلُ**	أَقْبَلَ–يُقْبِلُ
		انْفَعَلَ	**يَنْفَعِلُ**	انْهَزَمَ–يَنْهَزِمُ
		افْتَعَلَ	**يَفْتَعِلُ**	اقْتَصَدَ–يَقْتَصِدُ
		اسْتَفْعَلَ	**يَسْتَفْعِلُ**	اسْتَعْلَمَ–يَسْتَعْلِم
		فاعَلَ	**يُفاعِلُ**	ناوَلَ–يُناوِلُ

وانطلاقا من هذا التوصيف للمشكلة، فإن هذه الدراسة سوف تقوم باستخدام النماذج المتسلسلة (seq2seq models) لتدريب الآلة على التعرف على هذه الظواهر الصوتية ثم اختبار قدرتها على معرفة ذلك من خلال تقييم أدائها على بيانات جديدة، ومساهمة هذه الدراسة تأتي في سياق المحاولات التي تسعى إلى التغلب على المشاكل التي تواجه

حوسبة العربية على المستوى الصوتي–الصرفي، وذلك بتطوير خوارزميات قادرة على إدراك القوانين الفونولوجية الخاصة ببنية الكلمة العربية المتمثلة في القوانين الصرفية–الصوتية (morphophonological rules).

3. الدراسات السابقة

سبقت الإشارة في موطن سابق إلى أن الشبكات العصبية، وتحديدًا تلك النماذج التي سميناها بنماذج المتسلسلات (seq2seq models)، استُخدمتْ في الترجمة الآلية بشكل فعّال حيث حققت نجاحات باهرة في هذه الصدد (Klein et al., 2018)، وللتشابه الحاصل بين الترجمة الآلية وتصريف الكلمة في الخاصية الخطية التسلسلية التي تتسم بها بنية الجملة وبنية الكلمة على حد سواء، استُخدِمتْ تلك النماذج على مستوى بنية الكلمة متخذةً من الصوت/الحرف الذي تقوم عليه سلسلة الأصوات المكونة لبنية الكلمة وحدةً تقابل الكلمة التي تعد عنصرًا في سلسلة الكلمات المكونة للجملة (Khalifa et al., 2022; Wu et al., 2021)، وانطلاقا من هذا، وُظِّفتْ نماذجُ الشبكات العصبية في عمليات تعلم التصريف (Cotterell et al., 2017; Kodner et al., 2022)، أي تعلم عملية توليد الكلمة من الأصل المعجمي ومن المعلومات الصرفية المناسبة كمعلومات الزمن/الجهة، بالنسبة للفعل، والشخص والعدد والجنس.. إلخ.

إلا أن السؤال الذي بقي يلح على المتخصصين هو السؤال عن قدرة الآلة على تعلم القوانين اللغوية المصاحبة لعملية التصريف ومنها القوانين الفونولوجية التي تحكم التغيرات الصوتية التي تطرأ على أصل الكلمة أثناء هذه العملية (Muradoğlu & Hulden, 2023; Q & Z, 2021). وإجابة عن هذا السؤال كشفتْ إحدى الدراسات عن قدرة الآلة على تعلم بعض الظاهر الصوتية أثناء عملية تصريف الاسم في اللغة الفنلندية (Q & Z, 2021) ، وفي دراسات أخرى، استُخدِمتْ نماذجُ (seq2seq) في محاولة لنمذجة بعض الظواهر الفونولوجية في عدة لغات (Azim et al., 2023; Mirea & Bicknell, 2020; Prickett, 2021; M. P. Silfverberg et al., 2018)، وقد كشفتْ دراسة أخرى عن مدى قدرة الشبكات العصبية التكرارية (RNNs) على تعلم تناغم أصوات العلة في اللغة التركية (Rodd, 1997)، حيث أثبتت هذه الدراسة قدرة هذه الخوارزميات على تعلم هذه الظاهرة الصوتية عند توفر البيانات الكافية، وفي هذا السياق أُجريتْ عدة اختبارات على عدد من اللغات، ليس من بينها العربية، لمعرفة مدى قدرة هذه النماذج على إدراك التغيرات الصوتية الفونولوجية التي تحدث لبنية الكلمة كالتضعيف والحذف والإضافة وغيرها من الظواهر الفونولوجية (Beguš, 2021; Haley & Wilson, 2021; Kolachina & Magyar, 2019; Mirea & Bicknell, n.d.; Muradoˇ & Hulden, n.d.; M. Silfverberg et al., n.d.; M. P. Silfverberg et al., 2018).

وعلى الصعيد العربي نجد اختبار قدرة هذه النماذج قد تركز على اختبار قدرتها على تعلم التصريف ضمن مشاريع شملت عددًا كبيرا من اللغات من بينها العربية (Cotterell et al., 2017; Kodner et al., 2022)، أما على المستوى الصوتي الفونولوجي، فلا نجد، في حدود معرفتنا، سوى دراسة (Khalifa et al., 2022) التي ركزتْ على استخدام الشبكات

العصبية في تعلم التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الكلمة في اللهجة المصرية، من هنا تأتي أهمية ومساهمة هذه الدراسة التي بين أيدينا، حيث إنها تهدف إلى تدريب نماذج المتسلسلات (seq2seq models) على إدراك بعض التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الفعل الثلاثي في العربية الفصحى، ومن ثم اختبارها على بيانات جديدة لم يسبق أن تعرّفتْ عليها لتقييم قدرتها على معرفة القوانين الفونولوجية التي تقيد تلك التغيرات.

4. منهج الدراسة/ تصميم التجربة

قلنا في موضع سابق إن هذه الدراسة تهدف إلى استخدام النماذج المتسلسلة (seq2seq models) لتدريب الآلة واختبار قدرتها على معرفة بعض التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الفعل الثلاثي عندما تتصل به اللواصق التصريفية، ولمقاربة هذا الهدف سنتبع منهجية تجريبية تتكون من الخطوات الإجرائية الآتية: 1) إعداد البيانات وتهيئتها وفقا لمتطلبات هذه الدراسة، 2) بناء النموذج الحاسوبي المناسب لهذا الهدف، 3)تدريب هذا النموذج على تلك البيانات المعدة مسبقا، 4) تقييم قدرة هذا النموذج على توليد البنية السطحية للكلمة بصورة تتفق مع القوانين الصوتية المقيدة للسياقات والموضحة سابقا، وذلك باختباره على بيانات جديدة. وفي المباحث الفرعية الآتية تفصيل هذه الخطوات.

1.4. تهيئة البينات وإعدادها

لا شك أن استخدام نماذج (Seq2Seq) لتعلم القواعد الصوتية يتطلب تصميم خوارزميات قادرة على التنبؤ بالتغيرات الصوتية استناداً إلى أزواج الإدخال والإخراج المعدة. وجودة هذا النموذج أو ذاك ستعتمد فيما تعتمد عليه على جودة البيانات التدريبية وتنوعها؛ لذلك أولى الخطوات الإجرائية في هذه التجربة هي توفير البيانات الكافية وإعدادها وفقا لمتطلبات هذه التجربة. وقد سبق أن ذكرنا أنّ هذه الدراسة تقتصر على بنية الفعل العربي لما يتسم به من ثراء صرفي يلازمه تنوع كبير في التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الفعل الأصلية، وهو ما نريد أن نرصده في هذه الدراسة. ولكي يتحقق الهدف المنشود من هذه الدراسة، انطلقنا في عملية تهيئة البيانات من الصيغ الصرفية حيث إنه من المتعارف عليه في كتب الصرف العربي أن التغيرات الصوتية التي تطرأ على الفعل عند تصريفه محكومة إلى حد كبير بنوع الصيغة الأصلية للفعل؛ ولذلك صنفنا البيانات حسب هذا التصنيف الصرفي، وقد ركزنا على الظواهر الصوتية المطردة متجاهلين بعض التغيرات التي تطرأ على بنية الكلمة سواء في الحركات القصيرة كحركة عين الفعل الثلاثي الصحيح في المضارع التي لا يمكن التنبؤ بها، وكذلك قلب عين الفعل الأجوف واوًا أو ياءً، حيث إنّ معرفة القلب إلى واو أو إلى ياء لا يمكن التنبؤ به من الصيغة ولا من الجذر، ومثله قلب الألف في الفعل الناقص إلى واو أو ياء. وإلى جانب ذلك أهملنا بعض الظواهر الصوتية الناتجة عن الإعراب كالظواهر التي تطرأ على الفعل المعتل الآخر في حال الجزم، ومثل ذلك ما يحصل للفعل معتل العين عند جزمه، ولصعوبة التعامل مع تنوع وتعدد الظواهر الصوتية التي تعتري بنية الفعل العربي اكتفينا بالظواهر الصوتية المشار إليها في الجدول [2] أعلاه.

ومن المتعارف عليه بين المختصين في مجال تعلم الآلة أن تدريب الشبكات العصبية يتطلب كميات ضخمة من البيانات؛ لذلك لابد لاختبار قدرة هذه النماذج على معرفة التغيرات الصوتية قيد الدراسة من تدريبها أولا على عدد كبير من الأمثلة لكل تغير من التغيرات الصوتية الموضحة في الجدول [2]. بمعنى لو أردنا أن نختبر قدرة الآلة على التنبؤ بحذف حركة فاء الفعل الثلاثي الصحيح عن اتصاله باللاصقة الدالة على المضارعة، كما هو في الحالة الأولى في الجدول، فإنه يتوجب توفر عدد كبير من الأمثلة (آلاف الأمثلة على الأقل) لهذا الفعل الصحيح قبل اتصال اللاصقة به وبعد اتصالها به مضبوطا بالشكل في كلتا الحالتين، وهو أمر لا يمكن الحصول عليه بسهولة من المدونات المتاحة، فالمدونات المتاحة بين أيدينا ليست مخصصة لهذا الغرض؛ ولذلك فهي لا تحتوي إلا على أمثلة قليلة جدًا وغير كافية لتدريب الآلة على ملاحظة التغيرات الصوتية وربطها بالسياق الذي يحكمها. وهذه المشكلة تنطبق على بقية الظواهر/التغيرات الصوتية الأخرى التي نود اختبارها؛ ولهذا السبب قمنا بتوليد البيانات وفقًا للخطوات الآتية: 1) قمنا بتوليد عدد من الوحدات المعجمية الفعلية باستخدام الصيغ الصرفية والجذور، بحيث ينتج عن ذلك عدد كبير من الأمثلة التي تتفق مع البنية الصرفية للفعل، سواء أكانت هذه المفردة مستعملة أم مهملة ، ثم 2) قمنا بطريقة آلية بتوليد تصريفات الكلمة بإضافة اللواصق التصريفية وتغيير ما يلزم من تغيرات صوتية وفقا للقواعد الموضحة في علم التصريف، ثم 3) قمنا بتصنيف هذه البيانات وفقا للتغيرات الصوتية الموضحة في الجدول السابق، وهو ما نتج عنه أربع مجموعات من البيانات (datasets)، كل مجموعة/ملف يشتمل على بيانات مخصصة لتدريب الآلة على التعرف على تغير صوتي واحد من هذه التغيرات الذي قد يحدث في سياقات مختلفة كما هو موضح في العمودين الثالث والرابع في الجدول [2]. وبهذه الطريقة استطعنا إنشاء مجموعة بيانات تحتوي على أزواج من الكلمات أو السلاسل التي تظهر التغييرات الصوتية التي يمكن ملاحظتها قبل التصريف وبعده، فالعنصر الأول في كل زوج يمثل المدخل (input) والعنصر الثاني يمثل المخرج (output)، وهو ما يمكِّن الآلة من التدرب على ملاحظة التغير الصوتي الذي يطرأ على الكلمة المدخلة/ الفعل الأصلي.

2.4. بناء النموذج

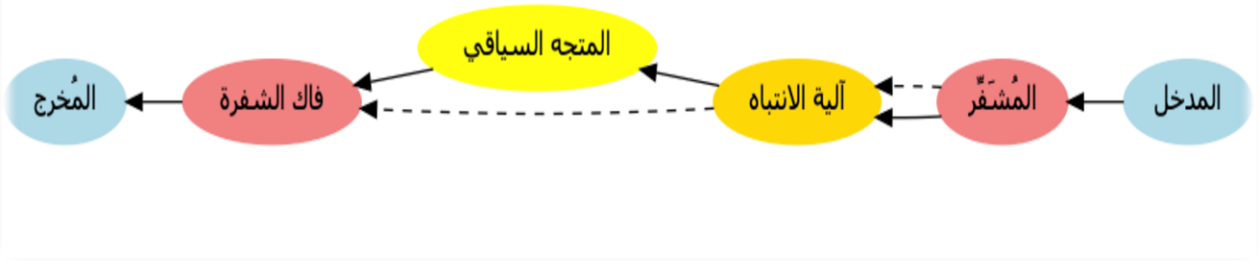
لبناء هذا النموذج استخدمنا خوارزميات النماذج المتسلسلة (seq-2seq model)، لمناسبتها لهذه المهمة، وهي إحدى نماذج التعلم العميق التي تتعامل مع المدخل الواحد (input) كسلسلة من المتواليات (sequence) التي تمثل مجموع العناصر المكونة لتلك السلسلة، وهي في معالجة اللغات الطبيعية إما كلماتُ جملةٍ أو حروفُ/أصواتُ كلمةٍ؛ فتقوم بمعالجتها وتوليد ما يقابل ذلك المدخل، فإذا كان المدخل عبارة عن جملة من لغة ما والمراد توليد جملة مقابلة لها في لغة أخرى، كما هو الحال مع استخدام هذه الخوارزميات في الترجمة الآلية، فإن الجملة المدخلة تتكون من سلسلة من الكلمات المكونة لتلك الجملة، ومن ثم تأتي المخرجات على شكل سلسلة من الكلمات المكونة للجملة المقابلة في اللغة الهدف. وبالطريقة نفسها يمكن التعامل مع المدخلات بوصفها كلمات وليست جملا، وفي هذه الحالة يكون المدخل كلمةً تتكون من

سلسلة من الأصوات أو الأحرف (characters)، وحينئذ يكون الهدفُ توليدَ كلمة مقابلة لتلك الكلمة المدخلة، وذلك كتوليد تصريفات الكلمة من الوحدة المعجمية(lemma).

وهذا النوع من الخوارزميات يتكون من مكونين اثنين: مُشَفِّر(encoder) وفاك للشفرة (decoder)، وهما نوعان من أنواع الشبكات العصبية التكرارية المعروفة بـ(RNN). وأثناء عملية الحوسبة يقوم المشفر(encoder) بمعالجة المدخل (input) بتحويله إلى تمثيل على شكل متجه (Context vector) من الأرقام التي ستصبح مخرجات لهذا المشفر، وهذه المخرجات تصبح مدخلات للمكون الآخر (decoder) الذي يقوم بمعالجة هذه المعلومات وتحويلها إلى متسلسلة من الأصوات /الأحرف المكونة للكلمة المراد توليدها، وهي هنا تصريف الكلمة. وحتى يتم تذكر مكونات السلسلة المدخلة، استخدمنا في هذه المعالجة ما يسمى بآلية الانتباه (attention mechanism)، وهي ما يسمح لهذه الخوارزميات بالتركيز على الأجزاء الأولى من الكلمة المدخلة، وكذلك التركيز على العناصر التي يجب الانتباه لها أكثر. والشكل [1] يوضح باختصار طريقة عمل هذه الخوارزميات.

شكل 1

شرح مبسط لطريقة عمل خوارزميات النماذج المتسلسلة (seq2seq models)



3.4. تدريب النموذج

بعد اختيار النموذج المناسب، تأتي الخطوة الثالثة في هذه التجربة، وهي تدريب النموذج على مجموعة البيانات المعدة مسبقًا على شكل أزواج تتكون من الفعل الأصلي وتصريفه، كما تم شرحه سابقًا، وقد تم الفصل بين البيانات المستخدمة للتدريب والبيانات المستخدمة للاختبار، وتتكون مجموعة البيانات المستخدمة للتدريب من المعلومات الآتية: الوحدة المعجمية الأصلية(lemma) التي يمثلها الفعل الماضي في صيغة المسند إلى الشخص الغائب المفرد المذكر، والوسم الخاص بالعملية الفونولوجية التي ستطرأ على البنية الأصلية، وأخيرًا الكلمة بعد التصريف. والغاية من تدريب النموذج على مجموعة البيانات المعدة مسبقًا هي الحصول على أفضل أداء، ولتلافي إحدى المشكلات الشائعة المصاحبة لخوارزميات تعلم الآلة، وهي حفظ النموذج لجميع التفاصيل (overfitting) دون التركيز على تعلم القوانين العامة، استخدمنا في هذه المرحلة بعض التقنيات التي تساعد على التغلب على هذه المشكلة، منها تدريب هذا النموذج على

عدد كبير من البيانات، ومنها تفعيل آلية التوقف المبكر. والجدول [3] يبين عدد البيانات المستخدمة للتدريب لكل ظاهرة.

جدول 3

عدد الأمثلة التي دربت عليها الآلة لكل ظاهرة صوتية

مجموعة البيانات	التغير الصوتي/ الظاهرة الصوتية	عدد الأمثلة
الأولى (dataset1)	حذف حركة فاء الفعل	4251
الثانية (dataset2)	حذف المقطع الأول من الكلمة	6376
الثالثة (dataset3)	إبدال حركة اللاصقة السابقة ضمة	4172
الرابعة(dataset4)	إبدال حركة عين الفعل الثلاثي المزيد كسرة	6252

4.4. اختبار وتقييم النموذج

لقياس مدى نجاح هذه التجربة وتقييم مدى دقة هذا النموذج في التنبؤ بالشكل الصوتي للكلمة أثناء تصريفها، نستخدم معيار الدقة(accuracy) كأحد المقاييس المعتمدة بين المتخصصين في هذا المجال، ويقيس هذا المعيار مدى تطابق مخرجات هذه النموذج مع الشكل الصوتي الصحيح. من خلال هذا التقييم، نهدف إلى الحصول على نظرة عامة عن كفاءة هذا النموذج في التعرف على القوانين الفونولوجية التي تحكم تلك التغيرات الصوتية التي تعتري أصل الكلمة عند التصريف. وتحسب درجة الدقة عن طريق مقارنة مخرجات النموذج بالبيانات الصحيحة ثم حساب النسبة. والجدول [4] يوضح نسبة الدقة لكل ظاهرة فونولوجية من الظواهر الأربع التي حددناها سابقا.

جدول 4:

نتائج اختبار قدرة النموذج الحاسوبي المستخدم على معرفة القواعد الفونولوجية الأربع.

التغير الصوتي/ الظاهرة الصوتية	عدد أمثلة التدريب	عدد أمثلة الاختبار	الدقة	النسبة
حذف حركة فاء الفعل	4251	850	**0.993**	**%99.3**
حذف المقطع الأول من الكلمة	6376	1275	**1.000**	**%100**
إبدال حركة اللاصقة السابقة ضمة	4172	834	**0.996**	**%99.6**
إبدال حركة عين الفعل المزيد كسرة	6252	1250	**1.000**	**%100**

ويتضح لنا من الجدول [4] أن هذا النموذج قد حقق **99.3%** فيما يتعلق بالظاهرة الأولى (ظاهرة حذف حركة فاء الفعل)، وقد بلغت دقته فيما يتعلق بالظاهرة الثانية (ظاهرة حذف المقطع الأول) **100%**، وكذلك الحال فيما يخص الظاهرة الثالثة (إبدال حركة اللاصقة ضمة)، حيث حقق **99.6%**، بينما بلغت دقته فيما يتعلق بالظاهرة الرابعة (إبدال حركة عين الفعل المزيد كسرة) دقة مقدراها **100%**. ولعل النتيجة الأكثر أهمية هي ما يتعلق بقدرة هذا النموذج على

التعميم (generalization)، بمعنى القدرة على استنباط القاعدة العامة رغم اختلاف السياقات. فهذه النتائج تكشف أن هذا النموذج قد استطاع التعرف على قاعدة حذف حركة الفاء وتطبيقها بشكل فعال رغم اختلاف صيغ الفعل (**يفْعَلُ-يفْعِلُ-يفْعُلُ**) التي تمثل اختلافا في السياق الصوتي للمدخل. ولو أخذنا قاعدة حذف المقطع الأول من الكلمة، للاحظنا أن هذا النموذج قد امتلك القدرة على معرفة هذه القاعدة وتطبيقها مع أن هناك أكثر من سياق/ صيغة صرفية، كما عرفنا من قبل، حيث يحذف المقطع الأول من الوحدات المعجمية التي على وزن **فَعَلَ** وفاؤها واوًا وكذلك الكلمات التي على وزن **أفْعَلَ** وتبدأ بهمزة، ومثل ذلك الكلمات التي على زون **انْفَعَلَ** أو **افْتَعَلَ** أو **اسْتَفْعَلَ**، وهذه سياقات صوتية مختلفة لقاعدة واحدة هي قاعدة حذف المقطع الأول من الكلمة. ويمكن أن يقال الشيء نفسه فيما يتعلق بقاعدة ابدال حركة عين الفعل المزيد كسرة حيث تؤكد النتائج أن هذا النموذج الحاسوبي تمكن من إدراك هذه القاعدة رغم اختلاف السياقات والقيود الصوتية المقيدة لها التي تمثلها الصيغ (**يَنْفَعِلُ- يَفْتَعِلُ-يَسْتَفْعِلُ- يُفاعِلُ- يُفَعِّلُ**). وكذلك يلاحظ من هذه النتائج أن اختلاف السياق الصوتي/ اختلاف الصيغ الصرفية لم يشكل عائقًا أم تعرف هذه النماذج على قاعدة إبدال حركة اللاصقة/السابقة (**يـَ، تـَ، نـَ، أَ**) ضمة مع صيغة (**يُفاعِل- يُفْعِل-يفعِّلُ**). وبصفة عامة، يتبين من نتائج هذه التجربة قدرة خوارزميات الشبكات العصبية المعروفة بالخوارزميات المتسلسلة (seq2seq models) على استنباط القواعد الفونولوجية الأربع والسياقات المقيدة لكل قاعدة منها ومن ثم وتطبيقها بدقة عالية.

5. الخاتمة

سعت هذه الدراسة إلى استكشاف قدرة نماذج (seq2seq models) على معرفة التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الفعل العربي الأصلية عند اتصاله باللواصق التصريفية، وتحديدًا عملية حذف حركة الفاء وحذف المقطع الأول من الكلمة وإبدال حركة اللاصقة ضمة وإبدال حركة العين كسرة، وهي ظواهر صوتية محكومة بقوانين فونولوجية سياقية. وقد كان الهدف الرئيس لهذه الدراسة هو اختبار قدرة هذه النماذج على توليد الشكل الصوتي الصحيح للفعل بعد تصريفه، وهو هدف يندرج تحت سياق أعم يطمح إلى معرفة مدى الاستفادة من الشبكات العصبية الاصطناعية (Neural Networks)، وتحديدًا النماذج المتسلسلة (Seq2seq models)، في تدريب الآلة على إدراك التغيرات الصوتية التي تطرأ على بنية الكلمة العربية أثناء عملية التصريف. ولضيق المساحة التي يسمح بها هذا النوع من الأبحاث اقتصرتْ هذه الدراسة على اختبار قدرة هذه النماذج على أربع ظواهر صوتية تقع لبنية الفعل الثلاثي عند تصريفه، وهي بلا شك لا تمثل إلا جزءًا يسيرًا من مجمل التغيرات الصوتية المحكومة بقوانين الفونولوجيا العربية.

وقد كشفت نتائج هذه الدراسة عن قدرة خوارزميات الشبكات العصبية المعروفة بالخوارزميات المتسلسلة (seq2seq models) على معرفة القواعد الفونولوجية الأربع والتعرف على السياقات المقيدة لكل قاعدة منها ومن ثم

تطبيقها بدقة عالية على بيانات جديدة لم يسبق أن تعرفت عليها أثناء عملية التدريب. وهذه النتيجة تبين لنا قدرة هذا النموذج على استنباط القاعدة الفونولوجية العامة (generalization)، رغم اختلاف السياقات الصوتية الخاصة بكل ظاهرة، وتطبيقها في سياقات جديدة. وهذا يؤكد ما توصلت إليه الدراسات السابقة التي قدمت دراسات مشابهة على ظواهر فونولوجية أخرى من لغات أخرى. إذا كانت هذه الدراسة قد اقتصرت بسبب ضيق المساحة على بعض التغيرات الصوتية الخاصة بالأفعال في العربية الفصحى، فإن الأمل أن يتم التركيز في المستقبل على اللهجات التي تتسم بنية الكلمة فيها بتغير صوتي كبير يختلف عن المعيار الفصيح، ومثل هذه الخوارزميات تقدم نموذجًا ذا درجة علية من الدقة يمكن أن يستفاد منه في هذه الاتجاهات البحثية المستقبلية.

مراجع البحث

Amherst ScholarWorks, Um., Amherst Doctoral Dissertations Dissertations, Um., & Prickett, B. (2021). *LEARNING PHONOLOGY WITH SEQUENCE-TO-SEQUENCE LEARNING PHONOLOGY WITH SEQUENCE-TO-SEQUENCE NEURAL NETWORKS NEURAL NETWORKS*. https://doi.org/10.7275/jchq-cm44

Azim, M. A., Hussein, W., & Badr, N. L. (2023). Using Character-Level Sequence-to-Sequence Model for Word Level Text Generation to Enhance Arabic Speech Recognition. *IEEE Access*, *11*, 91173–91183. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3302257

Beguš, G. (2021). Identity-based patterns in deep convolutional networks: Generative adversarial phonology and reduplication. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, *9*. https://doi.org/10.1162/tacl_a_00421

Cotterell, R., Kirov, C., Sylak-Glassman, J., Walther, G., Vylomova, E., Xia, P., Faruqui, M., Kübler, S., Yarowsky, D., Eisner, J., & Hulden, M. (2017). Conll-Sigmorphon 2017 shared task: Universal morphological reinflection in 52 languages. *CoNLL 2017 - Proceedings of the CoNLL SIGMORPHON 2017 Shared Task: Universal Morphological Reinflection*. https://doi.org/10.18653/v1/k17-2001

Khalifa, S., Kodner, J., & Rambow, O. (2022). Towards Learning Arabic Morphophonology. *WANLP 2022 - 7th Arabic Natural Language Processing - Proceedings of the Workshop*, 295–301. https://doi.org/10.18653/v1/2022.wanlp-1.27

Klein, G., Kim, Y., Deng, Y., Nguyen, V., Senellart, J., & Rush, A. M. (2018). OpenNMT: Neural machine translation toolkit. *AMTA 2018 - 13th Conference of the Association for Machine Translation in the Americas, Proceedings*, *1*.

Kodner, J., Khalifa, S., Batsuren, K., Dolatian, H., Cotterell, R., Akkuş, F., Anastasopoulos, A., Andrushko, T., Arora, A., Bella, N. A. G., Budianskaya, E., Ghanggo Ate, Y., Goldman, O., Guriel, D., Guriel, S., Guriel-Agiashvili, S., Kieraś, W., Krizhanovsky, A., Krizhanovsky, N., … Vylomova, E. (2022). SIGMORPHON-UniMorph 2022 Shared Task 0: Generalization and Typologically Diverse Morphological Inflection. *SIGMORPHON 2022 - 19th SIGMORPHON Workshop on Computational Research in Phonetics, Phonology, and Morphology, Proceedings of the Workshop*. https://doi.org/10.18653/v1/2022.sigmorphon-1.19

Mirea, N., & Bicknell, K. (2020). Using LSTMs to assess the obligatoriness of phonological distinctive features for phonotactic learning. *ACL 2019 - 57th Annual Meeting of the Association for*

Computational Linguistics, Proceedings of the Conference, 1595–1605. https://doi.org/10.18653/v1/p19-1155

Muradoğlu, S., & Hulden, M. (2023). Do transformer models do phonology like a linguist? *Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 8529–8537. https://doi.org/10.18653/v1/2023.findings-acl.541

Prickett, B. (2021). *ScholarWorks @ UMass Amherst LEARNING PHONOLOGY WITH SEQUENCE-TO-SEQUENCE NEURAL NETWORKS Submitted to the Graduate School of the University of Massachusetts Amherst in partial*. *June*.

Q, F. T., & Z, G. N. (2021). *Do RNN States Encode Abstract Phonological Alternations ? Z University of British Columbia Q Indiana University*. 5501–5513.

Rodd, J. (1997). Recurrent neural-network learning of phonological regularities in Turkish. *CoNLL 1997 - Computational Natural Language Learning, Proceedings of the 1997 Meeting of the ACL Special Interest Group in Natural Language Learning*.

Silfverberg, M. P., Mao, L., Hulden, M., Silfverberg, M., & Jack Mao, L. (2018). Sound Analogies with Phoneme Embeddings. *Proceedings of the Society for Computation in Linguistics*, *1*(1).

Wu, S., Cotterell, R., & Hulden, M. (2021). Applying the transformer to character-level transduction. *EACL 2021 - 16th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference*. https://doi.org/10.18653/v1/2021.eacl-main.163

بيانات الباحث

د. يحيى بن علي آل مريع عسيري، أستاذ مساعد في اللسانيات الحاسوبية وتكنولوجيا اللغات الطبيعية في قسم اللغة العربية وآدابها في كلية العلوم الإنسانية، جامعة الملك خالد بالسعودية. حاصل على درجة الدكتوراه في اللسانيات من جامعة كولورادو الأمريكية في مدينة بولدر عام 2019. تدور اهتماماته البحثية حول التمثيل الدلالي، وبناء وتوسيم الذخائر اللغوية الحاسوبية، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي المتعلقة باللغة العربية.

AUTHOR BIODATA

Dr. Yahya Ali Al-murayy Aseri is an Assistant Professor of Computational Linguistics and Human language Technology in the Department of Arabic Language, College of Humanities, King Khalid University, Saudi Arabia. Dr. Aseri received his PhD degree in Linguistics in (2019) from University of Colorado at Boulder. His research interests include Semantic representation, corpus construction, and Arabic and Artificial intelligence.

Email: yaasseri@kku.edu.sa