مجلة كلية الآداب. جامعة الإسكندرية . المجلد ٧٢ . العدد ١٠٨ .

منهج حاسوبي للتعامل مع ظاهرة الإعلال بالتعويض

د. صلاح راشد الناجم

كلية الآداب، قسم اللغة العربية

جامعة الكويت

salah.alnajem@ku.edu.kw

مستخلص

يقدم هذا البحث منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات الصوتية والصرف–صوتية (Morpho–Phonological) التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالتعويض. تجدر الإشارة إلى أننا سنقدم في بحث آخر منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات الصوتية والصرف–صوتية التي تحدث في إطار نوع آخر من أنواع ظاهرة الإعلال وهو الإعلال بالحذف. تتعلق ظاهرة الإعلال بالتغييرات التي تطرأ على أصوات العلة والهمزة في سياقات صوتية معينة، وتمثل هذه التغييرات تحدياً يواجه الباحثين في مجال علم اللغة الحاسوبي (Computational Linguistics) والمعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing) عند تصميم الأنظمة الحاسوبية التي تحاول التعامل مع النظام الصرفي العربي، وذلك نظرا لكثرة هذه التغيرات وتنوعها. بُني هذا المنهج الحاسوبي على أساس صياغة لسانية نظامية (Systematic linguistically motivated formalization) لهذه الظاهرة باستخدام التحليل المقطعي لبنية الكلمة (Syllabification) والقوانين الفونولوجية السياقية (Phonological Context-Sensitive Rules)، وقد قدمنا هذه الصياغة اللسانية في أبحاث سابقة. قمنا بتصميم المنهج الحاسوبي الذي يقدمه هذا البحث باستخدام تقنية الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata) وذلك عن طريق نظام Xerox Finite-State Tools. حيث قمنا باستخدام قوانين الاستبدال الحاسوبية (Replace Rules) لتطبيق القوانين الفونولوجية، واستطعنا أن نتعامل حاسوبياً مع تعميمات لسانية (Generalizations) ومظاهر اطراد

(Regularities) تحكم هذه التغييرات. هذه التعميمات ومظاهر الاطراد تشكل ركيزة أساسية لتصميم نظام معالجة حاسوبية للصرف العربي مبني على أسس لسانية سليمة.

١. تمهيد

تخضع الأسماء والأفعال في اللغة العربية أثناء اشتقاقها أو/و أثناء تصريفها لتغييراتصرف-صوتية(Morpho-phonological) كي نحصل على بنية سطحية(Surface Structure) لها. لتفسير هذه التغييرات، تقدم القوانين الصرف-صوتية (Morpho-phonological) التيتستخدم القوانين الصوتيةالسياقية (Phonological Context-Sensitive Rules)وسيلة نظامية تساعد على تفسير التغييرات الصوتية التي تحدث للوحدات الصرفية في كلمات اللغة عندما تتحول من بنيتها العميقة (Deep Structure) إلى بنيتها السطحية (Surface Structure). من أمثلة هذه التغييرات حذف بعض حروف الجذر وتغيير بعض حروف الجذر والتي تحدث عند اشتقاق أو تصريف الأفعال المعتلة. تمثل هذه التغييرات الصرف-صوتيةتحدياً يواجه الأنظمة الحاسوبية التي تحاول التعامل مع النظام الصرفي العربي، ويعود ذلك إلى كثرة هذه التغييرات وتنوعها. كذلك فإن من أسباب تلك التحديات ندرة الصياغات اللسانية النظامية (Systematic linguistically motivated formalization) لهذه التغييرات.كما تعاني ساحة البحث العلمي في العالم العربي عموماً، وفي منطقة الخليج والجزيرة العربية بشكل خاص من قلة الأبحاث العربية الي تتطرق للمعالجة الحاسوبية للصرف العربي مقارنة بالجهود التي تبذل في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية لمعالجة اللغات اللاتينية. في هذا السياق، تُدرس هذه التغييرات في دراسات الصرف العربي في إطار موضوعين رئيسين، يعرف الأول بالإسناد إلى الضمائر ، بينما يعرف الثاني بالإعلال والإبدال.

قدمنا في بحثين سابقين منهجاً حاسوبياً (نظاماً حاسوبياً) للتعامل مع التغييرات الصوتية المتعلقة بالإسناد إلى الضمائر[١]. بينما يقدم هذا البحث منهجا حاسوبيا (نظاماً حاسوبياً) للتعامل مع التغييرات الصرف-

[١] الناجم، صلاح. "منهج حاسوبي للتعامل مع إسناد الأفعال إلى الضمائر." *مجلة دراسات الخليج والجزيرة العربية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت، ٢٠٠٤، العدد ١١٤، السنة ٣٠، الصفحات ٤٠-٩.

صوتيةالمتعلقة بالإعلال بالتعويض. هذا المنهج الحاسوبي مبني على صياغة نظرية لسانية نظامية للتغييرات الصوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالتعويض وهي صياغة نظرية مبنية على التحليل المقطعي(Syllabification) لبنية الكلمة[٢]. بُنِيَهذا المنهج الحاسوبي باستخدام تقنيةالآلات منتهية الحالات(Finite State Automata) المستخدمة بكثرة في مجال علوم الحاسوب (Computer Science) بشكل عام وفي مجال المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing) بشكل خاص[٣]. وقد استَخدَمتُتقنية الآلات منتهية الحالاتلتصميم منهج حاسوبي للتعامل مع اشتقاق وتصريف الأفعال العربية، وقمت بمناقشةالجانب الاشتقاقي و التصريفي من هذا المنهج الحاسوبي في أبحاث أخرى[٤].كما طَبَّقتُ هذا المنهج على اللغة العربية باستخدام نظام Xerox Finite-State Tools والذي استُخدم لتطوير مناهج وأنظمة حاسوبية لمعالجة لغات عالمية عديدة[٥]. حيث قمت بتصميم نظام تحليل وتوليد آلي للصرف العربي (Morphological Analysis and Generation System) وفقاً للمنهج الحاسوبي المذكور باستخدام نظام Xerox Finite-State Tools.يُمكن استخدام نظام التحليل والتوليد الصرفي المذكور ليكون

---

[٢] الناجم، صلاح و الشرهان، إيمان. "منهج التحليل المقطعي لظاهرة الإعلال بالتعويض." *المجلة العربية للعلوم الإنسانية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت، ٢٠١٢، العدد ١١٨، الصفحات ٨٥-٥٧.

[٣] لمعرفة المزيد عن استخدام الآلات منتهية الحالات في المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية، يمكنكم الرجوع إلى:

Roche, E. & Schabes, Y. (1997). Introduction. In Roche, E. & Schabes, Y. (eds.), Finite-state language processing. Cambridge: MIT Press. 1-66.

[4] Alnajem, S. "A Finite-State Approach to Arabic Verbal Derivation." *Bulletin of the College of Arts (Literature & Linguistics)*, Publishing Unit, Faculty of Arts, Cairo University, Egypt, vol. 64, no. 1, pp. 59-96.

Alnajem, S. "A Finite-State Approach to Arabic Verbal Inflection." Journal of the College of Humanities and Social Sciences, Qatar University, Qatar, 2004.

[٥] لمعرفة المزيد عن استخدام نظام Xerox Finite-State Tools في المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية، يمكنكم الرجوع إلى:

Beesley, K. and Karttunen, L. Finite-State Morphology. CSLI, Stanford, 2003.

جزءاً من نظام تدقيق نحوي أو نظام للتعرف الآلي على الكلام (Speech Recognition System) أو نظام توليد آلي للكلام المنطوق (Speech Synthesis System). كما استخدمتُنظام Xerox Finite-State Tools لتطوير معجم حاسوبي إلكتروني(Lexicon) للغة العربية استُخدِم في نظام تدقيق إملائي وصرفي للشبكة العنكبوتية[٦] (Web Spell Checker)،وقد تم استخدام هذا النظام تجارياً. كذلكاستخدمتُنظام Xerox Finite-State Toolsلتطوير معجم حاسوبي إلكتروني استُخدِم في نظام حاسوبي لتحليل المزاج العام[٧] (Sentiment Analysis) تم أيضاً استخدامه تجاريا. كما استخدمتُ هذا النظام لتطوير معجم حاسوبي إلكتروني لجذوع الأسماء (Lemmas) استُخدِم في نظام حاسوبي لتحليل النصوص (Text Mining) تنتجه إحدى أكبر الشركات الأمريكية العالمية المتخصصة في مجال تحليل البيانات والنصوص.

ولعل من أهم ما يميز المنهج الحاسوبي المقترح في هذا البحث أنه منهج (نظام) حاسوبي يمكن استغلاله لصنع أنظمة معالجة للغة دون تقيد بنظام تشغيل معين (Platform-Independent). حيث صُمم المنهج (النظام) الحاسوبي باستخدام شفرة (Source Code) تعتمد على ترميز لاتيني قياسي (Standard Encoding) متوافر في كل أنظمة التشغيل الحاسوبية. هذا الترميز اللاتينييمكن أن يُحَوَّل إلى اللغة العربية آلياً وفقا للترميز العربي المتوافق مع نظام التشغيل المطلوب كترميزUnicode أو غيرهمن أنواع الترميز دون حاجة لتغيير الشفرة الأصلية.

1.1. ظاهرة الإعلال في الصرف العربي

تعتبر ظاهرة الإعلال إحدى الظواهر الصرف-صوتية (Morpho-phonological)التي بينت دراستنا لها في أبحاث أخرى أن أسبابها تعود إلى البنية المقطعية (Syllabic Structure)

---

[6]Alnajem, S. "مدقق الويب الإملائي باللغة العربية." *Information Age Consulting*, 2015, https://information-age-consulting.com/siteAR/index.php/products-and-services/arabic-spell-checker-api. Accessed 18 July 2021.

[7]Alnajem, S. "تحليل المزاج العام باللغة العربية." *Information Age Consulting*, 2015, https://information-age-consulting.com/siteAR/index.php/products-and-services/arabic-sentiment-analysis. Accessed 18 July 2021.

للكلمات[٨]. تمثل هذه الدراسة التي قمنا بها صياغة لسانية نظامية (systematic linguistically-motivated formalizations) لهذه التغييراتوقد استخدمنا فيها القوانين الفونولوجية (Phonological Context-Sensitive Rules) والتحليل المقطعي (Syllabification) للبنية المقطعية للكلمات. ينقسم الإعلال إلى نوعين : الإعلال بالتعويض (القلب) والإعلال بالحذف. من أمثلة الإعلال بالتعويض (القلب) الفعل *قام* وأصله *قَوَمَ* ، حيث قلبت فيه الواو ألفا (تم التعويض عن الواو بالألف). من أمثلة الإعلال بالحذف الفعل *يَعِد* الذي حذفت منه الواو والأصل *يَوعِد*.

[٨] الناجم، صلاح و الشرهان، إيمان. "منهج التحليل المقطعي لظاهرة الإعلال بالتعويض." *المجلة العربية للعلوم الإنسانية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت، ٢٠١٢، العدد ١١٨، الصفحات ٨٥-٥٧.

الناجم، الناجم، صلاح. "منهج التحليل المقطعي لظاهرة الإعلال بالحذف." *بحث مقبول للنشر في مجلة كلية دار العلوم*، جامعة القاهرة، القاهرة، 2021.

تتعلق ظاهرة الإعلال بالتغييرات التي تطرأ على أصوات العلة والهمزة في سياقات صوتية معينة، حيث تمثل هذه التغييرات تحدياً يواجه الباحثين في مجال علم اللغة الحاسوبي (Computational Linguistics)والمعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing)عند تصميم الأنظمة الحاسوبية التي تحاول التعامل مع النظام الصرفي العربي نظراً لكثرة هذه التغيرات وتنوعها. من جهة أخرى، هنالك ندرة في الصياغات اللسانية النظاميةلهذه التغييرات مقارنة بالظواهر الأخرى التي تناولتها أدبيات علم اللغة الحديث (Linguistics) .

هذا البحث هو محاولة تطبيقية لتصميم منهج حاسوبي لتمكين الحاسوب من التعامل مع ظاهرة الإعلال بالتعويض وفقاً للنتائج النظرية التي توصلنا إليها في دراسات سابقة لهذه الظاهرة وهي دراسات علمية تستند إلى أسس علم الأصوات المعاصر (Phonology).حيث سنقوم في هذا البحث ببناء منهج حاسوبي باستخدام مايعرف بالشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) وباستخدام عمليات رياضية تُطبَّق على هذه الشبكات أهمها عملية التركيب(Composition).سيستخدِمهذا المنهج الحاسوبي المنهج المقطعي (Syllabic Approach) والذي استُخدِم بشكل كبير لدراسة الظواهر الصوتية (phonological) والصرف–صوتية (morpho-phonological) في عدد من اللغات. هذا المنهج المقطعيهو نفس المنهج الذي طبقناه في أبحاث سابقة لدراسة هذه الظاهرة نظريا ولصياغة القوانين الفونولوجية التي تحكمها كما أشرنا سابقاً. أما النوع الثاني من ظاهرة الإعلال – وهو الإعلال بالحذف – فسنتناولمعالجتهحاسوبياً في بحث قادم إن شاء الله.

١.٢ أنواع المقاطع في العربية

لا تقبل اللغة العربية سوى أنواعاً معينة من المقاطع فقط وهي :

١- مقطع قصير مفتوح (CVصامت + صائت قصير)

٢- مقطع طويل مفتوح(CVVصامت + صائت طويل)

٣- مقطع طويل مغلق(CVC صامت +صائت قصير + صامت)

٤- مقطع مغرق في الطول مغلق بصامت CVVC (صامت +صائت طويل+ صامت)

٥- مقطع مغرق في الطول مغلق بصامتين CVCC (صامت +صائت قصير+صامت+صامت)[٩]

[٩] لا يسمح بآخر شكلين إلا في حالتي الوقف والتضعيف.

الرمز C يعني صوتاً صامتاً(Consonant)، الرمز V يعني صائتاً قصيراً ، (Short Vowel) والرمز VV يعني صائتاً طويلا (Long Vowel). يسمى المقطع الذي ينتهي بصامت مقطعا مغلقا (Closed Syllable) أما المقطع الي ينتهي بصائت فيسمى مقطعا مفتوحا (Open Syllable).

1.3 القوانين الفونولوجية (Phonological Rules)

تعتبر القوانين الفونولوجية من الوسائل الشائعة في مجال التحليل الصوتي للقوانين التي تحكم الظواهر الصوتية والصرف–صوتية في اللغات الإنسانية.تُستَخدَم هذه القوانين لمعالجة الظواهر الصوتية والصرف–صوتية معالجة حاسوبية.

يتكون القانون الفونولوجي من :

مُدخَل(Input)

مُخرَج(Output)

سياق صوتي (Phonetic Context)

وتشتمل المدخلات عادة على صوت أو مجموعة من الأصوات التي تشترك في سمة واحدة أو أكثر، أما المخرجات فهي ما يطرأ على هذه الأصوات من تغيير نتيجة وجودها في سياق صوتي معين. السياق الصوتي هو البيئة التي يشترط توافرها لحدوث التغيير الصوتي الذي يطرأ على المدخلات وتنتج عنه المخرجات. يمكن كتابة القوانين الفونولوجية باستخدام رموز الأصوات، كما يمكن أن تُكتَب القوانين باستخدام السمات المميزة للأصوات.

1.4 الرموز الصوتية المستخدمة في البحث

لكتابة الكلمات كتابة صوتية(Phonetic Transcription)، سيستخدم البحث رموزاً صوتية مستمدة من الأبجدية الصوتية الدولية (IPA). الجدول الآتييعرضهده الرموز وما يقابلها في العربية[١٠] :

[١٠] هذه الرموز هي المعتمدة في كتاب :

جدول (1) الرموز الصوتية المستخدمة في البحث وما يقابلها في العربية :

الصوت	رمزه	الصوت	رمزه	الصوت	رمزه
ء	?	ض	D	الفتحة	a
ب	b	ط	T	الضمة	u
ت	t	ظ	Ď	الكسرة	i
ث	θ	ع	ς	الفتحة الطويلة	aa
ج	j	غ	γ	الضمة الطويلة	uu
ح	H	ف	f	الكسرة الطويلة	ii
خ	x	ق	q		
د	d	ك	k		
ذ	ð	ل	l		
ر	r	م	m		
ز	z	ن	n		
س	s	ه	h		
ش	š	و	w		
ص	S	ي	y		

2. منهج حاسوبي للتعامل مع ظاهرة الإعلال بالتعويض

في المنهج الحاسوبي الذي يقدمه هذا البحث، ستُطبَّق التغييرات الصوتية الخاصة بظاهرة الإعلال بالتعويض على الأسماء والأفعال عن طريق قوانين حاسوبية خاصة تعرف بقوانين الاستبدال (Replace Rules). هذه القوانين يتم تحويلها آليا إلى شبكاتمنتهية الحالات (Finite State Transducers) عن طريق نظام (Xerox Finite State Tools). هذه القوانين تصاغ على أساس لساني علمي (Linguistically Motivated)قابل للمعالجة الحاسوبية،وهي قوانين تُستخدم في علم اللغة الحاسوبي والمعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية لتطبيق القوانين الفونولوجية المرتبطة بالسياق (Phonological Context-Sensitive Rules) والمستخدمة في تفسير ودراسة الظواهر الصوتية والصرف–صوتية في مجال علم الأصوات وعلم بناء الكلمة كما أشرنا سابقا. يُكتب قانون الاستبدال الحاسوبي وفقاً الصيغة الآتية:

$$A \rightarrow B \;||\; L _ R$$

Alnajem, S. "Inheritance-based approach to arabic verbal Root-and-Pattern morphology." *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods*, edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007, pp. 67-88.

يقول هذا القانون إن المدخَلAيتحول إلى المخرَجB عندما يكون L هو السياق الأيسر وR هو السياق الأيمن الذي يأتي فيه المدخَلA.

يُصاغ قانون استبدال حاسوبي لكل تغيير صوتي من التغييرات الخاصة بظاهرة الإعلال من خلال تحويل القانون الفونولوجي المرتبط بالسياق المستخدم في تفسير التغيير الصوتي إلى قانون استبدال يستطيع الحاسوب التعامل معه. يمكن أن يكون تطبيق قانون الاستبدال إجبارياً أو اختيارياً. كما تُطبَّققوانين الاستبدالعلى الكلمة بشكل متواز (في نفس الوقت) أو بشكل متسلسل بحيث يصبح مُخرَج(Output) قانون معين مُدخَلاً(Input) لقانون لاحق. في أدبيات المعالجة الحاسوبيةللغة الطبيعية، تُعرف الطريقة الأولى من طرق تطبيق قوانين الاستبدال بالتطبيق المتوازي (ParallelApplication)، بينما تُعرف الطريقة الثانية بالتطبيق المتتالي (Cascade Application). تُطبَّققوانين الاستبدال على الكلماتباستخدام عملية رياضية تجرى على الشبكات منتهية الحالات وهي عملية التركيب(Composition)[١١].

2.1. قوانين الاستبدال الحاسوبية لظاهرة الإعلال بالتعويض

يعرض هذا القسم قوانين الاستبدال الحاسوبية التي تُطبَّق التغييرات الصوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالتعويض،وهي الظاهرة التيقدَّمنا تفسيراً لسانياً لهاباستخدام التحليل المقطعي والقوانين الفونولوجية السياقية التي قمنا بصياغتها في أبحاث سابقة. في قوانين الاستبدال الحاسوبية، تُعرَّف الصوامت باستخدام متغير (variable) وهو C. تُعرَّف المتغيرات عن طريق الأمر define:

---

[١١]لمعرفة المزيد عن عملية التركيب التي تُطبق على الشبكات منتهية الحالات، يمكن للقارئ الرجوع إلى:

Alnajem, S. "A Computational Approach to the Variations in Arabic Verbal Orthography" Computer Speech and Language, Elsevier, Exeter, 2005, vol. 19, no.3, pp. 275–299.

Alnajem,Salah. (2004). *AFinite-StateApproachtoArabicVerbalDerivation*. InBulletinoftheCollegeofArts (Literature&Linguistics), 64(1),pages 59-96. PublishingUnit,FacultyofArts,CairoUniversity,Egypt.

```
define C[%@ | b | t | th | j | H | kh | d |
D | r | z | s | sh | S | dh | T | zh | %3 |
g | f | q | k | l | m | n | h | w | y];
```

يقابل الرمز "@" صوت الهمزة[١٢] ويقابل الرمز "3" صوت /ع/. الرمز "|" يعني عملية اتحاد المجموعات(Set Union)وهي العملية الرياضية التي تطبَّق على المجموعات (Sets) ويُرمَز لها في الرياضيات برمز ∪. يمكن قراءة هذا التعريف كالتالي:

مجموعة الصوامت (Consonants Set) تساوي ناتج اتحاد المجموعات الأحادية Singleton) (Sets التي تحتوي كل واحدة منها على صوت صامت واحد:

$$C = \{\%@\} \cup \{b\} \cup \{t\} \cup \{th\} \cup \{j\} \cup \{h\} \ldots$$

تُعَرَّف أيضا الصوائت القصيرة باستخدام المتغير Vوالصوائت الطويلة باستخدام المتغير Long V.

```
define V [a | u | i];
define LongV [aa | uu | ii];
```

بعد تعريف هذه المتغيرات، نبدأ بتعريف قوانين الاستبدالالخاصة بظاهرة الإعلال بالتعويض.

2.1.1 قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقي[١٣]

الحالة الأولى: في الفعل ، إذا كان صوت /و/ خاتمة لآخر مقطع في جذع الكلمة (Stem) ، وكانت نواة هذا المقطع الفتحة ، وكان المقطع الذي يسبقه طويلا مغلقا cvc ، واتصلت بالجذع إحدى لواحق

---

[١٢] الرمز "%" هو رمز خاص يُستخدم قَبل بعض الرموز المحجوزة في نظام Xerox Finite State Tools والتي تشتمل على الرمز "@" إضافة إلى رموز أخرى.

[١٣] الصوت الانزلاقي (Glide) (ويعرف أيضاً بالصوت شبه الصائت) هو صوت يُنطق كما تُنطق الصوائت ويصنف كصوت صامت (الخولي ، 1982). الأصوات الانزلاقية في العربية هي الواو والياء غير المديتين.

الماضي التصريفية (Inflectional Suffixes) التي هي عبارة عن مقطع مستقل[١٤] ، فإن صوت /و/ يعوض عنه بصوت /ي/.

من أمثلة هذه الحالة:

أ- عند اتصال إحدى اللواحق التصريفية بجذع الفعل المزيد بالهمزة أو بالفعل المزيد بالهمزة والسين والتاء :

أمثلة:

الفعل *أَعطَوتُ* يصبح *أَعطَيتُ*

←/ ʔaς Taw - tu//ʔaς Tay - tu/

الفعل *اسْتولَوْت* يصبح *اسْتولَيْتُ*

←/ ʔis taw law - tu/ /ʔis taw lay - tu/

الرمز "-" هو فاصل صرفي (Morphological Boundary) يفصل بين الجذع (ʔaς Taw) واللاحقة التصريفية {-tu}.

ب- عند اتصال نون النسوة بالفعل المضارع المبني للمجهول:

مثال: *يُعطَون* يصبح *يُعطَيْن*

←/ yuς Taw- na // yuς Tay - na /

ج- عند اتصال إحدى اللواحق التصريفية بالفعل المضعف

مثال: *كسَّوْنا* يصبح *كسَّيْنا*

←/kas saw- naa/ . / kas say- naa

---

[١٤] اللواحق التصريفية نوعان : النوع الأول: اللاحقة التيتُكَوِّن مقطعاً مفتوحاً(Open Syllable)وتتمثل فيصوت /ت/ مع الصائت القصير الذي يليه (تاء الفاعل) {- tu}،{- ta}،{- ti} ، وصوت /ن/ مع الصائت القصير الذي يليه (نون النسوة) {-na} ، وصوت /ن/ مع الصائت الطويل الذي يليه (نا المتكلمين){-naa}. النوع الثاني من اللواحق التصريفية يأتي على شكل صائت طويل (Long Vowel) يمثل نواة لمقطع ، ويرتبط هذا الصائت الطويل (النواة) بصوت صامت أو أكثر ليُكَوِّن مقطعا كاملا. اللواحق التصريفية التي تنتمي إلى هذا النوع هي ألف الاثنين {-aa}، واو الجماعة {-uu}، وياء المخاطبة {-ii}. الرمز {} يدل على الوحدة الصرفية كالسوابق واللواحق.

والفعل زَكَّوْت يصبح زَكَّيْت

←/ zak kaw – tu/ /zak kay – tu/

قانون الاستبدالالحاسوبي رقم (1) الذي يحكم الحالة الأولى للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقيهو القانون الآتي:

```
w → y || [ C V %-|C V] C C a _ %- [C V | C V V] .#. .o.
```

الرمز (–%) هو فاصل صرفي (Morpheme Boundary) يأتي ليفصل بين السوابق وبداية الجذع التصريفي كما يفصل بين اللاحقة التصريفية ونهاية جذع الكلمة (Stem). الرمز # يعني حدود الكلمة (Word Boundry)أي بدايتها أو نهايتها. الرمز .o. هو رمز خاص بنظام Xerox Finite State Tools ويستخدم لتطبيق عملية رياضية على شبكات منتهية الحالات وهي عملية التركيب (Composition)عن طريق تركيب سلسلة من قوانين الاستبدال الحاسوبيةالتي تُطبَّق على مُدخَلات النظام.هذه المدخلات هي الكلمات التي ستطبق عليها حاسوبياً ظاهرة الإعلال بالتعويضباستخدام قوانين الاستبدال الحاسوبية المشار إليها.

يقول هذا القانون إن صوت /و/ (w) يتحول إلى /ي/ (y) إذا كان آخر صامت في جذع(Stem)الكلمة ، وكان مسبوقابفتحة (a)، وجاءت بعد صوت /و/ (w) إحدى لواحق الماضي التصريفية التي هي عبارة عن مقطع مستقل (CV أو CVV). الرمز "|" في القانون يعني "أو".نلاحظ هنا أننا لم نحدد في سياق هذا القانون بداية الكلمة لأن الفعل قد يكون مزيدا بأكثر من صامت مثل الفعل *اسْتَدعوْتُ* الذي يصبح *اسْتَدعيْتُ*.

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (1)مثالاً على تطبيق فعلي (Sample Log)لقانون الاستبدال الحاسوبي رقم (1).حيث قمنا في هذا المثال بإدخال الفعل *أعطَوتُ*إلى النظام ويتبين لنا من هذه الشاشة أن النظام قد قام بتطبيق الإعلال بالتعويض باستخدامقانون الاستبدال الحاسوبي رقم (1) وأنتج الكلمة

الصحيحة *أَعطَيْتُ* بعد تطبيق ذلك الإعلال. كما أننا أدخلنا كلمة*يعطَوْن* وحصلنا على *يُعطَيْن*.

وأدخلنا كلمة *زَكَوْنا* وحصلنا على *زَكَيْنا*:

←/ ʔaç Taw – tu/ /ʔaç Tay – tu/

←/ yuç Taw– na // yuç Tay – na /

←/ zak kaw – naa/ /zak kay – naa/

```
[xfst[1]: apply down %@a3Taw-tu
%@a3Tay-tu
[xfst[1]: apply down yu-3Taw-na
yu-3Tay-na
[xfst[1]: apply down zakkaw-naa
zakkay-naa
xfst[1]:
```

شكل رقم (1): مثال (Sample Log) على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (1)

الحالة الثانية: إذا كان صوت /و/ استهلالاً لآخر مقطع في الكلمة ونواة هذا المقطع هي الفتحة القصيرة أو الطويلة ، وكان المقطع الذي يسبقه قصيرا cv نواته الكسرة ، فإن صوت /و/ يعوض عنه بصوت /ي/ . من أمثلة هذه الحالة:

أ- الفعل الماضي *رَضِوَ* يصبح *رَضِيَ*

← /ra Di–wa/ /ra Di– ya/

ب- الفعل الماضي المبني للمجهول المتصل بألف الاثنين مثل *دُعِوا*الذي يصبح *دُعِيا*

← /du çi–waa/ /du çi–yaa/

ج- الفعل المضارع المنصوب مثل *يُعطِوَ* الذي يصبح *يُعطِيَ*

/yuç Ti ya /←/yuç Ti wa /

د- فعل الأمر للمثنى مثل *أَعطِوا*الذي يصبح*أَعطِيا*

/ʔaç Ti yaa /←/ʔaç Ti waa /

هـ- اسم الفاعل المنصوب مثل*غازِوًا* الذي يصبح *غازِيًا*[١٥]

/ γaa zi yan/ ←γaa zi wan//

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (2) الذي يحكم الحالة الثانية للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقي هو:

```
w → y || C i _ %- [a | a a | a C] .#. .o.
```

يقول هذا القانون إن صوت /و/يصبح /ي/إذا وقع بين كسرة قصيرة(i) وفتحة قصيرة (a) أو طويلة (a a). الفتحة القصيرة أو الطويلة هي جزء من لاحقة تصريفية تأتي بعد جذع الكلمة.

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (2)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (2):

```
xfst[1]: apply down raDiw-a
raDiy-a
xfst[1]: apply down du3iw-aa
du3iy-aa
xfst[1]: apply down yu-3Tiw-a
yu-3Tiy-a
xfst[1]: apply down gaaziw-an
gaaziy-an
xfst[1]:
```

شكل رقم (2): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (2)

[١٥] تمثل هذه الحالة وجهاً من أوجهظاهرة المماثلة الصوتية(Assimilation) والتي تهدف إلى تحقيق الانسجام الصوتي لبنية الكلمة وتقليل الجهد المبذول أثناء النطق بالأصوات.

الحالة الثالثة: إذا كان صوت /و/ آخر صامت في جذع الكلمة ، وكان المقطع الذي يسبقه قصيراًCVنواته الفتحة ، واتصلت بالكلمة لاحقة تصريفية وهي الفتحة الطويلة ، فإن صوت /و/ يعوض عنه بصوت /ي/[١٦] ، وذلك في:

أ- الفعل المضارع مثل الفعل يَرضَوان الذي يصبح يَرضَيان

/yar Da yaan /←/yar Da waan /

ب- الفعل المضارع المبني للمجهول يُغزَوان الذي يصبح يُغزَيان

. /yuɣ za yaan /←za waan / /yuɣ

ج- اسم المفعول للمثنى مثل *مُعطَوان* يصبح *مُعطَيان*

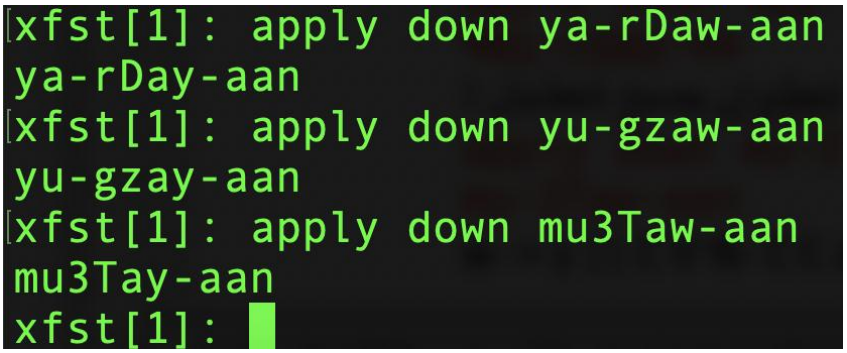
./muʂ Ta yaan /←/muʂ Ta waan /

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (3) الذي يحكم الحالة الثالثة للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقي هو:

```
w → y || [C V %- | C V] C C a _ %- [a a | a a C] .#. .o.
```

يقول هذا القانون إن صوت /و/ يتحول إلى /ي/ إذا كان آخر صامت في جذع الكلمة ، وكان واقعا بين فتحتين الأولى قصيرة والثانية طويلة (فتحة اللاحقة التصريفية).تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (3)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (3):

[١٦] يشترط في هذه الحالة أن يكون صوت /و/ رابع صامت في الكلمة أو أكثر، إذ تخرج من هذه القاعدة كلمات مثل *دعَوا* و *رجَوا* لأن صوت /و/ في هاتين الكلمتين هو ثالث صامت في الكلمة.



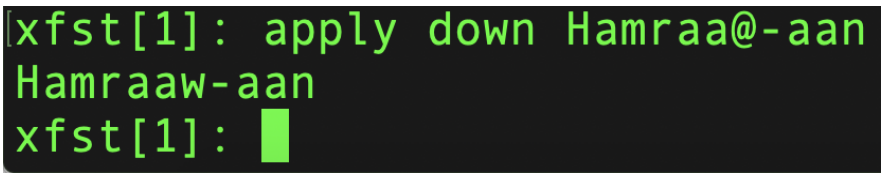
شكل رقم (3): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (3)

الحالة الرابعة: إذا كانت الكلمة مكونة من ثلاثة مقاطع ، الأول طويل مغلق cvc ، والثاني طويل مفتوح cvv نواته الفتحة الطويلة ، والثالث مغرق في الطول مغلق بصامتcvvc استهلاله الهمزة ونواته الفتحة الطويلة ، فإن صوت الهمزة يعوض عنه بصوت /و/ الانزلاقي ، مثل كلمة*حَمْراءان* التي تصبح *حَمْراوان* ← /Ham raa ʔaan//Ham raa waan/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (4) الذي يحكم الحالة الرابعة للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقي هو:

%@ → w || .#. C V C C a a _ %- a a C .o.

يقول هذا القانون إن صوت الهمزة (%@) يتحول إلى صوت /و/ إذا كان آخر صامت في جذع الكلمة ، وكان واقعا بين فتحتين طويلتين، حيث تكون الفتحة الطويلة الثانية جزءاً من لاحقة صريفية. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (4)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (4):



شكل رقم (4): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (4)

الحالة الخامسة: إذا كانت الكلمة مكونة من أربعة مقاطع، الأول منها طويل مغلق cvc ، والثاني طويل مفتوح cvv نواته الفتحة الطويلة ، والثالث طويل مغلق cvc استهلاله الهمزة ونواتة الكسرة وخاتمته صوت /ي/ الانزلاقي، والرابع هو المقطع الذي يحتوي على تنوين التنكير ، فإن الهمزة يعوض عنها بصوت /و/ مثل كلمة *صَحرائيٌّ* التي تصبح *صَحْراويٌّ*

/SaH raa ?iy yun/ ← /SaH raa wiy yun/ .

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (5) الذي يحكم الحالة الخامسة للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقي هو:

```
%@ → w ||   .#. C V C C a a _ %- [i y y V C
| i y] .#.   .o.
```

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (5)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (5):

```
xfst[1]: apply down SaHraa@-iyyun
SaHraaw-iyyun
xfst[1]:
```

شكل رقم (5): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (5)

2.1.2 قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بالتعويض بمطل الصائت

إذا كان صوت /و/ خاتمة لأول مقطع في الكلمة ، وكانت نواة هذا المقطع هي الكسرة ، أو كان صوت /ي/ خاتمة لأول مقطع في الكلمة وكانت نواة هذا المقطع هي الضمة، فإن صوت /و/ و صوت /ي/ يعوض عنهما بمطل النواة ، وينتج عن ذلك أن يتغير شكل المقطع من مقطع طويل مغلق cvc إلى مقطع طويل مفتوح cvv[١٧].

[١٧] يمكن أن تُفسر هذه الحالة صوتياً بأنها مماثلة (Assimilation) إذ أثرت الكسرة في صوت /و/ الواقع بعدها فحذف وعُوِّض عنه بتضعيف الكسرة ، كما أثرت الضمة في صوت /ي/ الواقع بعدها فحذف وعوض عنه بتضعيف الضمة، حيث تحقق هذه الممثلة تناغما صوتيا وسلاسة في النطق.

من أمثلة التعويض عن صوت /و/ بمطل الكسرة :

أ- الاسم *مِوْعاد* الذي يصبح *ميعاد*

/ mii ʕaa dun/←/miw ʕaa dun/

ب- الاسم *رِوح* التي يصبح *ريح*

/ rii Hun/←/ riw Hun/

ج- الفعل *رضِوت* الذي يصبح رضيت

/ ra Dii tu/←/ra Diw tu/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (6) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض بمطل الصائت:

```
w → i ||  C i _ .o.
```

يقول هذا القانون إن صوت /و/(w) يتحول إلى الصائت القصير الكسرة (i)إذا جاء خاتمةً للمقطع وكانت الكسرة هي نواة هذا المقطع.تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (6)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (6):

```
xfst[1]: apply down miw3aad-un
mii3aad-un
xfst[1]: apply down riwH-un
riiH-un
xfst[1]: apply down raDiw-tu
raDii-tu
xfst[1]:
```

شكل رقم (6): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (6)

من أمثلة التعويض بمطل الضمة كلمة*مُتْيَقِن*التي تصبح *موقِن*

/muu qi nun/ ← /muy qi nun/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (7) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض عن الصوت الانزلاقي /ي/ بمطل الضمة التي تسبقه هو :

y → u || C u _ .o.

يقول هذا القانون إن صوت /ي/(y) يتحول إلى الصائت القصير الضمة (u)إذا جاء خاتمةً للمقطع وكانت الضمة هي نواة هذا المقطع. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (7)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (7):

```
xfst[1]: apply down muyqin-un
muuqin-un
xfst[1]:
```

شكل رقم (7): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (7)

2.1.3 قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بالتعويض بالهمزة

الحالة الأولى: إذا كان أول مقطع في الكلمة قصيراً cv استهلاله صوت /و/ ونواته صوت الفتحة، والمقطع الذي يليه طويلا مفتوحا cvv استهلاله صوت /و/ ونواته الفتحة الطويلة ، فإن استهلال أول مقطع يُعوض عنه بصوت الهمزة ، مثل:

أ- كلمة *وَواصِل* جمع (*واصلة*) تصبح *أَواصِل*

/?a waa Si lun/ ←/wa waa Si lun

ب- كلمة *وَواقي* جمع (واقية) تصبح *أواقي*[١٨]

[١٨] يعد هذا المثال من تجليات ظاهرة المخالفة الصوتية (Dissimilation) التي تهدف إلى تحقيق سهولة النطق واقتصاد الجهد.

. /?a waa qiy /← /wa waa qiy/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (8) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض بالهمزة هو:

```
w → %@ ||  .#. _ a w a a .o.
```

يقول هذا القانون إن صوت /و/ (w) يصبح همزة (%@) إذا كان أول صامت في جذع الكلمة، وكان متلواً بصائت قصير هو صوت الفتحة (a) ، وكان ثاني صامت في جذع الكلمة هو صوت /و/ الذي يليه صائت طويل وهو صوت الفتحة الطويلة.تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (8)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (8):

```
xfst[1]: apply down wawaaSil-un
@awaaSil-un
xfst[1]: apply down wawaaqiy
@awaaqiy
xfst[1]:
```

شكل رقم (8): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (8)

الحالة الثانية: إذا كان الصوت الانزلاقي استهلالاً لآخر مقطع في الكلمة ، وكان المقطع الذي يسبقه طويلاً مفتوحاً cvv نواتة صوت الفتحة الطويلة ، فإن الصوت الانزلاقي يُعوض عنه بصوت الهمزة ، مثل الكلمات التالية:

أ- *كِساو* تصبح *كِساء*

/ki saa ?un /←/ki saa wun/

ب- *رِداي* تصبح *رِداء*

/ ri daa ?un/←/ri daa yun /

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (9) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض بالهمزة هو:

```
[w | y] → %@ || .#. C V C a a _ .o.
```

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (9)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (9):

```
xfst[1]: apply down kisaaw-un
kisaa@-un
xfst[1]: apply down ridaay-un
ridaa@-un
xfst[1]:
```

شكل رقم (9): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (9)

الحالة الثالثة: إذا كان أول مقطع في الكلمة طويلاً مفتوحاً cvv نواته صوت الفتحة الطويلة ، والمقطع الذي يليه قصيراً استهلاله صوت انزلاقي ونواته الكسرة ، فإن الصوت الانزلاقي يعوض عنه بصوت الهمزة، مثل الكلمات التالية:

أ- *قاوِل تصبح قائِل*

/qaa ʔi lun/←/qaa wi lun/

ب-*بايِع تصبح بائِع*

. /baa ʔi ɕun/ ← / baa yi ɕun/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (10) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض بالهمزة هو:

```
[w | y] → %@ || .#. C a a _ i C .o.
```

يقول هذا القانون إن الصوت الانزلاقي (w أو y) يتحول إلصوت الهمزة(@%) في حال كونه ثاني صامت في جذع الكلمة التي على وزن فاعِل، وكان واقعا بين صوت الفتحة الطويلة والكسرة.تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (10)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (10):

```
xfst[1]: apply down qaawil-un
qaa@il-un
xfst[1]: apply down baayi3-un
baa@i3-un
xfst[1]:
```

شكل رقم (10): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (10)

2.1.4 قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بالتعويض بالتضعيف

الحالة الأولى: إذا كان أول مقطع في الكلمة طويلا مغلقا cvc خاتمته صوت /و/ ، واستهلال المقطع الذي يليه صوت /ي/ ، فإن صوت /و/ يعوض عنه بتضعيف (Geminating) صوت /ي/ ، ليصبح صوت /ي/ هذا خاتمة للمقطع الأول ، بينما يصبح صوت /ي/ الثاني استهلالا للمقطع الذي يليه ، مثل كلمة *طَوِيٌّ* التي تصبح بعد الإعلال *طيٌّ*

. /Tay yun/←/ Taw yun/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (11) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض بالتضعيف هو:

```
w → y || .#. C V _ y (%-).o.
```

يقول هذا القانون إن صوت /و/ (w) يتحول إلصوت /ي/ (y) إذا جاء خاتمة لأول مقطع cvc في الكلمة، وكان استهلال المقطع الذي يليه صوت /ي/ (y) الذي قد ينتهي به جذع الكلمة.تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (11)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (11):

```
xfst[1]: apply down Tawy-un
Tayy-un
xfst[1]:
```

شكل رقم (11): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (11)

الحالة الثانية: إذا كان صوت /و/ استهلالا لثاني أو آخر مقطع في الكلمة ، وكان المقطع الذي يسبقه طويلاً مغلقا cvc خاتمته صوت /ي/ ، فإن صوت /و/ يعوض عنه بتضعيف صوت /ي/ ، مثل الكلمات التالية:

أ- سَيْوِد تصبح سيّد

/say yi dun/ ← /say wi dun/

ب- جُرَيْو(تصغير جَرو) تصبح جُرَيّ

/ju ray yun/← /ju ray wun/ .

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (12) الذي يحكمحالة الإعلال بالتعويض بالتضعيف هو:

```
w → y || C V y _ (%-) V .o.
```

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (12)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (12):

```
xfst[1]: apply down saywid-un
sayyid-un
xfst[1]: apply down jurayw-un
jurayy-un
xfst[1]:
```

شكل رقم (12): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (12)

الحالة الثالثة: إذا كان الصوت الانزلاقي استهلالا لآخر مقطع في الكلمة ، وكان المقطع الذي يسبقه طويلا مفتوحا cvv نواته الضمة الطويلة ، فإن الصائت الطويل (الضمة الطويلة) يصبح صائتا قصيرا ، ويعوض عن تحويل الصائت الطويل إلى صائت قصير بتضعيف الصوت الانزلاقي الذي يليه . من أمثلة هذه الحالة تضعيف صوت /و/ في كلمة *مَرْجوو* لتصبح *مَرجوّ*

/mar juw wun/ ←/mar juu wun/ .

و قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (13) الذي يحكم هذه الحالة من حالاتالإعلال بالتعويض بالتضعيف هو:

```
u → w ||  C u _ w %- .o.
```

يقول هذا القانون إن صوت الضمة (u)يتحول إلى صوت هو صوت /و/ الانزلاقي (w)، إذا كان صوت الضمة مسبوقاً بضمة أخرى ومتلوا بصوت /و/ الانزلاقي الذي يشكل آخر صامت في جذع الكلمة.تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (13)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (13):

```
xfst[1]: apply down marjuuw-un
marjuww-un
xfst[1]:
```

شكل رقم (13): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (13)

كذلك من أمثلة الحالة الثالثة، الأمثلة الآتية التي يكون فيها الصوت الانزلاقي /ي/ استهلالا لآخر مقطع في الكلمة:

تضعيف صوت /ي/ في كلمة *مَرْموي* تصبح *مَرميّ*

/mar muy yun/← /mar muu yun/

وفي هذه الحالة يحدث إعلال آخر نتيجة وقوع صوت /ي/ بعد ضمة ، حيث إن صوت /ي/ صوت أمامي(Front) والضمة صوت خلفي (Back).ولتسهيل النطق وتحقيق الانسجام في السمات الصوتية، يتحول صوت الضمة إلى صوت صائت قصير خلفي من جنس صوت /ي/ وهو صوت الكسرة (صائت مغلق أمامي غير مدور Close Front Unrounded Vowel) . لذلك تتحول كلمة مَرمُيّ إلى مَرميّ

/mar miy yun/←/mar muy yun/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (14) الذي يحكمهذه الحالةهو القانون المركب التالي والذي ينقسم إلى قانونين:

```
u → y ||  C u _ y %- .o.

u → i ||  C _ y C %- .o.
```

في المرحلة الأولى يتحول الضمة الصائت(u) إلى صوت انزلاقي هو صوت /ي/ (y)، وفي المرحلة الثانية يتحول صوت الضمة إلى صوت صائت آخر يتناسب مع صوت /ي/ في سماته الصوتية وهو صوت الكسرة. . تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (14)مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (14):

شكل رقم (14): مثال على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (14)

3. الأبحاث المستقبلية

ستتناول الأبحاث المستقبلية إن شاء الله استخدام المنهج الحاسوبي الذي قدمه هذا البحث لتطويرأداءالمدقق الإملائي الإلكتروني(Spell Checker)بحيث يأخذ بعين الاعتبار التغييرات الصوتية والصرف–صوتية

المتعلقة بظاهرة الإعلال بالتعويض. كذلك ستتناول الأبحاث القادمة إمكانية توسيع نطاق هذا المنهج الحاسوبي ليشمل تطويرأداء أنظمة تحديد الفئة النحوية للكلمات والوسم الآلي للفئة النحوية للكلمات (Part of Speech Guessers and Taggers) عن طريق تمكينها من التعامل مع التغييرات المتعلقة بظاهرة الإعلال بالتعويض. تقوم هذه الأنظمة بتحليل الكلمات في النصوص من أجل تحديد نوع الفئة النحوية للكلمة (مثل الأسماء والأفعال). كذلك ستتناول الأبحاث القادمة إمكانية استخدام هذا المنهج الحاسوبي لتصميم أنظمة تحليل وتوليد للبنية الصرفية للكلمات تعمل بصفتها جزءاً من أنظمة أكبر للمعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية.

4. الخلاصة

قدم هذا البحث منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات الصوتية التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالتعويض. بُني هذا المنهج على أساس صياغة لسانية نظامية لهذه الظاهرة باستخدام التحليل المقطعي والقوانين الفونولوجية. وقد بينت هذه الصياغة وتطبيقها العملي باستخدام المنهج الحاسوبي الذي قدمناه في هذا البحث دور التحليل المقطعي والقوانين الفونولوجية في تقديم تفسير لسانيسليم للتغيرات الصوتية والصرف–صوتية التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالتعويض. هذا التحليلالمقطعي قدم لنا أرضية مناسبة حاسوبياً للتعامل مع هذه الظاهرة، وقد ساعدت هذه الأرضية في تمكين الحاسوب من التعامل مع التغيرات الصوتية والصرف–صوتية المتعلقة بهذه الظاهرة، حيث أثبتنا ذلك من خلال ما عرضناه من أمثلة تطبيقية فعلية لهذه المعالجة الحاسوبية باستخدام منهجنا الحاسوبي المقترح. قمنا ببناء هذا المنهج الحاسوبيباستخدام تقنية الآلات منتهية الحالات(Finite State Automata)وذلك عن طريق نظام Xerox Finite-State Tools. وقد استُخدمت تقنية الآلات منتهية الحالاتبكثرة في مجال المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing) بشكل عام، والمعالجة الحاسوبية للصرف(Morphological Processing) بشكل خاص. في هذا السياق، تُعد تقنية الآلات منتهية الحالات من أهم التقنيات المستخدمة في المعالجة الحاسوبية للصرف العربي وفي تصميم الأنظمة الصرفية الحاسوبية التي تتعامل مع اللغة العربية كما هو مبين في Kay (1987), Beesley (1991, 1996, 1998), Kiraz (1994, 2000) , Kornai (1991, 1995), Bird and Ellison (1992, 1994), Narayanan and Hashem (1993), Attia, M., et al (2014), Neme, Alexis A. et. al (2013)

من خلال التحليل المقطعي واستخدام القوانين الفونولوجية لتفسير التغييرات الصوتية والصرف–صوتية في ظاهرة الإعلال بالتعويض، ومن خلال المعالجةالحاسوبية لهذه التغيرات باستخدام قوانين الاستبدال الحاسوبية التي استخدمناها لتطبيق القوانين الفونولوجية، استطعنا أن نتعامل حاسوبياً مع تعميمات لسانية (Generalizations) ومظاهر اطراد (Regularities) تحكم هذه التغييرات. هذه التعميمات ومظاهر الاطراد تشكل ركيزة أساسية لتصميم نظام معالجة حاسوبية للصرف العربي مبني على أسس لسانية سليمة.

المراجع

الخولي، محمد. *معجم علم اللغة النظري*. مكتبة لبنان، بيروت،1982.

الناجم، صلاح. "منهج حاسوبي للتعامل مع إسناد الأفعال إلى الضمائر." *مجلة دراسات الخليج والجزيرة العربية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت، 2004، العدد 114 ، السنة 30، الصفحات 9-40.

الناجم، صلاح و الشرهان، إيمان. "منهج التحليل المقطعي لظاهرة الإعلال بالتعويض." *المجلة العربية للعلوم الإنسانية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت، 2012، العدد 118، الصفحات 57-85.

الناجم، صلاح. "منهج التحليل المقطعي لظاهرة الإعلال بالحذف." *بحث مقبول للنشر في مجلة كلية دار العلوم*، جامعة القاهرة، القاهرة، 2021.

Alnajem, S. "Inheritance-based approach to arabic verbal Root-and-Pattern morphology." *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods*, edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007,pp. 67-88.

Alnajem, S. "تحليل المزاج العام باللغة العربية." *Information Age Consulting*, 2015, https://information-age-consulting.com/siteAR/index.php/products-and-services/arabic-sentiment-analysis. Accessed 18 July 2021.

Alnajem, S. "مدقق الويب الإملائي باللغة العربية." *Information Age Consulting*, 2015, https://information-age-consulting.com/siteAR/index.php/products-and-services/arabic-spell-checker-api. Accessed 18 July 2021.

Alnajem, S. "A Finite-State Approach to Arabic Verbal Derivation." *Bulletin of the College of Arts (Literature & Linguistics)*, Publishing Unit, Faculty of Arts, Cairo University, Egypt, vol. 64, no. 1, pp. 59-96.

Alnajem, S. "A Finite-State Approach to Arabic Verbal Inflection." *Journal of the College of Humanities and Social Sciences*, Qatar University, Qatar, 2004.

Alnajem,S. "AComputationalApproachtotheVariationsinArabicVerbalOrthography" *ComputerSpeechandLanguage*, Elsevier,Exeter, 2005, vol. 19, no.3,pp.275–299.

Attia, M., et al. "A Corpus-Based Finite-State Morphological Toolkit for Contemporary Arabic." *Journal of Logic and Computation*, 2014, vol. 24, no. 2, pp. 455-472.

Beesley, K. "Computer analysis of Arabic morphology: A two-level approach with detours." *Perspectives on Arabic linguistics III: Papers from the third annual symposium on Arabic linguistics,* John Benjamin's Publishing Company, Amsterdam,1991,pp. 155-172.

Beesley, K. "Arabic finite-state morphological analysis and generation." *Proceedings of the International Conference on Computational Linguistics (COLING'96)*, 1996, vol.1, pp.89-94.

Beesley, K. "Arabic morphology using only finite-state operations." *Computational approaches to Semitic languages: Proceedings of the workshop,* University of Montreal, Montreal, 1998, pp. 50-57.

Beesley, K. and Karttunen, L. *Finite-State Morphology*. CSLI, Stanford, 2003.

Bird, S & Ellison, T. "One-level phonology: Autosegmental representations and rules as finite-state automata." *Technical report, Research Paper EUCCS/RP-51*, University of Edinburgh,Edinburgh,1992.

Bird, S & Ellison, T. "One-level phonology: autosegmental representations and rules as finite automata". *ComputationalLinguistics,* 1994, vol. 20, no. 1, pp. 55–90.

Kay, M. "Nonconcatenative finite-state morphology." *Proceedings of the third conference on European chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL '87)*,Association for Computational Linguistics, USA,1987, pp. 2–10.

Kiraz, G. "Multi-tape two-level morphology: a case study in semitic non-linear morphology." *Proceedings of the 15th conference on Computational linguistics - (COLING '94*), Association for Computational Linguistics, USA, 1994, vol. 1, pp. 180–186.

Kiraz, G." Multitiered nonlinear morphology using multitape finite automata: a case study on Syriac and Arabic." *Computational Linguistics,*Association for Computational Linguistics, 2000, vol. 26, no. 1, pp. 77-105.

Kiraz, G. *Computational nonlinear morphology: With emphasis on Semitic languages*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.

Kornai, A. "Formal phonology". Ph.D. dissertation, University of Stanford, 1991.

Kornai, A. *Formal Phonology.* Routledge, 1995.

Narayanan, A. & Hashem, L. "On abstract finite-state morphology." *Proceedings of the sixth conference on European chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL '93)*. Association for Computational Linguistics, USA, 1993, pp. 297-304.

Neme, Alexis A., and Laporte, Éric. "Pattern-and-Root Inflectional Morphology: The Arabic Broken Plural." *Language Sciences,* Elsevier*,* 2013, vol. 40, pp. 221-250.

Roche, E. & Schabes, Y. "Introduction." *Finite-state language processing*, edited by Roche, E. & Schabes, Y., MIT Press, Cambridge, 1997,pp. 1-66.