منهج حاسوبي للتعامل مع ظاهرة الإعلال بالحذف

د. صلاح راشد الناجم

قسم اللغة العربية

كلية الآداب، جامعة الكويت، دولة الكويت

salah.alnajem@ku.edu.kw

المستخلص:

يقدم هذا البحث منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات الصوتية والصرف-صوتية (Morpho-Phonological) التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالحذف. تجدر الإشارة إلى أننا كنا قد قدمنا في بحث سابق منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات التي تحدث في إطار نوع آخر من أنواع ظاهرة الإعلال وهو الإعلال بالتعويض. تتعلق ظاهرة الإعلال بالتغييرات التي تطرأ على أصوات العلة والهمزة في سياقات صوتية معينة. بُني هذا المنهج الحاسوبي على أساس صياغة لسانية لهذه الظاهرة باستخدام التحليل المقطعي لبنية الكلمة (Syllabification) والقوانين الفونولوجية السياقية (Phonological Context-Sensitive Rules) ، حيث استطعنا بناء المنهج الحاسوبي باستخدام تقنية الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata) عن طريق الشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) وباستخدام عمليات رياضية تُطَبَّق على هذه الشبكات أهمها عملية التركيب (Composition). قمنا في هذا المنهج بتطبيق القوانين الفونولوجية الخاصة بالتغييرات المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف عن طريق قوانين حاسوبية خاصة تعرف بقوانين الاستبدال الحاسوبية (Replace Rules). هذه القوانين تم تحويلها آليا إلى شبكات منتهية الحالات (Finite State Transducers) عن طريق نظام (Xerox Finite State Tools)، واستطعنا عن طريقها أن نتعامل حاسوبياً مع تعميمات لسانية (Generalizations) ومظاهر اطراد (Regularities) تحكم التغييرات الصوتية والصرف-صوتية التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالحذف. كما أثبتنا في هذا البحث بشكل تطبيقي نجاح منهجنا الحاسوبي في تمكين الحاسوب من التعامل مع تلك التغييرات.

الكلمات الدالة: علم اللغة الحاسوبي، المعالجة الحاسوبية للغة العربية، علم اللغة التطبيقي، التحليل المقطعي، التغييرات الصرف-صوتية.

١. مقدمة

تخضع الأسماء والأفعال في اللغة العربية أثناء اشتقاقها أو/و أثناء تصريفها لتغييرات صرف-صوتية (Morpho-phonological) كي نحصل على بنية سطحية (Surface Structure) لها. من أمثلة هذه التغييرات حذف بعض حروف الجذر وتغيير بعض حروف الجذر والتي تحدث عند اشتقاق أو تصريف الأفعال المعتلة. في هذا السياق، تُدرس هذه التغييرات في دراسات الصرف العربي في إطار موضوعين رئيسين، يعرف الأول بالإسناد إلى الضمائر ، بينما يعرف الثاني بالإعلال والإبدال.

١.١. مشكلة البحث وحدوده

تمثل التغييرات الصرف-صوتية المتعلقة بالإعلال والإبدال تحدياً 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 أن هناك حاجة ملحة لأن تكون هذه الصياغة اللسانية النظامية قابلة للتطبيق حاسوبياً ليتمكن الحاسوب من التعامل مع هذه التغييرات في النصوص العربية. يتناول البحث المعالجة الحاسوبية للتغييرات الصوتية والصرف-صوتية (Morpho-Phonological) التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالحذف في اللغة العربية الفصحى فقط دون تطرق للهجات العربية، ولا يتناول أنواعا أخرى من التغييرات الصوتية أو الصرف-صوتية. كما لا يتناول البحث التغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالتعويض، حيث تناولناها في بحث سابق.

٢.١. فرضية البحث

يمكن تفسير التغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف عن طريق صياغة لسانية نظامية لهذه التغييرات باستخدام القوانين الصوتية السياقية (Phonological Context-Sensitive Rules) والتحليل المقطعي (Syllabification) لبنية الكلمة. حيث تمثل هذه القوانين وسيلة لسانية نظامية تساعد على تفسير التغييرات الصوتية التي تحدث للبنية الصرفية لكلمات اللغة عندما تتحول هذه الكلمات من بنيتها العميقة (Deep Structure) إلى بنيتها السطحية (Surface Structure). كما يمكن تحويل هذه الصياغة اللسانية إلى قوانين حاسوبية يستطيع الحاسوب التعامل معها وتطبيقها على كلمات اللغة العربية. يمكن استخدام تقنية الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata) عن طريق الشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) لبناء منهج حاسوبي (نظام حاسوبي) يستطيع الحاسوب من خلاله التعامل مع التغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف. تُستَخدم تقنية الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata) بكثرة في مجال علوم الحاسوب (Computer Science) بشكل عام وفي مجال المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing) بشكل خاص.[١]

٣.١. منهج البحث وأدواته وإجراءاته

يقدم هذا البحث منهجا حاسوبيا (نظاما حاسوبياً) للتعامل مع التغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بالإعلال بالحذف. هذا المنهج الحاسوبي مبني على صياغة نظرية لسانية نظامية للتغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف وهي صياغة نظرية مبنية على استخدام القوانين الصوتية السياقية والتحليل المقطعي لبنية الكلمة.[٢] حيث قمنا في هذا البحث ببناء منهج حاسوبي باستخدام

[١] لمعرفة المزيد عن استخدام الآلات منتهية الحالات في المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية، يمكنكم الرجوع إلى:
Roche, E. & Schabes, Y. "Introduction." *Finite-state language processing*, edited by Roche, E. & Schabes, Y., MIT Press, Cambridge, 1997, pp. 1-66.

[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.

ما يعرف بالشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) وباستخدام عمليات رياضية تُطَبَّق على هذه الشبكات أهمها عملية التركيب (Composition).

طُبِّقَت التغييرات الصوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف على الأسماء والأفعال عن طريق قوانين حاسوبية خاصة تعرف بقوانين الاستبدال الحاسوبية (Replace Rules). هذه القوانين يتم تحويلها آليا إلى شبكات منتهية الحالات (Finite State Transducers) عن طريق نظام (Xerox Finite State Tools).

ولعل من أهم ما يميز المنهج الحاسوبي المقترح في هذا البحث أنه منهج (نظام) حاسوبي يمكن استغلاله لصنع أنظمة معالجة حاسوبية للغة العربية 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 اللاتيني يمكن أن يُحَوَّل إلى اللغة العربية آليا وفقا للترميز العربي المتوافق مع نظام التشغيل المطلوب كترميز Unicode أو غيره من أنواع الترميز دون حاجة لتغيير الشفرة الأصلية.

٤.١. الدراسات السابقة

في إطار الدراسات المعاصرة السابقة التي تناولت الجانب الصوتي والصرف-صوتي للتغييرات الصوتية في بنية الكلمة العربية، تناول الدكتور عبد الصبور شاهين ظاهرة الإعلال والتشكيل المقطعي على ضوء دراسات الفونولوجيا المعاصرة[١] حيث حاول الدكتور عبد الصبور تقديم رؤية جديدة للصرف العربي باستخدام المنهج الصوتي للبنية العربية. ظهرت بعد ذلك عدة محاولات متأثرة بما قدمه الدكتور عبد الصبور شاهين منها ما جاءت به الدكتورة ديزيرة سقال في كتابها "الصرف وعلم الأصوات"[٢] كذلك خصص الدكتور عبد المقصود محمد عبد المقصود في كتابه "دراسة البنية الصرفية في ضوء اللسانيات الوصفية " فصلا لتفسير بعض مسائل الإعلال في العربية[٣] كما قدمت دراسة أخرى محاولة لتعليل بعض الظواهر الصرفية تعليلات صوتية على ضوء كتاب سر صناعة الإعراب لابن جني[٤] كذلك تناولت دراسة أخرى أثر التحليل المقطعي في بعض الظواهر الصوتية[٥] وتناولت دراسة أخرى النظام المقطعي في اللغة العربية

[١] شاهين، عبد الصبور. *المنهج الصوتي للبنية العربية*. مؤسسة الرسالة ، بيروت، 1980.

[٢] سقال، ديزيرة. *الصرف وعلم الأصوات*. دار الصداقة العربية ، بيروت، 1996.

[٣] محمد عبد المقصود، عبد المقصود. *دراسة البنية الصرفية في ضوء اللسانيات الوصفية*. الدار العربية للموسوعات ، بيروت، 2006.

[٤] الشمسان ، ابراهيم. " الإبدال إلى الهمزة وأحرف العلة في ضوء كتاب سر صناعة الإعراب لابن جني." *حوليات كلية الآداب والعلوم الاجتماعية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت ، 2002

[٥] السيد، محمود حلمي محمود. "أثر التحليل المقطعي في بعض الظواهر الصوتية." *مجلة كلية الآداب*، جامعة سوهاج-كلية الآداب، مصر، 2018، العدد 46.

وركزت على دور همزة الوصل في هذا النظام وما يرتبط بها من ظواهر متعلقة بالنطق والكتابة[١] من جهة أخرى، تناولت دراسات أخرى علاقة البنية المقطعية بالإعراب[٢]ومقارنة التعليلين الصرفي والصوتي لظاهرة الإعلال[٣] كما قدم بحث أخر دراسة صوتية لظاهرة الإعلال بالحذف في إطار المنهجين الوصفي والتاريخي[٤] وتناول بحث آخر استخدام التحليل الصرف-صوتي لبنية الكلمة العربية لتفسير التغيرات الصرف-صوتية والتي تشتمل على ظاهرتي الإعلال والإبدال [٥] إضافة إلى ما سبق، اهتم بحث آخر بدراسة ما يطرأ على أبنية الألفاظ العربية من تغيرات صوتية لما يتوقف عليها من فهم لكثير من القضايا الصرفية كالإعلال والإبدال، حيث درس البحث هذه التغيرات الصوتية في ألفاظ الحديث الشريف في صحيح الإمام البخاري باستخدام المنهج الاستقرائي التحليلي[٦] كما تناولت دراسة أخرى مقاربة صوتية دلالية لظاهرة الإبدال بين الصوامت في ضوء علم الأصوات الوظيفي [٧] وتناولت دراسة أخرى الإبدال بين الصوائت القصيرة في ضوء علم الأصوات الوظيفي[٨] تناول بحث أخر أيضا دور الأسس الصوتية الحديثة في تجديد الصرف العربي وتفسير التغيرات والظواهر الصرفية [٩] وتناولت دراسة أخرى تقصي بعض الظواهر الصوتية والصرف-صوتية في اللغة العربية مثل الإدغام والتصغير في إطار ما يعرف بنظرية الفونولوجيا المستقلة القطع (Auto Segmental Phonology) يهدف اختبار تطبيق هذه النظرية على قضايا في

[١] رباع، محمد علي. "النظام المقطعي وهمزة الوصل في العربية." *مجلة العلوم الإنسانية*، جامعة منتوري قسنطية ، الجزائر، 2000، العدد 13 ، الصفحات 159 -181.

[٢] صالح، رضا فاروق صديق. "علاقة البنية المقطعية بالإعراب عند المحدثين" *مجلة كلية الآداب*، كلية الآداب، جامعة سوهاج ، مصر، 2018، العدد 49 ، الصفحات 71 -108.

[٣] خلف، صيوان خضير. "الإعلال بين التعليلين الصرفي والصوتي." مجلة *أبحاث البصرة للعلوم الإنسانية*، جامعة البصرة – كلية التربية للعلوم الإنسانية، الجمهورية العراقية، 2013، المجلد 38، العدد 4 ، الصفحات 57-80.

[٤] شحاتة، قباري محمد عبده. "ظاهرة الإعلال بالحذف: دراسة صوتية." *صحيفة الألسن: سلسلة في الدراسات الأدبية واللغوية*، جامعة عين شمس – كلية الألسن، مصر، 2009، العدد 25 ، الصفحات 404-447.

[٥] حامد، عبد الحليم محمد. "التحليل المورفوفونولوجي لبنية الكلمة العربية." *مجلة كلية اللغة العربية*، جامعة أم درمان الإسلامية – كلية اللغة العربية، السودان، 2016، العدد 8 ، الصفحات 169-208.

[٦] عمر، محمد علي أحمد. "التغييرات الصوتية في بنية ألفاظ الحديث الشريف: دراسة في صحيح الإمام البخاري." *مجلة العلوم والبحوث الإسلامية*، جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا- معهد العلوم والبحوث الإسلامية، السودان، 2013، العدد 6 ، الصفحات 1-26.

[٧] بوبقار، عمر. "ظاهرة الإبدال بين الصوامت: مقاربة صوتية دلالية في ضوء علم الأصوات الوظيفي." *مجلة الذاكرة*، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، 2015، العدد 5 ، الصفحات 336-355.

[٨] بوبقار، عمر. "الإبدال بين الصوائت القصيرة في ضوء علم الأصوات الوظيفي." *مجلة الأثر*، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، 2014، العدد 20 ، الصفحات 63-71.

[٩] بوجمل، حمزة. "أثر الدرس الصوتي الحديث في تجديد الصرف العربي." *مجلة الآداب للدراسات اللغوية والأدبية*، جامعة ذمار – كلية الآداب، الجمهورية اليمنية، 2020، العدد 6 ، الصفحات 98-119.

الصرف العربي[١] كذلك تناولت دراسة أخرى تطبيق نظرية الفونولوجيا المستقلة القطع (Auto Segmental Phonology) لدراسة ظاهرة الوقف[٢] وتناول بحث آخر تأصيل المصطلح الصوتي في اللغة العربية من خلال مصطلحي الفونينيكا (Phonetics) والفونولوجيا [٣].

من جهة أخرى، تعاني ساحة البحث العلمي في العالم العربي عموما، وفي منطقة الخليج والجزيرة العربية بشكل خاص من قلة الأبحاث العربية التي تتطرق للمعالجة الحاسوبية للصرف العربي مقارنة بالجهود التي تبذل في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية لمعالجة اللغات اللاتينية. من الدراسات التي تناولت المعالجة الحاسوبية للصرف العربي محاولة لبناء برنامج حاسوبي لتوليد أفعال اللغة العربية وتصريفها، وفي هذه المحاولة اعتمد الباحث في استقصاء الجذور والأفعال على معجم تاج العروس، كما قام بوصف قوانين توليد الأفعال في اللغة العربية وأنظمة تصريفها [٤] كما قدمت دراسة أخرى منهجية في إطار صياغات رياضية (Formal) وفق علم اللسانيات لتمثيل جوانب عديدة من قواعد الصرف في اللغة العربية تسهل من برمجتها وتطبيقها حاسوبياً باستخدام لغة البرمجة PROLOG[٥]. كذلك تناولت دراسة أخرى قضايا التحليل الصرفي لمكونات الكلمة العربية باستخدام آليات التحليل الصرفي الحاسوبي للنص العربي المكتوب، وقد اعتمدت الدراسة على نتائج تحليل قاعدة بيانات نصية اشتملت على مليون كلمة عربية من لغة الإعلام المقروء[٦]. إضافة إلى ما سبق، تناول بحث آخر محاولة لبناء قاعدة بيانات معجمية دلالية تقدم شبكة معجمية دلالية للصيغ الصرفية الفعلية في القرآن الكريم، حيث حاول البحث أن يقدم تحليلا معجميا دلاليا للصيغ الصرفية من خلال الآيات القرآنية[٧] من جهة أخرى، تناولت دراسة أخرى المعالجة الحاسوبية للصرف العربي

[١] عبد الواحد، عبد الحميد و اليحياوي، مولدي. "الفونولوجيا المستقلة القطع ونماذج من تطبيقاتها على العربية." *مجلة اللسانيات العربية*، مركز الملك عبد الله بن عبد العزيز الدولي لخدمة اللغة العربية، المملكة العربية السعودية، 2016، العدد 3 ، الصفحات 153-190.

[٢] اليحياوي، مولدي. "الوقف: دراسة في فونولوجيا القطع المستقلة." *مجلة العلوم الإنسانية*، جامعة البحرين – كلية الآداب، مملكة البحرين، 2018، العدد 31 ، الصفحات 101-118.

[٣] سليمان، زين العابدين. "تأصيل المصطلح الصوتي في اللغة العربية: الفونتيتيكا والفونولوجيا أنموذجا." *مجلة الممارسات اللغوية*، جامعة مولود معمري تيزي وزو، الجزائر، 2017، العدد 39 ، الصفحات 107-120.

[٤] المهيوبي، عبد العزيز بن عبد الله. "بناء برنامج حاسوبي لتوليد أفعال اللغة العربية وتصريفها." *مجلة مجمع اللغة العربية على الشبكة العالمية*، مجمع اللغة العربية على الشبكة العالمية، المملكة العربية السعودية، 2018، العدد 17 ، الصفحات 91 -166.

[٥] مراد، محمد نعمان. "صياغة لسانية لبناء نظام حاسوبي لمعالجة الصرف في اللغة العربية." *مجلة العلوم التربوية والنفسية*، الجمعية العراقية للعلوم التربوية والنفسية، الجمهورية العراقية، 2013، العدد 101 ، الصفحات 701 -740.

[٦] أحمد، أحمد راغب. "التحليل الصرفي لمكونات الكلمات العربية: دراسة لغوية حاسوبية." *مجلة جيل الدراسات الأدبية والفكرية*، مركز جيل البحث العلمي، الجزائر، 2016، العدد 21 ، الصفحات 111 -122.

[٧] هواري، عبد العاطي و رشوان، محسن عبد الرازق و زغواني، وجدي . "نحو بناء مصدر دلالي حاسوبي للصيغ الصرفية الفعلية في القرآن الكريم." *مجلة التخطيط والسياسة اللغوية*، مركز الملك عبد الله بن عبد العزيز الدولي لخدمة اللغة العربية، المملكة العربية السعودية، 2017، السنة 2، العدد 4 ، الصفحات 52 -26.

وعلاقتها بالمعجم الآلي ودورها في الترجمة الآلية[1] كذلك تناولت دراسة أخرى المعالجة الحاسوبية لجمع التكسير في اللغة العربية [2] كما قدمت دراسة أخرى نهجًا حاسوبياً لمعالجة جذور وجذوع الكلمات المستخدمة كمصطلحات فهرسة (Indexing) للبحث عن النصوص في أنظمة استرجاع المعلومات (Information Retrieval) التي تتعامل مع اللغة العربية[3] كذلك تناولت دراسة أخرى التمثيل الصرفي للغة العربية المستخدمة في مجال للترجمة الآلية[4] كذلك فقد قدمتُ في بحث سابق منهجا حاسوبيا (نظاما حاسوبيا) للتعامل مع التغييرات الصوتية المتعلقة بإسناد الأفعال إلى الضمائر[5]كما قدمتُ في بحث آخر منهجا حاسوبيا لاشتقاق وتصريف الأفعال باستخدام عملية توارث السمات (Inheritance) [6].

وفي إطار المحاولات التي استخدمت تقنية الآلات منتهية الحالات في المعالجة الحاسوبية للصرف العربي، تعد هذه التقنية من أهم التقنيات المستخدمة في المعالجة الحاسوبية للصرف العربي وفي تصميم الأنظمة الصرفية الحاسوبية التي تتعامل مع اللغة العربية[7] في هذا السياق، استَخدَمتُ تقنية الآلات منتهية الحالات

[1] Dichy J., Farghaly A. (2007) Grammar-Lexis Relations in the Computational Morphology of Arabic. *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods*, *Text, Speech and Language Technology, vol 38,* edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007.

[2] Alajmi, N, Deris, N and Alnajem. "Computational approach to Arabic broken derived nouns morphology." *2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, IEEE, 2008, pp. 704-708.

[3] Alnaied, A., Elbendak, M., and Bulbul, A. "An intelligent use of stemmer and morphology analysis for arabic information retrieval". *Egyptian Informatics Journal*, 2020, *21*(4), 209-217.

[4] Habash N. "Arabic Morphological Representations for Machine Translation". *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods*, *Text, Speech and Language Technology, vol 38,* edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007.

[5] 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.

[6] Alnajem, S. "Inheritance-based approach to arabic verbal Root-and-Pattern morphology." *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods*, *Text, Speech and Language Technology, vol 38,* edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007, pp. 67-88.

[7] لمعرفة المزيد عن المحاولات التي استخدمت تقنية الآلات منتهية الحالات في المعالجة الحاسوبية للصرف العربي ، ارجع إلى :

Kay (1987), Beesley (1991, 1996, 1998), Kiraz (1994, 2000) , Kornai (1991, 1995), Bird and Ellison (1992, 1994), Narayanan and Hashem (1993), Attia, et al (2014), Neme, Alexis A. et. al (2013), Alnajem (2004, 2005a,2005b, 2005c).

لتصميم منهج حاسوبي للتعامل مع اشتقاق وتصريف الأفعال العربية، وقمت بمناقشة الجانب الاشتقاقي و التصريفي من هذا المنهج الحاسوبي في أبحاث أخرى. حيث طَبَّقتُ هذا المنهج على اللغة العربية باستخدام نظام Xerox Finite-State Tools. كذلك قمتُ 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 جزءاً من نظام تدقيق نحوي أو نظام للتعرف الآلي على الكلام (Speech Recognition System) أو نظام توليد آلي للكلام المنطوق (Speech Synthesis System). كما استخدمتُ نظام Xerox Finite-State Tools لتطوير معجم حاسوبي إلكتروني (Lexicon) للغة العربية استُخدِم في نظام تدقيق إملائي وصرفي للشبكة العنكبوتية[٢](Web Spell Checker)، وقد تم استخدام هذا النظام تجارياً. كذلك استخدمتُ نظام Xerox Finite-State Tools لتطوير معجم حاسوبي إلكتروني استُخدِم في نظام حاسوبي لتحليل المزاج العام[٣] (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. تجدر الإشارة إلى أن نظام Xerox Finite-State Tools استُخدم لتطوير مناهج وأنظمة حاسوبية لمعالجة لغات عالمية عديدة[٤]

٥.١. مفاهيم أساسية

يقدم هذا القسم مفاهيم أساسية سيتناولها البحث:

التغييرات الصرف-صوتية (Morpho-Phonological) هي التغيرات التي تُطبَق على صيغ لغوية بحيث تظهر في تمثيل صوتي وفقاً لشروط صرفية (Matthews, 2014).

علم اللغة الحاسوبي (Computational Linguistics): هو استخدام الحاسوب في دراسة اللسانيات وتطوير برمجيات يمكنها القيام بعمليات لغوية مثل التحليل النحوي الآلي وإدارة البيانات (Miller and Brown, 2019).

---

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[٤] 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.

المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing): تطلق على الأنظمة التي تستخدم لتحقيق التفاعل بين الحاسوب والبشر (Miller and Brown, 2019).

التحليل المقطعي لبنية الكلمة (Syllabification): هو تقسيم الكلمة إلى مقاطع صوتية (Crystal, 2011).

القوانين الفونولوجية السياقية (Phonological Context-Sensitive Rules): هي وسيلة لتحديد التغيرات الصوتية النظامية (Predictable Alternations) (Miller and Brown, 2019). كل قانون يعبَّر عنه بعملية يمكن أن تغير أو تضيف أو تحذف أو تعيد ترتيب السمات الصوتية في إطار سياق معين (Matthews, 2014).

الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata): هي مجموعة من القواعد الحاسوبية الي تُستخدم في علم اللغة النظري وعلم اللغة الحاسوبي لتصنيف اللغات التي يمكن إنشاؤها بشكل رياضي مجرد (Formal Languages). في هذا السياق، يمكن نمذجة الآلات (Automata) باستخدام مصطلحات مجردة على شكل سلسلة من المدخلات (Inputs) والمخرجات (Outputs) والحالات (States) وقواعد التشغيل (Rules of Operation). تقوم هذه الآلات بإجراء عمليات على المدخلات عن طريق الانتقال عبر سلسلة من "الحالات"، حيث يتم ربط كل حالة بالحالة التالية من خلال مايعرف بـ "وظيفة الانتقال" (Transition Function) (Crystal, 2011).

تعميم لساني (Generalizations): هو مقولة أو تحليل يمكن تطبيقه على عدد من الأمثلة أو الحالات (Miller and Brown, 2019).

بنية سطحية (Surface Structure): هو تمثيل البنية التركيبية بعد تطبيق كل التحويلات (التغييرات) عليها (Miller and Brown, 2019).

بنية عميقة (Deep Structure): أكثر المستويات البنيوية تجريداً (Most Abstract) والذي تُشتَق منه البنية السطحية (Miller and Brown, 2019).

مقطع صوتي (Syllable): وحدة تستخدم لتنظيم الأصوات النطقية. يتكون المقطع من استهلال (Onset) اختياري وقافية (Rhyme) إجبارية والتي تتكون بدورها من نواة (Nucleus) (صوت صائت) قد تتبعها اختياريا خاتمة (صامت) (Miller and Brown, 2019).

صوت صامت (Consonant): الأصوات الصامتة هي الأصوات التي تنتج عن طريق إغلاق أو تضييق الجهاز النطقي بحيث يُغلق المجال تماماً أمام تيار الهواء (يُعتَرض تيار الهواء) أو يضيق عليه لدرجة إنتاج صوت احتكاك مسموع (Crystal, 2011).

صوت صائت (Vowel): الصوت الصائت هو صوت لا يتطلب إنتاجه أي إغلاق أو تضييق للجهاز النطقي (Crystal, 2011).

صوت انزلاقي (Glide) (ويعرف أيضاً بالصوت شبه الصائت) : هو صوت يُنطق كما تُنطق الصوائت ويصنف كصوت صامت (الخولي ، 1982).

كتابة صوتية (Phonemic Transcription): هي وسيلة لتدوين الأصوات النطقية بطريقة منهجية ومتسقة (Crystal, 2011).

الأبجدية الصوتية الدولية (International Phonetic Alphabet): هي نظام من أنظمة الكتابة الصوتية أصدرتها جمعية الصوتيات الدولية (International Phonetic Association). تهدف هذه الأبجدية إلى تقديم نظام كتابة صوتية للغات العالم المعروفة (Miller and Brown, 2019).

تتابع الصامتين (Consonant Cluster): تتابع مكون من صوتين صامتين أو أكثر في إطار كلمة واحدة (Miller and Brown, 2019).

الصوائت الأمامية (Front Vowels): هي الأصوات التي يكون مكان نطقها هو الجزء الأمامي من الفم وتُنطق باستخدام الجزء الأمامي من اللسان (Crystal, 2011).

الصوائت الخلفية (Back Vowels): هي الأصوات التي يكون مكان نطقها هو الجزء الخلفي من الفم وتُنطق باستخدام الجزء الخلفي من اللسان (Crystal, 2011).

الصوائت المدورة (Rounded Vowels) : هي الصوائت التي تُنتَج مع تضييق الشفتين، وهي عكس الصوائت غير المدورة التي تُنتَج دون أي تضيق للشفتين (Crystal, 2011).

جذع الكلمة (Stem): هو أي جزء من الكلمة يمكن أن تضاف إليه مورفيمات (وحدات صرفية) إلصاقية (Affixes)، ويمكن أن يتكون الجذع من مورفيم واحد أو أكثر (Miller and Brown, 2019).

المورفيم الإلصاقي (Affix): هو وحدة صرفية تأتي كجزء من كلمة ولا يمكن أن تأتي ككلمة مستقلة، حيث يجب أن تُلصق هذه الوحدة بجذع (Miller and Brown, 2019).

المورفيم (Morpheme) (الوحدة الصرفية): أصغر جزء يمكن أن تقسم الكلمة المنطوقة أو المكتوبة إليه بحيث يميِّز هذا التقسيم بين الكلمات (من حيث المعنى) (Miller and Brown, 2019).

صائت ضيق (Narrow Vowel): هو صوت صائت يُنطق مترافقاً مع تضييق في عرض البلعوم (Crystal, 2011).

٦.١. 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) للكلمات[١] تمثل هذه الدراسة التي قمنا بها صياغة لسانية نظامية (systematic linguistically-motivated

[١] 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، صلاح. "منهج التحليل المقطعي لظاهرة الإعلال بالحذف." بحث *مقبول للنشر في مجلة كلية دار العلوم*، جامعة القاهرة، القاهرة، ٢٠٢١.

(Phonological Context-لهذه التغييرات وقد استخدمنا فيها القوانين الفونولوجية formalizations) (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*.

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 النظامية لهذه 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 بالحذف 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 ما يعرف بالشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) وباستخدام عمليات رياضية تُطَبَّق على هذه الشبكات أهمها عملية التركيب (Composition). سيستخدِم هذا المنهج الحاسوبي المنهج المقطعي (Syllabic Approach) والذي استُخدِم بشكل كبير لدراسة الظواهر الصوتية (phonological) والصرف-صوتية (morpho-phonological) في عدد من اللغات. هذا المنهج المقطعي هو نفس المنهج الذي طبقناه في أبحاث سابقة لدراسة هذه الظاهرة نظريا ولصياغة القوانين الفونولوجية التي تحكمها كما أشرنا سابقاً. تجدر الإشارة إلى أننا كنا قد قدمنا في بحث سابق منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات الصوتية والصرف-صوتية التي تحدث في إطار نوع آخر من أنواع ظاهرة الإعلال وهو الإعلال بالتعويض.

٧.١. أنواع المقاطع في العربية

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

1- مقطع قصير مفتوح ص ح (صامت + صائت قصير)
2- مقطع طويل مفتوح ص ح ح (صامت + صائت طويل)
3- مقطع طويل مغلق ص ح ص (صامت + صائت قصير + صامت)
4- مقطع مغرق في الطول مغلق بصامت ص ح ح ص (صامت + صائت طويل + صامت)
5- مقطع مغرق في الطول مغلق بصامتين ص ح ص ص (صامت +صائت قصير+ صامت + صامت)[١]

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

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

٨.١. 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.

٩.١. الرموز الصوتية المستخدمة في البحث

لكتابة الكلمات كتابة صوتية (Phonemic Transcription)، سيستخدم البحث رموزاً صوتية مستمدة من الأبجدية الصوتية الدولية (IPA). الجدول الآتي يعرض هذه الرموز وما يقابلها في العربية[١]:

جدول (١) الرموز الصوتية المستخدمة في البحث وما يقابلها في العربية:

[١] هذه الرموز هي المعتمدة في كتاب:

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.

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		

٢. منهج حاسوبي للتعامل مع ظاهرة الإعلال بالحذف

في المنهج الحاسوبي الذي يقدمه هذا البحث، ستُطَبَّق التغييرات الصوتية الخاصة بظاهرة الإعلال بالحذف على الأسماء والأفعال عن طريق قوانين حاسوبية خاصة تعرف بقوانين الاستبدال الحاسوبية (Replace Rules). هذه القوانين يتم تحويلها آليا إلى شبكات منتهية 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:

$$A \rightarrow B \parallel L _ R$$

يقول هذا القانون إن المُدخَل A يتحول إلى المُخرَج B عندما يكون L هو السياق الأيسر وR هو السياق الأيمن الذي يأتي فيه المُدخَل A.

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 تُطَبَّق قوانين الاستبدال على الكلمة بشكل متواز (في نفس الوقت) أو بشكل متسلسل بحيث يصبح مُخرَج (Output) قانون معين مُدخَلاً (Input) لقانون لاحق. في أدبيات المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية، تُعرف الطريقة الأولى من طرق تطبيق قوانين الاستبدال بالتطبيق المتوازي (Parallel Application)، بينما تُعرف

الطريقة الثانية بالتطبيق المتتالي (Cascade Application). تُطَبَّق قوانين الاستبدال على الكلمات باستخدام عملية رياضية تجرى على الشبكات منتهية الحالات وهي عملية التركيب (Composition).[1]

١.٢. قوانين الاستبدال الحاسوبية لظاهرة الإعلال بالحذف

يعرض هذا القسم قوانين الاستبدال الحاسوبية التي تُطَبِّق التغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف، وهي الظاهرة التي قدَّمنا تفسيراً لسانياً لها باستخدام التحليل المقطعي والقوانين الفونولوجية السياقية التي قمنا بصياغتها في أبحاث سابقة. في قوانين الاستبدال الحاسوبية التي سنطبقها عن طريق نظام Xerox Finite State Tools ستُستخدم الحروف اللاتينية لكتابة القوانين والرموز الصوتية والمتغيرات (Variables)، حيث سنستخدم الرموز التالية للتعبير عن الأصوات العربية في هذه القوانين:

جدول (٢) الرموز المستخدمة في قوانين الاستبدال الحاسوبية للتعبير عن الأصوات العربية:

الصوت	رمزه في قوانين الاستبدال الحاسوبية	الصوت	رمزه في قوانين الاستبدال الحاسوبية	الصوت	رمزه في قوانين الاستبدال الحاسوبية
ء	@	ض	dh	الفتحة	a
ب	b	ط	T	الضمة	u
ت	t	ظ	zh	الكسرة	i
ث	th	ع	3	الفتحة الطويلة	a a
ج	j	غ	g	الضمة الطويلة	u u
ح	H	ف	f	الكسرة الطويلة	i i
خ	kh	ق	q		
د	d	ك	k		
ذ	D	ل	l		
ر	r	م	m		
ز	z	ن	n		
س	s	ه	h		
ش	sh	و	w		
ص	S	ي	y		

تُعَرَّف الصوامت في قوانين الاستبدال الحاسوبية باستخدام متغير (Variable) وهو C. تُعَرَّف المتغيرات عن طريق الأمر define:

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];

[1] 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, 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.

يقابل الرمز "@" صوت الهمزة[١] 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 = {%@}∪ {b} ∪ {t} ∪ {th} ∪ {j} ∪ {h} …

تُعَرَّف أيضا الصوائت القصيرة باستخدام المتغير V.

define V [a | u | i];

بعد تعريف هذه المتغيرات، نبدأ بتعريف قوانين الاستبدال الخاصة بظاهرة الإعلال بالحذف.

١.١.٢. قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بحذف الصوت الانزلاقي

الحالة الأولى:

إذا كان الصوت الانزلاقي (الواو والياء غير المديتين) استهلالاً لثاني مقطع في جذع الكلمة وهو مقطع قصير ص ح نواته صوت الفتحة القصيرة، وكان المقطع الذي يسبقه قصيراً ص ح نواته صوت الفتحة القصيرة ، فإن الصوت الانزلاقي يُحذف، وينتج عن هذا الحذف أن تُضم نواة المقطع الثاني للمقطع الذي يسبقه وبذلك تصبح الكلمة مكونة من مقطعين أولهما طويل مفتوح ص ح ح نواته صوت الفتحة الطويلة بعد أن كانت الكلمة مكونة من ثلاثة مقاطع. من أمثلة الكلمات التي تنطبق عليها هذه الحالة:

أ- الفعل *قَوَل* الذي يصبح *قال*

/qaa la/←/qa **w**a la/

ب- الفعل *بَيَع* الذي يصبح *باع*

/baa ʕa/←/ba **y**a ʕa/

ج- الاسم *دَوَر* الذي تصبح *دار*
/ daa run/ ←/ da **w**a run/

د- الاسم نَيَب تصبح ناب

/naa bun/←/na **y**a bun/

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

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (1) الذي يحكم الحالة الأولى للإعلال بالتعويض بصوت انزلاقي هو القانون الآتي:

[w | y] → 0 || [.#.|%-] C a _ a C %- [V | V V].o.

يقول هذا القانون إن الصوت الانزلاقي ([w | y]) يُحذف إذا كان استهلالاً لثاني مقطع قصير مفتوح ص ح في جذع الكلمة وكان المقطع الذي يسبقه قصيراً مفتوحاً ص ح أيضا ونواته صوت الفتحة القصيرة ("a"). نلاحظ هنا أن الصوت الانزلاقي المحذوف كان ثاني صامت في جذع الكلمة وكان واقعا بين فتحتين.

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (1) مثالاً على تطبيق فعلي (Sample Log) لقانون الاستبدال الحاسوبي رقم (1). حيث قمنا بإدخال الفعل *قَوَل* إلى النظام، ويتبين لنا من هذه الشاشة أن النظام قد قام بتطبيق الإعلال عن طريق القانون رقم (1) وأنتج الكلمة الصحيحة *قال* بعد تطبيق ذلك الإعلال. كما أننا أدخلنا *بَيَع* وحصلنا على *باع*، وأدخلنا *دَوَر* وحصلنا على *دار*، وأدخلنا *نَيَب* وحصلنا على *ناب*.

/baa ça/←/ba ya ça/ /qaa la/←/qa **w**a la/

/naa bun/←/na **y**a bun/ /daa run/ ←/ da **w**a run/

```
xfst[1]: apply down qawal-a
qaal-a
xfst[1]: apply down baya3-a
baa3-a
xfst[1]: apply down dawar-un
daar-un
xfst[1]: apply down nayab-un
naab-un
xfst[1]:
```

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

كما سبق أن ذكرنا، يُشترط في هذا الإعلال أن يكون المقطع الذي يحوي الصوت الانزلاقي قصيراً مفتوحاً ص ح ويكون الصوت الانزلاقي استهلالاً لهذا المقطع، فإذا كان هذا المقطع طويلاً مغلقاً ص ح ص ، مثل ما يحدث عند إسناد الفعل إلى إحدى اللواحق التصريفية الدالة على الفاعل (التي تكون عبارة عن مقطع مستقل مثل {-tu} و {-naa } و {-tum})، فسيؤدي حذف الصوت الانزلاقي هنا إلى أن يكون أول مقطع في الكلمة مغرقاً في الطول مغلقاً بصامت ص ح ح ص، وهذا النوع من المقاطع ممنوع في العربية إلا في حالتي الوقف والتضعيف، لذلك فإن إعلالاً آخر يحدث وهو حذف النواة (الصائت الطويل) والتعويض عنها بصائت قصير يحمل سمات صوتية مشابهة لسمات الاستهلال المحذوف (الصوت الانزلاقي)، مثل ما يحدث في كلمة *قَوَلتُ* التي تصبح *قُلتُ* و *بَيَعتُ* التي تصبح *بِعتُ*. في هذه الحالة، تكون مراحل الإعلال التي مر بها هذان المثالان هي:

/bi**i**ç tu/ ←/ b**aa**ç tu/ ← /ba **y**aç tu/ / q**u**l tu/ ← /q**aa**l tu/ ←/qa **w**al tu/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (2) الذي يحكم الحالة الثانية للإعلال بحذف صوت الواو الانزلاقي هو:

w → 0 || [.#.|%-] C a _ a C %- [C V C | C V | C V V] .#..o.

a a → u || [.#.|%-] C _ C %- [C V C | C V | C V V] .#. .o.

كما نرى، هذا القانون المركب هو مثال على التطبيق المتتالي (Cascade Application) لقوانين الاستبدال الحاسوبية. حيث يُطَبق هذا القانون على مرحلتين: في المرحلة الأولى (القانون الأول) يُحذَف صوت /و/ (w) لوقوعه بين فتحتين وذلك عندما يأتي استهلالاً لثاني مقطع طويل مغلق ص ح ص في جذع الكلمة ويكون المقطع الذي يسبقه قصيراً مفتوحاً ص ح نواته صوت الفتحة، وفي المرحلة الثانية (القانون الثاني) يتحول الصائت الطويل (a a) وهو الفتحة الطويلة (المد بالألف) إلى صائت قصير يحمل سمات صوتية مشابهة لسمات الصوت الانزلاقي المحذوف (صوت /و/) وهذا الصائت القصير هو صوت الضمة (u). هنا يصبح مُخرَج (Output) القانون الأول مُدخَلاً (Input) للقانون الثاني. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (2) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي المركب رقم (2):

```
xfst[1]: apply down qawal-tu
qul-tu
xfst[1]:
```

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

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (3) الذي يحكم الحالة الثانية للإعلال بحذف صوت الياء الانزلاقي هو:

y → 0 || [.#.|%-] C a _ a C %- [C V C | C V | C V V] .#. .o.

a a → i || [.#.|%-] C _ C %- [C V C | C V | C V V] .#. .o.

هذا القانون المركب هو أيضاً مثال على التطبيق المتتالي (Cascade Application) لقوانين الاستبدال الحاسوبية، حيث يُطَبق هذا القانون على مرحلتين: في المرحلة الأولى (القانون الأول) يُحذَف صوت /ي/ (y) لوقوعه بين فتحتين وذلك عندما يأتي استهلالاً لثاني مقطع طويل مغلق ص ح ص في جذع الكلمة ويكون المقطع الذي يسبقه قصيراً مفتوحاً ص ح نواته صوت الفتحة، وفي المرحلة الثانية (القانون الثاني) يتحول الصائت الطويل (a a) وهو الفتحة الطويلة (المد بالألف) إلى صائت قصير يحمل سمات صوتية مشابهة لسمات الصوت الانزلاقي المحذوف (صوت /ي/) وهذا الصائت القصير هو صوت الكسرة (i). هنا أيضاً يصبح مُخرَج (Output) القانون الأول مُدخَلاً (Input) للقانون الثاني. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (3) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي المركب رقم (3):

```
xfst[1]: apply down baya3-tu
bi3-tu
xfst[1]:
```

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

كما أن هناك قاعدة أخرى تتعلق بالقاعدة السابقة، وتختص هذه القاعدة بالأفعال والأسماء المفردة التي يكون صوت /و/ ثاني صامت في جذرها. حيث إن مصادر هذه الأفعال وجموع التكسير الخاصة بتلك الأسماء

المفردة تخضع لإعلال آخر وهو حذف صوت /و/ الانزلاقي والتعويض عنه بصوت /ي/ الانزلاقي، وذلك إذا جاء صوت /و/ استهلالا لثاني مقطع في جذع الكلمة وكان هذا المقطع طويلا مفتوحا ص ح ح نواته صوت الفتحة الطويلة والمقطع الذي يسبقه قصيرا ص ح نواته صوت الكسرة. في هذه الحالة يحذف صوت /و/ ويعوض عنه بصوت /ي/. من أمثلة تطبيق هذه القاعدة على المصدر كلمة *قِوام* التي تصبح *قيام*:

/qi **y**aa mun/← /qi **w**aa mun/

ومن أمثلة تطبيق هذه القاعدة على جمع التكسير *دِوار* تصبح *ديار* :

/di **y**aa run/ ← /di **w**aa run/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (4) الذي يحكم هذه الحالة هو:

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

يقول هذا القانون إن صوت /و/ يتحول إلى صوت /ي/ إذا وقع بين صوت الكسرة (i)، وصوت الفتحة (a). هذا القانون متعلق بالقانونين السابقين الخاصين بحذف الصوت الانزلاقي الواقع بين فتحتين (قانون 2 و 3)، حيث إن تطبيقه يستلزم إمكانية تطبيق القانونين (2) و (3) على الفعل المقابل للمصدر، فلا يطبق هذا القانون على مصادر مثل *حوار* و *جوار* و *لواذ* على الرغم من انطباق الشروط الصوتية عليها، وذلك لأن أفعال هذه المصادر لا يطرأ عليها أي إعلال (أي لا يطبق عليها القانون الخاص بحذف الصوت الانزلاقي الواقع بين فتحتين) ، فهي على الترتيب *حاور* و *جاور* و *لاوذ*.

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (4) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (4):

```
xfst[1]: apply down qiwaam-un
qiyaam-un
xfst[1]: apply down diwaar-un
diyaar-un
xfst[1]:
```

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

الحالة الثانية:

إذا كانت الكلمة فعلا مضارعا، وكان أول مقطع في الكلمة طويلا مغلقا ص ح ص استهلاله ونواته سابقة تدل على الفعل المضارع (مثل {-ya})، وكان المقطع الثاني طويلا مغلقا ص ح ص استهلاله صوت انزلاقي، واتصلت بالفعل لاحقة عبارة عن مقطع مستقل وهي نون النسوة {-na}، فإن الصوت الانزلاقي (استهلال المقطع الثاني) يحذف، مثل:

كلمة يخوَفن التي تصبح يخفن /yax **w**af na/ ← / ya xaf na/

كلمة يقوُلن التي تصبح يقـُلن /yaq **w**ul na/ ← / ya qul na/

كلمة يبيِعن التي تصبح يبــِعن /yab **y**iç na/ ← / ya biç na/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (5) الذي يحكم هذه الحالة هو:

[w | y] → 0 || C V %- C _ V C %- C V .o.

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

```
xfst[1]: apply down ya-khwaf-na
ya-khaf-na
xfst[1]: apply down ya-qwul-na
ya-qul-na
xfst[1]: apply down ya-byi3-na
ya-bi3-na
xfst[1]:
```

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

الحالة الثالثة:

أ- حذف الصوت الانزلاقي في الأفعال:

إذا كان الصوت الانزلاقي استهلالا لآخر مقطع في الكلمة، وكانت نواة هذا المقطع هي صوت الفتحة، وكان المقطع الذي يسبقه قصيراً ص ح أيضا نواته صوت الفتحة، فإن الصوت الانزلاقي يحذف. من أمثلة هذه الحالة ما يأتي:

الفعل *رَمَيَ* الذي يصبح *رمى*

/ra maa/ ← /ra ma **y**a /

و يُشترط في هذه الحالة أن لا يكون المقطع الذي يحوي الصوت الانزلاقي طويلا مفتوحا ص ح ح نواته صوت الفتحة الطويلة، إذ لا يحدث أي تغيير في هذه الحالة، مثل:

دعوا /da ça **w**aa/ و *رميا* /ra ma **y**aa/

كما يُشترط أن لا يكون الصوت الانزلاقي خاتمة لمقطع طويل مغلق ص ح ص ينتهي به جذع الفعل كما يحدث حين يتصل الفعل بلاحقة تصريفية عبارة عن مقطع مستقل يأتي بعد جذع الفعل مثل /-tu/ أو /-naa/ أو /-na/، إذ لا يحدث أي تغيير في هذه الحالة، مثل:

رميتُ /ra ma**y** tu/ ، *رمينا* /ra ma**y** naa/ ، *رمينَ* /ra ma**y** na/

دعوتُ /da ça**w** tu/ ، *دعونا* /da ça**w** naa/ ، *دعون* /da ça**w** na/

ب- حذف الصوت الانزلاقي في الأسماء: إذا كان الصوت الانزلاقي استهلالا لآخر مقطع في الكلمة وكانت نواة هذا المقطع هي صوت الفتحة، وكان المقطع الذي يسبقه قصيرا ص ح نواته صوت الفتحة أيضا، فإن الصوت الانزلاقي يُحذف. من أمثلة هذه الحالة:

كلمة عصَوَ التي تصبح عصى /ʕa Sa w-a/ ← /ʕa Saa/

كلمة رَحَيَ التي تصبح رحى /ra Ha y-a/ ← /ra Haa/

كما يحدث هذا التغيير في المشتقات مثل:

كلمة مُرتجَيَ التي تصبح مُرتجى /mur ta ja y-a/ ← /mur ta jaa/

هذا إذا لم يكن الاسم منونا، فإذا كان منوناً فإنه ينتج عن حذف الصوت الانزلاقي أن يصبح آخر مقطع في الكلمة مغرقاً في الطول مغلقاً بصامت ص ح ح ص ، وهو مقطع ممنوع في العربية في حال الوصل:

/mur ta ja y-an/ ← /mur ta ja-an/

لذلك تخفف نواة المقطع الأخير ص ح ح ص بحذف جزء منها، فتصبح الكلمات المنونة بعد تخفيف النواة:
/mur ta j-an/

سنتحدث عن ذلك لاحقا عند حديثنا عن حذف النواة .

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (6) الذي يحكم هذه الحالة:

[w | y] → 0 || [.#.|%-] (C V C) C V C a _ %- a .o.

تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (6) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (6):

```
xfst[1]: apply down ramay-a
rama-a
xfst[1]: apply down 3aSaw-a
3aSa-a
xfst[1]: apply down raHay-a
raHa-a
xfst[1]: apply down murtajay-a
murtaja-a
xfst[1]:
```

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

الحالة الرابعة:

إذا كان الصوت الانزلاقي استهلالا لثاني مقطع في جذع الكلمة، وكان هذا المقطع قصيرا ص ح نواته صوت الكسرة، وكان المقطع الذي يسبقه قصيراً ص ح نواته صوت الضمة، فإن الصوت الانزلاقي يُحذف، وتضم نواة المقطع الثاني إلى نواة المقطع الأول مثل:

/ q**u**i la / ← / qu **w**i la /

/ b**u**i ʂa/←/bu **y**i ʂa/

وبما أن المقطع العربي لا يسمح بتوالي صائتين مختلفين؛ فيجب علينا توحيد النواة وذلك بحذف صوت الضمة والتعويض عنه بمطل صوت الكسرة، وبذلك يكون التغير الذي طرأ على الكلمة على النحو التالي:

/q**i**i la/ ← /q**u**i la/ ← /qu **w**i la/

/ b**i**i ʂa/←/ b**u**i ʂa/←/bu **y**i ʂa/

قانون الاستبدال الحاسوبي المركب رقم (7) الذي يحكم هذه الحالة:

[w | y] → 0 || [.#.|%-] C u _ i C .o.

u → i || [.#.|%-] C _ i .o.

هذا القانون المركب هو أيضاً مثال على التطبيق المتتالي لقوانين الاستبدال الحاسوبية، حيث يُطَبق هذا القانون على مرحلتين: في المرحلة الأولى (القانون الأول) يُحذف الصوت الانزلاقي إذا كان استهلالا لثاني مقطع في جذع الكلمة، وكان هذا المقطع قصيرا ص ح نواته صوت الكسرة، وكان المقطع الذي يسبقه قصيرا ص ح نواته صوت الضمة. في المرحلة الثانية (القانون الثاني) يُحذف صوت الضمة ويُعوض عنه بمطل صوت الكسرة. هنا أيضاً يصبح مُخرَج القانون الأول مُدخَلاً للقانون الثاني. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (7) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي المركب رقم (7):

```
xfst[1]: apply down quwil-a
qiil-a
xfst[1]: apply down buyi3-a
bii3-a
xfst[1]:
```

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

٢.١.٢. قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بحذف الواو والهمزة

في فعل الأمر إذا كان أول مقطع في الكلمة يبدأ بصامتين (يُطلق على تتابع هذين الصامتين في علم الأصوات مصطلح تتابع الصامتين Consonant Cluster)[٢] الأول صوت الهمزة أو صوت /و/، فإن صوت الهمزة و صوت /و/ يحذفان، مثل:

[١] عبابنة ، يحيى عطية. *"دراسات في فقه اللغة وفونولوجيا العربية."* دار الشروق، ٢٠٠٠.

[٢] من شروط المقطع العربي عدم البدء بصامتين.

الفعل وعِد الذي يصبح عِد /çid/←/ wçid/

الفعل أكَل الذي يصبح كـُل / kul / ← /?kul / .

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (8) الذي يحكم هذه الحالة هو:

[w | %@] → 0 || [.#.|%-] _ C V C .o.

يقول هذا القانون إن صوت /و/ (w) أو صوت الهمزة (@) يُحذف عندما يكون صوت /و/ أو صوت الهمزة أول صوت في تتابع صامتين (Consonant Cluster) تبدأ به الكلمة. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (8) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (8):

```
xfst[1]: apply down w3id
3id
xfst[1]: apply down @kul
kul
xfst[1]:
```

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

٣.١.٢. قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بحذف الواو

الحالة الأولى:

في الفعل المضارع، إذا كانت الكلمة مكونة من ثلاثة مقاطع أو أكثر، الأول مقطع طويل مغلق ص ح ص استهلاله ونواته سابقة تدل على المضارع) مثل /na-/ :، /?a-/، (/ya-/وخاتمته صوت /و/ الانزلاقي، وكانت نواة المقطع الأخير في جذع الفعل المضارع صائت أمامي غير مدور (Front Unrounded Vowel) وهو صوت الفتحة أو الكسرة ، فإن صوت /و/ يُحذف، مثل:

الفعل يَوعِد الذي يصبح يَعِد /yaw çi du/ ← /ya çi du/

الفعل نَوطَأ الذي يصبح نَطَأ /naw Ta ?u/ ← /na Ta ?u/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (٩) الذي يحكم هذه الحالة هو:

w → 0 || C V [.#.|%-] _ C [a | i] C .o.

يقول هذا القانون إن الصوت الانزلاقي /و/ يُحذف إذا كان أول صامت في جذع الفعل المضارع (Imperfective Stem)، وكان مسبوقا بسابقة تدل على الفعل المضارع (ص ح)، وكانت نواة المقطع الأخير في جذع الفعل المضارع صائت أمامي غير مدور (Front Unrounded Vowel) وهو صوت الفتحة أو الكسرة ([a | i]). تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (9) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (9):

```
xfst[1]: apply down ya-w3id-u
ya-3id-u
xfst[1]: apply down na-wTa@-u
na-Ta@-u
xfst[1]:
```

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

٤.١.٢. قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بحذف صائت قصير

إذا كان أخر مقطع في الكلمة مغرقاً في الطول مغلقاً بصامت ص ح ح ص في غير الوقف أو التضعيف، وهذا المقطع كما قلنا مقطع ممنوع في اللغة العربية في غير هاتين الحالتين، فإننا نغير بنية هذا المقطع بتخفيف النواة لتصبح صائتاً قصيراً بعد أن كانت صائتاً طويلا، ونجد هذا في حالات نذكر منها :

الحالة الأولى:

ما يحدث عند تنوين الاسم المنقوص مثل:

كلمة *داعي+ن* التي تصبح *داعٍ+ن* /daa ʕiin/ ←/daa ʕin/

كلمة *رامي+ن* التي تصبح *رامٍ+ن* /raa miin/ ← /raa min/[1]

الحالة الثانية:

نجد هذه الحالة عند صياغة فعل الأمر من الفعل المضارع *يقول* /ya-quul-u/. نقوم هنا في البداية بحذف سابقة ولاحقة الفعل المضارع لنحصل على جذع فعل الأمر *قول* /quul/ ، ويمثل هذا الجذع مقطعاً مغرقاً في الطول مغلقاً بصامت ص ح ح ص. وكما قلنا سابقا، هذا المقطع ممنوع في العربية في غير حالتي الوقف والتضعيف، لذلك فإن نواة هذا المقطع (الحركة الطويلة) تُخفف لتصبح صائتاً قصيراً فيتحول *فعل الأمر* *قول* /quul/ إلى *قُل* / qul / . ينطبق ذلك أيضاًعلى فعل الأمر *بيع* الذي يصبح *بع* /biiʕ/ ← /biʕ/ .

الحالة الثالثة:

في الفعل، إذا كان آخر مقطع في جذع الفعل طويلا مفتوحا ص ح ح نواته صوت الفتحة الطويلة، وأُسنِد الفعل إلى تاء التأنيث الساكنة /at-/. في هذه الحالة نجد أن آخر مقطع في الفعل يصبح مغرقاً في الطول مغلقاً بصامت ص ح ح ص، لذلك تخفف النواة بحذف صائت قصير منها، ليصبح المقطع طويلا مغلقا ص ح ص مثل:

[1] سبق أن تعرضت هاتان الكلمتين لإعلال سابق ، وتمثل هذا الإعلال في حذف استهلال ونواة آخر مقطع في الكلمة (**wu**n و **yu**n) والتعويض عنهما بمطل نواة المقطع الذي يسبقهما /daa ʕi **wu**n/ ← /daa ʕiin/ ←/daa ʕin/ /raa mi **yu**n/ ←/ra miin/ ← raa min/

الفعل *رمى+ت* الذي يصبح *رَمَت* / ra maat/ ← /ra mat/

الفعل *دعى+ت* الذي يصبح دعت / da ʕaat/ ← / da ʕat/

تجدر الإشارة هنا إلى أن هاتين الكلمتين قد تعرضتا لإعلال سابق بسبب وقوع الصوت الانزلاقي بين فتحتين، وبذلك نستطيع أن نقول أن هاتين الكلمتين قد تعرضتا لنوعين من الإعلال : الأول حذف الصوت الانزلاقي ، والثاني تخفيف النواة ، وذلك على النحو التالي :

/ra m-at/ ← /ra ma-**a**t/ ← /ra ma **y**-at/

/da ʕ-at/ ← /da ʕa-**a**t/ ← /da ʕa **w**-at/

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (10) الذي يحكم حالات الإعلال بحذف صائت قصير هو:

V → 0 || C V (%-) _ C.#. .o.

باستخدام هذا القانون يتحول المقطع المغرق في الطول المغلق بصامت ص ح ح ص الذي ينتهي به جذع الكلمة إلى مقطع طويل مغلق ص ح ص من خلال حذف صائت قصير من نواة هذا المقطع. تعرض الشاشة الظاهرة في شكل رقم (10) مثالاً على تطبيق قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (10):

```
xfst[1]: apply down daa3i-in
daa3i-n
xfst[1]: apply down raami-in
raami-n
xfst[1]: apply down quul
qul
xfst[1]: apply down bii3
bi3
xfst[1]: apply down da3aw-at
da3a-t
xfst[1]: apply down ramay-at
rama-t
xfst[1]:
```

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

٢.١.٥. قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بحذف صوت انزلاقي وصائت قصير

إذا كان آخر مقطع في جذع الكلمة طويلا مفتوحا ص ح ح، استهلاله صوت انزلاقي و نواته صائت طويل ضيق (Narrow Long Vowel) أي صوت الضمة الطويلة أو الكسرة الطويلة، وكان هذا المقطع مسبوقا بمقطع قصير ص ح نواته صائت قصير ضيق، فإن الصائت القصير الضيق (نواة المقطع قبل الأخير في جذع الكلمة) يُحذف، كما يحذف الصوت الانزلاقي (استهلال آخر مقطع في جذع الكلمة). الحالات التالية توضح أمثلة على تطبيق هذا الحذف.

الحالة الأولى:

من أمثلة حذف الصوت الانزلاقي في الأفعال:

الفعل الماضي *رضيوا* الذي يصبح بعد الإعلال *رضوا* /ra Di **y**uu/ ← /ra Duu/

الفعل المضارع *ترمِيون* الذي يصبح *ترمون* /tar m**i** **y**uun/← /tar muun/

الفعل المضارع *تدعُوين* الذي يصبح *تدعين* /tad ʕ**u** **w**iin/← /tad ʕiin/

الحالة الثانية:

من أمثلة حذف الصوت الانزلاقي في الأسماء:

اسم الفاعل *داعِوون* الذي يصبح *داعون* /daa ʕ**i** **w**uun/ ← /daa ʕuun/

اسم الفاعل *معطِوين* الذي يصبح *معطين* /muʕ T**i** **w**iin/ ← /muʕ Tiin/

اسم الفاعل *ساعِيون* الذي يصبح *ساعون* /saa ʕ**i** **y**uun/ ← /saa ʕuun/

اسم الفاعل *رامِيين* يصبح *رامين* /raa m**i** **y**iin/← /raa miin/ .

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (11) الذي يحكم هذه الحالة هو:

[w | y] → 0 || C [u|i] _ (%-) [u u | i i] (n).#. .o.

[u | i] → 0 || C _ %- [u u| i i] .o.

هذا القانون المركب هو أيضاً مثال على التطبيق المتتالي لقوانين الاستبدال الحاسوبية، حيث يُطَبق هذا القانون على مرحلتين: في المرحلة الأولى (القانون الأول) يُحذف الصوت الانزلاقي إذا كان واقعا بين صائتين ضيقين (Narrow Vowels)، الأول قصير ([u|i]) والثاني طويل ([u u | i i]). في المرحلة الثانية (القانون الثاني) يُحذف الصائت القصير لمنع تتابع صائت قصير وصائت طويل. هنا أيضاً يصبح مُخرَج القانون الأول مُدخَلاً للقانون الثاني . تبين الشاشة الآتية تطبيقاً فعلياً للقانون الحاسوبي رقم (11) :

```
xfst[1]: apply down raDiy-uu
raD-uu
xfst[1]: down ta-rmiy-uun
ta-rm-uun
xfst[1]: apply down ta-d3uw-iin
ta-d3-iin
xfst[1]: apply down daa3iw-uun
daa3-uun
xfst[1]: apply down mu-3Tiw-iin
mu-3T-iin
xfst[1]: apply down saa3iy-uun
saa3-uun
xfst[1]: apply down ramiy-iin
ram-iin
xfst[1]:
```

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

٦.١.٢. قوانين استبدال حاسوبية للإعلال بحذف همزة وصائت قصير

تحدث هذه الظاهرة في الفعل المضارع إذا كان أول مقطع في الكلمة قصيراً ص ح وهو عبارة عن سابقة من سوابق المضارع، والمقطع الذي يليه طويلا مغلقا ص ح ص استهلاله صوت الهمزة ونواته صوت الفتحة، فإن الهمزة تحذف مع صوت الفتحة، وبذلك تصبح خاتمة المقطع الثاني في الكلمة خاتمة للمقطع الأول، مثل:

الفعل *يؤكرم* الذي يصبح *يكرم* /yu **?a**k ri mu/ ← /yuk ri mu/

يشترط هنا أن لا تكون الهمزة من أصل الكلمة (أي أن لا تكون الهمزة أحد حروف جذر الكلمة)، إذ لا يقع الحذف في هذه الحالة، مثل *يؤجر* و *يؤرخ*.

قانون الاستبدال الحاسوبي رقم (12) الذي يطبق على الفعل المضارع هو:

%@ a → 0 || C V %- _ C C V C (.#. | %-) .o.

من خلال هذا القانون يُحذف صوت الهمزة وصوت الفتحة الذي بعده (@ a) إذا كانا يشكلان استهلالاً ونواة لأول مقطع في جذع الفعل المضارع (Imperfective Stem)، حيث يأتي هذا المقطع بعد سابقة من سوابق المضارع (ص ح). تبين الشاشة الآتية تطبيقاً فعلياً للقانون الحاسوبي رقم (12):

```
xfst[1]: apply down yu-@akrim-u
yu-krim-u
xfst[1]:
```

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

٣. الأبحاث المستقبلية

ستتناول الأبحاث المستقبلية إن شاء الله استخدام المنهج الحاسوبي الذي قدمه هذا البحث لتطوير أداء المدقق الإملائي الإلكتروني (Spell Checker) بحيث يأخذ بعين الاعتبار التغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف. كذلك ستتناول الأبحاث القادمة إمكانية توسيع نطاق هذا المنهج الحاسوبي ليشمل تطوير أداء 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 بالحذف. 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.

٤. نتائج البحث

قدم هذا البحث منهجاً حاسوبياً للتعامل مع التغييرات الصوتية والصرف-صوتية التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالحذف. 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 لساني سليم للتغيرات الصوتية والصرف-صوتية التي تحدث في إطار ظاهرة الإعلال بالحذف. هذا التحليل المقطعي 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.

أثبت البحث أننا من خلال استخدام التحليل المقطعي والقوانين الفونولوجية لتفسير التغييرات الصوتية والصرف-صوتية في ظاهرة الإعلال بالحذف، ومن خلال المعالجة الحاسوبية لهذه التغيرات ، 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. حيث استطعنا ببناء منهج حاسوبي باستخدام تقنية الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata) عن طريق الشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) وباستخدام عمليات رياضية تُطَبَّق على هذه الشبكات أهمها عملية التركيب (Composition). حيث طبقنا القوانين الفونولوجية الخاصة بالتغييرات الصوتية والصرف-صوتية المتعلقة بظاهرة الإعلال بالحذف على الأسماء والأفعال عن طريق قوانين حاسوبية خاصة تعرف بقوانين الاستبدال الحاسوبية (Replace Rules). هذه القوانين يتم تحويلها آليا إلى شبكات منتهية الحالات (Finite State Transducers) عن طريق نظام (Xerox Finite State Tools). كما أثبتنا نجاح منهجنا الحاسوبي في التعامل مع التغييرات الصوتية والصرف-صوتية في ظاهرة الإعلال بالحذف من خلال ما عرضناه من أمثلة تطبيقية فعلية لهذه المعالجة الحاسوبية باستخدام منهجنا الحاسوبي المقترح. تجدر الإشارة إلى أن تقنية الآلات منتهية الحالات (Finite State Automata) مستخدمة بكثرة في مجال المعالجة الحاسوبية للغة الطبيعية (Natural Language Processing) بشكل عام، والمعالجة الحاسوبية للصرف (Morphological Processing) بشكل خاص.

صُمِّمَ نظامنا الحاسوبي باستخدام 24 صيغة معالجة حاسوبية (Regular Expressions)، وتحتوي هذه الصيغ على 12 قانون استبدال حاسوبي (Replace Rules). النظام مكون من مجموعة من الشبكات منتهية الحالات (Finite State Networks) والتي تتكون من 184 حالة (States) و 4578 وظيفة انتقال (Transitions/Arcs).

المراجع:

أحمد، أحمد راغب. "التحليل الصرفي لمكونات الكلمات العربية: دراسة لغوية حاسوبية." *مجلة جيل الدراسات الأدبية والفكرية*، مركز جيل البحث العلمي، الجزائر، 2016، العدد 21 ، الصفحات 111 -122.

بوبقار، عمر. "الإبدال بين الصوائت القصيرة في ضوء علم الأصوات الوظيفي." *مجلة الأثر*، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، 2014، العدد 20 ، الصفحات 63-71.

بوبقار، عمر. "ظاهرة الإبدال بين الصوامت: مقاربة صوتية دلالية في ضوء علم الأصوات الوظيفي." *مجلة الذاكرة*، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، 2015، العدد 5 ، الصفحات 336-355.

بوجمل، حمزة. "أثر الدرس الصوتي الحديث في تجديد الصرف العربي." *مجلة الآداب للدراسات اللغوية والأدبية*، جامعة ذمار – كلية الآداب، الجمهورية اليمنية، 2020، العدد 6 ، الصفحات 98-119.

حامد، عبد الحليم محمد. "التحليل المورفوفونولوجي لبنية الكلمة العربية." *مجلة كلية اللغة العربية*، جامعة أم درمان الإسلامية – كلية اللغة العربية، السودان، 2016، العدد 8 ، الصفحات 169-208.

خلف، صيوان خضير. "الإعلال بين التعليلين الصرفي والصوتي." مجلة *أبحاث البصرة للعلوم الإنسانية*، جامعة البصرة – كلية التربية للعلوم الإنسانية، الجمهورية العراقية، 2013، المجلد 38، العدد 4 ، الصفحات 57-80.

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

رباع، محمد علي. "النظام المقطعي وهمزة الوصل في العربية." *مجلة العلوم الإنسانية*، جامعة منتوري قسنطية ، الجزائر، 2000، العدد 13 ، الصفحات 159 -181.

سقال، ديزيرة. *الصرف وعلم الأصوات*. دار الصداقة العربية ، بيروت، 1996.

سليمان، زين العابدين. "تأصيل المصطلح الصوتي في اللغة العربية: الفونتيتيكا والفونولوجيا أنموذجا." *مجلة الممارسات اللغوية*، جامعة مولود معمري تيزي وزو، الجزائر، 2017، العدد 39 ، الصفحات 120- 107.

السيد، محمود حلمي محمود. "أثر التحليل المقطعي في بعض الظواهر الصوتية." *مجلة كلية الآداب*، جامعة سوهاج-كلية الآداب، مصر، 2018، العدد 46.

شاهين، عبد الصبور. *المنهج الصوتي للبنية العربية*. مؤسسة الرسالة ، بيروت، 1980.

شحاتة، قباري محمد عبده. "ظاهرة الإعلال بالحذف: دراسة صوتية." *صحيفة الألسن: سلسلة في الدراسات الأدبية واللغوية*، جامعة عين شمس – كلية الألسن، مصر، 2009، العدد 25 ، الصفحات 404-447.

الشمسان ، ابراهيم. " الإبدال إلى الهمزة وأحرف العلة في ضوء كتاب سر صناعة الإعراب لابن جني." *حوليات كلية الآداب والعلوم الاجتماعية*، مجلس النشر العلمي، جامعة الكويت، الكويت ، 2002.

صالح، رضا فاروق صديق. "علاقة البنية المقطعية بالإعراب عند المحدثين" *مجلة كلية الآداب*، كلية الآداب، جامعة سوهاج ، مصر، 2018، العدد 49 ، الصفحات 71 -108.

عبابنة ، يحيى عطية. *"دراسات في فقه اللغة وفونولوجيا العربية."* دار الشروق، ٢٠٠٠.

عبد الواحد، عبد الحميد و اليحياوي، مولدي. "الفونولوجيا المستقلة القطع ونماذج من تطبيقاتها على العربية." *مجلة اللسانيات العربية*، مركز الملك عبد الله بن عبد العزيز الدولي لخدمة اللغة العربية، المملكة العربية السعودية، 2016، العدد 3 ، الصفحات 153-190.

عمر، محمد علي أحمد. "التغييرات الصوتية في بنية ألفاظ الحديث الشريف: دراسة في صحيح الإمام البخاري." *مجلة العلوم والبحوث الإسلامية*، جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا- معهد العلوم والبحوث الإسلامية، السودان، 2013، العدد 6 ، الصفحات 1-26.

محمد عبد المقصود، عبد المقصود. *دراسة البنية الصرفية في ضوء اللسانيات الوصفية*. الدار العربية للموسوعات ، بيروت، 2006.

مراد، محمد نعمان. "صياغة لسانية لبناء نظام حاسوبي لمعالجة الصرف في اللغة العربية." *مجلة العلوم التربوية والنفسية*، الجمعية العراقية للعلوم التربوية والنفسية، الجمهورية العراقية، 2013، العدد 101 ، الصفحات 701 -740.

المهيوبي، عبد العزيز بن عبد الله. "بناء برنامج حاسوبي لتوليد أفعال اللغة العربية وتصريفها." *مجلة مجمع اللغة العربية على الشبكة العالمية*، مجمع اللغة العربية على الشبكة العالمية، المملكة العربية السعودية، 2018، العدد 17 ، الصفحات 91 -166.

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

هواري، عبد العاطي و رشوان، محسن عبد الرازق و زغواني، وجدي . "نحو بناء مصدر دلالي حاسوبي للصيغ الصرفية الفعلية في القرآن الكريم." *مجلة التخطيط والسياسة اللغوية*، مركز الملك عبد الله بن عبد

العزيز الدولي لخدمة اللغة العربية، المملكة العربية السعودية، 2017، السنة 2، العدد 4 ، الصفحات 26-52.

اليحياوي، مولدي. "الوقف: دراسة في فونولوجيا القطع المستقلة." *مجلة العلوم الإنسانية*، جامعة البحرين – كلية الآداب، مملكة البحرين، 2018، العدد 31 ، الصفحات 101-118.

References:

Alajmi, N, Deris, N and Alnajem. "Computational approach to Arabic broken derived nouns morphology." *2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, IEEE, 2008, pp. 704-708.

Alnaied, A., Elbendak, M., and Bulbul, A. "An intelligent use of stemmer and morphology analysis for arabic information retrieval". *Egyptian Informatics Journal*, 2020, *21*(4), 209-217.

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

Alnajem, S. "Inheritance-based approach to arabic verbal Root-and-Pattern morphology." *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods*, *Text, Speech and Language Technology, vol 38,* edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007, pp. 67-88.

Alnajem, S. "A computational approach to arabic orthographic relaxation". *Arab Journal for the Humanities*, 2005c, 23(89), 189-205.

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, 2004.

Alnajem, S. "A Finite-State Approach to Arabic Verbal Inflection." *Journal of the College of Humanities and Social Sciences*, Qatar University, Qatar, 2005a.

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.

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. "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. "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. 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". *Computational Linguistics*, 1994, vol. 20, no. 1, pp. 55–90.

Crystal, D. *A dictionary of linguistics and phonetics*. John Wiley & Sons, 2011.

Dichy J., Farghaly A. "Grammar-Lexis Relations in the Computational Morphology of Arabic." *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods, Text, Speech and Language Technology, vol 38,* edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007.

Habash N. "Arabic Morphological Representations for Machine Translation". *Arabic Computational Morphology: Knowledge-based and Empirical Methods, Text, Speech and Language Technology, vol 38,* edited by Antal van den Bosch and Abdelhadi Soudi, Springer, Dordrecht, 2007.

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. " 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. "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. *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.

Matthews, P. H. *The concise Oxford dictionary of linguistics*. Oxford University Press, 2014.

Miller, J. E., and Brown, E. K. *The Cambridge dictionary of linguistics*. Cambridge University Press, 2013.

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.

A Computational Approach to Dealing with the Phenomenon of Al'ielal Bil Hazf

Dr. Salah Alnajem

Arabic Department

College of Arts, Kuwait University, Kuwait

salah.alnajem@ku.edu.kw

Abstract

This paper presents a computational approach to deal with the phonological and morpho-phonological alternations that occur within the phenomenon of Al'ielal Bil Hazf (الإعلال بالحذف). The phenomenon of Al'ielal relates to the alternations that occur in vowel and hamza sounds in certain phonological contexts. The computational approach presented in this paper is built using a linguistically-motivated formalization of Al'ielal Bil Hazf phenomenon using the Syllabification Analysis of word structure and Phonological Context-Sensitive Rules. We built the computational approach using Finite State Automata technique through Finite State Networks and using mathematical operations applied to these networks, the most important of which is the Composition operation. We applied the phonological rules of alternations related to the phenomenon of Al'ielal Bil Hazf by means of special computational rules known as Replace Rules. These rules were automatically converted into Finite State Transducers through the Xerox Finite State Tools system and using them we were able to computationally deal with the linguistic generalizations and regularities that govern the phonological and morpho-phonological alternations that occur in the phenomenon of Al'ielal Bil Hazf. We also demonstrated in an applied manner the success of our approach in enabling the computer to deal with these alternations.

Keywords: Computational Linguistics, Arabic Language Processing, Applied Linguistics , Syllabification, Morpho-phonological Alternations.