تحليل واستخلاص الخصائص الموسيقية لنغمات آلة الناي العربي

ماجد عبدالواحد الطائي: قسم هندسة الحاسوب، كلية الهندسة والتكنولوجيا، الجامعة الأردنية، عمان، الأردن.
فادي محمد الغوانمة: قسم الفنون الموسيقية، كلية الفنون والتصميم، الجامعة الأردنية، عمان، الأردن.

تاريخ الاستلام: 13 /8/ 2008 **تاريخ القبول**: 10 /5/ 2010

ملخص

تقدم هذه الورقة نظاما حاسوبيا قادرا على تحليل واستخلاص خصائص الموسيقى العربية لالة الناي العربي بهدف أتمتة التدوين الموسيقي لها. وجدير بالإشارة هنا بان أتمتة التدوين الموسيقي لآلة الناي هو الأكثر صعوبة مقارنة بالآلات الغربية والآلات العربية الأخرى. ويعود السبب في ذلك إلى اختلاف الموسيقى العربية عن نظيرتها الغربية بالأبعاد الموسيقية (Musical intervals)، حيث يعد نصف البعد (Semitone) هو أقل مسافة لحنية ممكنة بين نغمتين في الموسيقى الغربية مقارنة بربع البعد (Quarter tone) في الموسيقى العربية. وكذلك تعتبر عملية التدوين الموسيقي لآلة الناي أكثر صعوبة مقارنة بالآلات العربية الأخرى لكونها بسيطة التركيب وبالتالي فإنها أكثر عرضة لانحراف الضبط المصنعي (Tune deviation). وتختلف آلة الناي عن آلات التخت العربي الأخرى بعدم القدرة على تحديد بداية النغمة اعتمادا على تغير شدة الصوت. تم تصميم وبناء نموذج لنظام التدوين الحاسوبي لآلة الناي وتم اختبار كفاءته عمليا من خلال استخدام مخرج النظام وهو ملف ميدي (MIDI File) كمدخل لنظام سيبليوس(Sibelius). وقد بينت نتائج الاختبارات العملية بان النظام المقترح يعمل بدقة تزيد عن 90%.

Analysis and Features Recognition of the Arabian Flute (Nay) Musical Tones

Majid Al-Taee, *Faculty of Engineering and Technology, The University of Jordan, Amman, Jordan.*
Fadi Gwanmi, *Faculty of Arts and Design, The University of Jordan, Amman, Jordan.*

Abstract

Automatic music transcription of Arabian musical instruments is more difficult compared to Western musical instruments. An important reason for this is differences in musical intervals; whereas the least interval is a semitone in Western music, it is a quarter tone in Arabian music. In addition, automatic music transcription of the Arabian flute (Al-Nay) is more difficult than other Arabian instruments due to its simple handcrafting which makes it more prone to tune deviation and due to difficulty in identifying the tone's onset depending on the change in sound intensity. This paper presents a computerized system capable of analysing and extracting musical features of Al-Nay with the aim of automating its musical transcription. The system operation starts by the provision of an audio file to be processed through several stages with the aim of extracting its musical features. Fundamental frequencies are extracted and tone durations are computed ending up with constructing a MIDI matrix which contains all the data needed to generate the musical sheet. Performance of the developed system prototype was assessed experimentally by using its output (MIDI file) as an input to "Sibelius" software. Results of practical tests show that the proposed system operates with an accuracy rate exceeding 90%.

المقدمة

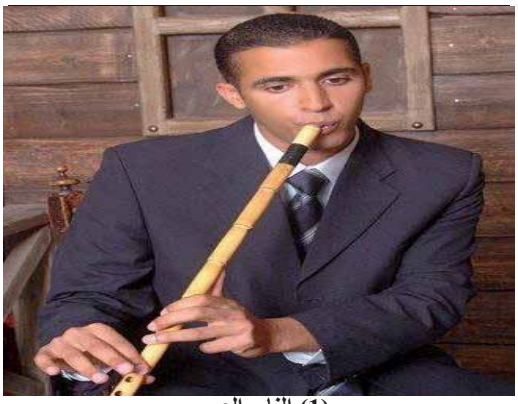
تعد آلة الناي من أبسط الآلات الموسيقية تركيبا وتصنيعا وأقلها كلفة فضلا عن كونها من أقدم الآلات النفخية اكتشافا. عُرفت آلة الناي في منطقتنا العربية منذ القدم وخاصة في بلاد مابين النهرين ووادي النيل ومن ثم انتشرت في عدة مناطق اخرى في العالم [1]. لقد لعبت هذه الآلة دورا هاما في التأريخ الحديث للموسيقى العربية وتطور استخدامها من خلال المراحل الآتية [1-3]:

1. **المرحلة الأولى** - لعبت آلة الناي دوراً هاماً كعنصر أساسي في فرقة التخت العربي التي تضم إلى جانب الناي أربع آلات أخرى وهي: القانون والعود والرّق والكمان. وكان دور آلة الناي في هذه الفرقة يقتصر على عزف الألحان التي يغلب عليها طابع الحزن بالاضافة الى أداء التقاسيم ومرافقة المغني خلال الغناء والارتجال. وفي

هذه المرحلة، كان عازف الناي يعتمد أساساً على مواهبه في الاستماع والحفظ وتكرار ما يسمع ويحفظ.

2. **المرحلة الثانية** - شهدت تطوراً هاماً فى توظيف التدوين الموسيقي المكتوب باليد في تعليم الناي واحترافه.
3. **المرحلة الثالثة** - تأثرت كبيرا بالتقدم التكنولوجي الحاصل في علوم الحاسوب والصوتيات، حيث تحليل قدرات آلة الناي وسماتها الموسيقية بدقة وتخصص لا سابق له. بالإضافة إلى ذلك فإن صناعة هذه الآلة قد تحسنت أيضا.

تستخدم آلة الناي بوصفها مجموعة متكاملة (طَقم) تتكون من سبعة نايات بقياسات مختلفة كما هو مبين في الشكل 1(أ). إن تركيب آلة الناي عبارة عن قصبة جوفاء ذي تسع عُقَل يفصلها ثماني عقد وتكون مفتوحة من كلا الجانبين ولها ستة ثقوب أمامية بالاضافة الى ثقب خلفي [4]. تختلف آلة الناي عن آلة الفلوت الغربي بطريقة نفخ الهواء، حيث ينفخ الهواء عموديا في آلة الناي كما موضح في الشكل 1(أ)، بينما ينفخ الهواء افقيا في آلة الفلوت كما في الشكل 1(ب).



(1) الناي العربي

(ب) الفلوت الغربي

الشكل 1: طريقة نفخ الهواء في آلتي الناي والفلوت.

تغطي مجموعة النايات ثلاث طبقات صوتية، هي [5]:

1. الطبقة الصوتية الكبيرة؛ وهي الطبقة المشتركة بين الموسيقى العربية والغربية وتكون ضمن مدى التردد (338 – 445) هيرتز، وتستخدم هذه الطبقة لضبط معظم الآلات الغربية والشرقية.
2. الطبقة الصوتية المتوسطة؛ وهي طبقة تنخفض بنصف بعد طنيني عن الطبقة الصوتية الكبيرة.
3. الطبقة الصوتية الصغيرة؛ وهي طبقة تنخفض ببعد طنيني كامل عن الطبقة الصوتية الكبيرة.

يستخدم عازف الناي آلاته كُلاً على حده، والاختيار بينها يتوقف على درجة المقام الموسيقي، فكلما قَصُر طول الناي ازدادت حدة صوته [6]. الجدول 1 يوضح قائمة بالأسماء المتداولة للنايات العربية وأطوالها. أما طرائق التحكم

بالصوت الموسيقي لآلة الناي، فيمكن ايجازها بما يأتي:

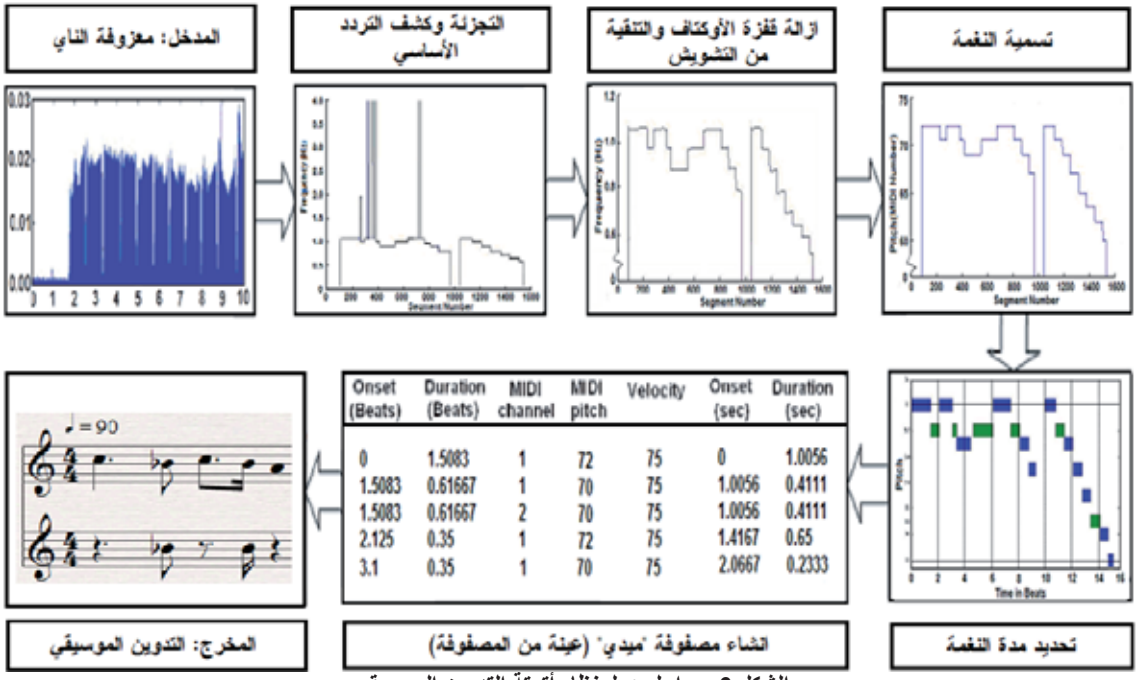
1. **طريقة النفخ** - ان إخراج الصوت الموسيقي من آلة الناي هو أول صعوبة يجب التغلب عليها لمن أراد تعلمها. كما أن زيادة قوة النفخ تعطي درجات صوتية أعلى وضمن مدى صوتي يقدر بأوكتافين ونصف.
2. **طريقة سد الثقوب** – تستخدم هذه الطريقة لتشكيل النغمات الموسيقية بالتسلسل المطلوب وذلك من خلال تتابع عملية غلق وفتح ثقوب الناي.

الجدول 1: الأسماء المتداولة للنايات العربية وأطوالها.

الرقم	الاسم (مقابله بالإنجليزية)	الطول (سم)
1	راست (C)	68
2	دوكاه (D)	60
3	بوساليك (E)	54
4	جاهاركاه (F)	51
5	نوى (G)	44.5
6	حسيني (A)	40.5
7	عجم (B flat)	37.5

2. وصف عام لنظام التدوين الموسيقي المقترح

الشكل 2 يوضح مخططا مبسطا لنظام التدوين الموسيقي المقترح لآلة الناي. يبدأ عمل النظام من خلال تغذيته بالملف الصوتي كمُدخل تتم معالجته في عدة مراحل بهدف استخلاص الخصائص الموسيقية التي تميز صوت آلة الناي عن غيره من اصوات الآلات الموسيقية الاخرى. وجدير بالاشارة هنا بان هذه المرحلة تمثل حجر الزاوية في عملية أتمتة التدوين الموسيقي بصفة عامة. وقد تم استخدام ناي «دوكاه» لإجراء التجارب الخاصة بهذا البحث وذلك لكونة الناي الأساسي والأكثر أهمية ضمن طقم النايات. الجدول 2 يوضح مجموعة النغمات التي يمكن اداؤها بناي "دوكاه"، حيث تم تمييز النغمات العربية (أرباع الأبعاد) في هذا الجدول بالخط الغامق المائل. الرمز (d) يعني نصف "بيمول".



الشكل 2: مراحل عمل نظام أتمتة التدوين الموسيقي.

الجدول 2: نغمات ناي دوكاه

أوكتاف 1	أوكتاف 2	أوكتاف 3
C_4	C_5	C_6
$C^{\#}_4 / D^{b}_4$	$C^{\#}_5 / D^{b}_5$	$C^{\#}_6 / D^{b}_6$
$D_{4(low)}$	$D_{5(middle)}$	$D_{6(high)}$
$D^{\#}_4 / E^{b}_4$	$D^{\#}_5 / E^{b}_5$	$D^{\#}_6 / E^{b}_6$
$\underline{\underline{E^{d}_4}}$	$\underline{\underline{E^{d}_5}}$	$\underline{\underline{E^{d}_6}}$
E_4	E_5	E_6
F_4	F_5	F_6
$F^{\#}_4 / G^{b}_4$	$F^{\#}_5 / G^{b}_5$	$F^{\#}_6 / G^{b}_6$
G_4	G_5	G_6
$G^{\#}_4 / A^{b}_4$	$G^{\#}_5 / A^{b}_5$	
A_4	A_5	
$A^{\#}_4 / B^{b}_4$	$A^{\#}_5 / B^{b}_5$	
$\underline{\underline{B^{d}_4}}$	$\underline{\underline{B^{d}_5}}$	
B_4	B_5	

وتتلخص مراحل عمل النظام الحاسوبي المقترح بما يأتي:

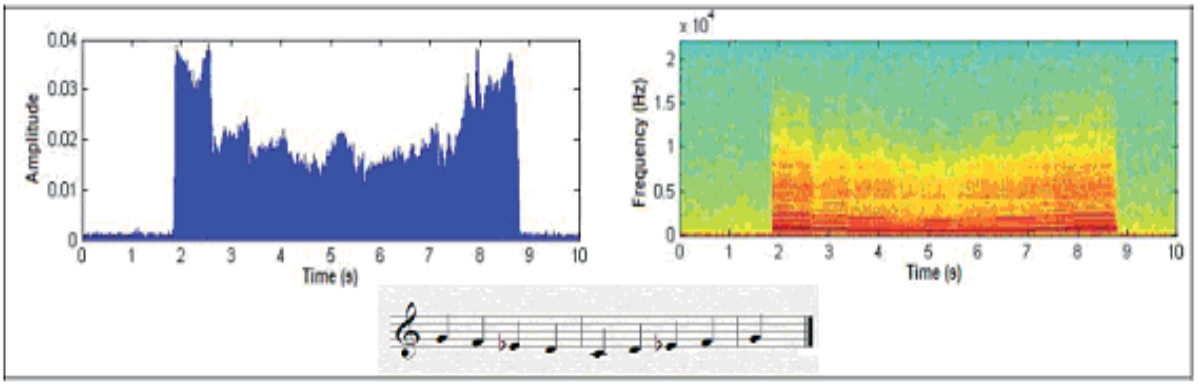
- استقبال الصوت الموسيقي لآلة الناي عن طريق لاقط الصوت وتحويله الى اشارة رقمية.
- تحليل الاشارة الرقمية باستخدام تحويل فورييه (Fourier Transform) لغرض استخلاص الخصائص الموسيقية وتصنيفها بحسب ترددها الاساسي (Fundamental Frequency) الى فئات منسجمة مع المديات القياسية لنغمة آلة الناي.
- تنقية الاشارات الرقمية من التشويش والتوافقيات غير المرغوب فيها والناجمة عن الضوضاء المحيطة وضعف تحكم العازف بشدة النفخ عند الانتقال من مستوى لآخر أثناء العزف.
- تسمية النغمة الموسيقية وتحديد مدتها.
- إستخدام خصائص الصوت الموسيقي التي تمت معالجتها في المراحل السابقة في انشاء مصفوفة، سميت مصفوفة ميدي (MIDI Matrix)، تتضمن جميع البيانات اللازمة لرسم النوتة الموسيقية العربية.
- استخدام نظام رسم النوتة الموسيقية للحصول على المدونة الموسيقية المعبرة عن الصوت الموسيقي لآلة الناي.

استخلاص خصائص الصوت الموسيقي لآلة الناي

تتطرق هذه الفقرة الى النظريات والنتائج العملية التي تم التوصل اليها خلال كل مرحلة من مراحل عمل النظام المقترح وذلك بهدف تحليل استخلاص خصائص الصوت الموسيقي لآلة الناي وصولا الى مرحلة التدوين الموسيقي لنغمات هذه الآلة.

كشف بداية النغمة (Onset Detection)

استنادا الى نظرية بيرغمان (Bergman's theory) [7]، **فان** الحَدّ (الهبوط النسبي) في شدة الصوت يقابل حداً بين نغمتينً. وبناء على ذلك فإن تحديد بدايات النغمات يمكن أن يتم نظريا من خلال اقتفاء أثر الحدود في شدة الصوت والتي تظهر على شكل هبوط نسبي في الشدة عند نهاية كل نغمة. ومن خلال النتائج التي تم التوصل اليها في هذا البحث، تبين بان هذه الطريقة غير فعالة في تحديد بداية النغمات الموسيقية لآلة الناي وذلك بسبب وجود نقاط هبوط في شدة الصوت ضمن النغمة الواحدة بالاضافة الى نهايتها، وكما هو مبين في الشكل 3. وقد يعود السبب في ذلك الى طريقة النفخ العمودي لآلة الناي. ومع ذلك فان طريقة تتبع شدة الصوت يمكن اعتبارها طريقة فعالة في كشف لحظات الصمت (التوقف عن العزف) حتى لو كانت قصيرة. وبناءً على ما تقدم، فقد تم التوصل الى طريقة أخرى تعتمد التغير في التردد الأساسي كبديل ناتج عن الهبوط النسبي في شدة الصوت في كشف بدايات النغمات **[8].**



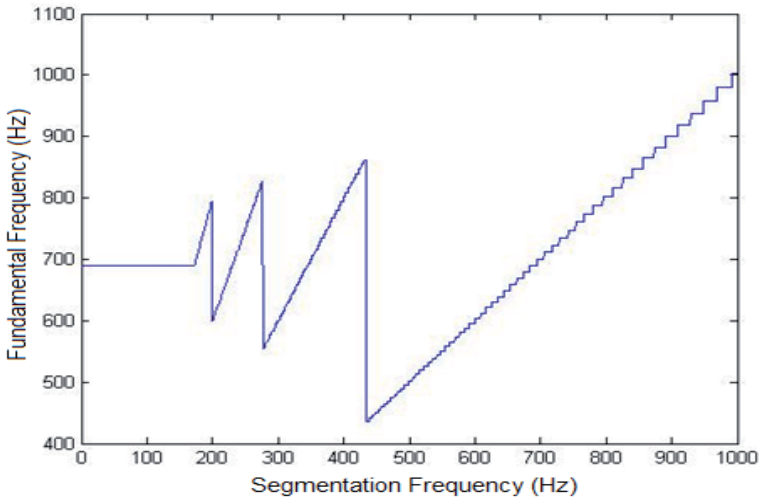
الشكل 3: الشكل الموجي والصورة الطيفية لعزف الناي.

كشف التردد الأساسي (Fundamental Frequency)

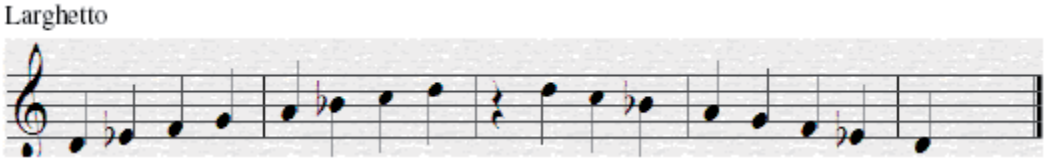
تهدف التجارب التالية الى التمييز بين النغمات المؤداة باستخدام ناي «دوكاه»، حيث تم استخدام تحويل فورييه ذي الزمن القصير (Short Time Fourier Transform) لتتبع ترددات الناي على طول فترة الأداء العزفي [9]. أجريت تجربتان عمليتان لمقارنة كشف النغمة (Pitch detection) لكل من الناي والفلوت وذلك عن طريق تحليل الشكل الموجي (Waveform) والصورة الطيفية (Spectrogram) لعزف الناي كما في الشكل 3. ان الهدف الأساسي من اجراء هذه التجارب هو إيجاد أفضل طول تجزئة (Segment) ليتم اعتماده أساساً لتجزئة السيل النغمي لعزف الناي ومن ثم حساب التردد الأساسي وفق الخوارزمية الآتية:

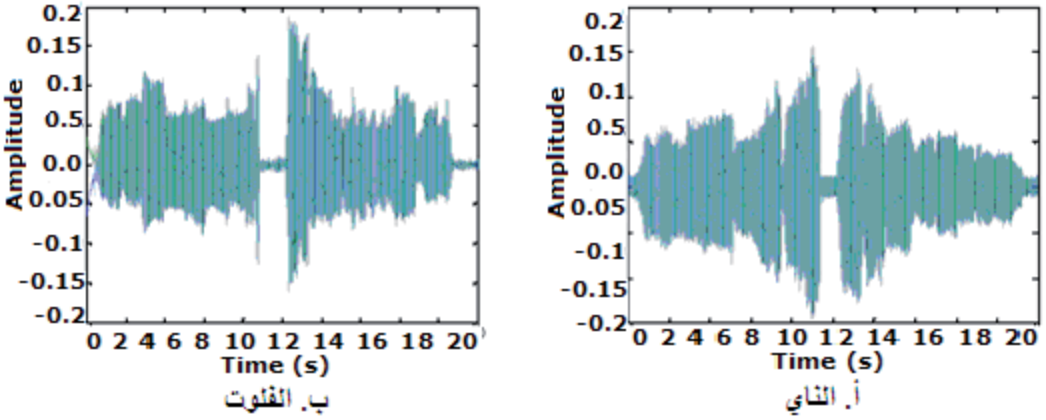
- اقتطع تجزئةً واحدةً بحجم (س) عينة صوتية، ولنسمها (ق)
- جَد تحويل فورييه لـ(ق)، ولنسمه (ت)
- جَد القيمة المطلقة لـ(ت)، ولنسمه (م)
- جَد التردد الأساسي والذي يمثل تردداً على قيمة لـ(م)

التجربه الأولى، تستخدم نغمات الناي لمعرفة العدد الأمثل من عينات الصوت اللازمة للكشف عن التردد الأساسي. ولضمان جودة تسجيل عالية، فقد تم تسجيل النغمات الموسيقية المستخدمة في هذا البحث بدقة 44100 عينة صوتية/ ثانية. الشكل 4 يظهر عينة من النتائج التي تم الحصول عليها، حيث يمثل المحور الأفقي لهذا الشكل تواتر تجزئة النغمة الموسيقية F5، أما المحور العمودي فيمثل التردد الأساسي للتجزئة الواحدة. يتضح من الشكل 4 بان نطاق تواتر تجزئة النغمة الموسيقية يجب أن لا يزيد عن 170 تجزئة/ثانية لضمان الدقة المطلوبة. وبناء عليه فإن الحد الأدنى لعدد العينات الصوتية (Samples) التي تضمن كشفاً صحيحاً للنغمة هو (44100 ÷ 170 ≈ 260) عينة صوتية/تجزئة.



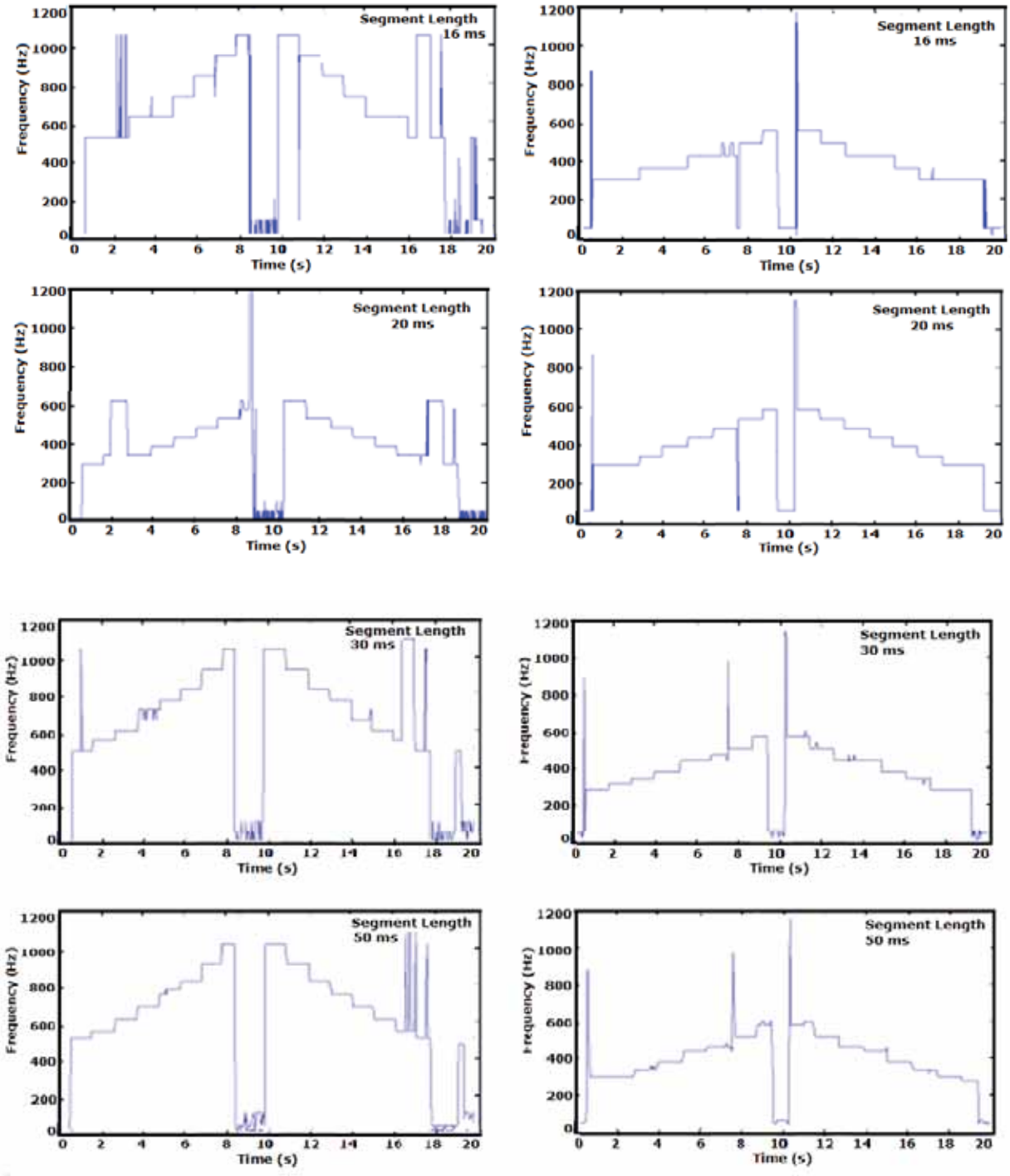
الشكل 4: تمثيل بياني للتردد الأساسي مع تواتر التجزئة والخاص بالنغمة F5 .

التجربه الثانية، تستخدم جملة موسيقية يمكن اداؤها باستخدام كل من الناي والفلوت وهي عبارة عن مقام «كُرد» يؤدى صعوداً وهبوطاً. الشكل 5 يوضح وتيرة الأداء (Larghetto) لهذه الجملة الموسيقية فيما يوضح الشكل 6 مقارنة لشدة أداء المقام "كُرد" في حال استخدام كل من الناي والفلوت.

الشكل 5: مقام «كرد» صعودا وهبوطا.



الشكل 6: مقارنة شدة أداء مقام «كرد» عند كل من الناي والفلوت.

يتضح من الشكل 6 بان شدة الصوت تزداد كلما ارتفع عازف الناي في أداء السلم الموسيقي وبالعكس. وبالمقابل، فان شدة الصوت تبقى ثابتة نسبياً عند صعود السلم أو هبوطه في حال عزف نفس الجملة الموسيقية على آلة الفلوت. الشكل 7 يوضح علاقة التردد الأساسي مع الزمن لكل من الناي والفلوت عند استخدام اطوال تجزئة مختلفة ضمن المدى الزمني 16 - 50 ملي ثانية (جزء بالألف من الثانية). يتضح من هذه النتائج بان الترددات الأساسية لنغمات الناي والفلوت يمكن كشفها بدقة مقبولة عندما يكون طول التجزئة الواحدة 50 ملي ثانية ، وهذا يتفق مع النتائج المذكورة في دراسات سابقة حول الفلوت [10-11]. وجدير بالذكر هنا بان طول التجزئة قد اعطى نتائج مقبولة حتى عند الترددات المنخفضة لآلة الناي بينما بينت النتائج بان نسبة الخطأ تزداد في حال استخدام الفلوت مع الترددات المنخفضة. وقد يعود السبب في ذلك الى تاثير التوافقية الأولى لآلة الفلوت.



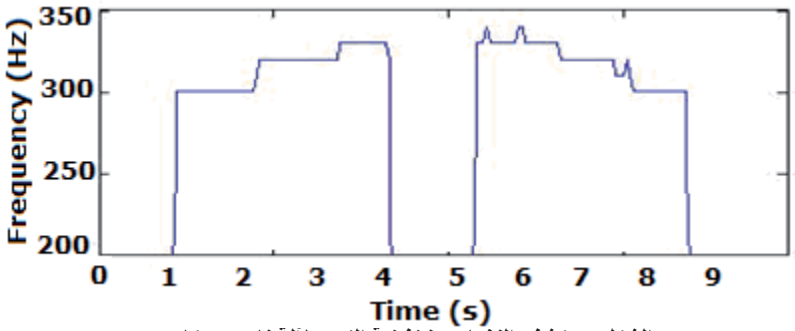
ب. الفلوت أ. الناي

الشكل 7: مقارنة كشف التردد الأساسي بين الناي والفلوت.

كشف النغمات منخفضة التردد

لغرض اختبار فعالية الطريقة المقترحة لكشف التردد الأساسي لنغمات الناي: E_4 بيمول و E_4 نصف بيمول و E_4 طبيعي والتي تم عزفها بناي «دوكاه» صعوداً وهبوطاً. ان مصطلح بيمول يعني هنا بأن حدة النغمة أقل من الطبيعي بمقدار نصف درجة، ونصف بيمول يعني أن حدة النغمة أقل من الطبيعي بمقدار ربع درجة. وجدير بالاشارة هنا بان الربع درجة هي من خصائص الموسيقى العربية وغير موجودة في الموسيقى الغربية. الشكل 8 يوضح امكانية

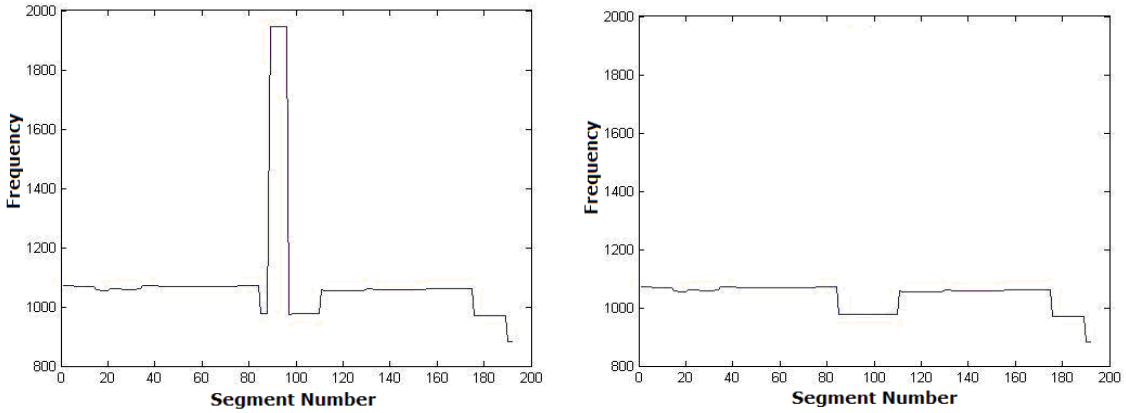
تحديد النغمات المذكورة أعلاه بدقة مقبولة رغم انخفاض ترددها. أما النغمات الأخرى التي يغطيها المجال الصوتي للناي فتكون تردداتها أعلى وبالتالي يمكن كشفها بدقه أعلى.



الشكل 8: كشف النغمات منخفضة التردد لآلة ناي «دوكاه».

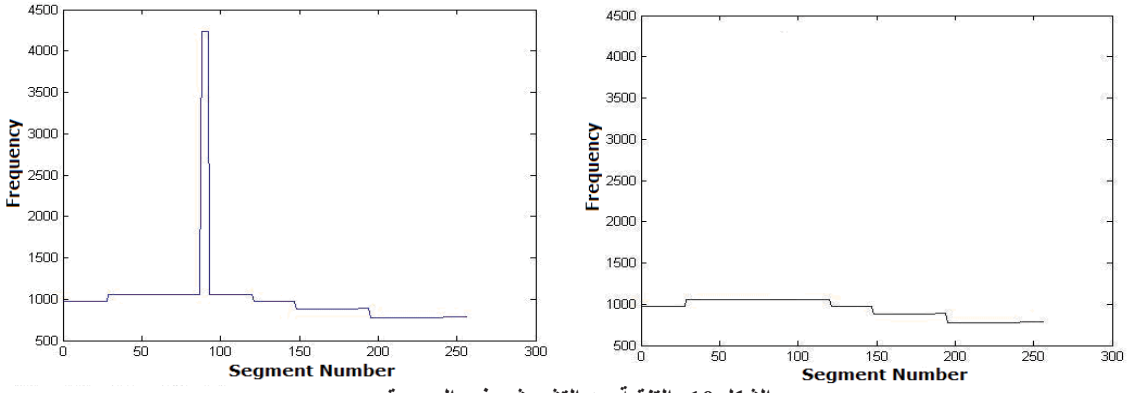
إزالة قفزة الأوكتاف والتنقية من التشويش

إن نطاق ترددات الناي «دوكاه» من أدنى نغمة (C_4) إلى أعلى نغمة (G_6) هو (262-1568) هرتز. وفي حال كشف التردد الأساسي لتجزئة معينة خارج هذا النطاق فيدل ذلك على وجود خطأ في عملية الكشف. ويمكن ان يكون السبب في حصول مثل هذا الخطأ هو قفزة الأوكتاف بالاضافة الى التشويش غير الموسيقي. وبينت النتائج المخبرية بان مشكلة قفزة الأوكتاف تزداد مع النغمات ذات التردد الأعلى. ولتجاوز هذه المشكلة تم اعتماد طريقة تتعلق بمفهوم قفزة الأوكتاف والتي تعني كشف التوافقية الأولى للنغمة بدلا من كشف ترددها الأساسي، حيث من المعروف بان تردد التوافقية الأولى يساوي ضعف التردد الأساسي للنغمة[7]. فإذا كان التردد الذي تم كشفه أعلى من تردد النغمة الأعلى للناي «دوكاه» وهي G_6 وكان أقل أو مساوياً لنطاق النغمة G_7 ذات التردد الأساسي المعياري 3136 هرتز، يتم اعتبار ذلك تلقائياً قفزة أوكتاف. وبالتالي، يقسم التردد على اثنين ليتوافق مع نطاق ترددات آلة الناي "دوكاه". الشكل 9 يوضح كيفية إزالة قفزة الأوكتاف باستخدام هذه الطريقة.



الشكل 9: إزالة قفزة الأوكتاف.

اما التشويش غير الموسيقي فيقصد به هنا التشويش المرافق للتسجيل الموسيقي والذي يؤدي إلى كشف ترددات أعلى من نطاق ترددات قفزة الأوكتاف. ولتجاوز تاثير هذا النوع من التشويش، تم اعتبار اي تجزئة يزيد ترددها عن 3136 هرتز امتدادا للتجزئة التي تسبقها. الشكل 10 يوضح كيفية إزالة التشويش باستخدام هذه الطريقة.



الشكل 10: التنقية من التشويش غير الموسيقي.

تسمية النغمة (Pitch Decision)

الجدول 3 يوضح أوكتاف واحد من النغمات الموسيقية لناى دوكاه مع نطاق التردد لكل نغمة. ويكون نطاق التردد لكل نغمة محصور بين نقطتين هما؛ النقطه في منتصف البعد الفاصل بين النغمة وسابقتها، والنقطة في منتصف البعد الفاصل بين النغمة ولاحقتها. ولتكييف هذا الجدول مع آلة الناي المستخدَمة في هذه التجربة، تم إدخال بعض التعديلات على الحدود النظرية لنطاق التردد الخاص بكل نغمة. النطاقات الضيقة في هذا الجدول تعود الى النغمات التي تمثل ربع البعد، وهذا يتطلب دقة مقبولة في أداء العازف ومن هنا تظهر أهمية تكييف نظام الأتمتة مع آلة العازف. هذا ويمكن تمثيل متطلبات مرحلتي «معالجة قفزة الأوكتاف والتنقية من التشويش» و «كشف النغمة» رياضيا بالمعادلة (1)، حيث تُعرف النغمة $(\text{Tone}_{(n)})$ (ن) كما يأتي:

$$Tone_n(f_o) = \begin{cases} silence & f_o < 250 \\ Table_{value} & 250 \le f_o \le 1580 \\ tone\left(\frac{f_o}{2}\right) & 1580 < f_o \le 3160 \\ tone_{n+1}(f_o) & 3160 < f_o \end{cases} \qquad (1)$$

$f_o = fundamental\ frequency$ (التردد الأساسي) $\qquad n = segment\ number$ (رقم التجزئة)

الجدول 3: مديات التردد لأوكتاف واحد من الناي «دوكاه».

النغمة	نطاق التردد (هرتز)		النغمة	نطاق التردد (هرتز)
الصمت	أقل من 508		$F^{\#}_5/G^{b}_5$	719 - 762
C_5	539 - 508		G_5	762 - 807
$C^{\#}_5/D^{b}_5$	571 - 539		$G^{\#}_5/A^{b}_5$	807 - 855
D_5	571 - 604		A_5	855 - 906
$D^{\#}_5/E^{b}_5$	604 - 631		$A^{\#}_5/B^{b}_5$	906 - 946
E^{d}_5	631 - 652		B^{d}_5	946 - 976
E_5	652 - 678		B_5	976 - 1017
F_5	678 - 719		C_6	1017 - 1077

مدة النغمة (Tone Duration)

لغرض تحديد مدة النغمة، تم تصميم خوارزميه تقوم على حساب عدد التجزئات المتتابعة والعائدة إلى نفس النغمة. وتقوم هذه الخوارزمية أيضا بتجاوز مشكلة قفزات الأوكتاف العابرة والتي لا يبلغ مجموع تجزئاتها المتتالية الحد الأدنى المقبول لمدة النغمة [12]. فعلى سبيل المثال، إذا ضُبط هذا الحد بـ 40 ملي ثانية ، فسيتم اهمال سلسلة التجزئات المتتاية لنغمة معينة إذا كان مجموع مدة التجزئات اقل من 40 ملي ثانية. وجدير بالاشارة هنا بان الحد الأدنى المقبول لمدة النغمة متغير ويعتمد على السرعة التي يؤدي بها عازف الناي مقطوعته، وبالتالي فان حسن اختيار هذا الحد سيكون له انعكاس إيجابي على أداء النظام. ويمكن ايجاز خطوات الخوارزمية المقترحة لهذا الغرض بالنقاط الآتية:

(i) Count (n) = sum of the $(n)^{th}$ similar sequential tones.

(ii) Segment time = 1/(sum of overlapped segments per second)

(iii) Duration (n) = count (n) * segment time

(iv) If duration (n) < minimum note duration, then:

Duration (n) = zero

Duration (n+1) = Duration (n) + Duration (n+1)

إنشاء مصفوفة "ميدي" (MIDI Matrix Creation)

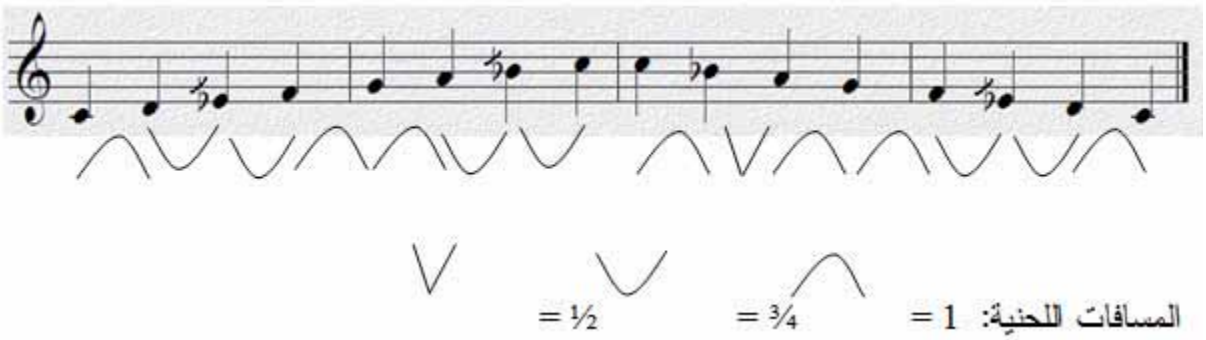
بعد كشف بدايات النغمات ومدة كل منها، تستخدم هذه النتائج لإنشاء مصفوفة «ميدي» كما هو موضح بالجدول 4. العمودان السادس والسابع لهما نفس قيم العمودين الأول والثاني بعد ضربهما بثابت معين يعتمد على سرعة المقطوعة. العمود الثالث يمثل قناة «ميدي» (MIDI Channel)، حيث يتم تمثيل كل نغمات آلة معينة في قناة واحدة. ونظرا لعدم إمكانية تمثيل أرباع الأبعاد العربية مصفوفة «ميدي» المتوفرة حاليا، فقد تم تقريب هذه النغمات لاقرب نغمة يمكن تمثيلها على مصفوفة «ميدي» في القناة الأولى ومن ثم تكرار هذه النغمة في قناة «ميدي» الثانية . على سبيل المثال يتم تقريب نغمة B^{d}_{5} إلى نغمة B^{b}_{5} و نغمة E^{d}_{5} إلى نغمة E^{b}_{5} في قناة "ميدي" الأولى، ومن ثم تكرار كل من النغمتين B^{b}_{5} و E^{b}_{5} في قناة "ميدي" الثانية. علماً بأن كل نغمة موسيقية يتم تمثيلها برقم معين يسمى نغمة "ميدي" (MIDI Pitch) يوضع في العمود الرابع من مصفوفة ميدي. أما العمود الخامس فهو خاص بشدة النغمة (Velocity) وقد يعبر عنها بقيمة ثابتة في النظام المقترح لكون موضوع كشف شدة الصوت خارج نطاق البحث في الوقت الحاضر. وبعد إنشاء مصفوفة ميدي يمكن تخزينها على شكل ملف «ميدي» (.mid) ليتم لاحقا تحويله إلى تدوين موسيقي باستخدام إحدى البرمجيات المتوفرة مثل سيبيليوس (Sibelius) و كيكووك (Cakewalk).

الجدول 4: نموذج لمصفوفة «ميدي»

1	2	3	4	5	6	7
Onset (Beats)	**Duration (Beats)**	**MIDI channel**	**MIDI pitch**	**Velocity**	**Onset (s)**	**Duration (s)**
0	1.5083	1	72	75	0	1.0056
1.5083	0.61667	1	70	75	1.0056	0.41111
1.5083	0.61667	2	70	75	1.0056	0.41111
2.125	0.975	1	72	75	1.4167	0.65

النتائج وتقييم مراحل عمل النظام

يقدم هذا الجزء تقييما مخبريا لمراحل عمل النظام المقترح وذلك من خلال استخدام مقطع موسيقي مسجل لآلة الناي، وهو جزء من الأغنية العربية التراثية «يا مال الشام» على المقام الموسيقي العربي «راست». تعتبر هذه الأغنية من عيون التراث العربي، كما يعتبر مقامها شيخ المقامات العربية. التدوين الموسيقي والأبعاد اللحنية الخاصة بمقام «راست» موضحة في الشكل 11.

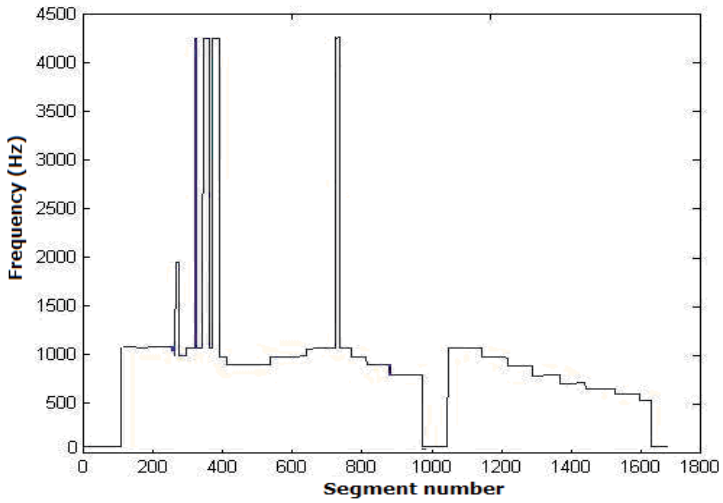


الشكل 11: التدوين الموسيقي لمقام «راست».

فيما يأتي وصف موجز لخطوات معالجة المقطع الموسيقي في ضوء مراحل عمل نظام أتمتة التدوين الموسيقي المقترح (الشكل 2) مع بيان مُخرَج كل مرحلة من مراحل عمله.

مرحلة التجزئة وكشف التردد الأساسي

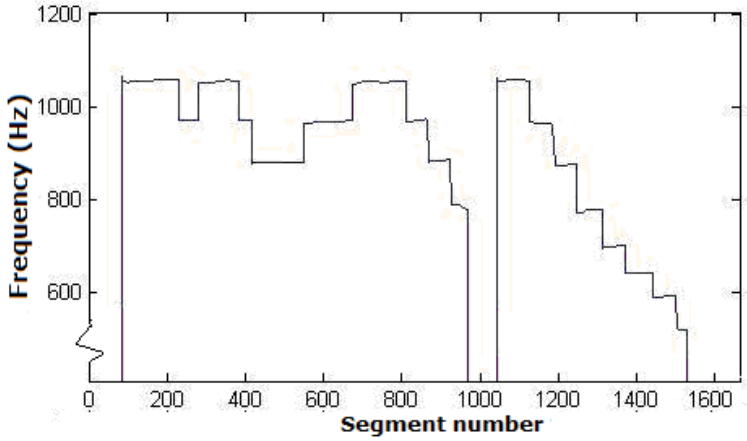
الشكل 12 يوضح مُخرَج مرحلة التجزئة وكشف التردد الأساسي. إن التأرجح الظاهر على قيمة التردد الأساسي للنغمة الواحدة يعود الى اهتزاز آلة الناي واختلال في عملية نفخ الهواء اثناء العزف. ويمكن ملاحظة ذلك في النغمة الأولى (التجزئات 100-270). وكذلك يمكن ملاحظة التارجح العالي نسبيا في النغمة الثانية (التجزئات 280-275) نتيجة لقفزة الأوكتاف. أما التشويش غير الموسيقي فيمكن ملاحظته عند مواقع التجزئات ذوات التردد 4250 هرتز.



الشكل 12: مُخرَج مرحلة التجزئة وكشف التردد الأساسي.

مرحلة إزالة قفزة الأوكتاف والتنقية من التشويش

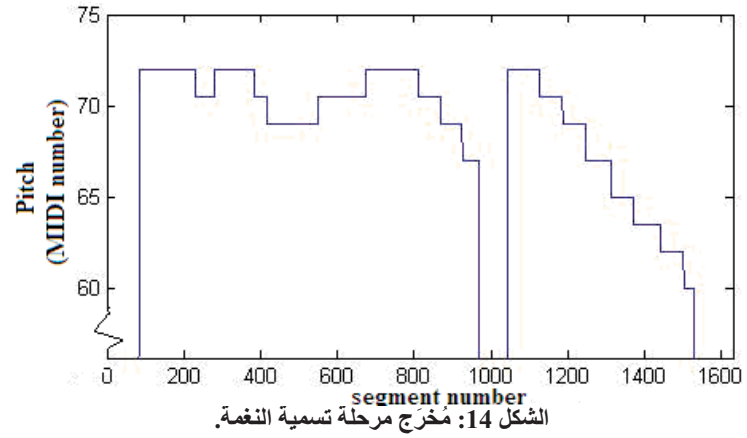
الشكل 13 يوضح مُخرَج مرحلة إزالة قفزة الأوكتاف والتنقية من التشويش وذلك بعد تطبيق الطرق المذكورة في الفقرة (3-4). وفي كلتا الحالتين، تم استبدال التردد الأساسي لكل تجزئة ذات قيمة تردد غير صحيحة بقيمة أخرى ملائمة مع مراعاة عدم حذف أي قيمة وذلك من أجل المحافظة على الوقت الإجمالي لكل نغمة دون تغيير.



الشكل 13: مُخرَج مرحلة إزالة قفزة الأوكتاف والتنقية من التشويش.

مرحلة تسمية النغمة

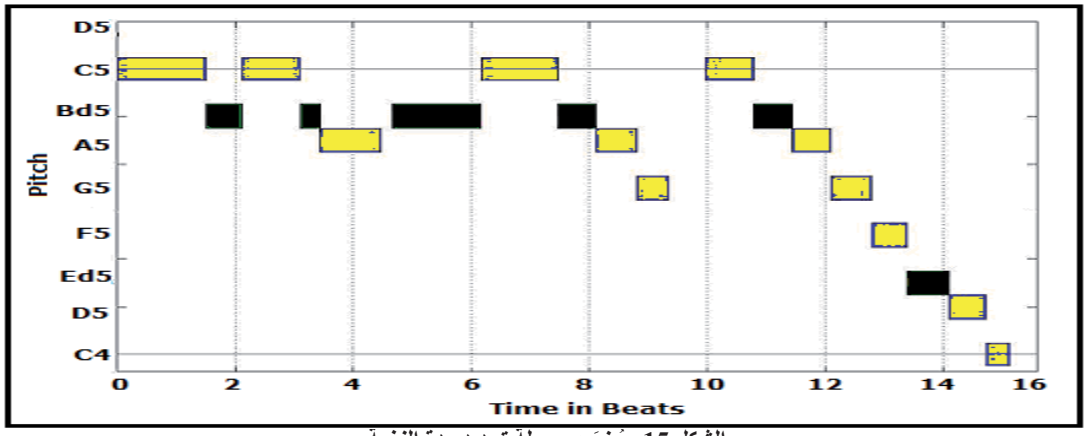
في هذه المرحلة، تم تحديد نغمة موسيقية مناسبة لكل تجزئة، حيث لم يعد هنالك لتأرجح التردد الأساسي ضمن تجزئات النغمة الواحدة وكما هو موضح في الشكل 14. **ولغايات التمثيل البياني**، فقد أعطيت كل نغمة عربية (ذات ربع البعد) قيمة تمثِّل معدل قيمتي النغمتين السابقة واللاحقة لها مع ضمان امكانية تمثيلها بمصفوفة «ميدي». ومثال على ذلك فان النغمة C_6 تمثَّل في مصفوفة "ميدي" بالرقم 71 والنغمة B^b_5 تمثَّل بالرقم 70، وبالتالي تمثَّل النغمة العربية B^d_5 بالرقم 70،5 .



الشكل 14: مُخرَج مرحلة تسمية النغمة.

مرحلة تحديد مدة النغمة

في هذه المرحلة، يتم حساب عدد التجزئات المتتابعه لنفس النغمة ومن ثم يتم حساب مدتها باستخدام خوارزمية «الحد الأدنى المقبول لمدة النغمة» والتي سبقت الاشارة اليها في الفقرة (3-6) أعلاه. الشكل 15 يوضح مُخرَج هذه المرحلة، حيث تم تمييز النغمات العربية (B^d_5 وE^d_5) في هذا الشكل باللون الغامق.



الشكل 15: مُخرَج مرحلة تحديد مدة النغمة.

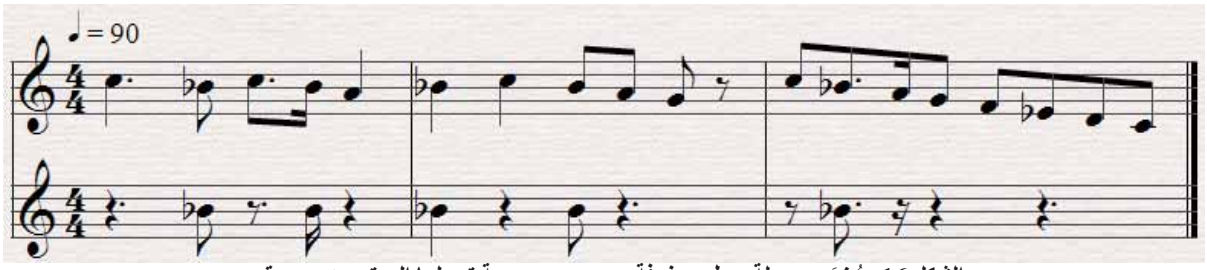
مرحلة إنشاء مصفوفه "ميدي"

في هذه المرحلة يتم انشاء مصفوفة «ميدي» وفق ما تم تفصيله في الفقرة 3-7 أعلاه. الجدول 5 يوضح مصفوفة "ميدي" المعبرة عن معزوفة الناي "يا مال الشام" والتي استخدمت كمُدخَل للنظام. وكما يظهر في الشكل، فان دقة تحديد النغمة تقترب من الكمال وان دقة مدة النغمة تزيد عن 90%.

الجدول 5: مُخرَج مرحلة إنشاء مصفوفة «ميدي».

1	2	3	4	5	6	7
Onset (Beats)	**Duration (Beats)**	**MIDI channel**	**MIDI pitch**	**Velocity**	**Onset (s)**	**Duration (s)**
0	1.5083	1	72	75	0	1.0056
1.5083	0.61667	1	70	75	1.0056	0.41111
1.5083	0.61667	2	70	75	1.0056	0.41111
2.125	0.975	1	72	75	1.4167	0.65
3.1	0.35	1	70	75	2.0667	0.23333
3.1	0.35	2	70	75	2.0667	0.23333
3.45	1.0333	1	69	75	2.3	0.68889
4.675	1.5	1	70	75	3.1167	1.0
4.675	1.5	2	70	75	3.1167	1.0
6.175	1.3	1	72	75	4.1167	0.86667
7.475	0.65	1	70	75	4.9833	0.43333
7.475	0.65	2	70	75	4.9833	0.43333
8.125	0.68333	1	69	75	5.4167	0.45556
8.8083	0.53333	1	67	75	5.8722	0.35556
9.975	0.81667	1	72	75	6.65	0.54444
10.792	0.65833	1	70	75	7.1944	0.43889
10.792	0.65833	2	70	75	7.1944	0.43889
11.45	0.65833	1	69	75	7.6333	0.43889
12.108	0.68333	1	67	75	8.0722	0.45556
12.792	0.6	1	65	75	8.5278	0.4
13.4	0.70833	1	63	75	8.9333	0.47222
13.4	0.70833	2	63	75	8.9333	0.47222
14.108	0.625	1	62	75	9.4055	0.41667
14.733	0.40833	1	60	75	9.8222	0.27222

التدوين الموسيقي باستخدام مصفوفة "ميدي"

تعتبر هذه المرحلة آخر المراحل التي يمر بها المقطع الموسيقي وصولا إلى التدوين. بعد إنشاء مصفوفة ميدي للمقطع الموسيقي قيد التدوين، تم استخدام البرمجية التجارية "Sonar" للحصول على المدونة الموسيقية المطلوبة وكما هو موضح في الشكل 16. ويمكن ملاحظة النغمة العربية للمقطع الموسيقي من خلال تكرار ذات النغمة في السطر الثاني. هذا ويجري حاليا تطوير عملية التدوين هذه للتوصل إلى طريقة مناسبة لتدوين ربع البعد دون الحاجة إلى سطر ثاني.

الشكل 16: مُخرَج مرحلة ربط مصفوفة «ميدي» ببرمجية تحولها إلى تدوين موسيقي.

الخـاتمة

حقق النظام المقترح لتحليل واستخلاص الخصائص الموسيقية لآلة الناي مدار البحث هدفه بعد أن تم فحص كفاءته مخبريا والحصول على دقة تزيد عن 90%. واذا ما أخذنا الاعتبار نسبة الخطأ الناجم عن عدم دقة الأنظمة التجارية الغربية عند استخدامها لتدوين الموسيقى العربية فإن دقة النظام المقترح تفوق دقة تلك الأنظمة. ويمكن ايجاز أهمية النتائج التي تم التوصل اليها في هذا البحث ومجالات تطبيقها في النقاط الآتية:

1. توفير وقت وجهد المحترفين عند قيامهم بالتدوين الموسيقي اليدوي لآلة الناي، حيث يمكن برمجة جهاز الحاسوب للقيام بهذه المهمة دون عناء.
2. تحليل الخصائص التقنية للموسيقى العربية واقتراح حلول فعالة لمعالجة معظم المشاكل والتحديات التي تواجه عملية اتمتة التدوين الموسيقي العربي والتطبيقات الأخرى ذات العلاقة.
3. تشجيع الباحثين العرب على الولوج في هذا المجال البحثي الجديد، حيث ان النتائج التي تم التوصل اليها في هذا البحث التطبيقي غير مسبوقة في مجال الموسيقى العربية وتمثل حجر الزاوية للقيام بابحاث وتطبيقات هامة أخرى؛ مثل الفهرسة اللحنية الرقمية للمكتبات (Digital Melody Indexing) والتعليم الإلكتروني للعزف على الآلات الموسيقية العربية، وغيرها.

شـكر وتقديـر

يتقدم الباحثان بخالص الشكر والتقدير لكل من صندوق دعم البحث العلمي في مؤسسة عبدالحميد شومان ومشروع دعم مبادرات واستراتيجيات البحث والتطوير التكنولوجي والإبداع (SRTD) على تقديمهما الدعم اللازم لتمويل هذا البحث وتوفير مستلزمات انجازه.

المصادر والمراجـع

المراجع العربية

[1] فهمي (عاطف إمام)، "استخدام نماذج من الألحان الشائعة في تعليم آلة الناي للطالب المبتدئ"، المعهد العالي للموسيقى العربية، القاهرة، 2005.

[2] القلعة (سعدالله آغا)، "الحاسوب والموسيقى"، مجلة البحث الموسيقي، جامعة الدول العربية، 2004.

[3] القبي (حشاد)، "مساهمة علم الصوتيات في دراسة صوت الناي"، مجلة البحث الموسيقي، جامعة الدول العربية، 2004.

[4] الحلو (سليم)، "تاريخ الموسيقى الشرقية"، الطبعة الثانية، منشورات مكتبة دار الحياة، بيروت، 1974.

[5] عبدالنبي (محمد)، "الصعوبات الجوهرية التي تواجه عازفي آلة الناي وكيفية التغلب عليها"، رسالة دكتوراة غير منشورة، المعهد العالي للموسيقى العربية، القاهرة، 1989.

[6] مشعل (عبد الحميد)، "دراسة الناي بالطريقة العلمية"، الطبعة الثانية، مطبعة رعد، القاهرة، 1979.

المراجع الأجنبية

[7] Gerhard, G., "Computer Music Analysis", School of Computing Science, Simon Fraser University, Burnaby, Technical Report CMPT TR 97-13, 2002.

[8] Al-Taee M.A., Al-Rawi M.S. and Al-Ghawanmeh F.M., Time-Frequency Analysis of the Arabian Flute (Nay) Tone Applied to Automatic Music Transcription, Proc. ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA'2008, Doha-Qatar, March 31 – April 4, 2008.

[9] Brossier, P., Bello, J. P. and Plumbley, M. D., Fast labelling of notes in music signals, Proc. of the 5th Int. Conf. on Music Information Retrieval (ISMIR 2004), Barcelona, Spain, October 10-14, 2004.

[10] Piszczalski, M., A Computational Model for Music Transcription, Ph.D Thesis, University of Stanford, 1986.

[11] Al-Taee M.A., Al-Ghawanmeh M.T., Al-Ghawanmeh F.M. and Al-Own B.O., Analysis and Pattern Recognition of Arabian Woodwind Musical Tones Applied to Query-by-Playing Melody Retrieval, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol I, WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K.

[12] Bello J., Monti G. and Sandler M., Techniques for Automatic Music Transcription, Proc. of the International Symposium on Music Information Retrieval (MUSIC IR 2000) Plymouth, Massachusetts, USA, October 23-25, 2000.