



Ses kayıtlarından otomatik keman müzik transkripsiyonu

*Automatic violin music transcription from audio recordings*Kemal Avcı^{1*}, Tamer Şevki Acuner²¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, kemal.avci@idu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5040-3594>² Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, tamer.acuner@beun.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0586-4994>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

*Makale Geçmişi:*Geliş 3 Şubat 2023
Revizyon 25 Mart 2023
Kabul 27 Mart 2023
Online 20 Haziran 2023*Anahtar Kelimeler:**Müzik işaret işleme, Otomatik müzik transkripsiyonu, Keman, Başlangıç zamanı tespiti, Matlab, Grafiksel kullanıcı arayüzü*

Bu çalışmada, başlangıç seviyesi keman eğitiminde kullanmak amacıyla keman öğrenenlere çalma performanslarıyla ilgili bir geri dönüt sağlayacak karmaşık spektral fark yöntemi tabanlı bir otomatik müzik transkripsiyon sistemi önerilmiştir. Ayrıca, önerilen müzik transkripsiyon sistemine dayalı ve kemandaki temel etütlerden olan dört boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi notalarını tespit eden Matlab yazılım tabanlı bir kullanıcı arayüzü gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin performans analizi için iPad tablet tabanlı profesyonel kayıt sistemi kullanarak sekiz katılımcıdan elde edilmiş bir ses kayıt veri seti oluşturulmuştur. Önerilen sistemin keman ses kayıtlarının analizini doğru yapabilmesi için müzik parçasının kendisini oluşturan notalara uygun bölütlenmesi, bunun için de notaların başlangıç zamanının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Pişano ve gitar gibi diğer müzik çalgı seslerine kıyasla, keman sesinin nota başlangıç zamanı tespiti, sahip olduğu zarf karakteristiği nedeniyle daha zordur. Önerilen çalışmada nota başlangıç zamanı tespiti için karmaşık spektral fark yöntemi kullanılmaktadır. Daha sonra, çıkarılan bölüte hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak keman sesinin notası ve oktavı belirlenecek şekilde bölütün temel frekansı bulunmaktadır. Ayrıca, geliştirilen arayüz üzerinde süre ve gürültü analizleri de yapılabilmektedir. Kıyaslamalı sonuçlar, önerilen sistemin önemli müzik analiz yazılımları olan MIRtoolbox ve Essentia'daki yöntemlere göre daha başarılı performans sergilediğini göstermektedir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

*Article history:*Received 3 February 2023
Received in revised form 25 March 2023
Accepted 27 March 2023
Available online 20 June 2023*Keywords:**Music signal processing, Automatic music transcription, Violin, Onset detection, Matlab, Graphical user interface*

Doi: 10.24012/dumf.1246822

* Sorumlu Yazar

In this study, an automatic music transcription system based on complex spectral difference method is proposed to provide feedback to violin learners about their playing performance for use in beginner violin education. In addition, a Matlab software-based user interface has been implemented based on the proposed music transcription system and detecting the four open-string, G major arpeggio and G major scale notes, which are ones of the fundamental etudes in violin. For the performance analysis of the proposed system, a sound recording database obtained from eight participants was created using an iPad tablet-based professional recording system. In order for the proposed system to analyze violin sound recordings correctly, the music piece should be segmented according to the notes forming the music piece itself, and for this, the starting times (onsets) of the notes should be determined. Compared to other musical instruments such as piano and guitar, the note onset detection of violin sound is more difficult due to its envelope characteristic. In the proposed study, the complex spectral difference method is used to determine the note onset. Then, by applying the fast Fourier transform to the detected segment, the fundamental frequency of the segment is found so that the note and octave of the violin sound are determined. Moreover, duration and volume analyzes can also be performed on the developed interface. The comparative results showed that the proposed system exhibits better performance than the methods existing in MIRtoolbox and Essentia, which are important music analysis softwares.

Giriş

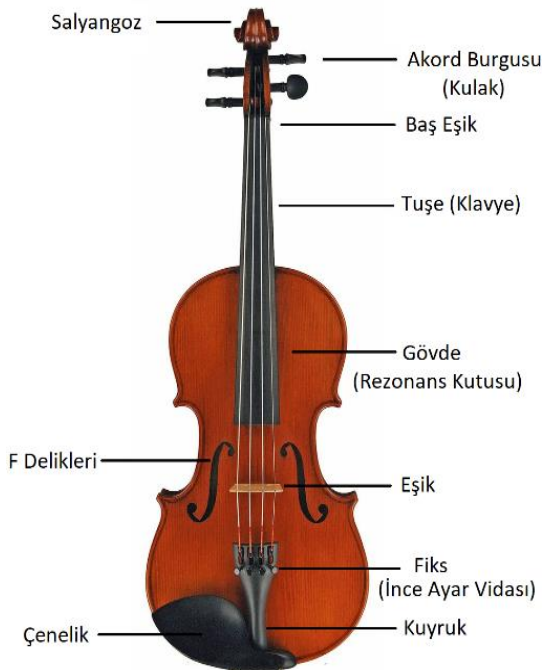
Keman Hakkında Temel Bilgiler

Keman, en tanınmış orkestra çalgısı olup dört telli yaylı bir çalgıdır. Diğer yaylı çalgılar ise viyola, viyolonsel (çello) ve kontrbasır. Bu dört telli yaylı çalgıların fiziksel ebatları ve tellere karşılık gelen notalar farklıdır. Tablo 1'de dört telli yaylı çalgıların boş tellerine karşılık gelen notalar ile çalgıların yaklaşık uzunlukları verilmiştir [1]. Müzik notalarının A (La), B (Si), C (Do), D (Re), E (Mi), F (Fa) ve G (Sol) harfleriyle gösterimi yaygın kullanılan bir nota adlandırma sistemidir. Tablo 1'de belirtilen notalar, kalın sestene ince sese doğru sıralanmış olup, notaların sağ alt tarafındaki rakamlar, oktav numarasını göstermektedir. Örneğin, G3 notası, 3. oktav Sol notasını belirtmektedir.

Tablo 1. Dört telli yaylı çalgıların boş tel notaları ve yaklaşık uzunlukları.

Çalgı	Boş Tel Notaları				Uzunluk (cm)
Keman	G ₃	D ₄	A ₄	E ₅	60
Viyola	C ₃	G ₃	D ₄	A ₄	66
Viyolonsel	C ₂	G ₂	D ₃	A ₃	115
Kontrbas	E ₁	A ₁	D ₂	G ₂	200

Sahip olduğu ses rengi, ses sınırı ve müzikal düşünceleri anlatmadaki ses çeşitliliği nedeniyle pek çok bestecinin en gözde çalgısı olan keman, üzerinde en çok eser yazılan ve çalma tekniği geliştirilen çalgılardan birisidir [2]. Şekil 1'de bir kemanın kısımları görülmektedir.



Şekil 1. Kemanın yapısı.

Kemanın gövde kısmı; akçaağaç, çam, köknar, ladin vb. ağaçlardan yapılmakta olup, üst kapak, alt kapak ve onları birleştiren kasnakta oluşur. Üst kapak üzerinde bulunan f şeklindeki iki adet delik, ses titreşimlerinin dışarı çıkmasını sağlar. Kemanın ses karakteristiğini belirleyen etmenler, keman yapımında kullanılan ağaç ve yapılan ciladır. Akçaağaçtan yapılan keman sapının ucu, görünümünden dolayı salyangoz olarak adlandırılır. Salyangozdan sonra dört tane akort burgusu ve baş eşik yer alır. Burgulara bağlanan teller, sap üzerine yerleştirilmiş siyah renk abanozdan yapılmış bir tuşenin üzerinden gelir ve eşikten geçerek kuyruğa bağlanır. Eşik (veya köprü) telleri yükselterek sap ile kuyruk arasında geçişi sağlarken tellerin titreşimini üst kapağa iletir. Tellerin kuyruğa bağlı olduğu yerlerde fiks (ince ayar vidası) kullanılarak hassas ayar yapılabilir. Keman çalarken konfor sağlayan çenelik, kemana haricen monte edilir. Keman tellerine sürterek ses çıkartan arşe (yay) ise genellikle at kılından imal edilir.

Boş tellerde yukarıdan aşağıya sırasıyla G (Sol), D (Re), A (La) ve E (Mi) notalarına akort edilen kemanda parmak kullanımıyla birlikte daha fazla nota seslendirilebilmektedir. Tablo 2'de tel bazında kemanda bulunan notalar ve bu notalara ait frekanslar gösterilmektedir. Tablo 2'de görüldüğü üzere kemadaki en pes ses 196 Hz frekansa sahip 3. oktav Sol (G₃) notası, en tiz ses ise 987,7 Hz frekansa sahip 5. oktav Si (B₅) notasıdır.

Tablo 2. Kemanda bulunan notalar ve Hz cinsinden frekansları.

1. Tel		2. Tel		3. Tel		4. Tel	
Nota	Frekans	Nota	Frekans	Nota	Frekans	Nota	Frekans
G ₃	196.0	D ₄	293.6	A ₄	440.0	E ₅	659.2
G# ₃	207.6	D# ₄	311.1	A# ₄	466.2	F ₅	698.5
A ₃	220.0	E ₄	329.6	B ₄	493.8	F# ₅	739.9
A# ₃	233.1	F ₄	349.2	C ₅	523.3	G ₅	784.0
B ₃	246.9	F# ₄	369.9	C# ₅	554.3	G# ₅	830.6
C ₄	261.6	G ₄	392.0	D ₅	587.3	A ₅	880.0
C# ₄	277.2	G# ₄	415.3	D# ₅	622.3	A# ₅	932.3
D ₄	293.6	A ₄	440.0	E ₅	659.2	B ₅	987.7

Otomatik Müzik Transkripsiyonu ve Önemi

Duygu ve düşünceleri belli bir amaç ve yöntemle, belirli bir güzellik anlayışına göre birleştirilmiş seslerle işleyip estetik bir bütün olarak anlatan müzik [3]; tüm sanat dalları içinde, insan ruhu üzerinde en derin etkiyi bırakan sanat olarak kabul edilmektedir [4],[5]. İnsanlık tarihinde önemli bir yere sahip olan müziğin [6] insanların entelektüel, sosyal ve kişisel gelişimleri üzerinde olumlu etkileri olması nedeniyle [7], müzik eğitimi her daim insanların amatör veya profesyonel olarak almak istedikleri bir konu olmuştur.

Müzik eğitiminin bir boyutu olan çalgı eğitimi Türkiye'de güzel sanatlar liseleri, konservatuvarlar, üniversitelerin güzel sanatlar eğitimi bölümleri, müzik öğretmenliği anabilim dalları, müzik dershaneleri, özel dersler vb. kurumlar aracılığı ile gerçekleştirilmektedir [8].

Geleneksel hoca-öğrenci çalışmalarındaki kısıtlamalar ve olanaksızlıklardan dolayı çalgı eğitiminde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle müzik eğitiminde yardımcı unsur olarak çeşitli teknoloji tabanlı sistemler önerilmiştir [9]-[11].

Bu gibi teknolojik sistemler müzik işaret işleme alanında oluşturulan yöntemlerin uygun yazılımlar yardımıyla değişik platformlarda kullanıcının hizmetine sunulmasıyla oluşturulmuşlardır. Bir müzik işaretinin otomatik olarak notaya dökümünü konu alan ve müzik işaret işleme disiplini içerisinde önemli bir yer tutan otomatik müzik transkripsiyon konusu, bu tür sistemlerin temelini ise oluşturmaktadır [12]-[17]. Otomatik müzik transkripsiyonu, bir müzik işaretinin bir sembolik gösterime dönüştürülme işlemidir [18]. Uygulama alanı olarak müzik bilgisinin otomatik çıkarımı, müzikolojik analiz ve interaktif müzik sistemleri verilebilir [19].

Problem Tanımı

Yaylı çalgılar ailesinin en küçük bireyi olan keman, dünyanın birçok yerinde çok sevilen ve oldukça yaygın kullanılan çalgılardan biri olma özelliğini taşımaktadır. Kemanın perdesiz bir çalgı oluşu, yay kullanımı ve keman çalımında yapılması gereken hareketlerin günlük yaşamda başka hiçbir alanda kullanılmaması, dolayısıyla vücudun bu hareketlere kolay uyum sağlayamaması gibi çeşitli etkenler; kemanı başlangıç aşamasından itibaren öğrenilmesi zor bir çalgıya dönüştürmektedir.

Kemanın öğrenilmesindeki zorluklar nedeniyle, bu çalgının öğrenmesini kolaylaştıracak bir takım yardımcı unsurlara ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Bu tür ihtiyaçlara yardımcı olabilecek teknolojik sistemler, otomatik transkripsiyon işlemine dayalıdır. Kemanın ses karakteristiğinin farklı yapısı ve çok farklı keman çalış tekniklerinin bulunması nedeniyle otomatik transkripsiyonun yapılması, diğer enstrümanlara göre daha zordur [13],[21].

Bu çalışmada, başlangıç seviyesi keman öğrencilerinin çalma performansları hakkında geri besleme alabilecekleri bir sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öğrencilerin boş tel, arpej ve dizi çalışmalarındaki performansları için geri dönüt alabilecekleri bir otomatik müzik transkripsiyon sistemi önerilmiş ve bu önerilen sisteme dayalı Matlab yazılım tabanlı bir kullanıcı arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma şu bölümlerden oluşmaktadır:

- İkinci bölümde otomatik müzik transkripsiyon ve kullanıcı arayüzleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar hakkında kısa bilgiler verilmektedir.
- Üçüncü bölümde, önerilen sistemin analizinde kullanılacak olan keman ses kayıtları, sonra literatürde yaygın olarak kullanılan MIRtoolbox ve Essentia müzik analiz yazılımları, bunu takiben ise önerilen otomatik transkripsiyon sistemi ile bu sistem tabanlı gerçekleştirilen kullanıcı arayüz hakkında bilgiler verilmektedir.
- Dördüncü bölümde ise boş tel, arpej ve dizi çalışma kayıtları için önerilen sistemle birlikte MIRtoolbox ve Essentia'dan elde edilen analiz sonuçları verilmektedir.
- Son bölümde, bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenmekte ve ileride konuyla ilgili yapılabilecek çalışmalar verilmektedir.

Literatür İncelemesi

Ses kayıtlarından otomatik müzik transkripsiyon çalışmaları 1977 yılından itibaren Moorer [22], Piszczalski ve Galler [23] çalışmaları ile başlamış olup, konuyla ilgili geniş incelemeler 2004'te Klapuri [24], 2013'te Benetos vd. [25] ve Tavares vd. [26] ve 2016'da Gowrishankar vd. [27] tarafından yapılmıştır. Literatürde gitar [28], basgitar [29], elektrogitar [30], piyano [31-33], davul [34]-[36], davul zili [37], zil çanları [38], sopele [39], Flamenko müziği [40] ve Hint klasik müziği [41] gibi farklı müzik enstrümanları ve türleri için yapılmış çeşitli otomatik müzik transkripsiyon çalışmaları bulunmaktadır.

Kemanla ilgili literatürde yapılmış çeşitli otomatik transkripsiyon ve sistem gerçekleştirme çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Muto ve Tanaka (2002) bir transkripsiyon sistemi önermiş ve bu sistemin performansını piyano, flüt, trampet ve kemanı kapsayan enstrümanlar üzerindeki etkilerini tek enstrüman sesi ve iki enstrüman sesi üzerinde denemişlerdir [42]. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin tek enstrüman sesleri arasında kemanın, iki enstrüman sesleri arasında ise piyano ve kemanın en düşük doğruluk oranında performans sağladığını göstermiştir. Krishnaswamy ve Smith (2003) ses işaretinin kısa zamanlı Fourier dönüşümü çerçevelerinin örüntü tanıma yaklaşımını kullanarak hangi tel üzerinde hangi notanın çalındığını, yayla mı yoksa parmakla mı çalındığını belirlemeye çalışmışlardır [43]. Charles vd. (2004) ViTool adını verdikleri keman pedagojisi, ses analizi ve başlangıç ile iyi çalıcı kayıtlarının kıyaslanması tabanlı bir keman öğretim yardımcısı geliştirmek için olası bir yaklaşım sunmuşlardır [44]. Yin vd. (2004) keman müziği tabanlı olarak bir kemancının animasyonunu otomatik çıkaran bir sistemin ilk adımını atmışlardır [45]. Bunun için ilk adım olarak giriş ses işaretinin analizini yapıp müzik notalarına dönüştürmeye, daha sonra da bu notaları kullanarak bir kemancının animasyonunu sentezlemeye çalışmışlardır. Yin vd. (2005) başlangıç keman öğrencileri için Digital Violin Tutor (Sayısal Keman Öğreticisi) isminde bir entegre sistem önermişlerdir [46]. Önerilen sistemin kullanıcı arayüzünün sol üst bölümünde öğretmen çalışının videosu, sağ üst bölümde 3 boyutlu avatar animasyonu, sol alt kısımda öğrenci çalışındaki hataların gösterilmesi ve sağ alt bölümde ise 2 boyutlu olarak keman klavyesi animasyonu yer almaktadır. Vogel vd. (2005) piyano ve keman sesleri odaklı çoklu enstrüman müzik transkripsiyonu için dinamik grafiksel bir model sunmuşlardır [47]. Her bir enstrüman zamanda en çok bir nota çalacak şekilde sistem modellenmiştir. Boo vd. (2006) kişisel keman öğrenmeyi desteklemek amacıyla bir ev ortamında kaydedilmiş gerçek zamanlı keman ses işaretlerinin transkripsiyonu için bir yöntem önermiş olup, burada aynı zamanda iki telin yayla çalındığı durumun tespit edilmesi hedeflenmiştir [48]. Burada doğrudan müzikle alakalı bir işaret spektral gösterimi olan yarım-ton bant spektrogramı kullanmıştır. Önerilen sistem nota bölütlenme tespiti ve perde tahmini adında iki ana bloktan oluşmaktadır. Loscos vd. (2006), önceki önerdikleri otomatik keman transkripsiyon sistemini [48] bir adım öte götürmeyi amaçladıkları bu çalışmada, transkripsiyon tekniklerine, yardımcı olma ve hesaplama maliyetini azaltma için düşük seviyeli tanımlayıcı seti sunmuşlardır [49].

Önerilen sistem için nota seviyesinde bölütlenme, perde tahmini ve vibrato analizi konuları çalışılmıştır. Charles vd. (2006) bu çalışmalarında tını uzayında en iyi keman sesini tanımlayan öznelikleri bulmak için işaret işleme yöntemlerinin kullanımı incelemiştir [50]. Tını kalitesini tanımlamak için 6 öznelikli verimliliği ve kullanılabilirliği göz önünde bulundurulmuştur. Wang vd. (2007) ses ve video tabanlı bir keman transkripsiyon sistemi önermişlerdir [51]. Sistemde sağ el yay çekme ve sol el klavye üzerinde parmak hareketlerinin izlenmesi için iki kamera kullanılmıştır. Thornburg vd. (2007), monofonik müzikal ses işaretleri için segmentasyon ve melodi çıkarma işlemleri için olasılıklı bir yöntem önermiş ve piyano ile keman sesleri için uygulama yapmıştır [52]. Yöntem kısa zamanlı Fourier dönüşüm tepeleri üzerine çalışmaktadır. Zhang vd. (2007) sadece ses tabanlı keman transkripsiyonunda ortaya çıkan zorlukları dengelemek için keman parmak kullanımının görsel analizini incelemiştir [53]. Lu vd. (2008) bir bilgisayar, bir mikrofon ve iki web kamera tabanlı bir işitsel-görsel sistemi C++ ortamında gerçekleştirmiştir [54]. Bu sisteme iDVT (interactive Digital Violin Tutor) adını vermişlerdir. Charles vd. (2008), bir bilgisayar sisteminin keman çalma kalitesini değerlendirebilmesine yardımcı olabilecek uygun öznelikler aranmış ve çalınan keman ses örneklerinin kalitesi başlangıç ve profesyonel olarak sınıflandırılmıştır [55]. Bunu yapmakla nesnel ve kararlı bir sınıflama yöntemi sağlama amaçlanmıştır. Maezawa vd. (2009) bir kemanda yayla çalınan tellerin sırasının tahmini için ses tabanlı bir sınıflama yöntemi ve üç hata düzeltme algoritması sunmuşlardır [56]. Barbancho vd. (2009) keman perde ve süre bilgileri dışında vibrato, pizzicato ve tremolo gibi çalım tekniklerinin de tanımlandığı bir müzik transkripsiyon sistemi önermişlerdir [57]. Maezawa vd. (2012), keman ses kayıtlarının analiz edilmesi ile otomatik parmak transkripsiyonu için bir yöntem sunmuşlardır [58]. Bunun için tel numarası ve tel boyunca basılan yerin belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Huang (2008) otomatik keman çalan bir çalıcının gerçekleştirilmesi için incelemeler yapmış [59] ve Huang vd. (2012) bu sistemi gerçekleştirmişlerdir [60]. Carillo vd. (2012) bir kemancı tarafından gerçekleştirilen eylemler ile bu eylemlerin ürettiği ses arasındaki ilişkiyi modellemeyi amaçlamışlardır [61]. Bunun için sinir ağları tabanlı bir keman tını modeli önermişlerdir. Wang vd. (2012), özel olarak perde doğruluğu üzerine çalışan keman öğrenenleri hedeflemişlerdir [62]. Bunun için çalınan perdeyi tespit edecek bir perde takip algoritması uygulamışlardır. Sonuçta doğru perdenin çalınıp çalınmadığı bilgisi kullanıcılara gerçek zamanlı olarak sağlanmıştır. Ayrıca öğretim materyali olarak majör dizi ve arpej skorları da sistem tarafından kullanıcılara sunulmakta, bunun yanı sıra seviyelerine bağlı olarak farklı tempolarda pratik yapma olanağı sunulmaktadır. Lin vd. (2014), solo keman kayıtlarında sunulan her bir notanın zaman-bağımlı analizi için çerçeve tabanlı özyinelemeli düzenlilik yöntemi önermişlerdir [63]. Bu yöntem negatif olmayan matris ayrıştırma yöntemine benzer olarak Fourier büyüklük katsayılarından oluşmuş matrisi taslak-matris ve şiddet-matrisine ayrıştırarak yapmaktadır. Pardue vd. (2015), kemanda performans takibi için düşük maliyetli ve gerçek zamanlı bir yöntem önermişlerdir [64]. Hem tel üzerinde yay takibi hem de klavye üzerinde parmak takibi için ayrı ayrı sensörler kullanılmıştır. Jo vd. (2015), insanın keman çalma tekniklerini taklit eden keman çalan bir robot önermişlerdir

[65]. Liang vd. (2015), nota başlangıç zamanı kadar literatürde fazla üzerinde durulmayan nota bitiş zamanının tespiti konusunu ele almışlardır [66]. Jo vd. (2016) bir robot tarafından çalınan kemandan üretilen sesleri değerlendiren işitsel geri besleme sistemi geliştirilmesi konusu ele alınmış, yay hızı ve yay basıncı tahmin edilmeye çalışılmıştır [67]. Maruyama ve Uemura (2017), yay mekanizması ve yay kaydırma mekanizmasını barındıran ve ses kontrol ile çalışan bir keman çalan robot geliştirmişlerdir [68]. Yura vd. (2017), Matlab Simulink tabanlı keman çalan bir robot kol modellemesi üzerinde durmuşlardır [69]. Li vd. (2017), polifonik müzikte vibrato tespiti ve analizi için video tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir [70]. Sonuç olarak yüksek polifoni durumları için önerilen video tabanlı yöntemin ses tabanlı yöntemlerden daha doğru bir şekilde vibrato tespiti yaptığı gözlemlenmiştir. Pardue ve McPherson (2019), kemanda entonasyonu geliştirmek için işitsel ve görsel geribeslemeli bir sistem önermişlerdir [71]. Ortega vd. (2019), keman performansında ifade modelleme üzerinde bir yaklaşım önermişlerdir [72].

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak başlangıç seviyesi keman öğrencilerinin boş tel, arpej ve dizi çalışmalarındaki performansları için geri besleme alabilecekleri bir arayüz tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmış, bu doğrultuda keman seslerinin doğru otomatik transkripsiyonun yapılması hedeflenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu bölümde çalışmada kullanılan keman ses kayıtları, önemli müzik analiz yazılımları olan MIRtoolbox ve Essentia ile önerilen sisteminin gerçekleştirilmesi hakkında bilgiler verilmektedir.

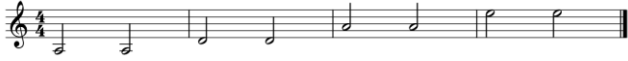
Keman Ses Kayıtları

Hedeflenen etütler için literatürde uygun veri seti olmadığından, öncelikle çalışmada kullanılacak kayıt verisi oluşturulmuştur. Müzik Eğitimi Anabilim Dalında öğretim elemanı olarak çalışan dört yaylı çalgılar eğitimcisi ve yaylı çalgılar eğitimi alan dört lisans öğrencisi, Şekil 2'de gösterilen bir yaylı çalgılar eğitimcisine ait kemana kullanarak boş tel, sol major arpej ve sol major dizi çalışmalarını çalışmışlardır.



Şekil 2. Kayıt çalışmalarında kullanılan keman.

İlk etüt çalışması olarak sessiz bir ortamda Şekil 3'te verilen boş tel çalışması çalınmış, bu çalmada çalıcılar keman üzerindeki dört boş teli yukarıdan aşağıya doğru her bir teli sırasıyla çekerek ve iterek toplamda 8 notayı çalmışlardır.



Şekil 3. Boş tel çalışması.

İkinci etüt çalışması olarak Şekil 4'te verilen Sol majör tonuna ait iki oktavlık çıkıcı ve inici arpejine ait toplamda 14 nota çalınmıştır.



Şekil 4. Sol majör arpej çalışması.

Son etüt çalışması olarak Şekil 5'te verilen Sol majör tonuna ait iki oktavlık çıkıcı ve inici dizisine toplamda 30 nota çalınmıştır.



Şekil 5. Sol majör dizi çalışması.

Keman çalgı tekniğinin gelişmesi açısından majör dizi çalışmalarının yapılmasının önem taşıdığı literatürde belirtilmiştir [73]. Belirtilen üç etüdün keman çalıcıları tarafından, bütün yaylarda (tüm kıl), forte (kuvvetli) gürlükte ve 45 metronom hızında çalmaları istenilmiştir. Bununla birlikte ayrıca Sol majör tonuna ait iki oktavlık çıkıcı ve inici dizinin ve arpejlerinin hiçbir müziksel dinamik (piyano, forte, diminiendo, ritardando, crescendo, de crescendo vb.) ve vibrato yapmaksızın çalınması ve kayıt altına alınması sağlanmıştır. Her çalma işleminden sonra kemanın akordu tekrar kontrol edilmiştir. Oluşturulan keman sesleri, Şekil 6'da verilen iPad tablet bilgisayar tabanlı iTrack Dock Studio kayıt sistemi ile profesyonel anlamda stüdyo kalitesinde (24 bit ve 48 KHz örnekleme oranları, 105 dB dinamik aralık) kayıt yapılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu şekilde, sistem performansında kullanılacak “.m4a” uzantılı keman ses kayıt dosyaları elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen tüm kayıtların analizi lisanslı 64 bit Matlab 2016a programı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6. iTrack Dock studio kayıt sistemi.

Ses analiz yazılımları: MIRtoolbox ve Essentia

Bu çalışmada önerilen sistemin keman ses kayıtlarının otomatik transkripsiyonundaki performansı, literatürdeki MIRtoolbox ve Essentia isimli iki yazılımda bulunan ilgili yöntemlerle kıyaslanarak yapılmıştır.

MIRtoolbox, ses kayıtlarından müzik bilgisi almak için kullanılan ve Olivier Lartillot ve Petri Toiviainen tarafından 2007 yılında yayınlanmış ve sürekli geliştirilmekte olan bir Matlab araç kutusudur [74]. Bu çalışmada MIRtoolbox'ın güncel sürümü olan 1.7 sürümü kullanılmıştır.

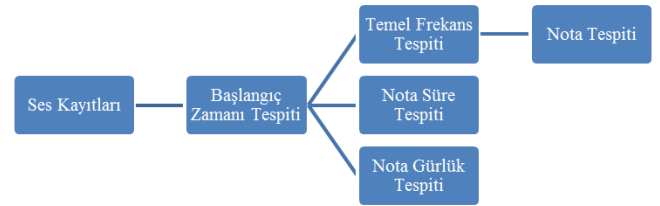
Essentia ise, İspanya'nın Barcelona şehrindeki Pompeu Fabra Üniversitesi bünyesinde bulunan Music Technology Group (MTG) tarafından 2013 yılında yayınlanan ses tabanlı müzik bilgisi alma ve ses analizi için kullanılan açık kaynaklı bir C++ kütüphanesidir [75]. Bu çalışmada güncel sürüm olan 2.1 beta3 kullanılmıştır.

Önerilen Otomatik Transkripsiyon Sistemi ve Kullanıcı Arayüz Gerçekleştirilmesi

Bu kısımda öncelikle keman seslerinin otomatik analizlerini yapacak olan önerilen transkripsiyon sistemi ve sonrasında bu sisteme dayalı olarak gerçekleştirilen kullanıcı arayüzü verilmiştir.

Önerilen Otomatik Transkripsiyon Sistemi

Boş tel, arpej ve dizi çalışmalarına ait ses kayıtlarının analizi için oluşturulan otomatik transkripsiyon sistemin blok diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Önerilen otomatik transkripsiyon sistemi blok diyagramı.

Başlangıç zamanı tespiti

Ses kayıtlarından nota yerlerinin tespiti için öncelikle nota başlangıç zamanlarının tespiti yapılması gerekmektedir. Literatürde nota başlangıç zamanı tespiti için çeşitli yöntemler bulunmaktadır [13], [76]. Tarafımızca yapılan analizler sonucu daha iyi sonuçlar vermesi nedeniyle bu çalışmada nota başlangıç zamanlarının tespiti için karmaşık spektral fark yöntemi [76] kullanılmıştır. Başlangıç zamanı tespiti için aşağıdaki işlem basamakları yapılmıştır.

(i) Karmaşık spektral fark yönteminden tespit fonksiyonun elde edilmesi: $s(n)$ ayrık zamanlı işaretin kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) Eş. (1)'deki gibi tanımlandığında, başlangıç zamanı tespitinde kullanılacak fonksiyon (δS) Eş. (2)'de belirtilen şekilde spektral farktan bulunur [75].

$$S_k(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n)w(mh - n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (1)$$

$$\delta S = \sum_{k=1}^N |S_k(m)| - |S_k(m-1)| \quad (2)$$

Burada $w(n)$ N-uzunluklu ayırık zamanlı pencere ve h ardışık pencereler arasındaki zaman kayması olup, bu çalışmada %50 örtüşme oranı ve 20 ms uzunluğunda Hamming penceresi kullanılmıştır. Tespit fonksiyonu (δS) için kemanda çalınan notaların bulunabileceği 190 Hz-995 Hz frekans aralığı kullanılmıştır.

(ii) *Tespit fonksiyonundan başlangıç zamanlarının elde edilmesi:* δS tespit fonksiyonu; boş tel, arpej ve dizi çalışmalarında bulunan nota sayısına göre bantlara bölünmüştür. Boş tel çalışmasında 8, arpej çalışmasında 14 ve dizi çalışmasında 30 nota seslendirilmiştir. Sonraki işlemde bantlar içerisinde yer alan en büyük genlik değerlerine karşılık gelen parça numarası (p_m) bulunur. Bulunan bu parça numaraları, örtüşme oranı ($n_{ort}=\%50$), pencere uzunluğu ($N=20$ ms) ve örnekleme frekansı ($f_s = 48.000$ Hz) kullanılarak Eş. (3)'de verilen işlem sonucu saniye cinsinden başlangıç zamanları bulunur.

$$\text{Başlangıç zamanları} = (p_m).(n_{ortusme).(N).(f_s) \quad (3)$$

Temel frekans tespiti

Nota başlangıç zamanlarının tespit edilmesiyle notaların parça içerisindeki yerleri belirlenmiş olur. Sonraki aşamada Hızlı Fourier Dönüşümü ile her bir notanın spektrumu bulunmaktadır. Adaptif eşik ve segmentasyon yöntemi, bulunan spektrumuna uygulanır ve sonuçta harmoniklerden ayırt edilmek suretiyle notanın temel frekansı tespit edilir. Temel frekans tespiti için şu aşamalar kullanılmıştır:

(i) *Parçanın notalara bölünmesi:* Başlangıç zamanlarının tespit edilmesiyle kayıt içerisindeki notalar ayrıştırılır. Boş tel çalışmasında 8, arpej çalışmasında 14 ve dizi çalışmasında 30 nota elde edilir.

(ii) *Notaların spektrumlarının bulunması:* Elde edilen her bir notanın Hızlı Fourier Dönüşümü alınarak genlik spektrumu bulunur.

(iii) *Her nota için eşik değerlerinin belirlenmesi:* Başlangıç eşik değeri 1 Hz ve ideal nota frekans değerleri ile arasındaki fark belirlenecek bir maksimum değer olarak eşik değeri tespit edilir.

(iv) *Temel frekansın bulunması:* Belirtilen eşik değeri geçen genlik değerleri 1, geçmeyenler sıfır olarak atanır. Eşik değeri ilk geçmiş (yani ilk sıfır olmayan) genlikten itibaren eşik değeri geçmiş ve geçmemiş genlik değerleri arasında maksimum genliğe sahip değerin ve bu maksimum değerinin o toplam veri içerisinde kaçınıcı sırada yer aldığı bulunur. Bulunan bu sıra kullanarak frekans bandından eşik değeri geçmiş notanın ilk temel frekansı bulunur.

Nota tespiti

Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te sırasıyla boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi notalarının hangi telde buldukları ile bunların isimleri ve ideal frekans değerleri bulunmaktadır. Tablodaki teller üstten aşağıya doğru sıralanmıştır. Yani, 1. tel kemanda en üst, 4. tel ise en alt tele karşılık gelmektedir. Keman kayıtlarından bulunacak temel frekansların, bu ideal frekanslara olan yakınlığı tespit edilerek ses kaydındaki notalar tespit edilmektedir.

Tablo 3. Keman boş tel nota ve frekans değerleri.

Tel No	Nota	Frekans (Hz)
1. Tel	G ₃	196.0
2. Tel	D ₄	293.7
3. Tel	A ₄	440.0
4. Tel	E ₅	659.3

Tablo 4. Keman sol majör arpej nota ve frekans değerleri.

Tel No	Nota	Frekans (Hz)
1. Tel	G ₃	196.0
1. Tel	B ₃	246.9
2. Tel	D ₄	293.7
2. Tel	G ₄	392.0
3. Tel	B ₄	493.9
3. Tel	D ₅	587.3
4. Tel	G ₅	784.0

Tablo 5. Keman sol majör dizi nota ve frekans değerleri.

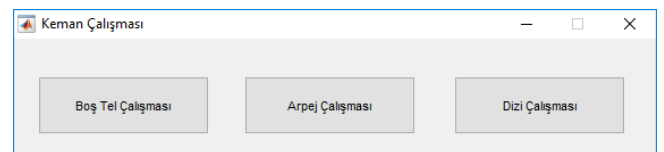
Tel No	Nota	Frekans (Hz)
1. Tel	G ₃	196.0
1. Tel	A ₃	220.0
1. Tel	B ₃	246.9
1. Tel	C ₄	261.6
2. Tel	D ₄	293.7
2. Tel	E ₄	329.6
2. Tel	F# ₄	370.0
2. Tel	G ₄	392.0
3. Tel	A ₄	440.0
3. Tel	B ₄	493.9
3. Tel	C ₅	523.3
3. Tel	D ₅	587.3
4. Tel	E ₅	659.3
4. Tel	F# ₅	740.0
4. Tel	G ₅	784.0

Süre ve gürlük tespitleri

Nota başlangıç zamanları tespit edildikten sonra notaların başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki fark nota süresi olarak alınmıştır. Gürlük analizi için ise her bir notanın seslendirilen süre içerisindeki tüm değerlerin mutlak değerinin ortalaması alınmıştır.

Önerilen Kullanıcı Arayüzü

Önerilen otomatik transkripsiyon işlemlerini yapmak üzere Matlab 2016a programı kullanarak Şekil 8'de verilen bir kullanıcı arayüz tasarlanmıştır. Bu arayüzün ayrıntılı yapısı, ileriki kısımlarda yapılacak örnek uygulamalarda verilecektir.



Şekil 8. Önerilen otomatik transkripsiyon için hazırlanmış grafiksel kullanıcı arayüzü.

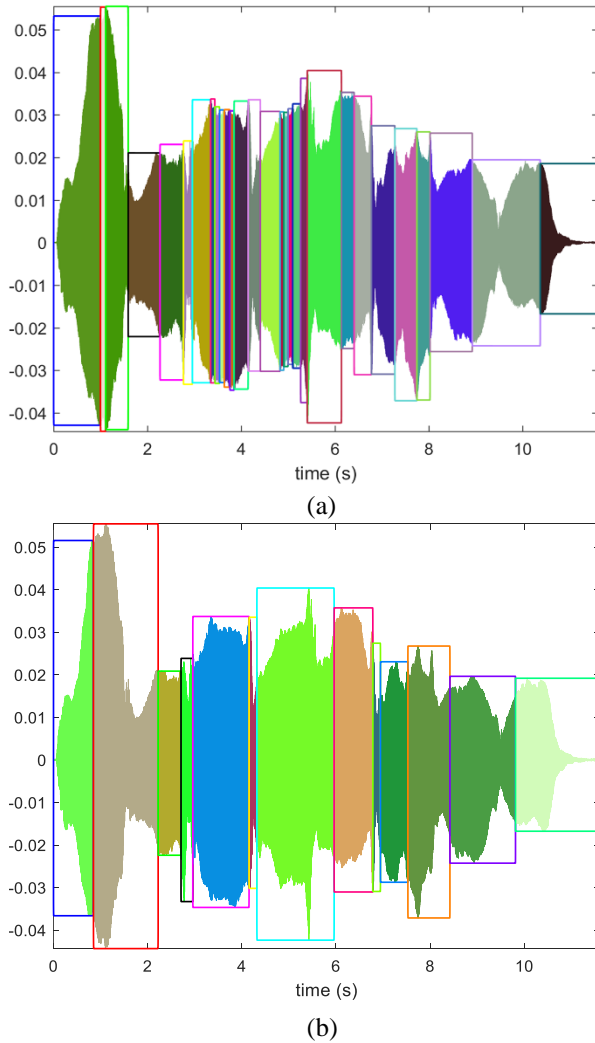
Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde sekiz katılımcıya ait boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi çalma kayıtları için literatürdeki önemli müzik analiz araçları olan MIRtoolbox ve Essentia ile önerilen yönteme ait analiz sonuçları verilmektedir.

Bu bölümün ilk kısmında analizler için kullanılan veri setinin dalga grafikleri verilmektedir. İkinci kısımda Matlab'ta MIRtoolbox kullanarak elde edilen analiz sonuçları verilmektedir. Üçüncü kısımda ise Essentia kütüphanesi kullanılarak aynı veri seti analiz edilmiştir. Son kısımda ise gerçekleştirilen arayüz kullanarak aynı veri seti analiz edilmiştir.

MIRtoolbox Tabanlı Analizler

MIRtoolbox 1.7 sürümünde atak faz kullanımsız ve atak faz kullanımlı olmak üzere iki adet bölütleme yöntemi bulunmaktadır. Şekil 9.a ve 9.b birinci katılımcıya ait boş tel çalışma kaydı için sırasıyla atak faz kullanımsız ve atak faz kullanımlı yöntemlere ait bölütleme sonuçlarını vermektedir. Atak faz kullanımsız sonucu elde etmek için Matlab'ta `>> o = mironsets('dosya adı'); mirsegment(o)`, atak faz kullanımlı sonucu elde etmek için ise `>> o = mironsets('dosya adı', 'Attacks');` komutları kullanılmıştır.



Şekil 9. Birinci katılımcı boş tel çalmasına ait ses dalgasının MIRtoolbox tabanlı nota bölütlenmesi a) atak faz kullanımsız b) atak faz kullanımlı.

Şekil 9'daki sonuçlardan görüleceği üzere, keman kaydının nota bölütlenmesi MIRtoolbox'ta başarısız bir şekilde sonuçlanmıştır, çünkü boş tel kaydında sadece 8 başlangıç zamanı ve 8 nota olmasına rağmen, atak faz kullanımsız yöntemde 28 başlangıç zamanı ve 28 nota, atak faz kullanımlı yöntemde ise 16 başlangıç zamanı ve 16 nota bulunmuştur. Nota bölütlenmesi hatalı olduğu için ilgili kaydın frekans analizi yapılmamıştır.

Şekil 9'dan elde edilen boş tel çalışmasına ait sonuçlarla birlikte birinci katılımcıya ait sol majör arpej ve dizi çalışmasına ait analiz sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Sonuçlar atak faz kullanımlı yöntemin daha iyi sonuçlar vermesine rağmen her iki yöntemin gerçek değerlerden oldukça fazla sayıda bölütleme yaptığı görülmektedir. Sayfa sınırlamasından dolayı diğer katılımcılara ait sonuçlara burada yer verilememiş, fakat benzer başarısız sonuçlar diğer katılımcı kayıtları için de elde edildiği görülmüştür.

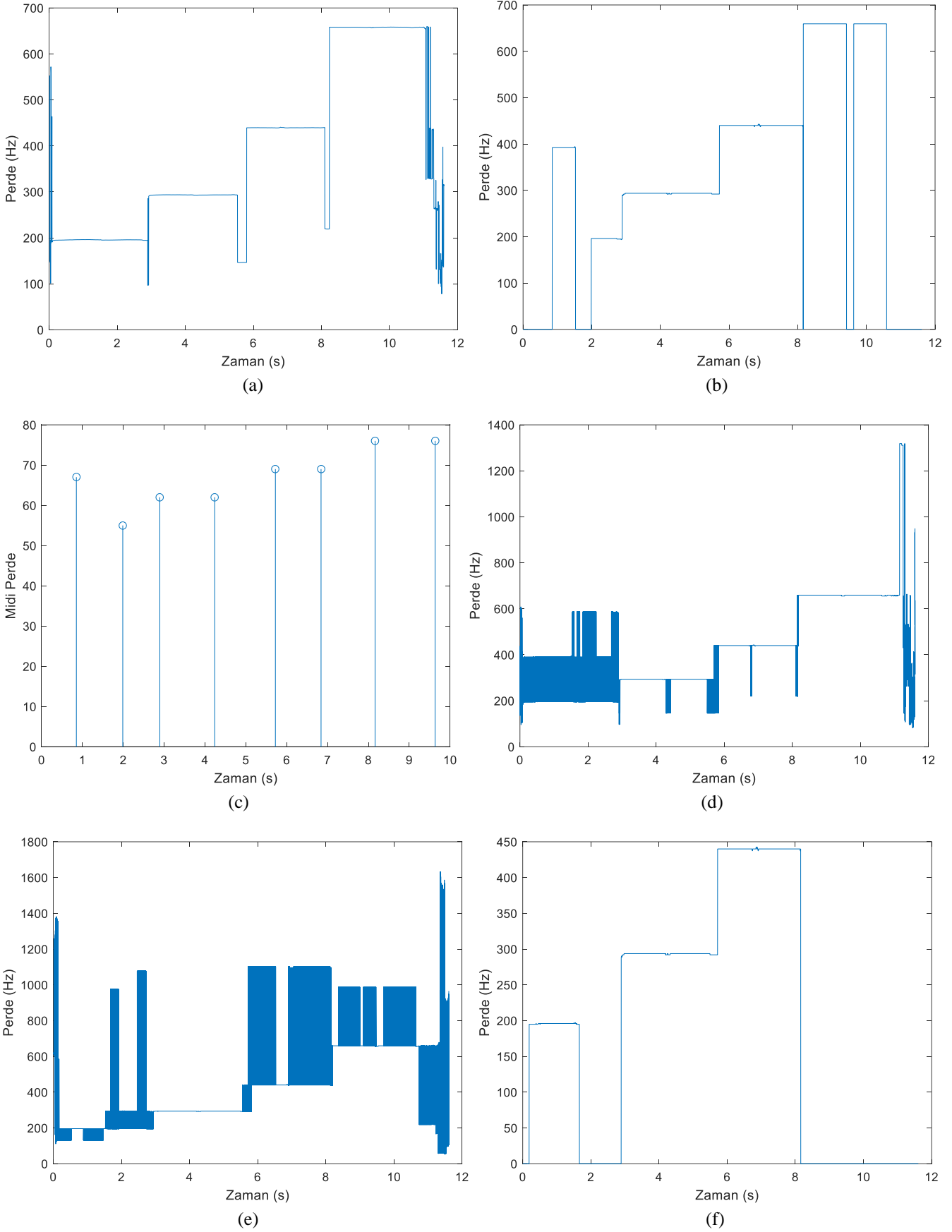
Tablo 6. Birinci katılımcıya ait çalmalar için MIRtoolbox nota bölütleme analiz sonuçları.

Kayıt	Nota sayısı	Atak faz kullanımsız	Atak faz kullanımlı
Boş tel	8	28	16
Arpej	14	40	22
Dizi	30	70	40

Essentia Tabanlı Analizler

Essentia kütüphanesinde tanımlı 6 bölütleme yöntemi bulunmaktadır [77]. Bu yöntemler Yin FFT monofonik perde tahmini (Essentia-I) [78], Melodia monofonik perde tahmini yöntemi (Essentia-II) [79], Monofonik perde tahmini (Essentia-III) [77], Klapuri çoklu perde tahmini yöntemi (Essentia-IV) [80], Melodia çoklu perde tahmini yöntemi (Essentia-V) [79] ve Melodia predominant perde tahmini (Essentia-VI) [79] yöntemleridir. Şekil 10 birinci katılımcıya ait boş tel çalışma kaydı için bu altı yönteme ait bölütleme sonuçlarını vermektedir.

Şekil 10.a'da verilen Yin FFT monofonik perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, gerçekte 8 adet olan parçadaki nota sayısı 4 olarak bulunmuş ve ayrıca parçanın başında ve sonunda oldukça fazla salınım ortaya çıkmıştır. Şekil 10.b'de verilen Melodia monofonik perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısı 6 olarak bulunmuş ve ayrıca nota süreleri çok farklı bir şekilde tespit edilmiştir. Şekil 10.c'de verilen Monofonik perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısı 8 olarak doğru bulunmuş, ama ilk notanın midi perde sayısı yanlış bulunmuştur. Bunun yanı sıra nota süreleri eşit çalınmasına rağmen notalar arası süreler eşit bulunmamıştır. Şekil 10.d'de verilen Klapuri çoklu perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısını çok farklı sayıda bulmuş, bunun yanı sıra özellikle ilk nota ve parçanın sonunda çok fazla salınım ortaya çıkmıştır. Şekil 10.e'de verilen Melodia çoklu perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısını çok farklı sayıda bulunmuş, bunun yanı sıra parçanın birçok bölümünde çok fazla salınım ortaya çıkmıştır. Şekil 10.f'de verilen Melodia predominant perde tahmini yöntemi tabanlı nota bölütlenmesi sonucu, parçadaki nota sayısını 3 olarak bulunmuş, bunun yanı sıra son iki nota hiçbir şekilde tespit edilememiştir.



Şekil 10. Birinci katılımcı boş tel çalmasına ait kaydın Essentia tabanlı nota bölütlenmesi a) Yin FFT, b) Melodia monofonik perde tahmini, c) monofonik nota transkripsiyon, d) Klapuri çoklu perde tahmini, e) Melodia çoklu perde tahmini ve f) Melodia predominant perde tahmini.

Şekil 10'dan elde edilen boş tel çalışmasına ait sonuçlarla birlikte birinci katılımcıya ait sol majör arpej ve dizi çalışmasına ait analiz sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Sonuçlar yer yer bazı yöntemlerin doğru nota sayısını tespit etmekle birlikte, tüm yöntemlerin bölütlemeye birtakım

hatalar verdiğini göstermektedir. Sayfa sınırlamasından dolayı diğer katılımcılara ait sonuçlara burada yer verilememiş, fakat benzer başarısız sonuçlar diğer katılımcı kayıtları için de elde edildiği görülmüştür.

Tablo 7. Birinci katılımcıya ait çalmalar için Essentia nota bölütleme analiz sonuçları.

Kayıt	Essentia I	Essentia II	Essentia III	Essentia IV	Essentia V	Essentia VI
Boş Tel (8 Nota)	- 4 nota tespiti - Başında ve sonunda çok fazla salınım	- 6 nota tespiti - Çok farklı nota süreleri	- 8 nota tespiti - Yanlış ilk nota midisi ve farklı nota süreleri	- Çok fazla nota tespiti - Başında ve sonunda çok fazla salınım	- Çok fazla nota tespiti - Birçok kısımda çok fazla salınım	- 3 nota tespiti - Son iki notanın tespit edilememesi
Arpej (14 Nota)	- Çok fazla nota tespiti - Başında çok fazla salınım	- 15 nota tespiti - Atlanan sus işareti ve yanlış tespit edilen ortadaki notalar	- 14 nota tespiti - Sus işareti yerine yanlışlıkla tespit edilen başka bir nota	- Çok fazla nota tespiti - Parça içerisinde çok fazla salınım	- Çok fazla nota tespiti - Parça içerisinde çok fazla salınım	- 11 nota tespiti - Bir adet sus yerine bulunan iki adet sus
Dizi (30 Nota)	- 30 nota tespiti - Başında ve sonunda fazla salınım, kısa süreli sus işareti	- 30 nota tespiti - Az süreli son iki nota, bazı nota aralarında kısa süreli sus işaretleri	- 32 nota tespiti - Nota süreleri bazı notalar	- Çok fazla nota tespiti - Orta kısım hariç parça içerisinde çok fazla salınım	- Çok fazla nota tespiti - Birçok yanlış nota tespiti, çok fazla salınım	- 18 nota tespiti - Çok fazla sus işareti tespiti

Önerilen Kullanıcı Arayüz Sistemi Tabanlı Analizler

Bu kısımda önerilen kullanıcı arayüz kullanarak keman boş tel, sol majör arpej ve sol majör dizi kayıtlarının notalara nasıl bölümlendiği sadece birinci katılımcıya ait kayıt üzerinden anlatılmakta, daha sonra da tüm kayıtlarla ilgili sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

Boş tel çalma kaydı için analiz sonuçları

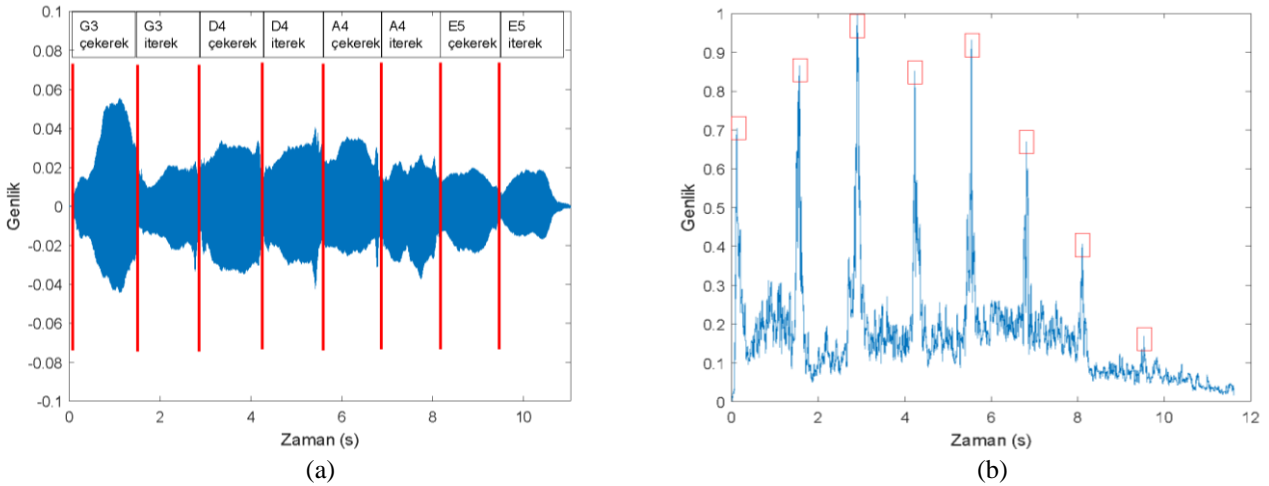
Şekil 11.a'da birinci katılımcıya ait boş tel kayıt örneğinin dalga grafiği ile burada yer alan notaların başlangıç zamanları görülmektedir. Oluşturulan sistemin ilk basamağı, nota başlangıç zamanlarının tespit edilmesidir. Böylelikle kayıt içerisindeki her bir notanın yeri belirlenmiş olup, ilgili analiz için uygun temel bilgi elde edilmiş olmaktadır. Bu çalışmada notalar arası duraksama olmadığından, bir notanın başlangıç zamanı, önceki notanın bitiş zamanı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 11.a'daki grafikte, dikey kırmızı renkli çizgiler nota başlangıç zamanlarını göstermekte olup, bu dalga formunda sekiz notanın var olduğu açıkça görülebilmektedir. Şekil 11.a'da belirtilen nota başlangıç zamanlarını bulma işlemi otomatik olarak yapmak üzere karmaşık spektral fark yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen benzeşim sonucu Şekil 11.b'de verilmiştir. Burada tepe noktalara karşılık gelen yatay eksenindeki değerler nota başlangıç değerlerini oluşturmaktadır. Oluşturulan sistemin

ikinci aşaması, kayıt içerisinden çekilen notanın temel frekansının adaptif eşik ve segmentasyon işlemleri kullanarak bulunmasıdır.

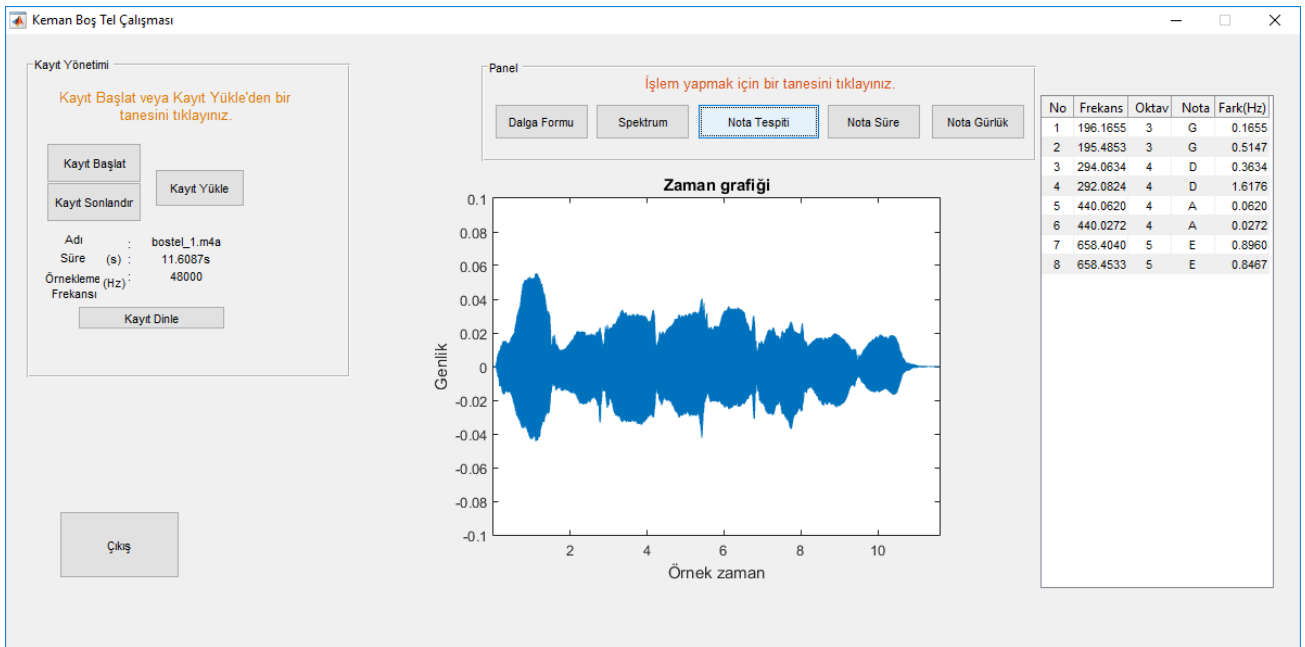
Tüm bu işlemleri otomatik olarak yapmak için hazırlanan arayüz Şekil 12'da görülmektedir. Bu arayüz, Şekil 8'de verilen arayüzde 'Boş Tel Çalışması' butonu tıklandığında çıkmaktadır. Arayüzde bulunan kayıt yönetiminden birinci kişiye ait ses kaydı arayüze yüklenerek ve panel bölümünden "Nota Tespiti" seçildiğinde ilgili kayıttaki notaların oktav ve nota isimleri ile ideal frekans değerlerinden ne kadar fark ile çalıştığı gösterilmektedir (Şekil 12).

Birinci kayıt dışındaki diğer kayıtlar için de nota tespiti yapmak için sistem çalıştırıldığında Tablo 8'de belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlara bakıldığında en yüksek fark değerinin yedinci kayıta ait çekerek çalınan E5 notasında olduğu görülmektedir. Benzer şekilde fark değerlerine bakarak hangi kaydın hangi notasında ne kadar bir fark olduğu, dolayısıyla katılımcıların frekans anlamında performansları görülebilir.

Frekans analizi dışında, arayüzün panel kısmında "Nota Süre" seçildiğinde Şekil 13'te verildiği gibi sekiz notanın saniye cinsinden ne kadar sürede çalındıkları da bulunabilmektedir. Benzer şekilde panel kısmında "Nota Gürlük" seçildiğinde sekiz notanın ne kadar genlikle çalındıkları da bulunabilmektedir (Şekil 14).



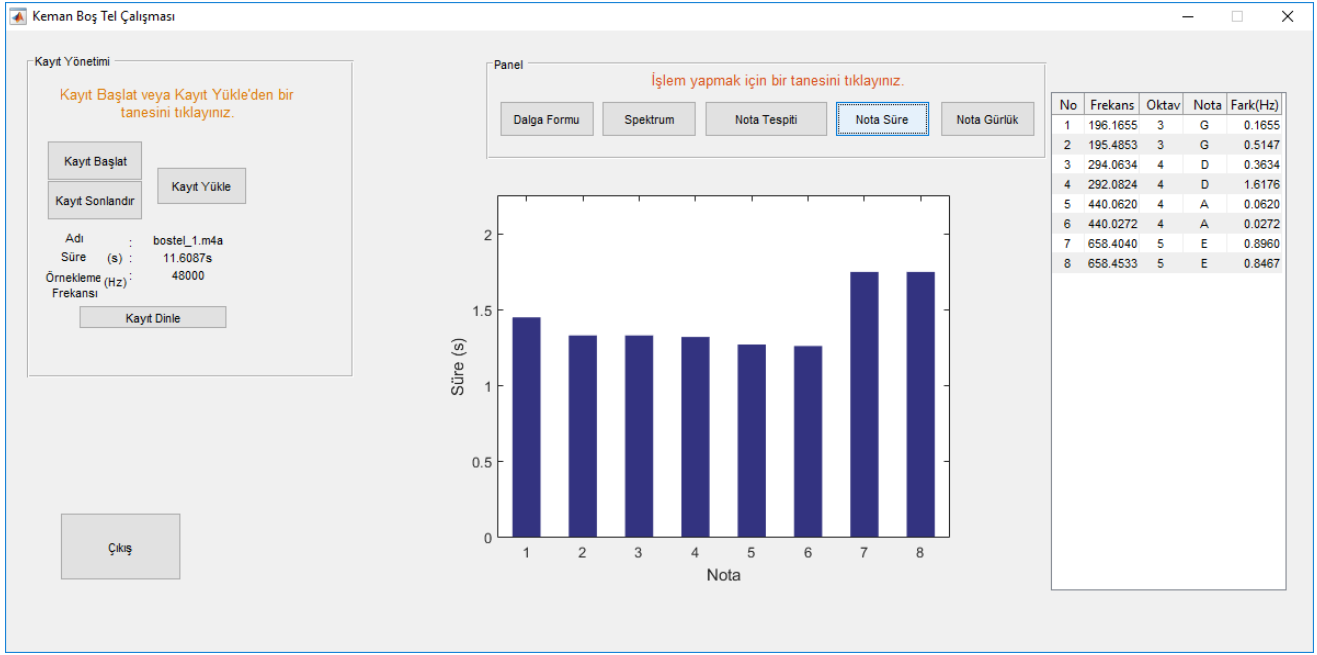
Şekil 11. Birinci katılımcıya ait boş tel kaydının a) dalga grafiği ve nota başlangıç zamanları b) karmaşık spektral fark yöntemiyle bulunan nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği.



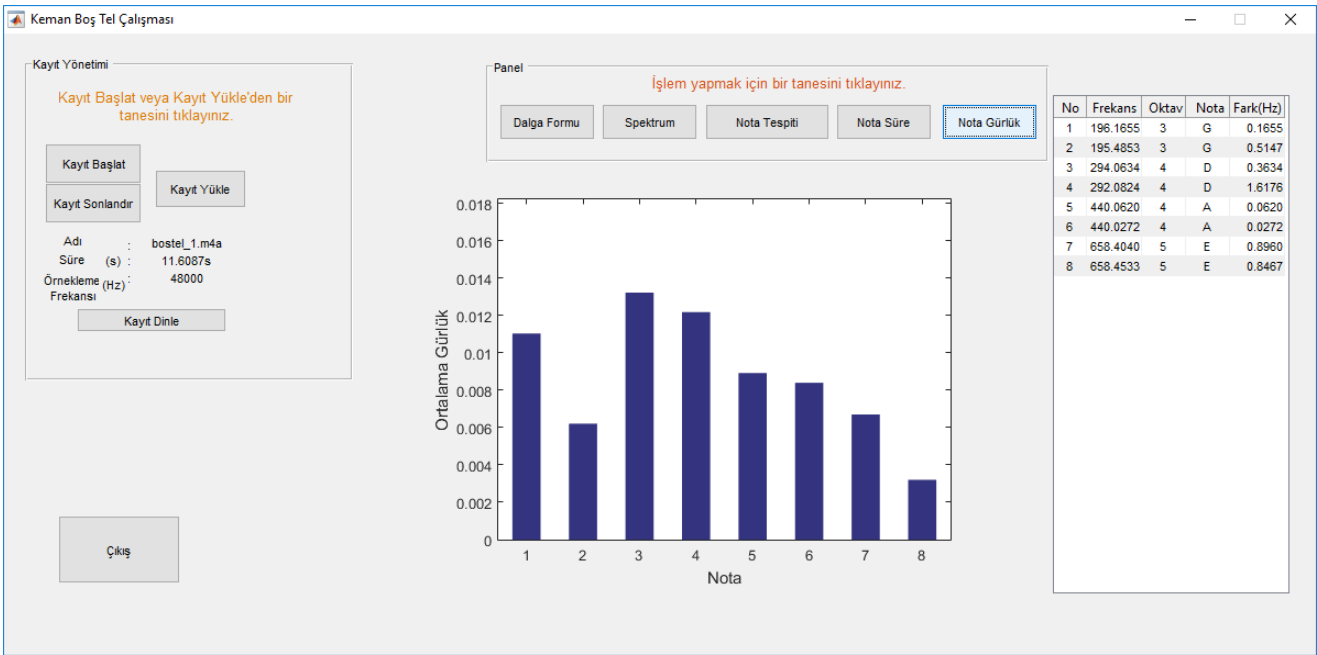
Şekil 12. Boş tel çalışması birinci kayıt için elde edilen nota tespit sonucu.

Tablo 8. Boş tel otomatik transkripsiyon ile bulunan frekans analiz sonuçları

Kayıt	İdeal Frekansa Göre Mutlak Hata (Hz)							
	G ₃	G ₃	D ₄	D ₄	A ₄	A ₄	E ₅	E ₅
1	0.1	0.5	0.3	1.6	0.0	0.0	0.9	0.8
2	0.3	0.5	0.2	0.3	0.6	1.5	0.7	0.4
3	0.5	0.4	1.9	1.8	0.9	1.7	0.9	0.8
4	0.0	0.1	1.3	0.6	0.3	1.1	1.2	1.9
5	0.5	0.7	0.3	1.8	1.8	0.7	1.0	2.4
6	0.4	0.0	1.5	1.0	1.4	2.1	2.4	1.9
7	1.1	0.7	1.9	0.1	0.4	0.0	2.5	1.0
8	0.9	0.6	0.6	0.4	1.8	0.5	1.4	1.7



Şekil 13. Boş tel çalışması birinci kayıt için elde edilen nota süreleri.

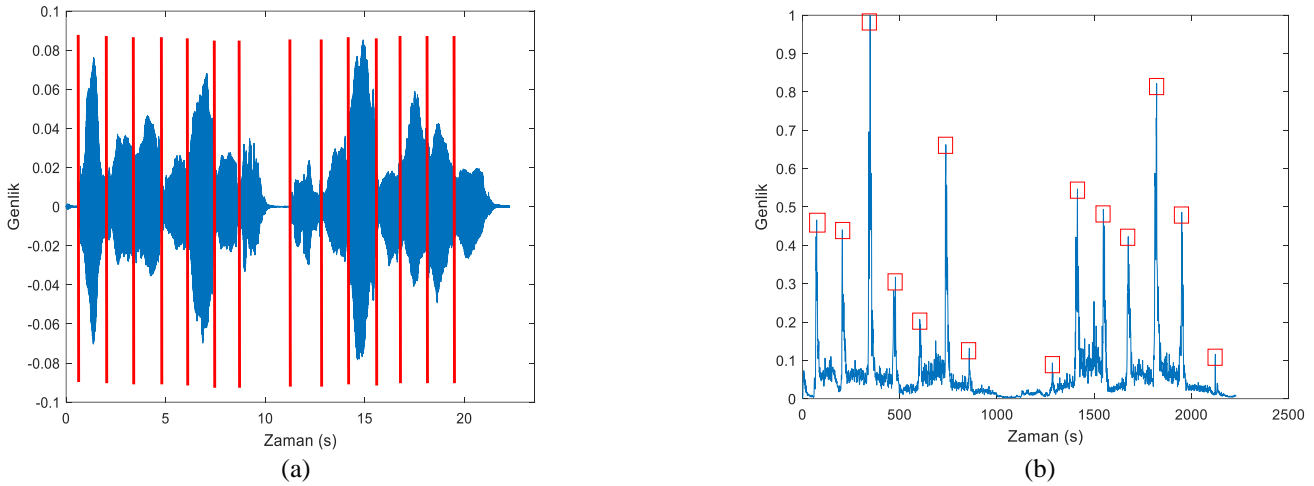


Şekil 14. Boş tel çalışması birinci kayıt için elde edilen nota gürlük değerleri.

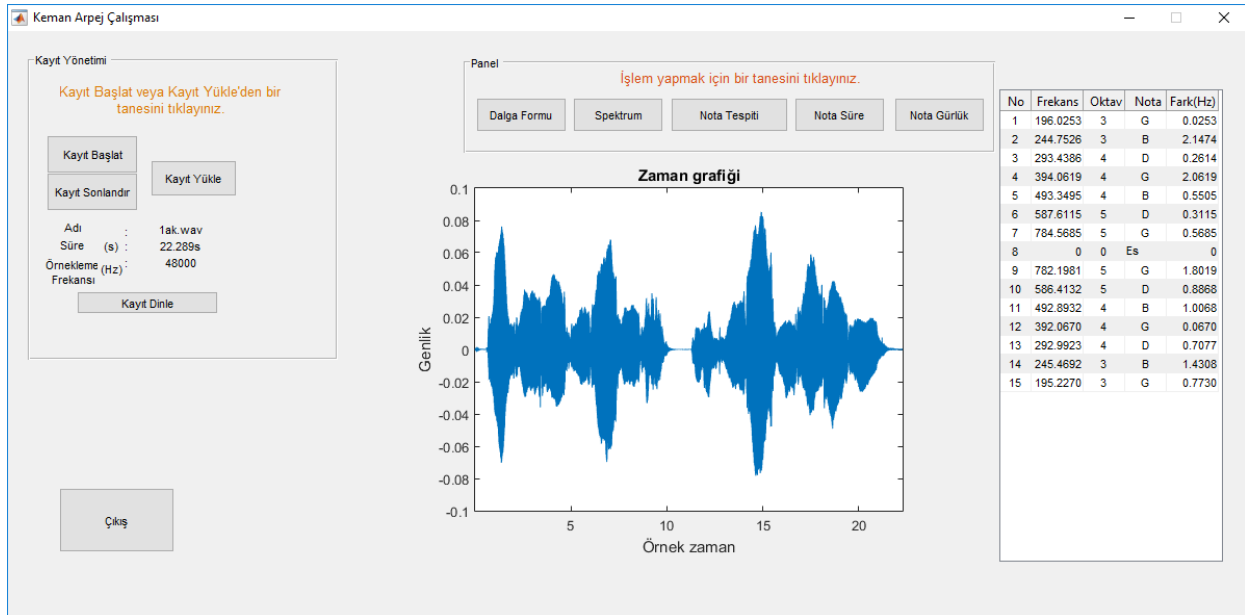
Arpej çalma kaydı için analiz sonuçları

Şekil 15.a'da birinci katılımcıya ait sol majör kayıt örneğinin dalga grafiği ile burada yer alan notaların başlangıç zamanları görülmektedir. Bu grafikte, kırmızı renkli çizgiler nota başlangıç zamanlarını göstermekte olup, bu dalga formunda 14 nota ve arada bir sus işaretinin var olduğu açıkça görülebilmektedir. Karmaşık spektral fark yöntemi kullanılarak elde edilen nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği Şekil 15.b'de verilmiştir. Burada tepe noktalara karşılık gelen yatay eksendeki değerler nota başlangıç değerlerini oluşturmaktadır.

Bu işlemleri otomatik olarak yapmak için hazırlanan arayüz Şekil 16'da görülmektedir. Bu arayüz, Şekil 8'de verilen arayüzde 'Arpej Çalışması' butonu tıklandığında çıkmaktadır. Kayıt yönetiminden birinci kişiye ait wav uzantılı (bu formatla da çalıştığını göstermek için) ses kaydı arayüze yüklenerek ve panel bölümünden "Nota Tespiti" seçildiğinde ilgili kayıttaki notaların oktav ve nota isimleri ile ideal frekans değerlerinden ne kadar fark ile çalındığı gösterilmektedir (Şekil 16). Birinci kayıt dışındaki diğer kayıtlar için de nota tespiti yapmak için sistem çalıştırıldığında Tablo 9'da belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlara bakıldığında en yüksek fark değerinin altıncı kayıta ait G5 notasında olduğu görülmektedir.



Şekil 15. Birinci katılımcıya ait arpej kaydının a) dalga grafiği ve nota başlangıç zamanları b) karmaşık spektral fark yöntemiyle bulunan nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği.



Şekil 16. Arpej çalışması birinci kayıt için elde edilen nota tespit sonucu.

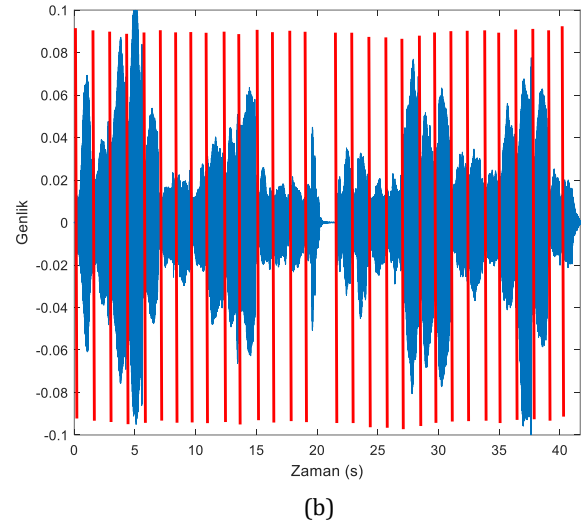
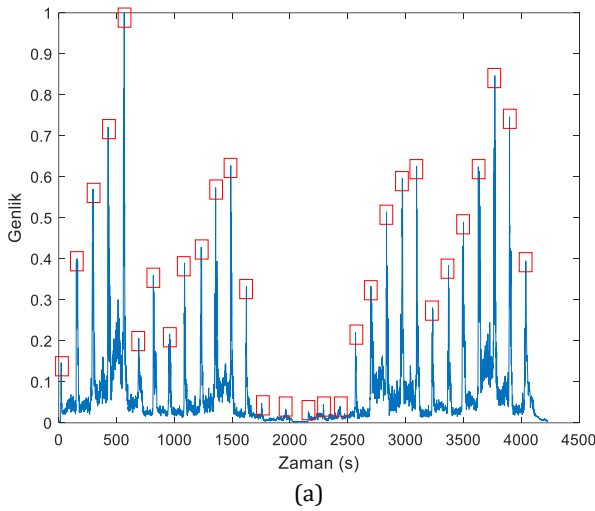
Tablo 9. Arpej otomatik transkripsiyon ile bulunan frekans analiz sonuçları
Arpej Nota Bazında İdeal Frekansa Göre Mutlak Hata (Hz)

No	G ₃	B ₃	D ₄	G ₄	B ₄	D ₅	G ₅	G ₅	D ₅	B ₄	G ₄	D ₄	B ₃	G ₃
1	0.03	2.15	0.26	2.06	0.55	0.31	0.57	1.80	0.89	1.01	0.07	0.71	1.43	0.77
2	0.64	2.03	0.86	0.15	0.51	1.16	0.41	3.62	0.66	0.81	0.56	1.39	2.57	0.53
3	1.22	0.93	0.58	0.44	0.08	0.65	0.46	0.87	1.52	1.85	0.15	0.06	0.92	0.07
4	0.54	1.40	1.09	2.30	0.09	0.08	1.31	1.65	0.63	1.31	1.21	0.96	0.95	0.69
5	0.20	1.85	1.31	1.68	1.34	1.12	0.62	5.22	0.18	0.08	1.07	1.16	2.35	0.49
6	0.67	0.94	3.18	3.14	0.39	1.40	5.27	1.07	1.31	1.34	0.02	1.16	1.44	0.77
7	0.38	0.00	0.86	2.44	1.78	0.91	1.48	1.62	1.31	1.63	1.19	0.61	0.48	0.49
8	0.04	1.48	2.01	1.07	2.78	0.47	2.48	1.31	0.42	1.38	1.21	0.16	0.96	0.85

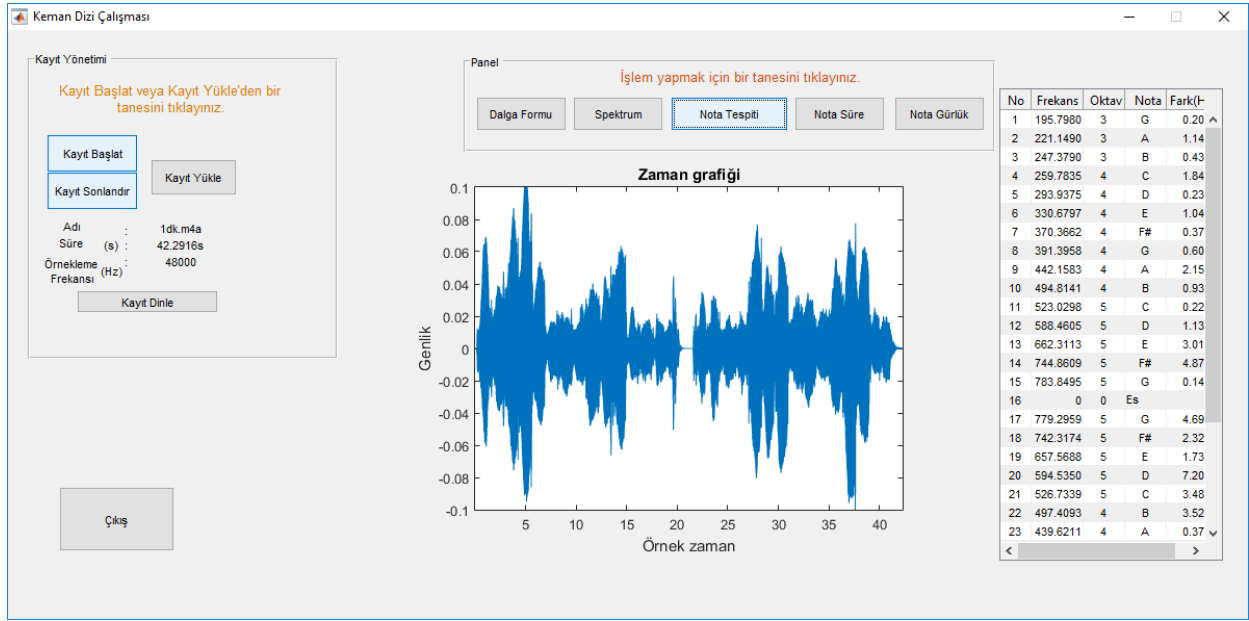
Dizi çalma kaydı için analiz sonuçları

Şekil 17.a'da birinci katılımcıya ait sol major dizi kayıt örneğinin dalga grafiği ile burada yer alan notaların başlangıç zamanları görülmektedir. Bu grafikte, kırmızı renkli çizgiler nota başlangıç zamanlarını göstermekte olup, bu dalga formunda otuz notanın var olduğu açıkça görülebilmektedir. Karmaşık spektral fark yöntemi kullanılarak elde edilen benzeşim sonucu Şekil 17.b'de verilmiştir. Burada tepe noktalara karşılık gelen yatay eksendeki değerler nota başlangıç değerlerini oluşturmaktadır.

Dizi kaydı otomatik transkripsiyon için hazırlanan arayüz Şekil 18'de görülmekte olup, birinci katılımcı için elde edilen nota tespit sonuçları da bu şekilde verilmiştir. Bu arayüz, Şekil 8'de verilen arayüzde 'Dizi Çalışması' butonu tıkladığında çıkmaktadır. Diğer kayıtlar içinde sistem çalıştırıldığında Tablo 10'da belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlardan en yüksek fark değerinin beşinci kayıta ait F#5 notasında olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Birinci katılımcıya ait dizi kaydının a) dalga grafiği ve nota başlangıç zamanları b) karmaşık spektral fark yöntemiyle bulunan nota başlangıç zamanı tespit fonksiyonu grafiği.



Şekil 18. Dizi çalışması birinci kayıt için elde edilen nota tespit sonucu.

Tablo 10. Dizi otomatik transkripsiyon ile bulunan frekans analiz sonuçları.

Nota	Dizi Nota Bazında İdeal Frekansa Göre Mutlak Hata (Hz)							
	Kayıt No							
	1	2	3	4	5	6	7	8
G ₃	0.20	0.38	0.76	0.42	0.38	0.04	0.25	0.48
A ₃	1.15	0.85	0.32	1.47	0.38	0.52	0.79	1.29
B ₃	0.44	0.39	0.94	1.25	0.99	2.29	0.44	1.35
C ₄	1.85	1.01	1.83	2.07	0.51	0.23	0.04	2.38
D ₄	0.24	0.58	0.01	0.60	0.76	0.39	0.01	1.39
E ₄	1.05	1.15	0.14	4.03	0.90	2.42	0.76	1.18
F# ₄	0.38	0.92	1.72	0.80	0.87	1.82	2.57	0.37
G ₄	0.60	0.56	2.06	2.15	0.33	0.07	1.15	1.37
A ₄	2.16	0.50	2.13	0.30	0.02	1.41	0.02	0.19
B ₄	0.93	1.64	1.75	0.07	0.08	0.07	2.33	0.73
C ₅	0.22	1.66	0.12	0.09	0.73	0.01	0.74	1.00
D ₅	1.13	1.40	2.40	0.92	1.15	1.99	2.77	1.58
E ₅	3.01	0.92	1.86	2.11	6.79	7.65	0.12	3.39
F# ₅	4.87	2.05	0.72	3.49	6.55	0.59	8.90	0.66
G ₅	0.14	5.50	1.84	4.61	1.68	0.65	1.98	3.02
G ₅	4.69	2.27	0.03	8.29	4.74	0.58	3.38	1.03
F# ₅	2.33	1.92	0.71	5.65	11.88	5.00	2.08	3.47
E ₅	1.73	0.04	5.25	1.27	9.55	3.39	2.48	0.88
D ₅	7.21	1.77	0.24	0.45	0.24	0.89	0.47	1.83
C ₅	3.48	1.88	0.36	4.75	0.88	0.63	1.75	0.98
B ₄	3.53	4.24	0.93	0.99	4.34	1.88	0.49	1.80
A ₄	0.38	0.64	1.47	0.15	0.56	0.34	0.71	0.50
G ₄	0.85	0.80	1.06	3.26	0.02	2.17	0.41	0.62
F# ₄	1.73	2.31	2.40	0.89	0.37	0.96	3.07	0.36
E ₄	0.84	1.44	3.14	0.42	1.44	3.40	1.35	0.84
D ₄	0.01	0.09	0.50	1.44	0.86	1.11	0.73	1.31
C ₄	0.04	2.99	1.25	3.46	0.58	1.52	0.12	0.71
B ₃	0.52	0.88	0.97	0.44	0.45	1.90	2.65	1.73
A ₃	0.67	2.49	2.22	0.84	0.94	0.63	1.35	0.10
G ₃	1.63	0.53	1.08	0.15	0.67	0.85	0.76	0.69

Sonuçlar

Bu çalışmada, başlangıç seviyesi keman öğreniminde öğrencilere yardımcı olabilecek bir kullanıcı arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Önerilen arayüz, temel keman eğitimi etütlerinden olan boş tel çalma, sol majör arpej çalma ve sol majör dizi çalma için tasarlanmıştır. Bu sistemi tasarlayabilmek için öncelikle keman seslerini notalarına doğru bir şekilde otomatik ayırt edebilecek bir transkripsiyon sistemi oluşturulmuştur. Önerilen otomatik transkripsiyon, öncelikle nota başlangıç zamanlarını tespit etmeye ve sonra frekans analiziyle notaların temel frekansını bulmaya dayanmaktadır. Nota başlangıç zamanları tespiti için farklı yöntemler denenmiş ve bunlar arasında karmaşık spektral fark yönteminin keman sesleri için en uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Kayıtlar notaya başarılı bir şekilde bölündükten sonra, her bir notanın temel frekansı bulunarak hangi nota olduğu ve ideal frekanstan ne kadar saptığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte arayüz üzerinde süre ve gürlük analizleri de yapılabilecek şekilde sistem geliştirilmiştir.

Matlab tabanlı MIRtoolbox ve C++ tabanlı Essentia, ses sinyalleri için çok çeşitli analizlerin yapılabileceği ve daha çok bilimsel amaçlı kullanıma sahip iyi bilinen açık kaynak yazılım kütüphaneleridir. Bu kütüphaneler keman dışındaki çalgılara (daha çok piyano ve gitar gibi) ait ses zarfı görece kolay sesler için başarılı olmuş otomatik müzik transkripsiyon yöntemlerini içermektedirler. MIRtoolbox ve Essentia yazılımları, bu çalışmada kullanılan sekiz kişiye ait keman sesi veri seti için uygulandığında, bu yazılımlardaki yöntemlerin nota başlangıç zamanı bulmada bazı problemler yaşadıkları gözlemlenmiştir. Şu anki oluşturulan sistem boş tel çalma, sol major arpej çalma ve sol major dizi çalma etütlerine ait eşit vurulu sesler için başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Dolayısıyla, önerilen kullanıcı arayüzü bu tür etütler için öğrencilere faydalı bir geri dönüt yapabilecektir.

İleriki çalışma olarak, farklı tonlarda arpej ve dizi etütleri için çalışma kapsamı genişletilebilir. Yapılacak etütler farklı metronom hızlarında ve müziksel dinamikler içerecek şekilde çalınabilir. Ayrıca sistem gerçek zamanlı olarak çalışacak şekilde gerçekleştirilebilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. İlgili makale, yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Tüm yazarlar makaleye yeterli derecede katkıda bulunmuştur. İlgili makale yüksek lisans tezinden oluşturulmuştur. Yazarlar yüksek lisans tez öğrencisi ve tez danışmanıdır.

-Çalışma konsepti ve tasarım (K.A.)

-Veri toplama (K.A.)

-Verilerin analizi ve yorumlanması (K.A. ve T.Ş.A.)

-Taslağın oluşturulması (K.A.)

- Diğer katkılar: Gerçekleştirilen çalışmada K.A. transkripsiyon sisteminin geliştirilmesi, literatür taraması, kullanılan malzemelerin temin edilmesi; T.Ş.A., literatür taraması, arayüz sisteminin geliştirilmesi başlıklarında ayrıca katkı sunmuşlardır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteklerini esirgemeyen Yaylı Çalgılar Müzik Eğitimcisi Prof.Dr. Ahmet Serkan Ece'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Parker B. *Güçlü Titreşimler - Müziğin Fiziği*. Birinci baskı. Ankara, Türkiye, TÜBİTAK Yayınları, 2015.
- [2] Çuhadar CH. "Kemanda çalma teknikleri". *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 121-132, 2009.
- [3] Uçan A. *Müzik Eğitimi: Temel Kavramlar-İlkeler-Yaklaşımlar*. Ankara, Türkiye, Müzik Ansiklopedisi Yayınları, 1997.
- [4] Öz NB. "İnsanın kültürel gelişiminde müzik eğitiminin önemi". *Uludağ Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 14(1), 101-106, 2001.
- [5] Çuhadar CH. "Müzik ve beyin". *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 67-76, 2008.
- [6] Durahim AO, Setirek AC, Özel BB, Kebapçı H. "Music emotion classification for Turkish songs using lyrics". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 292-301, 2018.
- [7] Hallam S. "The power of music: its impact on the intellectual, social and personal development of children and young people". *International Journal of Music Education*, 28(3), 269-289, 2010.
- [8] Topalak Ş. "Güzel sanatlar lisesi çalgı eğitimi/öğretiminde karşılaşılan sorunların incelenmesi". *Sanat Eğitimi Dergisi*, 1(2), 114-129, 2013.
- [9] Qionggang R. "Application and research on digital music technology in music teaching". *Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*, Wenzhou, China, 26-29 November 2009.
- [10] Liang YC, Shiue YM, Huang YM, Liu CG. "Development of a digital game-based learning system in music learning". *Advanced Materials for Science and Engineering*, Tainan, Taiwan, 12-13 November 2016.
- [11] Pati KA, Gururani S, Lerch A. "Assessment of student music performances using deep neural networks". *Applied Sciences*, 1-8(4), 1-18, 2018.
- [12] Klapuri AP. *Signal Processing Methods for the Automatic Transcription of Music*. PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2004.
- [13] Muller M, Ellis DP, Klapuri A, Richard G. "Signal processing for music analysis". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5(6), 1088-1110, 2011.
- [14] Muller M. *Fundamentals of Music Processing: Audio, Analysis, Algorithms, Applications*. 1st ed. Switzerland, Springer International Publishing, 2015.
- [15] Chis LG, Marcu M, Dragan F. "Software tool for audio signal analysis and automatic music transcription".

- IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, Timisoara, Romania, 17-19 May 2018.
- [16] Benetos E, Dixon S, Duan Z, Ewert S. "Automatic music transkriptin: an overview". *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(1), 20–30, 2019.
- [17] Wu YT, Luo YJ, Chen TP, Wei IC, Hsu JY, Chuang YC, Su L. "Omnizart: a general toolbox for automatic music transcription". *arXiv*, 2106.00497 [cs.SD], 2021
- [18] Argenti F, Nesi P, Pantaleo G. "Automatic transcription of polyphonic music based on the constant-q bispectral analysis". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 19(6), 1610-1630, 2011.
- [19] Benetos E, Dixon S, Giannoulis D, Kirchhoff H, Klapuri A. "Automatic music transcription: breaking the glass ceiling". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Porto, Portugal, 8-12 October 2012.
- [20] Avci K, Acuner TŞ. "Keman Kayıtlarından Boş Tel Notalarının Otomatik Transkripsiyonu", 25. *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU-2017)*, Antalya, Türkiye, 15 – 18 Mayıs 2017.
- [21] Bello JP, Daudet L, Abdallah S, Duxbury C, Davies M, Sandler MB. "A tutorial on onset detection in music signals". *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 13(5), 1035-1047, 2005.
- [22] Moorer JA. "On the transcription of musical sound by computer". *Computer Music Journal*, 1(4), 32-38, 1977.
- [23] Piszczalski M, Galler BA. "Automatic music transcription". *Computer Music Journal*, 1(4), 24-31, 1977.
- [24] Klapuri AP. "Automatic music transcription as we know it today". *Journal of New Music Research*, 33(3), 269-282, 2004.
- [25] Benetos E, Dixon S, Giannoulis D, Kirchhoff H, Klapuri A. "Automatic music transcription: challenges and future directions". *Journal of Intelligent Information Systems*, 41(3), 407-434, 2013.
- [26] Tavares TF, Barbedo JGA, Attux R, Lopes A. "Survey on automatic transcription of music: Historical overview of techniques". *Journal of the Brazilian Computer Society*, 19(4), 589-604, 2013.
- [27] Gowrishankar B, Bhajantri NU. "An exhaustive review of automatic music transcription techniques: survey of music transcription techniques". *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*, Odisha, India, 3-5 October 2016.
- [28] Yazawa K, Itoyama K, Okuno HG. "Automatic transcription of guitar tablature from audio signals in accordance with player's proficiency". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Florence, Italy, 4-9 May 2014.
- [29] Abesser J, Schuller G. "Instrument-centered music transcription of solo bass guitar recordings". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 25(9), 1741-1750, 2017.
- [30] Kehling C, Abeßer J, Dittmar C, Schuller G. "Automatic Tablature transcription of electric guitar recordings by estimation of score and instrument-related parameters". *Digital Audio Effects Workshop (DAFx)*, Erlangen, Germany, 1-5 September 2014.
- [31] Kirkpatrick T, Andreas J, Klein D. "Unsupervised transcription of piano music". *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*, Montreal, Canada, 8-13 December 2014.
- [32] Akbari M, Cheng H. "Real-time piano music transcription based on computer vision". *IEEE Transactions on Multimedia*, 17(12), 2113-2121, 2015.
- [33] Wan Y, Wang X, Zhou R, Yan Y. "Automatic piano music transcription using audio-visual features". *Chinese Journal of Electronics*, 24(3), 596-603, 2015.
- [34] Gillet O, Richard G. "Transcription and separation of drum signals from polyphonic music". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16(3), 529-540, 2008.
- [35] Wu CW, Dittmar C, Southall C, Vogl R, Widmer G, Hockman J, Müller M, Lerch A. "A review of automatic drum transcription". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26(9), 1457-1483, 2018.
- [36] Wei IC, Wu CW, Su L. "Improving automatic drum transcription using large-scale audio-to-midi aligned data". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Toronto, Canada, 6-11 June 2021.
- [37] Souza VM, Batista GE, Souza-Filho NE. "Automatic classification of drum sounds with indefinite pitch". *International Joint Conference on Neural Networks*, Killarney, Ireland, 12-17 July 2015.
- [38] Marolt M. "Automatic transcription of bell chiming recordings". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(3), 844-853, 2012.
- [39] Skoki A, Ljubic S, Lerga J, Atajduhar I. "Automatic music transcription for traditional woodwind instruments sopele". *Pattern Recognition Letters*, 128(2019), 340-347, 2019
- [40] Kroher N, Gomez E. "Automatic transcription of flamenco singing from polyphonic music recordings". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 24(5), 901-913, 2016.
- [41] Dhara P, Rengaswamy P, Rao KS. "Designing automatic note transcription system for hindustani classical music". *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, Jaipur, India, 21-24 September 2016.
- [42] Muto Y, Tanaka T. "Transcription system for music by two instruments". *6th Signal Processing Conference*, Beijing, China, 26-30 August 2002.
- [43] Krishnaswamy A, Smith JO. "Inferring control inputs to an acoustic violin from audio spectra". *International Conference on Multimedia and Expo*, Baltimore, USA, 6-9 July 2003.
- [44] Charles JA, Fitzgerald D, Coyle E. "Towards a computer assisted violin teaching aid". *International Symposium on Psychology and Music Education*, Padua, Italy, 29 November 2004.
- [45] Yin J, Dhanik A, Hsu D, Wang Y. "The creation of a music-driven digital violinist". *12th ACM International Conference on Multimedia*, New York, USA, 10-16 October 2004.
- [46] Yin J, Wang Y, Hsu D. "Digital violin tutor: an integrated system for beginning violin learners". *13th*

- ACM International Conference on Multimedia, Hilton, Singapore, 6-11 November 2005.
- [47] Vogel BK, Jordan MI, Wessel D. "Multi-instrument musical transcription using a dynamic graphical model". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Philadelphia, USA, 19-23 March 2005.
- [48] Boo WJJ, Wang Y, Loscos A. "A violin music transcriber for personalized learning". *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, Toronto, Canada, 9-12 July 2006.
- [49] Loscos A, Wang Y, Boo WJJ. "Low level descriptors for automatic violin transcription". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Victoria, Canada, 8-12 October 2006.
- [50] Charles JA, Fitzgerald D, Coyle E. "Violin timbre space features". *IET Irish Signals and Systems Conference*, Dublin, Ireland, 28-30 June 2006.
- [51] Wang Y, Zhang B, Schleusing O. "Educational violin transcription by fusing multimedia streams". *International Workshop on Educational Multimedia and Multimedia Education*, Augsburg, Germany, 28 September 2007.
- [52] Thornburg H, Leistikow RJ, Berger J. "Melody extraction and musical onset detection via probabilistic models of framewise STFT peak data". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 15(4), 1257-1272, 2007.
- [53] Zhang B, Zhu J, Wang Y, Leow WK. "Visual analysis of fingering for pedagogical violin transcription". *15th ACM International Conference on Multimedia*, Augsburg, Germany, 23-28 September 2007.
- [54] Lu H, Zhang B, Wang Y, Leow WK. "iDVT: an interactive digital violin tutoring system based on audio-visual fusion". *16th ACM International Conference on Multimedia*, Vancouver, Canada, 27-31 October 2008.
- [55] Charles JA, Fitzgerald D, Coyle E. "Violin sound quality detection". *IET Irish Signals and Systems Conference*, Galway, Ireland, 18-19 June 2008.
- [56] Maezawa A, Itoyama K, Takahashi T, Ogata T, Okuno HG. "Bowed string sequence estimation of a violin based on adaptive audio signal classification and context-dependent error correction". *International Symposium on Multimedia*, San Diego, USA, 14-16 December 2009.
- [57] Barbancho I, de la Bandera C, Barbancho AM, Tardon LJ. "Transcription and expressiveness detection system for violin music". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Taipei, Taiwan, 19 April 2009.
- [58] Maezawa A, Itoyama K, Komatani K, Ogata T, Okuno HG. "Automated violin fingering transcription through analysis of an audio recording". *Computer Music Journal*, 36(3), 57-72, 2012.
- [59] Huang HH. "Research and development of an automatic violin player". *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 25-27 June 2008.
- [60] Huang HH, Li WH, Chen YJ, Wen CC. "Automatic violin player". *10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Beijing, China, 6-8 July 2012.
- [61] Carrillo AP, Bonada J, Maestre E, Guaus E, Blaauw M. "Performance control driven violin timbre model based on neural networks". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(3), 1007-1021, 2012.
- [62] Wang JH, Wang SA, Chen WC, Chang KN, Chen HY. "Real-time pitch training system for violin learners". *IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops*, Melbourne, Australia, 9-13 July 2012.
- [63] Lin YJ, Wang TM, Chen TC, Chen YL, Chang WC, Su AW. "Musical note analysis of solo violin recordings using recursive regularization". *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, 25(2014), 1-13, 2014.
- [64] Pardue LS, Harte C, McPherson AP. "A low-cost real-time tracking system for violin". *Journal of New Music Research*, 44(4), 305-323, 2015.
- [65] Jo W, Park H, Lee B, Kim D. "A study on improving sound quality of violin playing robot". *6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, Queenstown, New Zealand, 17-19 February 2015.
- [66] Liang CY, Su L, Yang YH, Lin HM. "Musical offset detection of pitched instruments: the case of violin". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Malaga, Spain, 26-30 October 2015.
- [67] Jo W, Lee B, Kim D. "Development of auditory feedback system for violin playing robot". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 717-724, 2016.
- [68] Maruyama T, Uemura T. "Development of a violin playing robot and its sound volume and pitch controls". *56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, Kanazawa, Japan, 19-22 September 2017.
- [69] Yura J, Oyun-Erdene M, Byambasuren BE, Kim D. *Modeling of Violin Playing Robot Arm with Matlab/Simulink*. Editors: Kim JH, Karray F, Jo J, Sincak P, Myung H. Robot Intelligence Technology and Applications 4 of Advances in Intelligent Systems and Computing, 249-261, Switzerland, Springer-Cham, 2017.
- [70] Li B, Dinesh K, Sharma G, Duan Z. "Video-based vibrato detection and analysis for polyphonic string music". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Suzhou, China, 23-27 October 2017.
- [71] Pardue LS, McPherson A. "Real-time aural and visual feedback for improving violin intonation". *Frontiers in Psychology*, 10(627), 1-19, 2019.
- [72] Ortega FJM, Giraldo SI, Perez A, Ramirez R. "Phrase-level modeling of expression in violin performances". *Frontiers in Psychology*, 1-11, 10(776), 2019.
- [73] Özmenteş S. "Müzik eğitiminin boyutları ve çalgı eğitimi". *İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 6(9), 89-98, 2005.
- [74] Lartillot O, Toivainen P. "A Matlab toolbox for musical feature extraction from audio". *Digital Audio Effects Workshop (DAFx)*, Bordeaux, France, 10-14 September 2007.
- [75] Bogdanov D, Wack N, Gómez E, Gulati S, Herrera P, Mayor O, Roma G, Salamon J, Zapata J, Serra X.

- "Essentia: an open-source library for sound and music analysis". *21st ACM International Conference on Multimedia*, Barcelona, Spain, 21-25 October 2013.
- [76] Duxbury C, Bello JP, Davies M, Sandler M. "A combined phase and amplitude based approach to onset detection for audio segmentation". *Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services*, London, UK, 9-11 April 2003.
- [77] Music Technology Group (MTG). "Essentia". https://github.com/MTG/essentia/blob/master/src/examples/standard_pitchdemo.cpp (22.11.2017).
- [78] Brossier PM. Automatic Annotation of Musical Audio for Interactive Applications. PhD Thesis, Queen Mary University of London, London, UK, 2007.
- [79] Salamon J, Gomez E. "Melody extraction from polyphonic music signals using pitch contour characteristics". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(6), 1759–1770, 2012.
- [80] Klapuri AP. "Multiple fundamental frequency estimation by summing harmonic amplitudes". *International Society for Music Information Retrieval Conference*, Victoria, Canada, 8-12 October 2006.