

**T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**TÜRK MAKAM MÜZİĞİ'NİN
EZGİSEL BOYUTUNA YÖNELİK
İNTERAKTİF EĞİTİM PROGRAMI**

Yüksek Lisans Tezi

HASAN SERCAN ATLI

İSTANBUL, 2016

TC.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SES TEKNOLOJİLERİ

**TÜRK MAKAM MÜZİĞİ'NİN
EZGİSEL BOYUTUNA YÖNELİK
İNTERAKTİF EĞİTİM PROGRAMI**

Yüksek Lisans Tezi

HASAN SERCAN ATLI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. BARIŞ BOZKURT

İSTANBUL, 2016

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SES TEKNOLOJİLERİ

Tezin Adı: Türk Makam Müziği'nin Ezgisel Boyutuna Yönelik
İnteraktif Eğitim Programı
Öğrencinin Adı Soyadı: Hasan Sercan Atlı
Tez Savunma Tarihi: 25/05/2016

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanmıştır.

Doç. Dr. Nafiz ARICA
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylıyorum.

Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak TAMER
Program Koordinatörü

Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzalar

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Barış BOZKURT

Üye

Doç. Dr. Ozan BAYSAL

Üye

Yrd. Doç Dr. Yahya Burak TAMER

Varlığını her zaman hissedeceğim canım babama...

ÖNSÖZ

Yüksek lisansımın ve tez çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, yönlendiren ve bana bu şansı veren tez danışmanım Doç. Dr. Barış Bozkurt'a, yüksek lisans süresince her konuda destek olan Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak Tamer'e, tezle ilgili her konuda verdiği desteğe ve karşılıksız dostluğu için Sertan Şentürk'e, tezin yazım aşamasında düzeltmeleriyle bana yardımcı olan Doç. Dr. M. Kemal Karaosmanoğlu'na, her zaman yanımda olan annem Zuhâl Atlı, kardeşim Eliz Atlı ve sevgili aileme, bana her koşulda inanan, güvenen ve destek olan kız arkadaşım Pelin Duba'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma, European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) / ERC bünyesindeki European Research Council 267583 (CompMusic) projesi tarafından desteklenmiştir.

İstanbul, 2016

Hasan Sercan ATLI

ÖZET

TÜRK MAKAM MÜZİĞİ'NİN EZGİSEL BOYUTUNA YÖNELİK İTERAKTİF EĞİTİM PROGRAMI

Hasan Sercan ATLI

Ses Teknolojileri

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Barış Bozkurt

Mayıs 2016, 64 sayfa

Bu çalışmada Türk makam müziğinin ezgisel boyutuna yönelik interaktif bir eğitim programı oluşturulması hedeflenmiştir. Geliştirilen araç kapsamlı bir eğitim programı değildir; belirli bir makamı öğrenmek için kullanıcıya referans kayıtlar ve kayıtlarla ilgili öğrenime yardımcı bilgiler ve araçlar sunan bir programdır.

Program, bünyesinde ses kayıtlarının baskın ezgilerini, entonasyonlarını ve icra edilen karar perdelerinin frekanslarını otomatik analiz eden araçlar barındırmaktadır. Aynı zamanda seçilen ses kayıtları ilgili notalarla otomatik eşlenmiştir. Dolayısıyla kullanıcı, referans kayıtlardaki icraların bir bölümünü seçebilir ve çalıştığı bölümün notasını takip edebilir. Tez kapsamında kullanıcıya interaktif bir çalışma ortamının sağlanabilmesi hedeflendiğinden, ses kayıtlarıyla ilgili notaları görselleştiren ve seslendiren araçlar da çalışma kapsamında geliştirilmiştir. Öğrenime yardımcı tüm bilgiler, bir çizimsel arabirim ile kullanıcıya sunulmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar doğrultusunda baskın ezgi analizi ve otomatik karar perdesi frekansı tespiti konuları için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin verimliliği oluşturulan deney veri kümeleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Bu çalışma çerçevesinde geliştirilen tüm araçlar ve derlenen veriler, akademik araştırmalar için kullanıma açılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Türk Makam Müziği, Ses Sinyali İşleme, Hesaplamalı Müzikoloji

ABSTRACT

AN INTERACTIVE TUITION SOFTWARE FOR THE MELODIC DIMENSION OF TURKISH MAKAM MUSIC

Hasan Sercan ATLI

Audio Technologies

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Barış Bozkurt

May 2016, 64 pages

The presented study is aimed at developing a computer based education software specifically designed for Turkish makam music. It is not a comprehensive educational system but is limited to the implementation of a system that helps the user to learn and practice the musical intervals of an audio recording with a specific makam or a makam with related reference audio recordings. The system provides an ability to practice the reference audio recording by using provided computational tools.

The software includes some analysis tools that extract predominant melody, identifies the tonic frequency, analyzes the style and the tuning of the performance in the audio recording. Moreover, the score of the selected performance is aligned with the related audio recording. Hence, the user can select a part of the performance and practice the melody by following the automatically-aligned music scores. The software also includes some visualization and synthesis tools for the scores of the audio recordings. The new methodologies developed for predominant melody extraction and automatic tonic identification are evaluated with prepared test datasets. The developed tools and prepared datasets are publicly shared for academic use.

Key words: Turkish Makam Music, Audio Signal Processing,
Computational Musicology

İÇİNDEKİLER

TABLolar	viii
ŞEKİLLER	ix
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 MÜZİK BİLGİ ERİŞİMİ AÇISINDAN TÜRK MÜZİĞİ İLE BATI MÜZİĞİ ARASINDAKİ FARKLILIKLAR	5
1.1.1 Nota Frekanslarındaki Farklılıklar	5
1.1.2 Kuramsal Farklılıklar	5
1.1.3 Çalgısal - Tımsal Farklılıklar	6
2. LİTERATÜR TARAMASI VE BENZER ÇALIŞMALAR	7
3. SİSTEM	12
3.1 SİSTEMİN AKIŞI VE KULLANICI SENARYOLARI	12
3.2 SİSTEMİN TASARIMI İÇİN KULLANILAN TEKNOLOJİLER	13
3.3 PROGRAMIN PROTOTİPİ	15
4. VERİ	21
4.1 COMPMUSIC-MAKAM VERİ KÜTÜPHANESİ	22
4.2 PROGRAM İÇİN DERLENEN VERİ KÜMESİ VE KULLANILAN DENEY KÜMELERİ	26
5. YÖNTEMLER VE ARAÇLAR	29
5.1 SES KAYDI ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN VE KULLANILAN YÖNTEMLER	30
5.1.1 Baskın Ezgi Kestirimi	30
5.1.2 Frekans Dağılımları Gösterimi	35
5.1.3 Karar Perdeleri ve Frekansı Tespiti	36
5.1.4 İcra Edilen Perdelerin ve Frekanslarının Tespiti	40
5.2 MAKİNECE OKUNUR NOTALAR İÇİN GELİŞTİRİLEN VE KULLANILAN YÖNTEMLER	44
5.2.1 MusicXML Okuyucu	44

5.2.2	Nota Görselinin Oluşturulması.....	45
5.2.3	Nota ve Çalışma Materyali Sentezi	46
5.2.4	Nota - İcra Eşleştirme.....	47
6.	BULGULAR.....	49
6.1	BASKIN EZGİ ANALİZİ DEĞERLENDİRMESİ	49
6.1.1	Verilerin Oluşturulması	49
6.1.2	Deney ve Değerlendirme.....	53
6.2	OTOMATİK KARAR PERDESİ TESPİTİ YÖNTEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	59
6.2.1	Verilerin Oluşturulması	59
6.2.2	Deney ve Değerlendirme.....	59
7.	SONUÇ	62
7.1	GELECEK ÇALIŞMALAR	63
	KAYNAKÇA.....	65
	EKLER	
	EK 1: VERİ KÜMESİNDEKİ ESERLER VE SES KAYITLARI.....	71
	ÖZGEÇMİŞ	75

TABLULAR

Tablo 4.1: CompMusic-makam veri kümesindeki ses kayıtlarının form istatistikleri....	23
Tablo 4.2: CompMusic-makam veri kütüphanesinin ses kayıtlarının genel istatistikleri	23
Tablo 4.3: CompMusic-makam veri kütüphanesinin ses kaydı meta-verilerinin bütünlük açısından istatistiği.....	24
Tablo 4.4: SymbTr nota koleksiyonunun makam, usul ve form istatistikleri.....	26
Tablo 5.1: Nota frekans tablosu	42
Tablo 6.1: Baskın ezgi kestirimi deney veri kümesindeki eserler	51
Tablo 6.2: Deney veri kümesi için seçilen icralar.....	52
Tablo 6.3: Deney sonuçlarının istatistikleri	55
Tablo 6.4: Deneyler sonrası elde edilen başarı istatistikleri	60

ŞEKİLLER

Şekil 3.1: Tasarlanan sistemin akış şeması	12
Şekil 3.2: Prototipin ekran görüntüsü	16
Şekil 3.3: Dalga formu ve bölge seçme aracı	17
Şekil 3.4: Seçilen bir bölgenin baskın ezgi analizi ve histogramı	17
Şekil 3.5: Meta-veri penceresi	18
Şekil 3.6: Nota izleme penceresi.....	19
Şekil 3.7: Sentezlenmiş notayla çalışma penceresi.....	20
Şekil 5.1: Yöntem ve araçların akış şeması	30
Şekil 5.2: (Salamon & Gómes, 2012)'de baskın ezgi analizi için sunulan yöntemin Essentia programlama kütüphanesi (Bogdanov, ve diğerleri, 2014) içerisindeki Python versiyonunun akış şeması	31
Şekil 5.3: Analizden sonra hesaplanan pitch contour'lar (Kırmızı noktalar dışındaki gösterim kaydın spektrogramını ifade etmektedir.)	33
Şekil 5.4: Yeni yöntemle elde edilen baskın ezgi analizi	34
Şekil 5.5: Filtreleme sonrası elde edilen baskın ezgi kestirimi.....	35
Şekil 5.6: Histogram örneği	36
Şekil 5.7: Kaydın histogramı ve şablon histogram eşleşmesine bir örnek	37
Şekil 5.8: Bölütlenmiş bir baskın ezgi örneği.....	39
Şekil 5.9: Son nota ile karar perdesi kestirimi akış şeması.....	39
Şekil 5.10: Seslendirilen perdelerin tespiti için tasarlanan aracın akış şeması	40
Şekil 5.11: Tepe noktaları hesaplanmış bir histogram örneği.....	41
Şekil 5.12: Histogram ve icra edilen perdeler.....	43
Şekil 5.13: Lilypond ile Türk müziği arızalarının gösterimine bir örnek	45
Şekil 5.14: Otomatik oluşturulmuş bir nota görseli örneği.....	46
Şekil 6.1: Nota işaretlemesi yapılmış bir örnek	53
Şekil 6.2: Nota işaretlemeleri ve baskın ezgi kestirimi.....	54
Şekil 6.3: Frekans kestirimi yanlış yapılmış bir süsleme örneği	56
Şekil 6.4: Tanbur icrasında yapılan yanlış frekans kestirimine bir örnek.....	57

Şekil 6.5: Heterofoniden kaynaklanan nedenlerle yanlış yapılan baskın ezgi kestirimine bir örnek	58
Şekil 6.6: Frekans kestirimi ile elle işaretlemenin örtüşmediği bir örnek	58

KISALTMALAR

AEU	:	Arel Ezgi Uzdilek
GPL	:	General Public License
Hz	:	Hertz
JSON	:	JavaScript Object Notation
Kbps	:	Kilobit per second
MIDI	:	Musical Instrument Digital Interface
MIR	:	Music Information Retrieval
PDF	:	Portable Document Format
TET	:	Ton eşit taksimat (Tone equal temperament)
TRT	:	Türk Radyo Televizyon Kurumu

1. GİRİŞ

Türk makam müziği, kendine özgü ezgisel ve ritmik yapısından ötürü eşsiz zenginliğe sahip bir müzik kültürüdür. Bu kültürün müzik eserlerinin ana nitelikleri *makamlar*, *usuller* ve *formlar* kullanılarak açıklanmaktadır. Makamlar, Türk makam müziği repertuarlarının büyük bir kısmının ezgisel yapısını açıklamaktadır. Makam, başlangıç, güçlü ve durak perdesi olan, ses dizilerinin belirli kurallar çerçevesinde kullanılmasıyla ortaya çıkan ezgisel bir yapıdır. İcra edilen perdeler ve ezgilerin seyir özellikleri, makamları birbirlerinden ayırmaktadır. Türk makam müziğinin ritmik yapıları usullerle açıklanmaktadır. Çeşitli zamanlarda ve şiddetlerdeki vuruların belirli kurallar çerçevesinde oluşturduğu vuruş kalıpları belirli bir usulü meydana getirmektedir. İki vuruştan oluşan basit usuller olduğu gibi birden fazla usulün biraraya gelmesiyle oluşan daha karmaşık yapıları usuller de Türk makam müziğinde bulunmaktadır. Türk makam müziği eserlerinin düzensel (*compositional*) özellikleri formlarla ifade edilmektedir. Türk makam müziği enstrümantal ve/veya vokal icralarından oluşan formlar içermektedir. Bunların bir kısmı dini müzik düzenlerini açıklamakta ve dini törenlerde icra edilmektedir. Aynı zamanda taksim ve gazel gibi herhangi bir usul yapısına bağlı olmayan Türk müziği formları da mevcuttur.

Türk makam müziği yüzyıllardan beri ağırlıklı olarak sözel bir kültür ürünüdür. Son yüzyılda Türk müziği eserlerinin gösterimi Batı müziği notasyonunun genişletilmiş bir çeşidi kullanılarak yapılmaktadır. Genişletilmiş Batı notasyonu ile oluşturulmuş Türk müziği notaları genellikle Arel-Ezgi-Uzdilek (AEU) (Arel, 1968) ses sistemi kullanılarak yazılmıştır. Bu sistem için günümüzde şu yaklaşık tanım benimsenmiştir: Oktav 1 Holder koması genişliğinde 53 eşit aralığa bölünür (53 TET, 53 ton-eşit-taksim), bunlardan birbirlerine eşit uzaklıkta olmayan belirli 24 adedi seçilir. AEU notasyonundaki müzik notaları eserin ana ezgisini ifade eder. Müzisyenler icralarını, Türk müziği notalarını referans alarak kendi yaklaşımlarıyla gerçekleştirirler. Türk müziği icralarında müzisyenler, icra ettikleri eserin çeşitli yerlerinde süslemeler yapabilir, nota ekleyebilir/çıkarabilir, notaların sürelerini değiştirebilir ve basılı notadaki bölümlerin (*hane* vb.) tekrar sayısına bağlı kalmadan icrada bulunabilirler. Bazı aralıkların

entonasyonu icra sırasında ses sisteminde belirtilen aralıklarla kıyaslandığında müzisyenlerin tercihine göre yarım ses aralığa kadar farklılık gösterebilmektedir (Signell, 1986). Bu tercihlerden ötürü, aynı eserin farklı icralarında seslendirilen perdelerin frekanslarında farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Türk müziğinin başka bir karakteristik özelliği de heterofonidir. Müzisyenler aynı ezgiyi kendi enstrümanlarının ve ses alanlarının sınırları içinde icra ederler.

Türk makam müziği eğitimi için yaygın olarak, gelenekselleşmiş *meşk* yöntemi kullanılmaktadır. Meşk, öğrenci ile eğitimcinin birarada bulunduğu oturumlar vasıtasıyla karşılıklı bilgi aktarımında buldukları ve pratik yapmaya dayalı bir eğitim yöntemidir. Meşk süreci içerisinde eğitmen, öğrencisinin seviyesine göre eğitim sürecini ve içeriğini tasarlamakta ve kendi tecrübesini öğrencisine aktarmaktadır. Öğrenci, icrası sonrasında eğitmeninden gelen geribildirimler sayesinde kendisini geliştirmektedir. Meşk yöntemi sayesinde öğrenci, eğitmenini doğrudan gözlemleyebilmektedir. Aynı anda eğitmen de öğrencisinin hatalarını görebilmekte ve müdahale edebilmektedir.

Teknolojilerinin gelişmesi, fiyatlarının oldukça ucuzlaması ve ulaşılabilirliklerinin kolaylaşmasıyla birlikte bilgisayarlar, son çeyrek yüzyılda eğitim alanında yaygın olarak kullanılmaya başlandı (Hartley, 1987). Aynı zamanda eğitim için geliştirilen araçların internet vb. iletişim yollarıyla da kolaylıkla öğrencilere sağlanabiliyor olması, bilgisayar teknolojisini eğitim alanında önemli bir noktaya taşımıştır. İyi hazırlanmış bilgisayar destekli eğitim materyalleri, hem öğrencileri hem de eğitmenleri eğitim sürecinde desteklemekte ve eğitim sürecini hızlandırmaktadır. Bilgisayar destekli eğitim, sadece eğitim sürecini desteklemekle ve hızlandırmakla kalmamakta, aynı zamanda öğrencilerin ve eğitmenlerin de eğitim süreci esnasındaki motivasyonlarını da artırmaktadır (Fraser & Teh, 1994). Literatürdeki başarılı örnekler, bilgisayar destekli eğitimin yararlarını kanıtlamaktadır (Jaffe & Lynch, 1995) (Berridge, Roudsari, Taylor, & Carey, 2000). Bilgisayar destekli eğitimin ulaşılabilirliğinden ötürü öğrenciler, öğrenme sürecinde zaman ve yer gibi faktörlerden de etkilenmemektedirler. Sinyal işleme, istatistiksel analiz, makine öğrenmesi, bilgi erişim vb. alanların hızla gelişmesiyle birlikte hesaplamalı müzik analizi ve müzik bilgi erişimi (*MIR*) alanında son yıllarda etkin yöntemler sunulmaya başlanmıştır. Eğitim teknolojisi, müzik bilgi erişimi ve hesaplamalı

müzik analizi yöntemlerini de kapsayacak şekilde son yıllarda müzik eğitiminde de yerini almaya başlamıştır. Batı müziği için, klasik eğitim yöntemlerini destekleyici ve bu yöntemlere alternatif olabilecek yeni çalışmalar yapılmaktadır.

Önemli bir kısmı Batı müziğini işlemek için geliştirilen hesaplamalı müzik analizi yöntemleri, Batı müziği kuramı üzerine kurulmaktadır. Çalışmaların büyük bir kısmı Batı müziği notasyonu kullanılarak oluşturulmuş veriler kullanılarak yapılmaktadır. Batı müziği için yapılmış birçok çalışma, Batı müziği dışındaki kültürlerin gereksinimlerine cevap verememektedir. Batı müziği dışındaki müzik kültürleri için müzik bilgi erişimi alanındaki ilgi ve çalışmalar giderek artmaktadır. Ortadoğu, Asya'nın önemli bir kısmı ve Kuzey Afrika gibi büyük bir coğrafya üzerinde yaşayan müzik kültürlerinin benzerliği ve yakınlığı göz önünde bulundurulduğunda Türk makam müziği için yapılan hesaplamalı müzik analizi çalışmaları büyük bir öneme sahiptir. Diğer kültürlerde olduğu gibi Türk makam müziği için de Batı müziğine yönelik olarak geliştirilmiş birçok yöntem, hesaplamalı müzik analizi gereksinimlerine büyük oranda cevap verememektedir. Müzik bilgi erişimi alanı açısından Türk müziği ile Batı müziği arasındaki farklılıklar Bölüm 1.1'de anlatılmaktadır. Türk makam müziği için yapılan çalışmaları özetleyen ve gelecekte çalışılabilecek olası araştırma konularını derleyen çalışmalar bulunmaktadır (Bozkurt, Ayangil, & Holzapfel, 2014), (Bozkurt, Gedik, & Karaosmanoğlu, 2009).

Teknoloji destekli geliştirilecek olan müzik eğitimi araçlarının kültüre özgü özellikler içermesi ve o kültürün problemlerine cevap verebilmesi gerekmektedir. Batı müziği eğitimi için geliştirilen teknoloji destekli eğitim araçlarının Türk müziği eğitiminin gereksinimlerini büyük bir oranda karşılayamamasının nedeni, Türk müziğinin Batı müziğinden farklı yanlarının bulunmasıdır. Bundan ötürü, Türk müziği için geliştirilecek teknoloji destekli bir eğitim aracı, kültüre özgü sorunlara cevap verebilecek araçlar barındırmalıdır. Eğitim teknolojisinin müzik eğitimi için her geçen gün ilerlemesi ve Türk müziği için müzik bilgi erişimi yöntemlerini kullanarak müzik eğitimi destekleyen interaktif bir aracın eksikliği, bu çalışmanın yapılması için bir motivasyon kaynağı olmuştur. Tez kapsamında, başlangıç seviyesindeki bir öğrencinin kendi başına bolca pratik yaparak Türk müziği çalışabileceği, eğitim sürecine ve eğitime destek verebilecek bilgisayar destekli bir eğitim programı geliştirilmesi hedeflenmiştir. Sistem,

Türk müziğinin ezgisel boyutuyla sınırlı tutulmuştur. Çalışma kapsamında, yaygın olarak kullanılan beş makamın eğitimi hedeflenmiştir. Eğitim programı içerisinde, seçilen makamlarla ilgili referans ses kayıtları, kayıtların notaları ve kayıtlarla ilgili eğitimi destekleyecek çeşitli bilgiler bulunmaktadır. Kullanıcının, program bünyesinde bulunan referans ses kayıtları ve kayıtlarla ilgili diğer ek bilgilerle birlikte makam müziğini pratik yaparak çalışabileceği bir kurgu hedeflenmiştir. Hedeflenen tasarım çerçevesinde ses kayıtlarından eğitim için gerekli müzikal özelliklerin otomatik çıkarılabilmesi için çeşitli analiz araçları geliştirilmiş ve program bünyesine dahil edilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen yeni yöntemlerin ve araçların sürdürülebilir ve erişilebilir olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar ve oluşturulan veriler paylaşımına açılmıştır. Veriler ve yöntemlerle ilgili ayrıntılar tezin ileriki bölümlerinde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Tezin sonraki bölümleri şu şekilde sıralanmaktadır: Bölüm 1.1’de Türk müziğinin, müzik bilgi erişimi açısından Batı müziğinden farklılıkları ve zorlukları, tez sınırları doğrultusunda ele alınmıştır. Bölüm 2’de teknoloji destekli müzik eğitimi literatürü ve yapılan benzer çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 3’te bilgisayar programının sistem tasarımı, kullanılan teknolojiler, sistemin akışı ve kullanıcı senaryoları anlatılmıştır. Bölüm 4’te programın tasarımı için kullanılan verilerden söz edilmiştir. Bölüm 5’te program içerisinde kullanılan araçlar ve yöntemler açıklanmıştır. Bölüm 6’da tez kapsamında geliştirilen yeni yöntemler için yapılan deneyler ve sonuçları sıralanmıştır.

1.1 MÜZİK BİLGİ ERİŞİMİ AÇISINDAN TÜRK MÜZİĞİ İLE BATI MÜZİĞİ ARASINDAKİ FARKLILIKLAR

Bu bölümde müzik bilgi erişimi açısından Türk makam müziğinin ezgisel boyutu gözönünde bulundurularak Batı müziğinden farklı olan yanları ve zorlukları anlatılmıştır.

1.1.1 Nota Frekanslarındaki Farklılıklar

Türk makam müziğinde, Batı müziğinde olduğu gibi sabit bir akort frekansı bulunmamaktadır. Bunun yerine, genellikle ahenk olarak adlandırılan, ney boylarıyla ilişkilendirilmiş akort sistemleri kullanılmaktadır (Ergüner, 2007). Ayrıca oktav içerisinde bulunan perde sayısı ile ilgili kuramsal tartışmalar devam etmemiştir. Bu konuda, 17 ile 79 arasında perde içeren çeşitli ses sistemleri önerilmiştir (Yarman, 2008). Müzisyenlerin tercihinine bağlı olarak bazı perdelerin frekansları farklılık gösterebilmektedir. Aynı zamanda icra esnasında eklenen süslemelerden (çarpma, kaydırma, vibrato vb.) kaynaklanan nedenlerle, perde frekanslarının dağılımlarının Batı müziğine kıyasla daha geniş ve yaygın olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum perdeli enstrümanlar için de geçerlidir. Bu tür enstrümanların perdelerinin frekansları için herkes tarafından kabul edilmiş bir standart bulunmamaktadır. Müzisyen, enstrümanındaki perdelerin frekanslarını kendi tercihleri doğrultusunda ayarlamaktadır. Batı müziği ile Türk makam müziği arasında farklılıklar, burada örneği verilen türden bağlam farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Türk makam müziği için yüksek çözünürlüklü ve referans noktası kaydırılabilen frekans dağılımlarının kullanılması gerekmektedir.

1.1.2 Kuramsal Farklılıklar

Makamlarının dizilerine ek olarak seyir kurallarının olması ve kültürün eğitiminin genellikle meşk yöntemiyle sağlanmasından ötürü Türk makam müziği, fazlasıyla tanımsal/sözel bilgi içermektedir. Bu nedenden ötürü Türk müziği kuramı halen icrası ile belirli düzeyde örtüşememe sorunları yaşamaktadır. Nota yazımı AEU ses sistemi ile yapılmakta ancak bu ses sistemi araştırmacılar tarafından icrayla belirli noktalarda örtüşmemesinden ötürü eleştirilmektedir (Tura, 1988). Bu yüzden, Türk müziği bilgi

erişimi uygulamalarında kuramdan yararlanma olanağı Batı müziğinde olduğu kadar geniş kapsamlı değildir.

1.1.3 Çalgısal - Tımsal Farklılıklar

Türk müziği için yapılan temel titreşim frekansı analizlerinde, halihazırdaki araçların Türk müziği kayıtlarındaki başarılarının Batı müziği kayıtlarına oranla daha düşük olduğu gözlenmiştir (Bozkurt, 2008). Bunun nedeninin Türk müziğine özgü olan enstrümanların fiziksel özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Müzisyenlerin icraları esnasında ekledikleri süslemeler ve çalım tarzları, ezginin gözlemlenmesini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda tanbur gibi çalgı seslerinin ikinci ve üçüncü doğuşkanlarının genliklerinin birinci doğuşkanlarına kıyasla daha yüksek olması da müzik bilgi erişimi açısından Türk makam müziği kayıtlarında icra edilen ezginin analizini zorlaştırmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI VE BENZER ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, teknoloji destekli interaktif müzik eğitimi teknolojileri için yapılmış çalışmalardan ve geliştirilen ürünlerden örnekler sunulmuştur.

Hali hazırda Batı müziği ve Türk makam müziği için geliştirilmiş eğitim araçları mevcuttur. [musictheory.net](http://www.musictheory.net)¹ Batı müziği için bir grup öğretici materyal bulunduran web tabanlı ücretsiz bir eğitim aracıdır. Kullanıcı bu araç sayesinde porte, anahtar, notaların porte üzerindeki yerleri gibi başlangıç seviyesindeki derslerden başlayarak aralıklar, gamlar, akorlar gibi daha ileri seviyedeki teori derslerini çalışabilmektedir. Araç bünyesinde, birtakım etkileşimli çalışma materyalleri bulunmaktadır. Ayrıca kullanıcıya dersleri kendi bilgisayarlarına indirebilme olanağı da sunulmuştur.

good-sounds.org² topluluk desteğiyle çalışan (*community driven*) müzikal performansları paylaşmak ve değerlendirmek için kurulmuş web tabanlı ücretsiz bir araçtır. Müzisyenlerin yükledikleri müzikal egzersiz kayıtlarını sistem, bünyesinde bulundurduğu ‘*artistry technology*’ olarak adlandırılan analiz araçları aracılığıyla değerlendirmektedir. Araçlar, kullanıcının yüklediği ses kayıtlarının perde kararlılığı (*pitch stability*), tını kararlılığı (*timbre stability*), tını zenginliği (*timbre richness*), dinamik kararlılık (*dynamic stability*), atak berraklığı (*attack clarity*) gibi müzikal performans ölçütlerini gözönünde bulundurarak değerlendirmekte ve kullanıcının kendi performansının zayıf olduğu yönler konusunda öneriler vermektedir. Ayrıca araca yüklenen ses kayıtları kullanıcılar tarafından da değerlendirilebilmekte ve oylanabilmektedir. Verilen oylar doğrultusunda makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak otomatik değerlendirme yöntemleri de geliştirilmektedir. Kullanıcılar bu araç sayesinde şu an için flüt, klarnet, trompet, çello, keman, saksafon, trombon ve tuba enstrümanlarını çalışabilmektedirler.

¹ <http://www.musictheory.net/>

² <https://good-sounds.org/>

Aurolia³ Batı müziği eğitimi için geliştirilmiş ticari bir bilgisayar programıdır. Aurolia, kullanıcının kendi başına çalışabileceği bir program olmasının yanısıra, eğitmenlere eğitim sürecinde de destek olabilen de bir programdır. Bünyesinde 40'tan fazla eğitim konusu bulunmaktadır. Ayrıca eğitmenler tarafından özel çalışma programları da oluşturulabilmektedir. Kullanıcı perde, aralık, akor, gam, ritim gibi Batı müziğinin temel konularını çalışabilmektedir. Araç, bünyesinde bulunan müzik analiz araçları sayesinde kullanıcıyla etkileşimde bulunabilmektedir. Kullanıcı program bünyesinde sunulan konuları kendi performanslarını kaydederek çalışabilmektedir. Program kaydedilen performansları değerlendirebilmekte ve kullanıcıya performansı ile ilgili bir geribildirim verebilmektedir. Ayrıca program bünyesinde bir bulut (*cloud*) sistemi bulunmaktadır. Bulut sistemi sayesinde eğitmen öğrencisine ev ödevleri verebilmekte ve verdiği ödevleri kontrol edebilmektedir. Aurolia Amerika Birleşik Devletleri'nin birçok eğitim kurumunda müzik eğitimini desteklemek için kullanılmaktadır⁴.

eContent HARMOS⁵ (Iglesias, Sanchez, Guibert, Guibertand, & Gómes, 2006) profesyonel müzisyenler için geliştirilmiş web tabanlı bir eğitim projesidir. Proje kapsamında Batı müziği eğitimi hedeflenmiştir. Müzik kültürü için önemli olan orkestra şeflerinin (*maestro*) ve ustaların (*master*) verdiği ustalık dersleri (*master class*) proje bünyesinde sesli ve görsel olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen materyaller müzikal sınıflandırma (*musical taxonomy*) araçlarıyla işaretlenmiştir. Aynı zamanda müzik bilgi erişimi yöntemleri yardımıyla da bu ders kayıtları üzerinde otomatik işaretlemeler yapılmıştır. Kullanıcılar enstrüman, hoca, besteci, beste vb. çoklu seçeneklerle arama yapabilmeyi sağlayan bir araç ile sistemin veri kümesi içerisinde gezinebilmekte ve belirlediği ölçütler doğrultusunda bulunduğu bölütlenmiş ve işaretlenmiş ders videolarına ulaşabilmektedirler. Ders videoları üzerinden kullanıcılar, istedikleri enstrümanı veya eseri çalışabilmekte, dersler vasıtasıyla ustaların/bestecilerin bakış açılarını ve tarzlarını öğrenebilmektedirler.

³ <https://www.risingsoftware.com/auralia/>

⁴ <https://www.risingsoftware.com/education/>

⁵ <http://www.classicalplanet.com/magister/>

Belirli bir çalım tekniği eğitimi veya şarkı söyleme eğitimi gibi özel konularla ilgili teknoloji destekli eğitim çalışmaları da yapılmaktadır. Keman çalışmada vibrato tekniği ile ilgili teknoloji destekli etkin bir eğitim aracı çalışması yapılmıştır (Ho, Lin, Chen, & Tsai, 2015). Bu yöntem aracılığıyla geleneksel yöntemlerle öznel bir şekilde ustadan öğrenciye aktarılan vibrato tekniğinin bilgisayar destekli bir araç aracılığıyla öğretiminin ve performans değerlendirmesinin daha nesnel bir şekilde yapılabilmesi hedeflenmiştir. Vokal eğitimi için geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan bir yöntem mevcuttur (Mayor, Bonada, & Loscos, 2009). Yöntem, kullanıcı performansını referans bir kayıtla karşılaştırmaktadır. Ayrıca karşılaştırma sonrası kullanıcıya başarısıyla ilgili bir not vermekte ve performansının yetersiz kaldığı noktalarla ilgili bir geribildirimde bulunmaktadır. Geliştirilen bu yöntem birçok eğitim aracında ve karaoke oyunlarında kullanılmaktadır.

Türk müziği eğitimi için de teknoloji destekli eğitim çalışmaları yapılmaktadır. Mus2okur⁶ (Karaosmanoğlu, ve diğerleri, 2008) Türk makam müziği ve Türk halk müziği ile ilgili tüm konu ve kavramları görüntülü, sesli ve hareketli olarak kullanıcıya sunan bilgisayar destekli ve ticari bir müzik eğitim aracıdır. Hedef kitlesi Türk müziğini yeni öğrenmeye başlayan kullanıcılardır. Bünyesinde büyük zamanlı usulleri, az kullanılan makamları ve görece daha az bilinen Türk müziği eserlerini de bulundurduğundan ötürü Türk müziği kültüründe daha tecrübeli kullanıcılara da hitap etmektedir. Mus2okur, veri kümesinde 25000 kadar eserin meta-verilerini barındırmaktadır. Bu eserlerin yaklaşık 1500 adedinin notaları mevcuttur. Notalı olan eserler MIDI ya da Türk müziği çalgıları ile istenilen ahenk ve tempoda sentezlenebilmekte ve görüntülenebilmektedir. Notası bulunan eserlerin sözleri mevcutsa kullanıcı, eseri karaoke görünümünde izleyebilmekte ve çalışabilmektedir. Kullanıcı, programın veri kümesinde konular halinde tanımlanmış olan makam, usul ve formları çalışabilmektedir. Bilgilerine erişilebilen Türk müziği bestecilerinin kısa hayat hikayeleri, fotoğrafları vb. verilere de Mus2okur veri kümesinden kullanıcılara ulaştırılabilmektedir.

⁶ <http://www.musiki.org/>

Dunya-makam⁷ Türk makam müziği için geliştirilmiş web tabanlı bir analiz ve keşif aracıdır (Şentürk, Ferraro, Porter, & Serra, 2015). İnternet sitesi üzerinden CompMusic (Serra, 2011) projesi kapsamında elde edilen tüm analiz sonuçları görüntülenebilmektedir. CompMusic projesi kültüre özgü yöntemler kullanılarak Batı kültürü dışındaki birtakım müzik kültürlerinin otomatik tanımlanmasında ilerleme sağlamayı amaçlayan bir araştırma projesidir. Dunya-makam aracılığıyla kullanıcıya yaklaşık 6000 ses kaydı ve bu ses kayıtlarıyla ilişkilendirilmiş 800 müzik notası sunulmaktadır. Ses kayıtlarındaki icralar ile müzik notaları arasındaki eşleştirilme otomatik olarak yapılmıştır. Kullanıcı web arabirimi üzerinden ses kaydını dinlerken, aynı anda icra edilen notayı gözlemleyebilmekte ve icra edilen eserle ilgili kültürel (*makam, usul, form, ahenk vb.*) meta-verilere de ulaşabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen tüm araçlar ve yöntemler, Dunya-makam arabiriminde ve sunucu bölümünde, ses kayıtlarının ve müzik notalarının analizlerinin yapılabilmesi, kullanıcıya ulaştırabilmesi ve görselleştirilmesi aşamasında kullanılmaktadır. Arabirimin tasarımı esnasında kullanıcının müzik kültürünü etkileşimli bir şekilde keşfedebilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda kullanıcıların kültürü öğrenebilmeleri de hedeflenmiştir. Dunya-makam ücretsiz bir araçtır. Bünyesindeki tüm analiz araçları ve analiz sonuçları akademik araştırmalarda kullanılabilir üzere paylaşımına açıktır.

Son yıllarda hareket algılama (*motion recognition*) teknolojisinin gelişmesiyle birlikte birçok yeni yöntem ve cihaz geliştirilmektedir. Bu teknolojilere örnek olarak Leap Motion⁸ ve Kinect⁹ verilebilir. Leap Motion, programlanabilen hareket algılayıcı bir cihazdır. Kullanıcıya herhangi bir temas olmadan ellerini bilgisayar faresi (*mouse*) gibi kullanabileceği bir olanak sağlamaktadır. Leap Motion son yıllarda müzik eğitimi teknolojisinde de denenmiştir. Bu olanak kullanılarak ilkokul öğrencileri üzerinde başlangıç seviyesinde nota eğitimi denenmiştir (Perdana, 2014). Politècnica de València Üniversitesi ile birlikte Carnegie Mellon Üniversitesi bünyesindeki Computer Music Group Ekibi ‘New Technologies and Interfaces for Music Education and Production’ projesi kapsamında Batı müziği için klasik eğitim yöntemlerinden ayrı olarak birçok

⁷ dunya.compmusic.upf.edu

⁸ <https://www.leapmotion.com/>

⁹ <http://www.xbox.com/>

eğitim senaryosu ve bu senaryoları gerekledikleri birçok farklı prototipler geliştirmişlerdir (Sastre, ve diğerleri, 2013). Uygulamaların tümü bilgisayarlar, tabletler, akıllı telefonlar ve Kinect/Leap Motion gibi yeni teknolojiler kullanılarak geliştirilmiştir. Gelecek yıllarda bu teknolojiler kullanılarak yapılacak olan mőzık eğitimi araçlarının ve yőntemlerinin artması beklenmektedir.

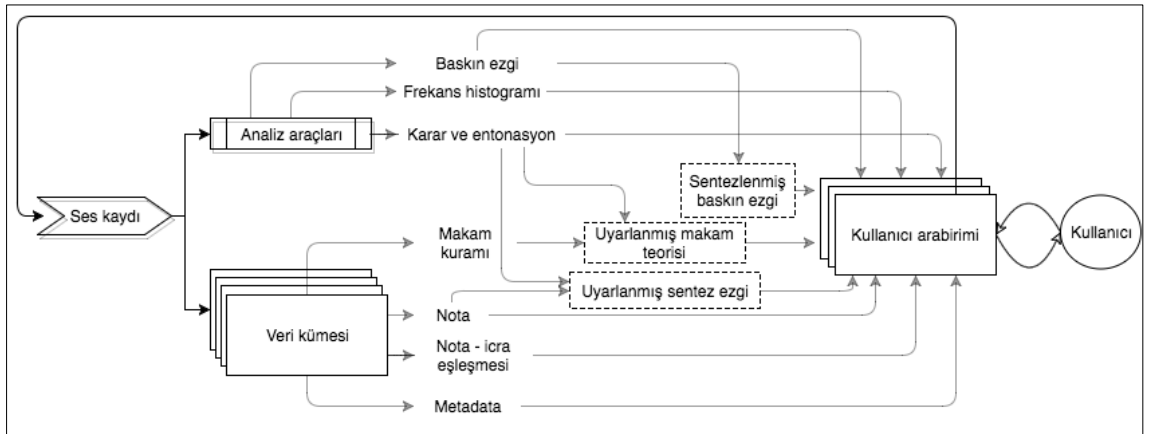
3. SİSTEM

Bu bölümde, program için geliştirilen sistemin tasarımı hakkında genel bilgiler verilmektedir. Sistemin akış şeması ve kullanıcı senaryoları Bölüm 3.1’de, sistemin kodlanabilmesi için kullanılan teknolojiler Bölüm 3.2’de ve bilgisayar yazılımının tasarımı da Bölüm 3.3’te anlatılmaktadır.

3.1 SİSTEMİN AKIŞI VE KULLANICI SENARYOLARI

Kullanıcının çalışmak istediği referans kaydı seçebileceği bir kurgu üzerine sistem tasarımı yapılmıştır. Programda bulunan ek bir pencere ile kullanıcı, çalışmak istediği ses kaydını seçebilir. Seçim sonrasında kullanıcıya, eğitim ortamının kurulabilmesi için ses kaydıyla ilgili müzik notasında ve ses kaydında bir dizi analizin yapıldığı bir kurgu gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen verilerin ve müzik notasının, görselleştirilmiş bir arabirim ile kullanıcıya sunulması hedeflenmiştir. Sistemin akış şeması Şekil 3.1’de görülmektedir.

Şekil 3.1: Tasarlanan sistemin akış şeması



3.2 SİSTEMİN TASARIMI İÇİN KULLANILAN TEKNOLOJİLER

Tez kapsamında tasarlanan program, Python¹⁰ (Guido & others, 2007) programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Python, nesne odaklı, interaktif ve yorumlanabilir yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Sözdiziminin (*syntax*) basit kurallar çerçevesinde girintilere (*indentation*) dayalı olması, dilin akılda kalmasını ve kolay öğrenilmesini sağlamaktadır. Bu özellik sayesinde, sözdizimi ayrıntıları ile fazla zaman kaybedilmeden, kullanıcıya hızlı ve pratik bir çalışma ortamı sunulmaktadır. Dilin çapraz platform çalışabilme özelliği, Python ile geliştirilen kodların UNIX, Linux, Mac, Windows gibi sistemlerde çalışabilmesine olanak sağlamaktadır. Python ile kullanıcı arabirimi programlama, veritabanı kontrolü, sistem programlama gibi birçok alanda yazılım geliştirilebilmektedir. Ayrıca C ve C++ gibi programlama dillerinde yazılmış programlama kütüphaneleri de kolaylıkla Python ile geliştirilen kodlarda çağrılabilmekte, kontrol edilebilmekte ve kullanılabilir. Tasarlanan sistemin prototipinin gerçekleştirilmesi için Python Versiyon 2.7 kullanılması tercih edilmiştir. Versiyon 2.7, daha yeni olan Versiyon 3.5'e göre şu an için daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum, harici programlama kütüphanesi gereksinimi duyulduğunda Versiyon 2.7'yi Versiyon 3.5'e kıyasla daha avantajlı kılmaktadır.

Python programlama diliyle bilim ve mühendislik alanındaki çalışmalara yardımcı olacak birçok etkin programlama kütüphanesi bulunmaktadır. Sistemin gerçekleştirilmesi esnasındaki bilimsel hesaplama işlemleri için NumPy ve SciPy¹¹ (Van Der Walt, Colbert, & Varoquaux, 2011) programlama kütüphaneleri kullanılmıştır. Kütüphanenin sunmuş olduğu özel veri yapıları sayesinde işlemler, Python ile beraberinde gelen matematik kütüphanelerine (*built-in libraries*) göre çok daha hızlı yapılmaktadır. Ayrıca kütüphaneler, Python'ın liste (*list*) yapısı için derlenmiş birçok farklı işlem yapan hazır fonksiyonlar da içermektedir. Bu fonksiyonlar, kodun yapısını oldukça sadeleştirmekte ve işlem gücü için harcanan vakti de oldukça azaltmaktadır. Kütüphanenin

¹⁰ <http://www.python.org>

¹¹ <http://www.scipy.org>

dokümantasyonunun iyi yapılmış olması ve açık kaynak kodlu olması, gerçekleşme esnasında oluşabilecek hatalar için çözümlerin bulunabilmesini de kolaylaştırmaktadır. Sayısal ses sinyali işlemleri için Essentia¹² (Bogdanov, ve diğerleri, 2014) programlama kütüphanesi kullanılmıştır. Kütüphane C++ programlama dilinde geliştirilmiştir ve açık kaynak kodludur. Bünyesinde ses sinyali analizi ve ses sinyali ile bilgi erişim çalışmalarında kullanılacak fonksiyonlar bulundurmaktadır. Kütüphane standart ses sinyali işleme işlemlerinin yanısıra, istatistiksel sınıflandırma ve büyük veri kümelerini tonal, spektral vb. özellikler ile tanımlama ve sınıflandırma olanakları da sunmaktadır.

Ses kaydı okuma ve kaydetme kısmında Pyglet¹³ (Holkner, 2008) programlama kütüphanesi kullanılmıştır. Pyglet, Python haricinde herhangi bir başka programlama kütüphanesine gereksinim duymamasından ötürü avantajlıdır. Ayrıca kütüphane nesne yönelimli programlama yapmaya olanak sağlamaktadır.

Grafiksel kullanıcı arabirimi oluşturulması için Qt¹⁴ aracı kullanılmıştır. Qt, C++ programlama diliyle yazılmış, çapraz platform çalışabilen ve açık kaynak kodlu bir araçtır. Python ile geliştirilmiş PySide¹⁵ programlama kütüphanesi ile Python aracılığıyla çalışabilme özelliği sağlanmıştır. QtCreator programıyla tasarlanan kullanıcı arabirimleri, PySide kütüphanesi yardımıyla Python programlama dilinde, Qt aracının sağladığı tüm avantajlardan faydalanılarak kullanılabilir.

Analiz sonuçlarının görselleştirilebilmesi için PyQtGraph (Campagnola, 2012) programlama kütüphanesi kullanılmıştır. PyQtGraph, Python programlama dili ile geliştirilmiş, görsellerinin oluşturulması kısmında Qt kütüphanesinin grafik görüntüleme araçlarını kullanan bir çizim kütüphanesidir. Bu nedenden ötürü, Python için geliştirilmiş birçok çizim kütüphanesine göre çok daha hızlı çalışabilmektedir ve çizim yöntemleri açısından daha fazla araca sahiptir. Aynı zamanda kütüphane bünyesinde, kullanıcıyla etkileşimi artıran birçok araç bulunmaktadır. Programın gerçekleşmesi aşamasında

¹² <http://essentia.upf.edu/>

¹³ <https://www.pyglet.org>

¹⁴ <https://www.qt.io>

¹⁵ <https://www.pyside.org>

PyQtGraph kütüphanesinin sağladığı avantajlarla oluşturulan arabirimde, kullanıcıyla etkileşim daha da artırılabilmiştir.

Veritabanı işlemleri için SQLite¹⁶ kullanılmıştır. SQLite herhangi bir sunucuya gereksinim duymamaktadır. Çapraz platform çalışabilmektedir. Ayrıca her veritabanı için tek bir dosya oluşturmaktadır. Bu sayede oluşturulan veritabanları kolaylıkla yedeklenebilmekte ve değiştirilebilmektedir. Ayrıca Python ile hızlıca ve kolaylıkla kullanılabilir.

Nota görsellerinin oluşturulması aşamasında Lilypond¹⁷ (Nienhuys & Nieuwenhuizen, 2003) uygulaması kullanılmıştır. Bölüm 5.2.2’de Lilypond’un avantajları ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

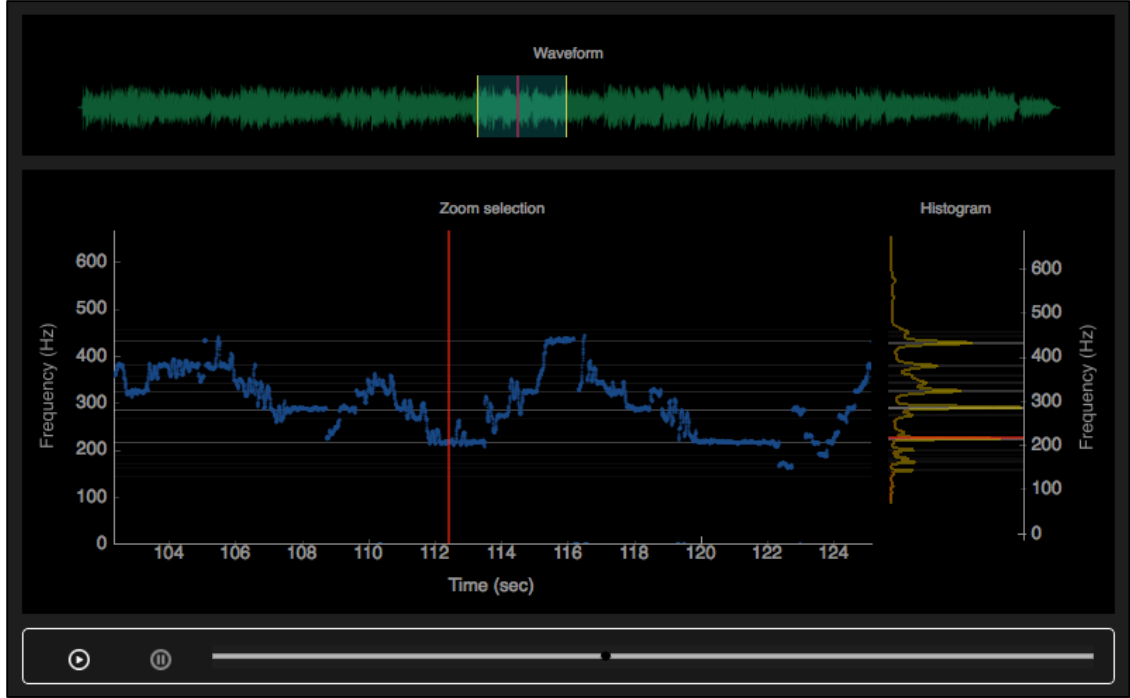
3.3 PROGRAMIN PROTOTİPİ

Programın prototipi Mac OS X Yosemite versiyon 10.10.5 işletim sistemi kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca Ubuntu 14.04 LTS işletim sisteminde de sorunsuz çalışmaktadır. Şekil 3.2’de prototipin ana penceresinin ekran görüntüsü bulunmaktadır.

¹⁶ <https://www.sqlite.org>

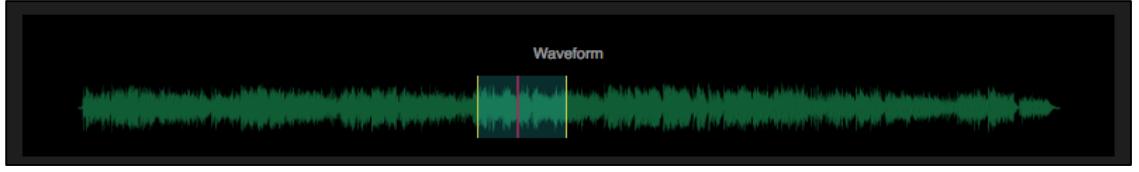
¹⁷ <https://www.lilypond.org>

Şekil 3.2: Prototipin ekran görüntüsü



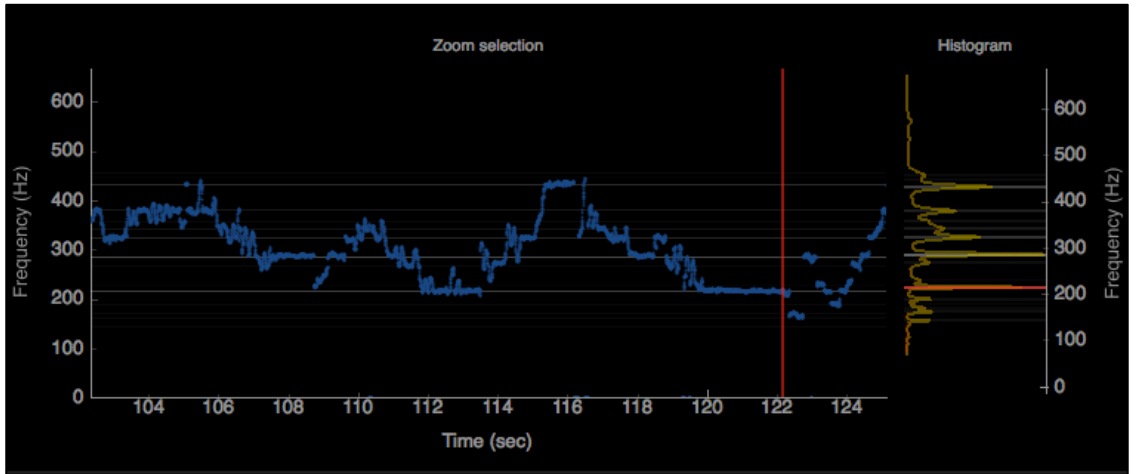
Şekil 3.3'te görülen "Waveform" bölümü, referans ses kaydının dalga şeklini göstermektedir. Kullanıcı, dalga şekli üzerinden çalışmak veya dinlemek istediği bölümü bölge seçici araç yardımıyla seçebilir. Dalga şekli üzerinde gözüken dikdörtgen kutucuk, bölge seçici aracıdır. Kullanıcı, aracı kaydırabilir ve seçili bölgeyi genişletebilir/daraltabilir.

Şekil 3.3: Dalga formu ve bölge seçme aracı



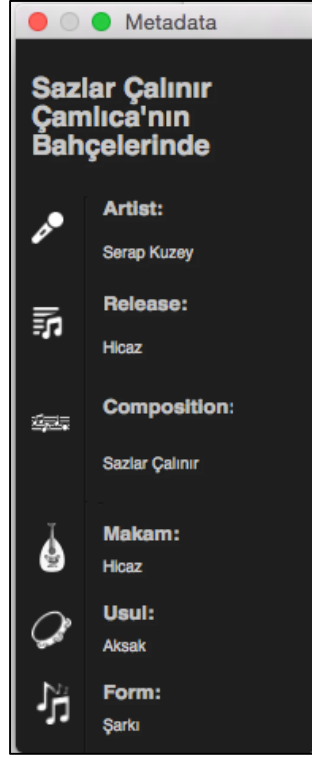
Seçilen bölgenin baskın ezgi analizi ve frekans histogramı, sırasıyla “Zoom selection” ve “Histogram” bölümlerinde gösterilir. Şekil 3.4’te örnek bir ekran görüntüsü bulunmaktadır. Histogram ve baskın ezgi analizlerinin frekans eksenleri birbirleriyle eşlenmiştir. Baskın ezgi analizi kısmında bulunan kırmızı dikey çizgi, histogram üzerinde yatay kırmızı çizgi ve dalga formunda bulunan dikey kırmızı çizgi birbirlerine bağlı hareket etmektedir. Histogram üzerindeki yatay çizgi, o anda icra edilen perdenin frekansını göstermektedir. Baskın ezgi analizi kısmında bulunan yatay beyaz çizgiler, histogramda bulunan tepe noktalarına denk gelmektedir. Histogramdaki görülme sıklıklarına göre beyaz çizgilerin belirginlik/siliklik değerleri değişmektedir. Histogramda daha sık görülen tepe noktaları, baskın ezgi analizi kısmında daha belirgin yatay çizgilerle görülmektedir. Bu sayede kullanıcı, seçilen kayıt içerisinde icra edilen perdelerin ne kadar sık çalındığını da anlık olarak gözlemleyebilmektedir. Ayrıca bu çizgiler sayesinde, perde geçişleri esnasında icra edilen süslemeler ve geçişler de kullanıcı tarafından gözlemlenebilmektedir.

Şekil 3.4: Seçilen bir bölgenin baskın ezgi analizi ve histogramı



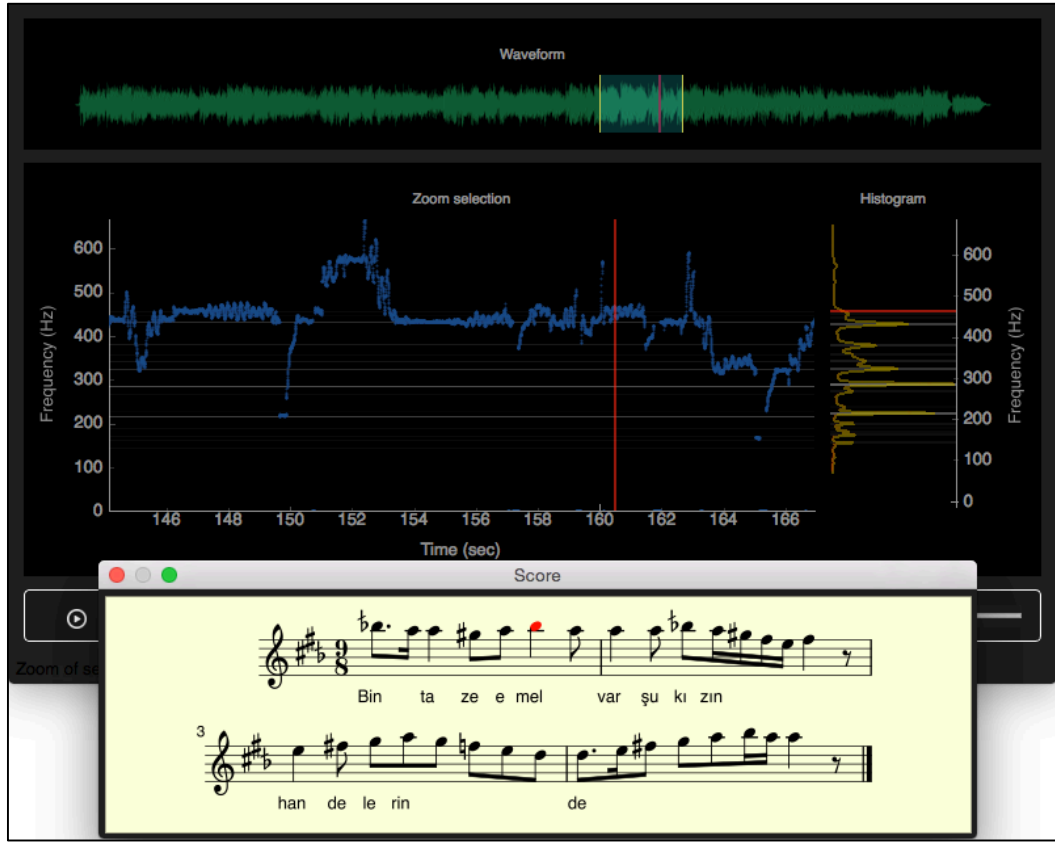
Kullanıcı isterse, seçtiği kaydın meta-verilerine ayrı bir pencerede ulaşabilir. Şekil 3.5'te seçilmiş referans bir kayıt için meta-veriler görülmektedir. Kullanıcı, açılan meta-veri penceresini istediği yere sürükleyerek kullanabilir.

Şekil 3.5: Meta-veri penceresi



Kullanıcı isterse ayrı bir pencerede, o an icra edilmekte olan notayı da gözlemleyebilir. Şekil 3.6'da nota penceresinin açık olduğu bir örnek ekran görüntüsü bulunmaktadır. Kullanıcı, nota izleme penceresini istediği yere sürükleyerek kullanabilmektedir. O anda icra edilen nota, nota penceresi içerisinde kırmızı renge boyanmaktadır. Kaydın baskın ezgi analizi, notası ve frekans histogramının aynı anda görülebildiği tasarımda kullanıcı, kuram - icra farklılıklarını ve icra edilen perdeleri gözlemleyebilmektedir.

Şekil 3.6: Nota izleme penceresi



Kullanıcı isterse ayrı açılabilen bir pencerede, nota ve seçtiği kaydın entonasyonu ile sentezlenmiş sesle çalışmasını yapabilmektedir. Sentez ses ile nota görseli, otomatik olarak eşlenir. Kullanıcı, sentez ses ile müzik notasını senkron olarak takip edebilir. Şekil 3.7'de sentezlenmiş nota ile çalışma imkanı sağlayan özelliğin ekran görüntüsü bulunmaktadır. Sentez seste o anda duyulan nota, nota görseli üzerinde kırmızı rengi almaktadır.

Şekil 3.7: Sentezlenmiş notayla çalışma penceresi

The image shows a software window titled "Synthesized Score" with a yellow background. The title "Sazlar Çalınır" is centered at the top, with the composer "Yesari Asım Arsoy" to the right. Below the title, the musical style is listed as "Usul Aksak" and "Makam: Hicaz". The score is written on a treble clef staff in 3/8 time. The lyrics are "Saz lar ça lı nır Çam lı ca nın bah çe le rin de". The score is divided into three lines, with the first line starting at measure 1, the second at measure 3, and the third at measure 5. A red dot on the second line indicates the current playback position. The word "SAZ" is written above the final measure of the third line. At the bottom of the window, there is a control bar with a play button, a stop button, and a progress bar.

4. VERİ

Müzik bilgi erişimi alanında teknolojilerin geliştirilebilmesi ve verimlerinin test edilebilmesi için veriye (*data*) gereksinim duyulmaktadır. Kullanılan veri kümelerinin düzgün ve dikkatlice hazırlanması, geliştirilen yöntemlerin başarısının ölçülmesi ve daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi açısından önemlidir. Hazırlanan verilerin gerçek senaryoları yansıtabilmesi de geliştirilen teknolojilerin, varolan sorunlara çözüm olabilmemesi ve daha verimli olabilmemesi açısından önem taşımaktadır.

Araştırma problemleri için hazırlanan veri kütüphaneleri (*research corpus*) birden fazla kaynaktan oluşabilir. Oluşturulan veri kütüphaneleri, toplulukların katkısıyla (*community effort*) geliştirilebilir ve genişletilebilir. Müzik bilgi erişimi açısından bakıldığında, oluşturulan bir veri kütüphanesi varolan tüm müzik türlerini kapsayamayacağından ötürü, araştırılan tüm problemler ve farklı kültürler için özel hazırlanmalıdır.

Deney veri kütüphaneleri (*test datasets*) genellikle veri kütüphanelerinden bazı ek bilgilerle birlikte belirli araştırma problemleri için derlenmektedir. Deney veri kütüphaneleri, tasarlanan araçların veya yöntemlerin geliştirilmesinde, iyileştirilmesinde ve değerlendirilmesi için tasarlanan deneylerde kullanılmaktadır. Sonrasında bu deney veri kütüphaneleri, geliştirilen yöntemlerin sonuçlarıyla da büyütülürler. Dolayısıyla deney veri kütüphaneleri, veri kütüphanelerinin aksine, geliştirilen yöntemler ve araçların çıktıları ve analiz sonuçları kullanılarak elde edilen sentez veriler de içerebilmektedir.

Veri kütüphanelerinin hazırlanması başlıbaşına bir araştırma problemidir. (Peeters & Fort, 2012)'de müzik bilgi erişimi problemleri için veri kütüphanelerinin nasıl hazırlanması gerektiğine dair bir yöntem anlatılmıştır. (Serra, 2014)'te de müzik bilgi erişimi veri kütüphaneleri hazırlanırken dikkat edilmesi gereken tasarım ölçütleri de açıklığa kavuşturulmuştur. Buna göre müzik bilgi erişimi problemleri için hazırlanan veri kütüphaneleri amaç (*purpose*), kapsam (*coverage*), bütünlük (*completeness*), kalite (*quality*) ve tekrar kullanılabilirlik (*reusability*) ölçütleri gözönünde bulundurularak hazırlanmalıdır.

Bu ölçütler gözönünde bulundurularak Türk müziği için derlenmiş CompMusic-makam *Corpus* (Uyar, Atlı, Şentürk, Bozkurt, & Serra, 2014) adında bir veri kütüphanesi bulunmaktadır. Sistem için oluşturulan veri kütüphanesi ve deney veri kümeleri, CompMusic-makam veri kütüphanesi kullanılarak hazırlanmıştır. CompMusic-makam veri kütüphanesiyle ilgili ayrıntılar Bölüm 4.1’de, sistem için hazırlanan veri kümesi ve deney setleri de Bölüm 4.2’de anlatılmıştır.

4.1 COMPMUSIC-MAKAM VERİ KÜTÜPHANESİ

Compmusic-makam veri kütüphanesi, CompMusic projesi (Serra, 2011) kapsamında Türk müziği araştırmaları için derlenen bir veri kütüphanesidir. Projenin Türk müziği ayağındaki odak noktası, kültürün ezgisel ve ritmik özellikleri olduğu için, veri kütüphanesi ses kayıtları, makinece okunur müzik notaları ve meta-verilerden oluşmaktadır. Meta-veriler, ses kayıtları ve müzik notalarının bilgilerinin yanısıra, icracılarla ilgili doğum tarihi, ilgili internet kaynakları gibi ek bilgiler de içermektedir. Veri kütüphanesi içerisindeki tüm verilerin birbirleri arasındaki bağlantılar, sistematik bir şekilde tutulmaktadır.

Veri kütüphanesi yaklaşık olarak 7000 ses kaydı içermektedir. Koleksiyon 20. Yüzyıl başından günümüze kadar gelen solo, orkestral ve koro icralarından oluşmaktadır. Koleksiyon içerisinde aynı zamanda türkü formunda (halk müziği) ve ilahi formunda (dini müzik) ses kayıtları da bulunmaktadır. Tablo 4.1’de ses kayıtlarının formlarıyla ilgili istatistik bulunmaktadır.

Tablo 4.1: CompMusic-makam veri kümesindeki ses kayıtlarının form istatistikleri

Form	#	Form	#
Şarkı	2439	Beste	188
Taksim	1066	Yürüksemai	185
Peşrev	460	Ağırsemai	166
Sazsemaisi	391	İlahi	127
Türkü	199	Diğerleri (75)	1220

Ses kayıtları, ticari olarak satılan TRT (Türk Radyo Televizyon) ve bu kültür için önemli çalışmalarda bulunmuş yapım şirketlerinin (örn: Kalan müzik) klasik Türk müziği icraları içeren kayıtları derlenerek oluşturulmuştur. Ayrıca veri kütüphanesinde ticari olmayan ses kayıtları da bulunmaktadır. Tablo 4.2’de ses kayıtlarıyla ilgili genel istatistikler bulunmaktadır.

Tablo 4.2: CompMusic-makam veri kütüphanesinin ses kayıtlarının genel istatistikleri

	#
Ses kayıtları	6541
Albümler	356
Eserler	2928
İcracılar	794
Makamlar	111
Usuller	74
Formlar	87

Meta-veriler için albüm kapakları üzerinde bulunan tüm bilgiler derlenmiştir. Bilgilerin eksik olduğu noktada meta-veriler, başka kaynaklar kullanılarak tamamlanmaya çalışılmıştır. Ses kayıtlarının bütünlük ilkesi göz önünde bulundurularak meta-verilerinin değerlendirildiği istatistikler Tablo 4.3’te bulunmaktadır. 1141 ses kaydı taksim veya gazel gibi doğaçlama formlarda olduğundan ötürü, eser bilgisi içermemektedir.

Prodüksiyon kalitesi düşük olan (usta icracıların eski kayıtları hariç) ve icra/müzikal kalitesi düşük olan ses kayıtlar (örneğin MIDI destekli yapılmış kayıtlar) veri kütüphanesine dahil edilmemiştir.

Tablo 4.3: CompMusic-makam veri kütüphanesinin ses kaydı meta-verilerinin bütünlük açısından istatistiği

	# Ses kaydı	% toplam
Albümler	6541	100
Eserler	4626	78
İracılar	6541	100
Makamlar	6096	93
Usuller	6075	92
Formlar	6093	93

Türk müziği için müzik notaları genellikle el yazması veya kitap gibi fiziksel ortamlardadır. Ayrıca PDF/JPEG gibi dijital formatlarda da birçok Türk müziği notası mevcuttur. Yazılımlar, bu biçimlerdeki dosyalardan nota, tempo, ezgisel cümlecikler gibi gerekli bilgileri otomatik olarak okuyamamaktadırlar. Dolayısıyla yazılım yardımıyla yapılan hesaplamalı araştırmalarda, sadece tarama (*scanning*) veya fotoğraflama işlemiyle elde edilmiş müzik notaları çoğunlukla kullanılamamaktadır.

CompMusic Projesi kapsamında SymbTr (Karaosmanoğlu, A Turkish makam music symbolic database for music information retrieval: SymbTr, 2012) adlı bir nota koleksiyonu derlenmiştir. Bu koleksiyon Türk müziği için oluşturulmuş, makinece okunur 2200 nota ve notalarla ilgili meta-verileri içerisinde barındıran bir nota kütüphanesidir. SymbTr, makinece okunur yazı (*text*) biçimindeki verilerin yanı sıra, notaların PDF ve MIDI formatındaki sürümlerini de içermektedir. Bütünlük açısından değerlendirildiğinde SymbTr kütüphanesi bünyesinde bulunan tüm notaların başlığı, bestecisi, söz yazarı gibi tüm meta-verileri mevcuttur. Ayrıca notalar içerisinde makam, usul, form, tempo, hane, perde/aralık bilgileri gibi kültüre özgü bilgiler de bulunmaktadır.

SymbTr nota kütüphanesinin yayınlanan son versiyonunda¹⁸ metin biçimindeki makinece okunur notalar MusicXML 3.0 (Good, 2001) biçimine de çevrilmiştir. MusicXML, notaların araçlardan ve platformlardan bağımsız olarak kolaylıkla hazırlanabilmesi ve kullanıcıların bunları birbirleriyle paylaşabilmesi için geliştirilmiş ücretsiz bir makinece okunur müzik notasyonu biçimidir. MusicXML formatı MuseScore, Sibelius, Finale gibi 200'den fazla nota yazım programıyla kullanılabilir. Ayrıca makine tarafından kolaylıkla okunabilmesi ve değiştirilebilmesinden ötürü, hesaplamalı araştırma problemlerinde kullanılmaktadır. SymbTr koleksiyonu ile ilgili genel istatistik Tablo 4.4'te görülmektedir.

Meta-veriler MusicBrainz¹⁹ (Swartz, 2002) platformunda tutulmaktadır. MusicBrainz açık kaynak kodlu bir müzik kütüphanesi projesidir. Kullanıcı destekleriyle gelişmektedir. CompMusic-makam veri kütüphanesi içerisinde bulunan tüm elemanların meta-verileri ve aralarındaki ilişkiler MusicBrainz içerisinde tutulmaktadır. İcracı, besteci, albüm, kayıt, eser gibi meta-verilerin tamamı MusicBrainz platformunda birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Kullanıcı, MusicBrainz platformunun sağladığı özellikler sayesinde, veri kütüphanesinde bulunan herhangi bir eserin kaydına, kaydın icrasında bulunan müzisyenlerin bilgilerine ve kaydın kültüre özgü bilgilerine (makam, usul, form vb.) ulaşabilmektedir. CompMusic-makam veri kütüphanesi ile ilgili yaklaşık 22000 adet meta-veri, kullanıcı destekleriyle elle (*manuel*) MusicBrainz platformuna girilmiştir. Python ile geliştirilmiş bir programlama kütüphanesi²⁰ yardımıyla da MusicBrainz bünyesindeki tüm verilere ücretsiz ve hızlıca ulaşılabilir.

¹⁸ <https://github.com/MTG/SymbTr>

¹⁹ <https://musicbrainz.org>

²⁰ <https://github.com/alastair/python-musicbrainzngs>

Tablo 4.4: SymbTr nota koleksiyonunun makam, usul ve form istatistikleri

Makam	#	Usul	#	Form	#
Hicaz	118	Sofyan	251	Şarkı	677
Rast	88	Aksak	246	Türkü	285
Nihavent	85	Düyek	143	Seyir	169
Uşşak	85	Aksaksemai	101	Küpe	120
Segah	74	Curcuna	91	Peşrev	74
Hüseyini	72	Ağıraksak	83	Aranağme	72
Hüzzam	65	Yürüksemai	75	Sazsemaisi	66
Mahur	54	Nimsofyan	74	İlahi	32

(Serra, 2014)'te müzik bilgi erişim problemleri için veri kütüphanesi oluşturulması ilkeleri göz önünde bulundurularak değerlendirildiğinde, CompMusic veri kütüphanesi, bütünlüğü, erişilebilirliği, kapsamı, kullanım kolaylığı ve Türk makam müziğini iyi bir şekilde yansıtabilmesinden ötürü, tasarlanan sistemin üzerine oturduğu veri olarak kullanılmıştır. Bölüm 4.2'de, sistem içerisinde kullanılan verilerin ayrıntıları CompMusic-makam veri kütüphanesinden yararlanılarak anlatılmıştır.

4.2 PROGRAM İÇİN DERLENEN VERİ KÜMESİ VE KULLANILAN DENEY KÜMELERİ

Oluşturulan veri kümesi (Serra, 2014)'te belirtilen ölçütler doğrultusunda hazırlanmıştır. Kapsamı ve tezin sınırları gözönünde bulundurulduğunda veri kümesinin tasarımı için SymbTr müzik kütüphanesinde en sık görülen beş makamın kullanılmasına karar verilmiştir. Bu makamlar sırasıyla Hicaz, Rast, Nihavent, Uşşak ve Segah'tır. Seçilen her makam için CompMusic-makam ses kaydı kütüphanesi istatistiklerinde en sık görülen formlar olan şarkı, taksim, peşrev, sazsemaisi, yürüksemai, türkü ve ek olarak ilahi formlarından birer referans ses kaydı seçilmiştir. Böylelikle seçilen beş makam ile SymbTr kütüphanesinin yüzde 20'si, CompMusic-makam veri kütüphanesinin ses kayıtlarının da yüzde 32'si kapsamıştır. Seçilen ses kayıtların tam listesi ekler bölümünde bulunmaktadır.

Sistemin veri kümesinde beş makam için toplam 30 ses kaydı bulunmaktadır. Seçilen ses kayıtlarının ve müzik notalarının icracı, besteci, albüm bilgisi vb. tüm meta-verileri mevcuttur. Taksim formu dışındaki tüm kayıtların müzik notaları bulunmaktadır. Bütünlük bakımından veri kümesi değerlendirildiğinde meta-veri ve elemanları arasındaki ilişkiler bağlamında herhangi bir eksiği bulunmamaktadır.

Kalite ölçütü gözönünde bulundurularak seçilen kayıtlar solo, orkestral ve koro eşlikli icralar içermektedir. Seçilen kayıtlar 20. Yüzyılın başından günümüze kadar uzanmaktadır. Ses kayıtlarının seçimi yapılırken uzmanların görüşlerine başvurulmuştur. Veri kümesi oluşturulurken, herkes tarafından kabul görmüş usta icracıların icralarını içeren kayıtlarının seçilmesine özen gösterilmiştir.

Oluşturulan veri kümesinin standardize edilebilmesi ve başka araştırmalarda da kullanılabilmesi için analizlerde ve analiz çıktılarının/sonuçlarının saklanması aşamasında belirli parametreler ve biçimler kullanılmıştır. Ses kayıtları MP3 biçiminde 44.1 kHz ve 160 kbps çözünürlükte örneklenmiştir. MP3 formatının yeğlenmesi, prototipin fazla yer tutmamasını sağlamaya yöneliktir. Veri kümesinde bulunan tüm müzik notaları MusicXML 3.0 formatındadır. MusicXML formatı sayesinde kullanıcı, notalarda gördüğü yanlış ve eksiklikleri MusicXML 3.0'ı destekleyen herhangi bir nota yazım programını kullanarak düzeltebilir ve ekleyebilir. Meta-veriler ve veri kümesindeki elemanlar arasındaki ilişkilerin tamamı JSON²¹ biçimi kullanılarak saklanmaktadır. JSON biçimi programın gerçekleştirildiği Python programlama dili ile kolaylıkla kullanılabilmekte ve yazı düzenleyici (kelime işlemci) programları ile de kolaylıkla açılabilmekte, okunabilmekte ve değiştirilebilmektedir.

Veri kümesi ses kaydı, müzik notaları ve meta-verilere ek olarak Bölüm 5'te anlatılan yöntemlerle elde edilmiş analiz sonuçlarını da içermektedir. Her ses kaydı için yapılan baskın ezgi kestirimi ve karar perdesi frekansı kestirimi sonuçları da veri kümesinde bulunmaktadır. Müzik notası – icra eşleme analizi sonrası ses kaydı için elde edilen

²¹ <http://www.json.org/>

bölüm/hane bilgisi, tempo bilgileri ve nota eşlemeleri de ayrıca veri kümesinde tutulmaktadır. Tüm analiz sonuçları JSON formatında hazırlanmıştır.

Seçilen beş makamla ilgili kuramsal bilgiler, oluşturulan bir SQLite dosyası içerisinde tutulmaktadır. Makamları oluşturan özel üçlüler, dörtlüler ve beşliler, oluşturulan veri kümesi dosyasında saklanmaktadır. Beş makam için, makamı oluşturan tüm bilgiler veri kümesi dosyasında bulunmaktadır. Her makam için diziyi oluşturan üçlü, dörtlü ve beşli bilgileri, seyir özelliği, karar perdesi, güçlü perdesi ve yeden perdesi tanımlanmıştır. Sistem bu bilgilerden yararlanarak, kullanıcıya makamı çalışabileceği bilgileri analizler sonrasında otomatik olarak sunmaktadır.

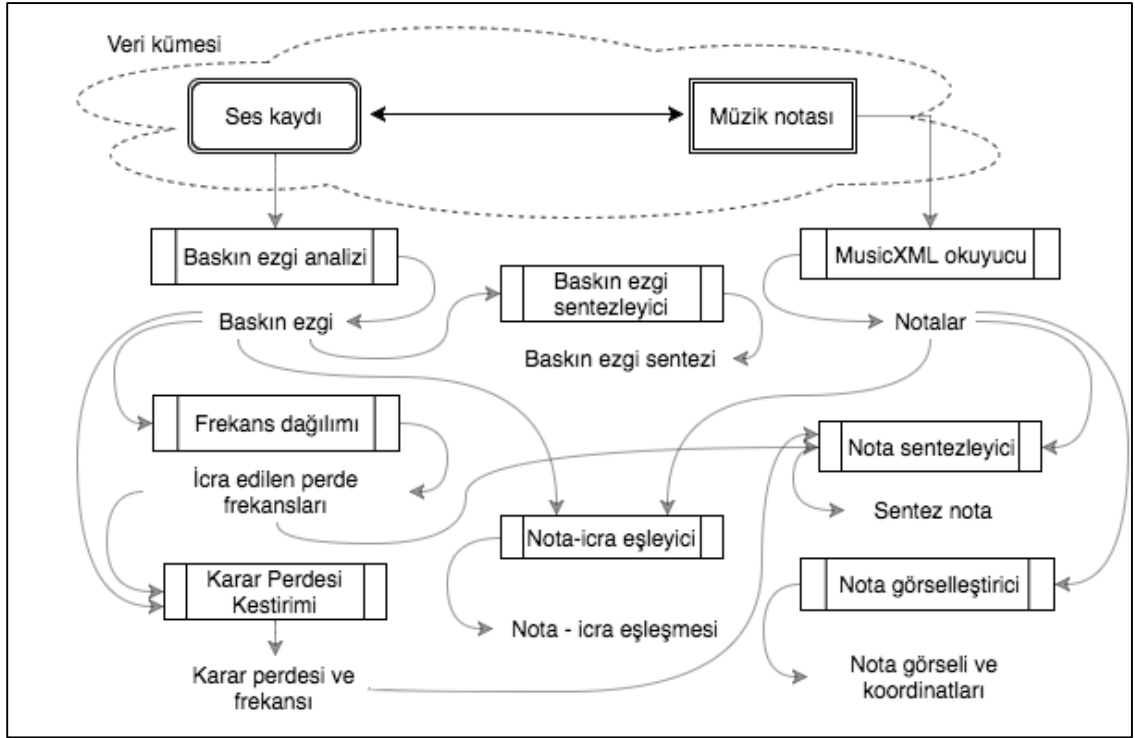
5. YÖNTEMLER VE ARAÇLAR

Bu bölümde, sistem tasarlanırken geliştirilen yöntemler ve araçlar açıklanmaktadır. Araçlar, Bölüm 5.1’de ses kaydı işleyen ve Bölüm 5.2’de müzik notaları işleyen analiz araçları olmak üzere iki alt başlıkta anlatılmaktadır.

Kullanıcı çalışılmak istenen ses kaydını kullanıcı seçtikten sonra sistem, ilk olarak ses kaydının baskın ezgi kestirimini yapmaktadır. Baskın ezgi analizi sonrası elde edilen frekans - zaman serisi (*melogram*) üzerinden perde dağılımı (frekans histogramı ve kernel yoğunluk frekans dağılımı) hesaplanır. Daha sonra hesaplanan perde dağılımlarından, ses kaydı içerisinde icra edilen perdelerin frekansları kestirilir. Son olarak ses kaydı üzerinden karar perdesi kestirimi yapılır. Karar perdesi, sisteme, kullanıcıya yönelik çalışma modelinin kurulabilmesi için gereken referans noktayı ve frekansı sisteme sağlamaktadır.

Müzik notası ile ilgili kısımda ise, ses kaydı seçildikten sonra sistem, kayıtlı ilgili makinece okunur müzik notasını veri kümesinden bulur. Bulunan nota otomatik olarak görselleştirilir ve görsel üzerinde bulunan her notanın koordinatları hesaplanır. Oluşturulan nota görseli ve nota koordinatları, ses kaydı - müzik notası, sentez ezgi - müzik notası ve çalışma materyallerinde kullanılmak üzere saklanır. Makinece okunur notalardan elde edilen bilgiler ve baskın ezgi kestirimiyle nota - icra eşleşmesi yapılır. Ayrıca analizler sonucunda elde edilen baskın ezgi kestirimi de sentezlenerek kullanıcıya çalışma materyalleri arasında sunulmaktadır. Yöntem ve araçların akış şeması Şekil 5.1’de görülmektedir.

Şekil 5.1: Yöntem ve araçların akış şeması



5.1 SES KAYDI ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN VE KULLANILAN YÖNTEMLER

Ses kaydı ile ilgili özelliklerin çıkarımı için geliştirilen yöntemler sırasıyla Bölüm 5.1.1 baskın ezgi kestirimi, Bölüm 5.1.2 frekans gösterimi, Bölüm 5.1.3 karar perdesi frekansı kestirimi ve Bölüm 5.1.4 icra edilen perde isimlerinin frekanslarının kestirimi olmak üzere üç alt başlıkta anlatılmaktadır.

5.1.1 Baskın Ezgi Kestirimi

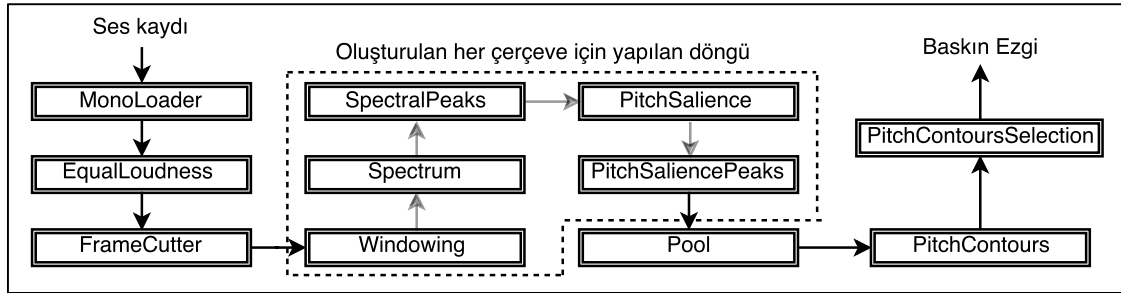
Baskın ezgi kestirimi, sistemin kullanıcıya yönelik çalışma modelini oluşturabilmesi için ses kaydından çıkarttığı (*extract*) ilk ezgisel özelliktir. Bu adımda, ses kaydı içerisinde icra edilen ezginin doğru olarak çıkarımı hedeflenmektedir.

Baskın ezgi analizi Türk müziğinin heterofonik yapısından ötürü hesaplamalı araştırmalar için gereksinim duyulan temel araçlardan birisidir (Bozkurt, Ayangil, & Holzapfel, 2014).

Gedik ve Bozkurt, Türk müziği için temel titreşim frekansı hesaplamalarında YIN (Cheveigné & Kawahara, 2002) yöntemini kullanmışlardır (Gedik & Bozkurt, 2010). Bu yöntemin, monofonik Türk müziği kayıtları için verdiği frekans - zaman serisi (*melogram*) çıktıları çok başarılı değildir. Fakat, bu çıktılar üzerine uygulanan, yine Türk müziği kayıtları için tasarlanmış bir filtreleme (Bozkurt, 2008) işlemi ile iyi sonuçlara ulaşılabilmektedir. Ancak arka plan gürültüsü yüksek olan (örneğin taş plaklardan dijitalle aktarılmış) Türk müziği kayıtlarında bu yöntem her halükarda iyi sonuç vermemektedir. Ayrıca YIN algoritmasının heterofonik kayıtlarda iyi sonuçlar verememesinden ötürü bu yöntem çalışma alanlarını oldukça daraltmaktadır.

Baskın ezgi kestirimi Batı müziği için de çalışılan araştırma konularından birisidir. Salamon ve Gómes bu konu üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda etkin bir yöntem sunmuşlardır (Salamon & Gómes, 2012). Yöntemin Essentia programlama kütüphanesi (Bogdanov, ve diğerleri, 2014) içerisindeki gerçekleşmiş halinin akış şeması Şekil 5.2'de görülmektedir. Şekil içerisinde bulunan her bir kutu, Essentia programlama kütüphanesindeki fonksiyonları temsil etmektedir.

Şekil 5.2: (Salamon & Gómes, 2012)'de baskın ezgi analizi için sunulan yöntemin Essentia programlama kütüphanesi (Bogdanov, ve diğerleri, 2014) içerisindeki Python versiyonunun akış şeması



Bu yöntem pop ve caz gibi popüler Batı müziği kültürleri için uygun hale getirilmiştir (optimize edilmiştir). Yöntem, ezginin belirgin olmadığı ve müzisyenlerin sadece eşlikte bulunduğu bölgelerde (örneğin vokal veya solo bir performansın olmadığı akor çalınan yerler) baskın ezginin icra edilmediğini varsayar. Ayrıca bu yöntem, verilen her kayıt için, kullanıcının tanımlamış olduğu parametreler doğrultusunda belirlediği *pitch saliency* seviyesinin altında kalan *pitch contour* kestirimlerini ihmal eder ve o zaman aralığında

ezginin icra edilmediğini varsayar. Türk makam müziği kayıtlarında ezginin icra edilmediği zaman aralıklarının çok nadir olması ve taş plaklardan dijitala aktarılan eski kayıtların gürültü seviyelerinin, pop ve caz gibi popüler (güncel) kayıtlara göre daha yüksek olmasından ötürü bu yöntem, varsayılan parametreleriyle Türk makam müziği için yeterince iyi çalışmamaktadır.

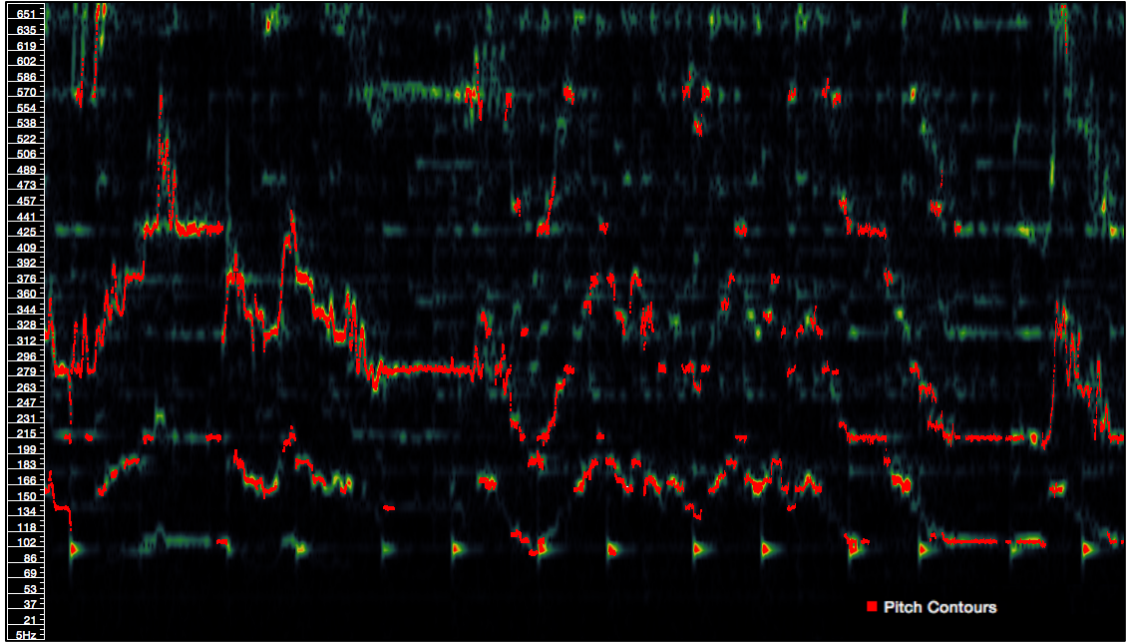
Bu yöntemin Essentia (Bogdanov, ve diğerleri, 2014) içerisinde bulunan Python programlama dili ile gerçekleştirilmiş versiyonu, Türk müziği ses kayıtları ve notaları üzerinde yapılan otomatik nota - icra eşleme (Şentürk, Holzapfel, & Serra, 2014) çalışmasında kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada, belirli parametrelerin varsayılan değerleri değiştirilerek, Türk müziği kayıtları için daha uzun *pitch contour* kestirimleri, dolayısıyla daha uzun baskın ezgi kestirimleri yapması hedeflenmiştir. Böylelikle Türk makam müziği kayıtları için daha az sessiz bölge içeren baskın ezgi kestirimleri elde edilmiştir.

Yöntemin parametrelerinin değiştirilmiş halinin, varsayılan parametrelerin kullanıldığı haline göre Türk makam müziği kayıtları için daha iyi sonuçlar vermesine rağmen, müzisyenlerin kaydın geneline göre daha düşük tuşyle icrada buldukları zaman aralıklarında hatalı sonuçlar vermeye devam ettiği gözlemlenmiştir (Atlı, Uyar, Şentürk, Bozkurt, & Serra, 2014). Bu nedenle Şekil 5.2’de belirtilen fonksiyonların “*PitchContourSelection*” aşamasına kadar olan tüm parametreleri Türk makam müziğine daha uygun hale getirilmiş ve bu müziğe özgü yeni bir “*PitchContourSelection*” fonksiyonu yazılarak baskın ezgi analizi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Atlı, Uyar, Şentürk, Bozkurt, & Serra, 2014). Bu yöntemle baskın ezgi kestirilirken “*PitchSaliencyFunction*” fonksiyonunun “*bin resolution*” parametresi²², varsayılan “10 sent” değeri yerine, Türk makam müziği için daha uygun olan “7.5 sent” değeriyle değiştirilmiştir. 7.5 sent değeri yaklaşık olarak 1/3 Holder komasına denk gelmekte ve bu farkın Türk makam müziği için dikkate alınabilir bir değişim olduğu sözlü ve yazılı kültürde sıkça ifade edilmektedir. Ayrıca *pitch salience* tepelerinin hesaplanması

²² http://essentia.upf.edu/documentation/reference/std_PitchSaliencyFunction.html

aşamasında “*peakDistributionThreshold*” parametresinin²³ varsayılan “0.9” değeri yerine “1.4”ün kullanılmasıyla yapılan gözlemlerin sonucunda, Türk makam müziği kayıtlarına daha uygun uzunlukta *pitch contour* kestirimi gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.3’te yapılan parametrizasyon sonrası “Sazlar Çalınır Çamlıcanın Bahçelerinde” adlı kayıt²⁴ için 17 ile 35’inci saniyeler arası elde edilen *pitch contour* kestirimleri kaydın spektrogramı üzerinde gösterilmiştir. Şekil Sonic Visualizer (Cannam, Landone, & Sandler, 2010) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Şeklin yatay eksenini zaman, dikey eksenini de frekans değerlerini göstermektedir.

Şekil 5.3: Analizden sonra hesaplanan *pitch contour*'lar (Kırmızı noktalar dışındaki gösterim kaydın spektrogramını ifade etmektedir.)



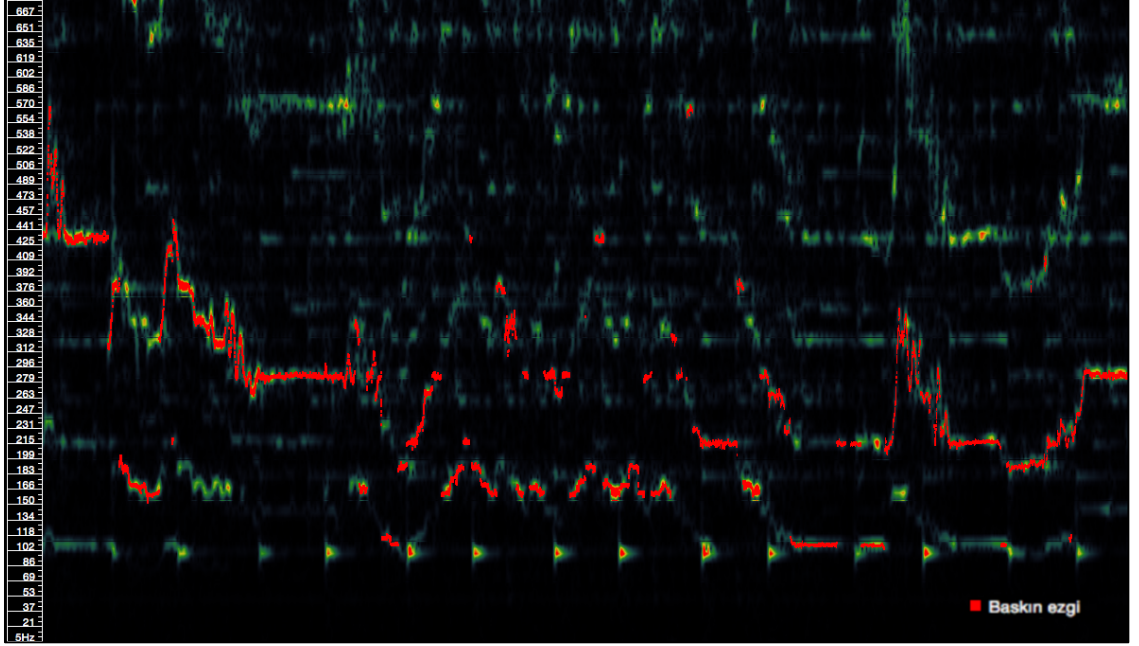
Baskın ezgi kestiriminin son adımı olan “*pitch contour*” seçimi için yazılan yeni fonksiyon, analizler sonucu elde edilen tüm *pitch contour* kestirimlerini, uzunluklarını ve enerjilerini gözönünde bulundurarak sıralar. Sıralama sonrasında en uzun *pitch contour* kestiriminden başlayarak baskın ezgi serisini (*melogram*) oluşturur. En uzun *pitch contour* kestirimi ile kesişen tüm *pitch contour* kestirimleri analizden atılır. Bu işlem, elde edilen tüm *pitch contour* kestirimleri bitene kadar devam ettirilir ve baskın ezgi kestirimi

²³ http://essentia.upf.edu/documentation/reference/std_PitchContours.html

²⁴ <http://musicbrainz.org/recording/cab08727-d5c2-4fda-9d96-d107915a85ec>

elde edilir. Şekil 5.4'te bulunan *melogram* örneğinde, seçilen bölge için hesaplanan baskın ezgi kestirimi görülmektedir. Yöntemin Python programlama dilinde gerçekleştirilmiş sürümü akademik araştırmalar için kullanıma açılmıştır²⁵.

Şekil 5.4: Yeni yöntemle elde edilen baskın ezgi analizi

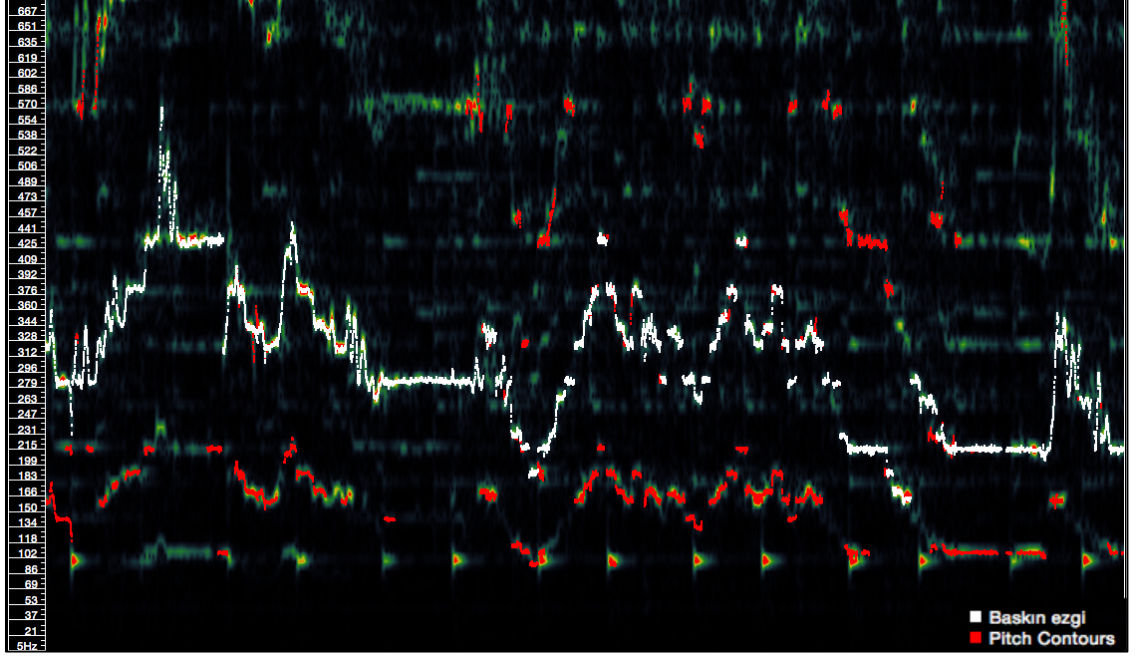


Oluşabilecek oktav hatalarını ve hatalı kestirimleri giderebilmek için (Bozkurt, 2008)'de sunulan filtreleme yöntemi, analiz sonrası elde edilen baskın ezgi kestirimine uygulanmaktadır. Bu yöntem, düşük enerji seviyesindeki örneklemleri ve görece kısa uzunlukta olan *pitch contour* kestirimlerini ezgi kestiriminden temizler. Oktav farklılıkları olan *pitch contour* kestirimlerini de önündeki ve arkasındaki daha uzun *pitch contour* kestirimleri ile kıyaslayarak oktav düzeltmelerini yapar. Son olarak filtre, hesaplanan *melogramın* ortanca değeri gözönünde bulundurularak, 4 oktavlık bölge içerisinde bir maksimum ve minimum değeri belirler. Bu değerler dışarısında kalan tüm *pitch contour* kestirimleri baskın ezgi kestiriminden temizlenir. Filtrelenmiş bir baskın ezgi örneği Şekil 5.5'te görülmektedir. Şekilde görülen kırmızı noktalar *pitch contour* kestirimlerini, beyaz noktalar *pitch contour* seçimi ve filtreleme sonrası oluşturulan baskın ezgi kestirimini temsil etmektedir. Yöntemin Python programlama

²⁵ <https://github.com/sertansenturk/predominantmelodymakam>

kütüphanesinde gerçekleştirilmiş sürümü akademik araştırmalarda kullanılabilmesi için kullanıma açılmıřtır²⁶.

şekil 5.5: Filtreleme sonrası elde edilen baskın ezgi kestirimi



Tasarlanan sistemde baskın ezgi analizi adımımda yeni geliştirilen yöntem kullanılmaktadır.

5.1.2 Frekans Dağılımları Gösterimi

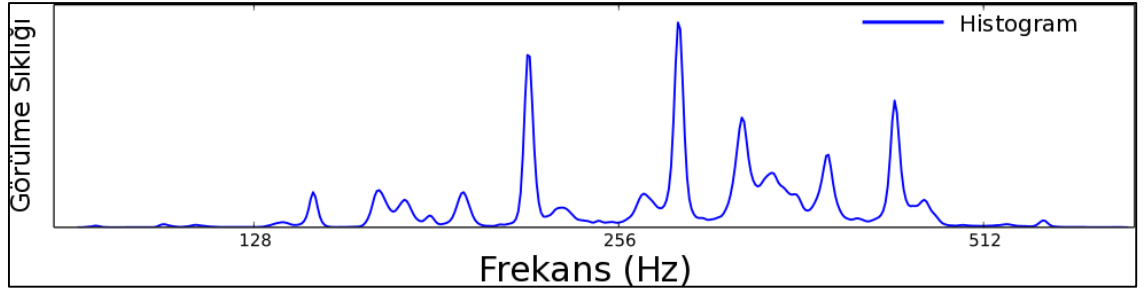
Analizi yapılan ses kaydında icra edilen perde frekanslarının bulunabilmesi için frekans gösterimi yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Frekans histogramları hem Batı müziği kültüründe hem de Batı dışı müzik kültürlerinde kullanılmaktadır.

Batı müziği için kullanılan perde - sınıf frekans histogramlarının Türk müziği için kullanışlı olmadığı (Gedik & Bozkurt, 2010)'da tartışılmıştır. Türk müziğindeki perde - kuram farklılıklarından ötürü kuramdan yola çıkılarak hazırlanan frekans histogramı gösterimlerinin ciddi veri kaybına yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu histogramlar yerine

²⁶ <https://github.com/hsercanatli/pitchfilter>

yüksek çözünürlüklü frekans histogramlarından yararlanılmasının Türk makam müziğinde kullanılan perde frekanslarının gözlemlenebilmesi için daha verimli olduğu bilinmektedir. Frekans histogramındaki tepe noktaları, o kaydın içerisinde kullanılan perde frekansları ile ilgili bilgi içermektedir (Bozkurt, 2012). Error! Reference source not found.'da “Sazlar Çalmır Çamlıca'nın Bahçelerinde” adlı kaydın²⁷ baskın ezgi analizi sonrası hesaplanan yüksek çözünürlüklü frekans histogramı görülmektedir.

Şekil 5.6: Histogram örneği



5.1.3 Karar Perdesi ve Frekansı Tespiti

Makamı oluşturan temel kavramlardan birisi karar perdesidir. Karar perdesi makam icrasının son bulunduğu perdedir. Aynı zamanda durak perdesi olarak da adlandırılır. Teorik ve yaygın bir uygulama olarak Türk müziği icraları, karar perdesinde son bulur (Akdoğan, 1989).

Türk makam müziğinde, Batı müziğinde olduğu gibi tek bir akort frekansı bulunmamaktadır. Karar perdesi, icra edilen makama ve icracının kendi yaptığı akorda bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenden ötürü karar perdesi frekansının, kullanıcıya yönelik çalışma modelinin otomatik oluşturulması esnasında tüm referans kayıtlar için doğru olarak kestirilmesi büyük önem taşımaktadır.

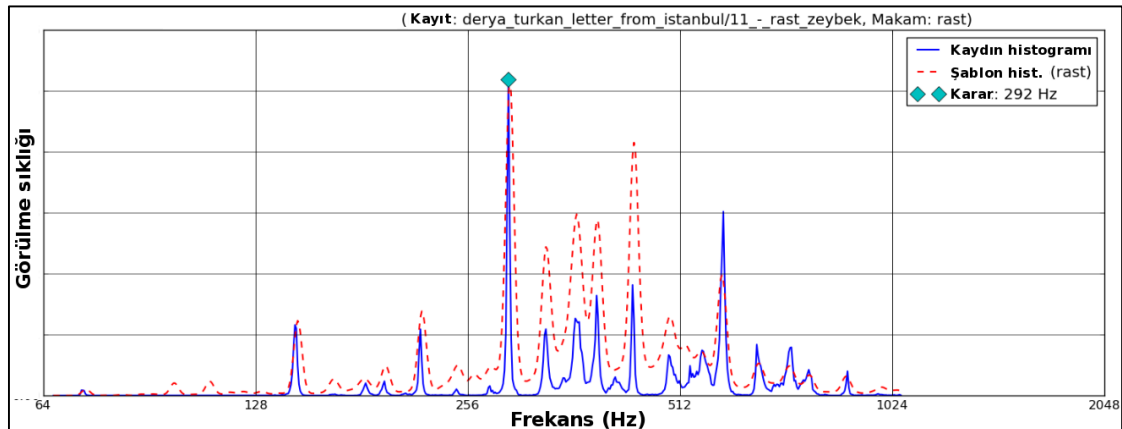
Hesaplamalı müzikoloji ve müzik bilgi erişimi alanlarında otomatik karar perdesi frekansı kestirimi problemi yaygın olarak çalışılan araştırma konularından birisidir. Frekans

²⁷ <http://musicbrainz.org/recording/cab08727-d5c2-4fda-9d96-d107915a85ec>

histogramları ve perde - sınıf frekans histogramları, karar perdesinin otomatik tespiti için yaygın olarak kullanılan ezgisel gösterimlerdendir.

Türk müziği kayıtları için (Gedik & Bozkurt, 2010)'da frekans histogramı ile otomatik karar perdesi tespiti yapan etkin bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem basitçe, makama özgü hesaplanmış şablon frekans histogramları ile sisteme verilen ses kaydının histogramını kıyaslayarak otomatik karar perdesi tespiti yapmaktadır. Karar perdesi tespiti yapılırken, histogramlardan biri diğerinin üzerinde belirli adımlarla kaydırılır ve her kaydırma işlemi için histogramlar arasındaki uzaklık hesaplanır. İki histogramın birbirine en çok yaklaştığı eşleşmeden, sisteme verilen kaydın karar perdesi, şablon makam histogramı referans alınarak otomatik olarak tespit edilir. Şablon histogramlar, kuramsal bilgilerden yola çıkılarak, aynı makamdan oluşan bir grup ses kaydının histogramlarının ortalamasının hesaplanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu yöntem ile Türk makam müziğinde en sık kullanılan 44 makamın şablon histogramları hesaplanmıştır. Yöntem, yüksek oranda doğru sonuç vermesine rağmen, makam histogramı şablonuna ve analizi istenen ses kaydının makam bilgisine gereksinim duymasından ötürü çalışma alanını kısıtlamaktadır. Şekil 5.7'de Rast makamına ait şablon histogram ile Rast makamında icra edilmiş bir kaydın²⁸ histogramının eşlendiği bir örnek görülmektedir. Şeklin yatay eksenini logaritmik olarak ölçeklendirilmiştir.

Şekil 5.7: Kaydın histogramı ve şablon histogram eşleşmesine bir örnek



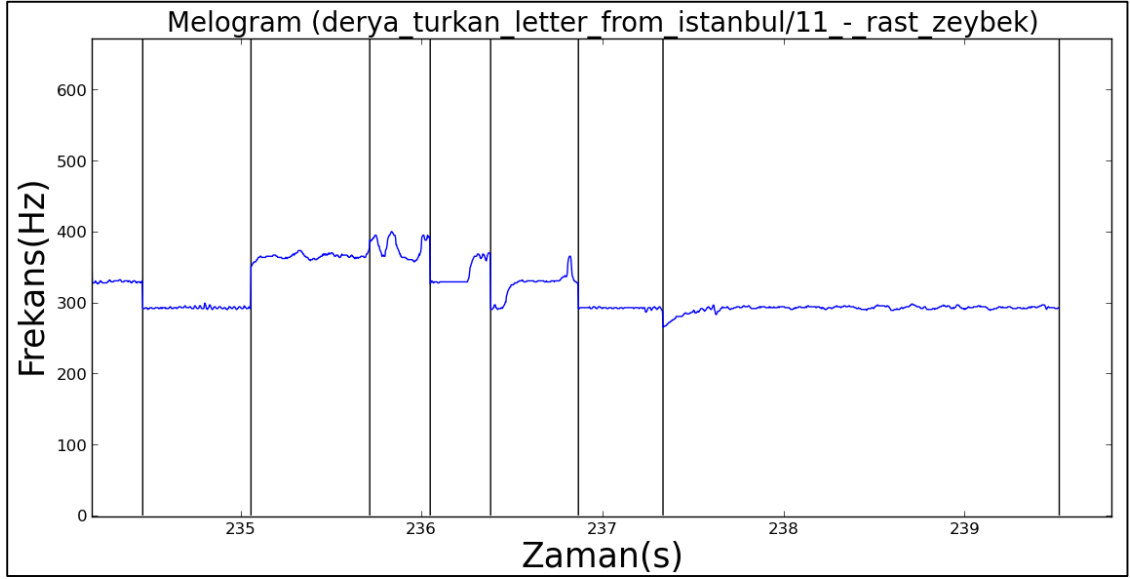
²⁸ <http://musicbrainz.org/recording/26da8cac-5757-4494-a214-25ad564fc292>

Makinece okunur müzik notası, Türk müziği için otomatik karar perdesi tespitinde yardımcı bir özellik olarak kullanılabilir. Böyle bir çalışmaya örnek, (Şentürk, Gulati, & Serra, 2013)'tür. Bu yöntem, öncelikle makinece okunur müzik notasında en çok tekrar eden kısmın ezgisini kuramsal bilgilerden yararlanarak sentezler. Daha sonra karar perdesi frekansı kestirilmek istenen ses kaydının baskın ezgi kestirimini yapar ve bu kestiriminden perde - sınıf kernel yoğunluk frekans dağılımını hesaplar. Sistem, dağılımdan elde edilen her tepe noktasını karar perdesi adayı olarak saklar. Nota içerisinde en çok tekrar edilen kısım, ses kaydı içerisinde (Şentürk, Holzapfel, & Serra, 2014)'de sunulan yöntem ile otomatik olarak bulunur ve eşlenir. Sentezlenen frekans serisi, sırasıyla her bir karar perdesi adayı "0 sent"e denk gelecek şekilde normalize edilir ve en çok tekrar eden baskın ezgi kestirimi ile kıyaslanır. Kıyaslamalar sonrasında birbirine en yakın olan eşleşmeye denk gelen tepe noktası, o kaydın karar perde frekansı olarak kestirilir. Bu yöntem yüksek oranda doğru sonuç vermesine rağmen, makinece okunur müzik notasına gereksinim duymasından ötürü, müzik notası mevcut olmayan ve taksim gibi genellikle notası bulunmayan Türk müziği kayıtları için kullanılamamasından ötürü, çalışma alanını daraltmaktadır.

Makam müziği performanslarının karar perdesi icra edilerek bitirilmesi yaygın bir alışkanlıktır (Akdoğan, 1989). Bu müzikal bilgiyi kullanarak Türk müziği kayıtları için otomatik karar perdesi kestirimi yapan bir yöntem (Atlı, Bozkurt, & Şentürk, 2015)'te sunulmuştur. Yöntem, karar perdesi frekansı tespit edilmesi istenen ses kaydındaki icranın karar perdesi ile bittiğini varsayar. Yöntemin akış şeması Şekil 5.9'da görülmektedir. Yöntem ilk olarak verilen ses kaydının baskın ezgi kestirimini yapar. Daha sonra elde edilen *melogramı*, icra edilen son notayı bulabilmek için parçalara böler. Şekil 5.8'de "Rast Zeybek" kaydında²⁹ icra edilen son notayı bulabilmek için yapılan bölütleme sonrası 234 ile 240'nci saniyeler arasındaki *melogram* görülmektedir. Şekilde görülen siyah dikey çizgiler, ezgi parçalarının sınırlarını belirtmektedir.

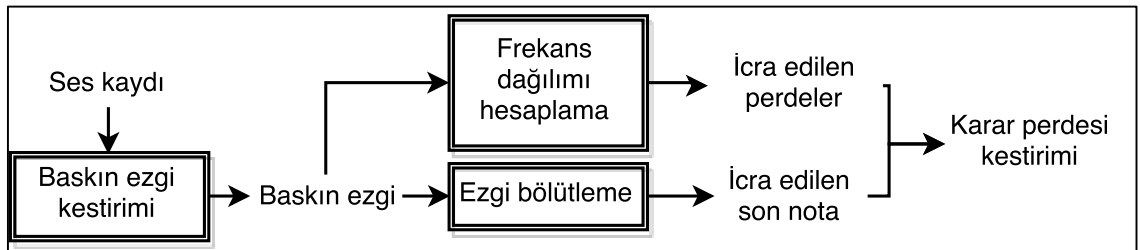
²⁹ <http://musicbrainz.org/recording/26da8cac-5757-4494-a214-25ad564fc292>

Şekil 5.8: Bölütlenmiş bir baskın ezgi örneği



Bölütleme işleminin bitiminden sonra elde edilen son parça içerisinde karar perdesinin icra edildiği varsayılır. Son ezgi parçasının ortanca değeri hesaplanır ve kestirimin yapılabilmesi için tutulur. Baskın ezgi kestirimden sonra yöntem Türk müziği kaydının frekans histogramını hesaplar. Kaydın içerisinde icra edilen perde frekansları, histogramın tepe noktalarından kestirilir. Son olarak ortanca değeri hesaplanan son ezgi parçasının en yakın olduğu tepe noktası, o kaydın karar perdesi olarak kestirilir. Bölüm 6.2’de yapılan deneyler sonucunda yöntemin %84 oranında karar perdesi frekansını doğru olarak kestirdiği gösterilmiştir. Yöntem, ses kaydı dışında herhangi ek bir bilgiye veya özelliğe gereksinim duymadığından ötürü, Türk makam müziği kayıtları için diğer yöntemlere oranla daha geniş bir çalışma alanında kullanılabilir.

Şekil 5.9: Son nota ile karar perdesi kestirimi akış şeması

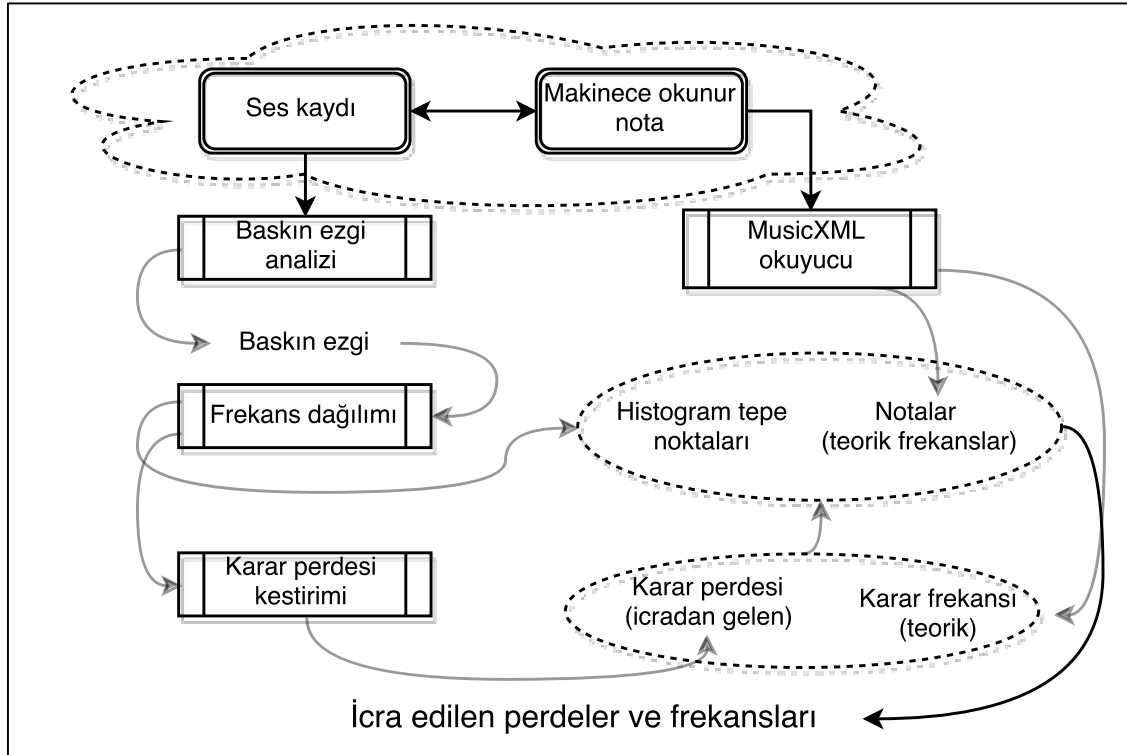


Tasarlanan sistemde karar perdesinin frekansının otomatik kestirimi için son nota üzerinden karar perdesi kestirimi yapan yöntemin kullanılması tercih edilmiştir. Yöntemin Python programlama dilinde gerçekleştirilmiş sürümü akademik araştırmalarda kullanılabilirlik üzere kullanıma açılmıştır³⁰.

5.1.4 İcra Edilen Perdelerin ve Frekanslarının Tespiti

Karar perdesinin otomatik kestiriminden sonra histogramın tepe noktalarına denk gelen perdelerin neler olduğunun tespiti için yeni bir araç geliştirilmiştir. Araç, önceden hazırlanmış bir tablo yardımıyla, karar perdesi kestirimi yapılmış Türk müziği kaydında seslendirilen perdelerin adlarını ve denk geldikleri frekanslarını makinece okunur nota yardımı ile otomatik olarak kestirebilmek için geliştirilmiştir. Aracın akış şeması Şekil 5.10'da görülmektedir.

Şekil 5.10: Seslendirilen perdelerin tespiti için tasarlanan aracın akış şeması

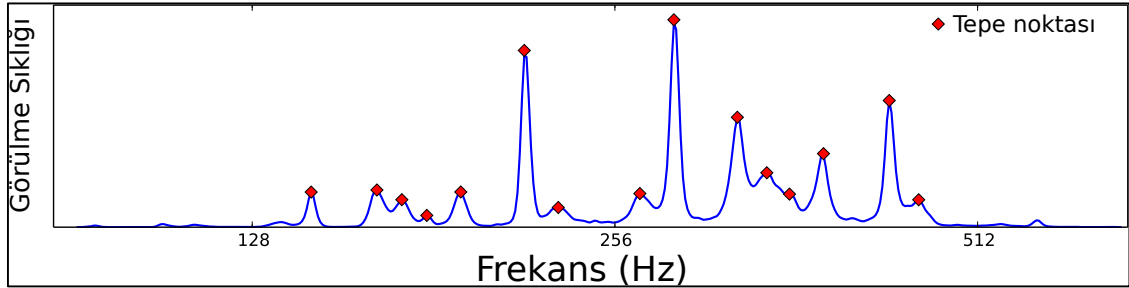


³⁰ https://github.com/hsercanatli/tonicidentifier_makam

Araç, öncelikle makinece okunur notada bulunan tüm notaları okur. Elde edilen notalar, önceden hesaplanmış bir frekans tablosuyla eşleştirilir. Bu frekans tablosu, SymbTr notalarından gelen 53 ton-eşit-taksimat sütunundaki değerler (C-1 notası 0 Hz'e denk gelecek şekilde, tüm notalar için tanımlanan Holder koması cinsinden uzaklıklar) kullanılarak hesaplanmış frekans değerlerinden oluşmaktadır. İlk adımda eldeki notalar, frekans tablosundaki değerlerle otomatik olarak eşleştirilir. Perdeleri eşleştirmek için gerekli olan ve kuramdan gelen karar perdesi frekansı, makinece okunur nota içerisindeki en son notaya tabloda karşı gelen frekansı olarak atanır.

Ses kaydının öncelikle baskın ezgi kestirimi yapılır. Sonrasında frekans histogramı hesaplanır ve icra edilen son notadan karar perdesi kestirimi yapılır. Frekans histogramında bulunan tüm tepe noktalarının frekansları hesaplanır. Şekil 5.11'de tepe noktaları işaretlenmiş bir frekans histogramı görülmektedir.

Şekil 5.11: Tepe noktaları hesaplanmış bir histogram örneği



Kuramdan gelen karar perdesi frekansının ve kaydın analizi ile elde edilen karar perdesi frekansına oranı, bu değerler birbirlerine bölünerek hesaplanır. Tablodan eşlenen nota frekansları, hesaplanan bu oranla çarpılır ve kaydın analizi ile elde edilen tepe noktalarına yaklaştırılır. Yaklaştırılan her bir tepe noktası da, kaydın histogramından elde edilen en yakın tepe noktasıyla eşleştirilmeye çalışılır. Yaklaştırılan tepe noktası, kaydın histogramından gelen en yakınındaki tepe noktasına 2 Holder komalık bir aralık içerisinde kalabiliyorsa, kaydın histogramından gelen tepe noktası, kıyaslanan notanın icra edildiği frekans olarak atanmaktadır. Araç, eğer 2 Holder komalık aralık içerisinde bir tepe noktası bulamazsa, kıyasladığı frekans değerinin alt ve üst oktavlarında da aynı işlemi yaparak tepe noktasını eşlemeye çalışmaktadır. Kıyaslanan frekans değeri için alt

ve üst oktav değerlerinde de bir tepe noktası bulunamazsa, o perde için en başta atanan frekans değerinin oranlanmış hali perde frekansı olarak atanır.

Tablo 5.1’de “Sazlar Çalınır Çamlıca’nın Bahçelerinde” adlı kaydın³¹ frekans tablosundan gelen ve kaydın histogramından eşlenen nota frekans değerleri ve adları görülmektedir. Histogram tepeleriyle eşleşen notalar için tabloda görülen “Tablodan oranlanmış frekans değerleri” sütununda herhangi bir frekans değeri bulunmamaktadır. Çünkü o notaların frekans değerleri, frekans histogramı yardımıyla bulunabilmiştir.

Tablo 5.1: Nota frekans tablosu

Nota	Notadaki görülme sıklığı (%)	Tablodan gelen frekans değerleri (Hz)	Histogram tepeleri (Hz)	Tablodan oranlanmış frekans değerleri (Hz)
G4	0,89	391	190,69	-
A4 (Karar)	8,99	440	215,28	-
B4b4	4,19	469	229,74	-
C5#4	6,09	549	268,51	-
D5	19,08	586	286,54	-
E5	15,38	659	323,49	-
F5	9,69	695	342,23	-
F5#4	4,29	732	357,39	-
G5	9,09	782	381,38	-
G5#4	1,49	824	-	403,17
A5	13,28	880	432,44	-
B5b4	4,09	939	457,49	-
B5	0,19	989	-	483,90
C6#4	0,19	1099	-	537,72
D6	0,1	1173	-	573,93

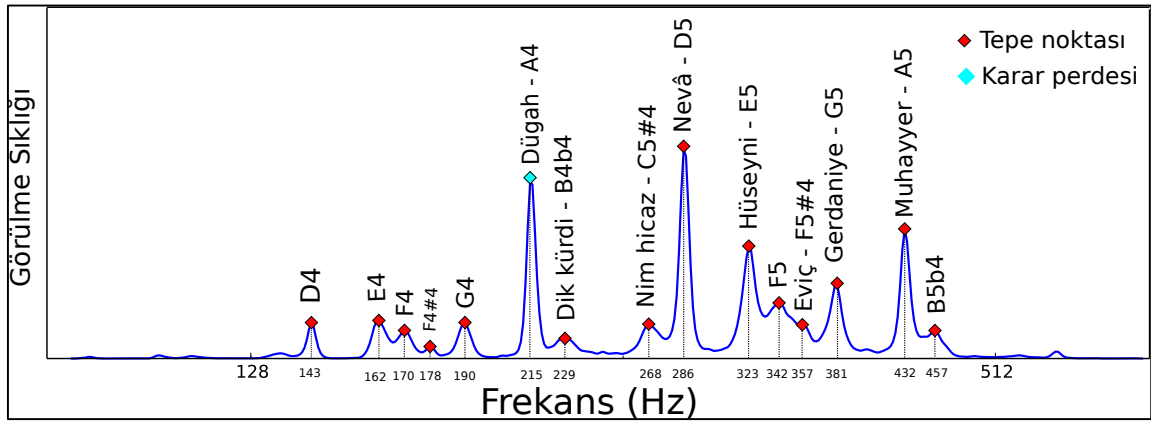
³¹ <http://musicbrainz.org/recording/cab08727-d5c2-4fda-9d96-d107915a85ec>

Frekans histogramından gelen herhangi bir tepe noktası ile eşleşemeyen notalar için hesaplanan frekans değerleri, tabloda bulunan “Tablodan oranlanmış frekans değerleri” sütununda görülmektedir. Eşleşme sonrasında elde edilen frekans histogramı ve tepe noktalarına denk gelen perde adları Şekil 5.12’de görülmektedir.

Sistem G5#4, B5, C6#4 ve D6 hariç tüm notaları kaydın histogramındaki tepelere eşleyebilmiştir. Sıklığı az olan bu notaları ise kaydın histogramı içerisinde bulamamış, oranlanan kuramsal frekansı notaya atamıştır. G4 notası da sık görülmemiş olmasına rağmen, 2 Holder koması tolerans aralığında, bir üst oktavındaki G5 notası ile eşleşebilmiştir.

Bilgisayar ile yapılan işlemlerde sorun yaşanmaması için (Karaosmanoğlu, A Turkish makam music symbolic database for music information retrieval: SymbTr, 2012)’de kullanılan perde adlandırılmaları kullanılmaktadır. Tasarlanan araç, akademik araştırmalarda kullanılabilmesi için paylaşımına açılmıştır³².

Şekil 5.12: Histogram ve icra edilen perdeler



³² <https://github.com/hsercanatli/adaptivetuning>

5.2 MAKİNECE OKUNUR NOTALAR İÇİN GELİŞTİRİLEN VE KULLANILAN YÖNTEMLER

Makinece okunur nota ile ilgili işlemlerin yapılabilmesi için geliştirilen araçlar sırasıyla Bölüm 5.2.1’de MusicXML okuyucu, 5.2.2’de nota sentezleyici ve Bölüm 5.2.3’te nota görselleştirici olmak üzere üç alt başlıkta anlatılmıştır.

5.2.1 MusicXML Okuyucu

Veri kümesi içerisinde MusicXML formatında bulunan müzik notalarını okuyabilmek için tez kapsamında bir araç geliştirilmiştir. Araç, üç ana aşamada veri kümesinde bulunan MusicXML notalarından, sistem için gerekli olan tüm bilgileri otomatik olarak almaktadır. Aşamalar sırasıyla: meta-verileri okuma, tempo ve donanım bilgilerini çıkarma ve son olarak notaları okuma olarak tasarlanmıştır.

Araç, öncelikle Türk müziği MusicXML’leri içerisinde bulunan ve SymbTr notalarına has olan eser adı, besteci, varsa güfte yazarı gibi meta-verileri alır. Daha sonra kültüre özgü olan makam, usul ve form meta-verilerini okur. Bu bilgiler, sonraki aşamalardan birisi olan nota görselleştirilmesinde kullanılmak üzere saklanır.

İkinci adım olarak araç, müzik notasının tempo ve donanım bilgilerini çıkarır. Donanım arızalarının ve tempo bilgisinin elde edildiği bu adımdaki bilgiler, notayı sentezleme ve görüntüleme aşamasında kullanılmak üzere saklanır. Ayrıca tempo bilgisinden elde edilen oranlar sayesinde, okunacak olan notaların süreleri de hesaplanmaktadır.

Son olarak araç, MusicXML içerisinde bulunan tüm notaları ilk ölçüden başlayarak son ölçüye kadar okumaktadır. İlk özellik olarak notanın süsleme olup olmadığına bakar. Süsleme olan notalar, nota sentezinde ve perde frekansı bulma işlemlerinde kullanılmayacağı için ayrı bir yerde saklanır. Okunan nota süsleme ise, sonrasında süslemenin çeşidine, varsa uzunluğuna ve perde değerlerine bakılır. Tüm özellikler nota için çıkarılır ve saklanır.

Normal notaların okunması üç aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalarda sırasıyla perdesel, ritmik ve sözel özellikleri çıkartılır. İlk olarak, okunan notanın perde özelliklerine bakılır. Perde bilgisi olarak bulunduğu oktav ve varsa arıza bilgisi okunur. Sonrasında ritmik özellik olan notanın uzunluğu, *tuplet* olup olmadığı veya noktalı nota olup olmadığına bakılır. Son olarak, notaya denk gelen hece yada sözcük varsa bu çıkarılır ve saklanır. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasıyla birlikte Türk müziği MusicXML notası okunmuş ve sistem içerisindeki algoritmalarca işlenebilir hale gelmiş olur.

5.2.2 Nota Görselinin Oluşturulması

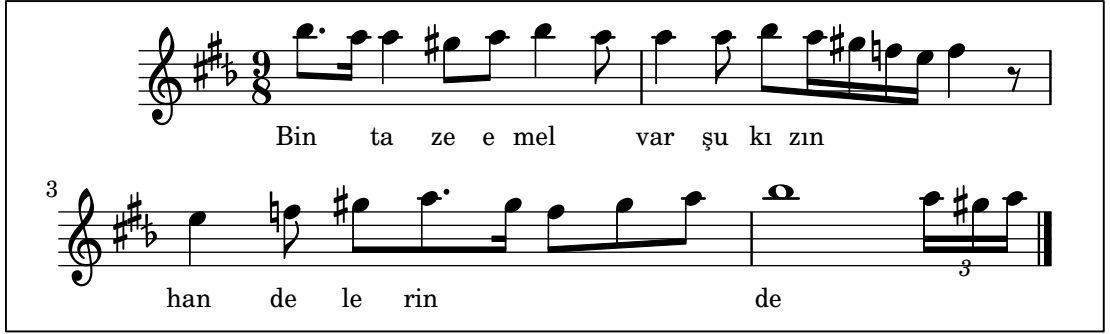
Notaların otomatik olarak görsel dönüşebilmesi için sistem tasarımında Lilypond tercih edilmiştir. Lilypond Türk müziği notasyonunu desteklemesi, ücretsiz bir yazılım olması ve komut yoluyla nota görselleri oluşturabilme imkanı sunmasından ötürü, tasarlanan çalışma sisteminde nota görsellerini oluşturmak için yeğlenmiştir. Şekil 5.13'te Türk müziğine özgü olan değiştirici işaretlerin (arızaların) Lilypond ile oluşturulmuş örnek bir gösterimi bulunmaktadır.

Şekil 5.13: Lilypond ile Türk müziği arızalarının gösterimine bir örnek



Lilypond, belirli kurallar çerçevesinde yazılan komutları otomatik olarak nota görseline çevirmektedir (Nienhuys & Nieuwenhuizen, 2003). Sistemin veri kümesine seçilen notaların görsellerinin otomatik olarak oluşturulması için yazılan araç, MusicXML okuyucu sonrası elde edilen tüm notaları Lilypond'un görsel çevirebileceği komutlar bütününe dönüştürmektedir. Şekil 5.14'te MusicXML'den otomatik olarak görselleştirilmiş bir nota parçası görülmektedir.

Şekil 5.14: Otomatik oluşturulmuş bir nota görseli örneği



Tasarlanan araç aynı zamanda, MusicXML içerisindeki notaların, oluşturulan görsellerde hangi noktaya denk geldiğini de otomatik olarak bulmaktadır. Bu sayede, ses kaydı – nota eşleşmesi ve sentez ezgi – nota eşleşmesi gibi özellikler kullanıcıya sunulabilmektedir.

Tasarlanan araç, akademik araştırmalarda kullanılabilmesi için paylaşımına açılmıştır³³.

5.2.3 Nota ve Çalışma Materyali Sentezi

Sembolik veriler ile çalışma materyallerinin kullanıcıya sunulabilmesi için veri kümesinde bulunan makinece okunur müzik notalarının seslendirilmesi gerekmektedir.

Batı müziği için sentez araçları ve programlama kütüphaneleri oldukça yaygındır. Sistemin tasarlandığı Python programlama dilinde Batı müziği (12 ton-eşit-taksitmat) için tasarlanmış açık kaynak kodlu sentez kütüphaneleri bulunmaktadır.

PySynth³⁴ kütüphanesi Python ile geliştirilmiş, açık kaynak kodlu bir ses sentezleme kütüphanesidir. Kütüphane iki farklı türde ses sentezleyebilmektedir. Bunlardan birincisi doğuşkanları olan sinüs sentezidir. Bu ses, doğuşkanlara sahip olmasından ötürü normal bir sinüs sentezine göre daha iyi tınlamaktadır. Ötekisi ise Kaplus-Strong algoritması (Jaffe & Smith, 1983) ile sentezlenen sestir. Sentez sonucu elde edilen ses, telli enstrüman tınısı yaratmaktadır. PySynth kütüphanesi, harici programlama kütüphanelerine

³³ <https://github.com/hsercanatli/makam-musicxml2lilypond>

³⁴ <https://mdoege.github.io/PySynth>

gereksinim duymamasından ötürü kullanışlıdır. Ayrıca çalışma hızı, diğer kütüphanelere kıyasla daha yüksektir. Açık kaynak kodlu olması ve GPL ile lisanslandırılmasından ötürü, kaynak kodunda değişiklik yapılabilmesini mümkün kılar. Ancak bu kütüphane de varsayılan haliyle mikrotonal sentez yapamamakta ve 12 ton-eşit-taksimat sistemine uygun çalışmaktadır.

Türk makam müziği mikrotonal bir yapıdadır ve sabit bir referans frekansa sahip değildir. O nedenle, bu müziğe uygun sentezcinin sentezleyebildiği frekans tablosunun değişken olması ve her sentez işlemi için tekrar hesaplanabilme esnekliğine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenlerden ve var olan sentezcilerin mikrotonal aralık gereksinimi karşılamamasından ötürü, tez kapsamında yeni bir sentezci geliştirilmiştir. Sentezci, PySynth kütüphanesinin kaynak kodu kullanılarak yapılmıştır. Temelde PySynth kütüphanesine mikrotonal aralıkları sentezleyebilme özelliği eklenmiştir. Ayrıca farklı frekans tablolarıyla çalışabilme esnekliği de sağlanmıştır. Bu özellik sayesinde, eldeki notalar, istenilen bir ses kaydının entonasyonu ile sentezlenebilmektedir. Böylelikle, veri kümesinde bulunan referans kayıtların entonasyonları ile müzikal aralık çalışma setleri hazırlanabilir ve veri kümesinde bulunan makinece okunur notalar, seçilen referans kaydın entonasyonuna göre sentezlenebilir duruma gelmiştir. Aynı zamanda kütüphane, herhangi bir entonasyon tercihinde bulunulmadığında, varsayılan frekans tablolarıyla da sentez yapabilmektedir. İçerisinde 53 ton-eşit-taksimat için hazırlanmış bir frekans tablosu bulunmaktadır. Yapılan iyileştirmelerle birlikte yeni geliştirilen kütüphane, PySynth kütüphanesine kıyasla daha hızlı çalışmaktadır. Geliştirilen araç, akademik araştırmalar çerçevesinde kullanılabilmesi için paylaşımına açılmıştır³⁵.

5.2.4 Nota - İcra Eşleştirme

Ses kayıtları ile notaların otomatik eşleştirilmesi aşamasında, Türk makam müziği için bu amaçla geliştirilmiş bir yöntem kullanılmıştır (Şentürk, Gulati, & Serra, 2014) (Şentürk, Holzapfel, & Serra, 2014). Yöntem, bölüm/hane bilgileri (bölümlerin/hanelerin başlangıç ve bitiş notaları) işaretlenmiş makinece okunur Türk müziği notası ile notayla ilgili kaydı

³⁵ <https://github.com/hsercanatli/adaptivetuning/tree/master/adaptivetuning/synthesizer>

girdi olarak kullanır. Yöntem öncelikle verilen kaydının baskın ezgi analizini yapar. Sonra notada işaretli olan bölüm ve hanelerin sentez ezgilerini hesaplar. Sentezlenen ezgilerdeki aralıkların tümü, notadan gelen karar perdesi 0 sent'e denk gelecek şekilde AEU ses sistemi kullanılarak hesaplanır. Ardından sıra ses kaydının karar perde frekansının hesaplanmasına gelir. Baskın ezgi, karar frekansı 0 sent'e denk gelecek şekilde yeniden hesaplanır. Ses kaydından ve makinece okunur notadan çıkarılan özelliklerin yardımıyla kurulan benzerlik hesaplamaları sonucunda notadaki bölümler ve haneler, ses kaydı içerisindeki yerleriyle otomatik eşleşir. Bölümlerin ve hanelerin yerlerinin hesaplanmasının ardından nota düzeyinde eser - icra eşleştirmesi yapılır. Böylelikle kayıt ile icra arasındaki eşleştirme nota düzeyinde tamamlanmış olur. Yöntem tez kapsamında tekrar gerçekleştirilmemiş, hazırda olan uygulaması³⁶ aracılığıyla veri kümesindeki nota ve kayıtlar için eşleştirilme yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları, programın veri kümesinde tutulmaktadır.

36

<https://github.com/sertansenturk/tomato/blob/52d3da09c11282254d96ae28655ef829802c5397/tomato/joint/jointanalyzer.py>

6. BULGULAR

Tez kapsamında baskın ezgi kestirimi ve otomatik karar perdesi frekansı kestirimi problemleri için geliştirilen yeni yöntemlerin verimliliklerini ölçebilmek için deneyler yapılmıştır. Bu bölümde deneylerin yapılabilmesi için derlenen deney veri kümeleri, deney düzenekleri ve sonuçları anlatılmaktadır.

6.1 BASKIN EZGİ ANALİZİ DEĞERLENDİRMESİ

Bu kısım, tez kapsamında geliştirilen baskın ezgi analizi yönteminin değerlendirilebilmesi için oluşturulan veri kümesi ve deney düzeneği ile ilgilidir. Deney için kayıtlardan ve müzik notalarından oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur. Oluşturulan veri kümesi Bölüm 6.1.1’de anlatılmaktadır. Deneyin düzeneği, sonuçları ve değerlendirmesi ise Bölüm 6.1.2’dedir.

6.1.1 Verilerin Oluşturulması

Yöntemin değerlendirilebilmesi için CompMusic-makam veri kütüphanesinde notası mevcut olan 14 eserin 18 icrası seçilmiştir³⁷. Deney kapsamında seçilen kayıtlarının tamamı değil, bir bölüm/hane icra edilmiş kısımları kullanılmıştır. Kayıtlarla ilgili kültürel (makam, usul, form) bilgiler, meta-veriler (beste, besteci, icracı, albüm) ve deney için seçilen bölüm/hane bilgileri Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de bulunmaktadır. Deney veri kümesi monofonik ve heterofonik icralardan oluşmaktadır. İçerisinde koro, orkestral ve solo icralar bulunmaktadır. Tablo 6.1’nin son sütununda bulunan referans numaralar, Tablo 6.2’te bulunan kayıtlarla eserlerin eşlenebilmesi için verilmiştir.

Kayıtların seçiminden sonra deneyin yapılabilmesi için ses kayıtları üzerinde işaretlemeler yapılmıştır. Kayıtlarda öncelikle, deneyde kullanılmak için seçilen

³⁷ Deney veri kümesinin hazırlanması aşamasındaki kayıt ve bölüm/hane seçimleri Sertan Şentürk tarafından yapılmıştır.

bölümlerin/hanelerin yerleri bulunmuştur. Sonra da ses kayıtlarından bölümlerin/hanelerin icra edildiği bölgeler alınmıştır. Sonic Visualizer (Cannam, Landone, & Sandler, 2010) programı kullanılarak kayıtlardaki ilgili bölümlerin görüngen resimleri (*spectrogram*) hesaplanmıştır. Seçilen bölüm/hane içerisinde icra edilen notalar hesaplanan görüngen resimleri üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 6.1’de nota işaretlemesi yapılmış örnek bir eser görülmektedir. Şeklin yatay eksenini zamanı, dikey eksenini de frekansı göstermektedir. Şekilde görülen beyaz kutular, işaretlenen notaları anlatmaktadır. Notaların uzunlukları ve frekans değerleri icraya göre işaretlenmiştir. Bu şekilde 18 kayıt için yaklaşık olarak 1000 nota işaretlenmiştir.

Ayrıca seçilen ses kayıtlarının tümünün baskın ezgi kestirimleri deneyin yapılabilmesi için Bölüm 5.1.1’de anlatılan yöntemle hesaplanmış ve test veri kümesine eklenmiştir. Seçilen kayıtların tümü 44100 örnek/saniye sıklığında örnekleştirilmiştir. Baskın ezgi kestirimi için her 128 örneklemede 1 frekans kestirimi yapılmıştır. Bu da yaklaşık olarak her 3 milisaniyede bir frekans kestirimine denk gelmektedir.

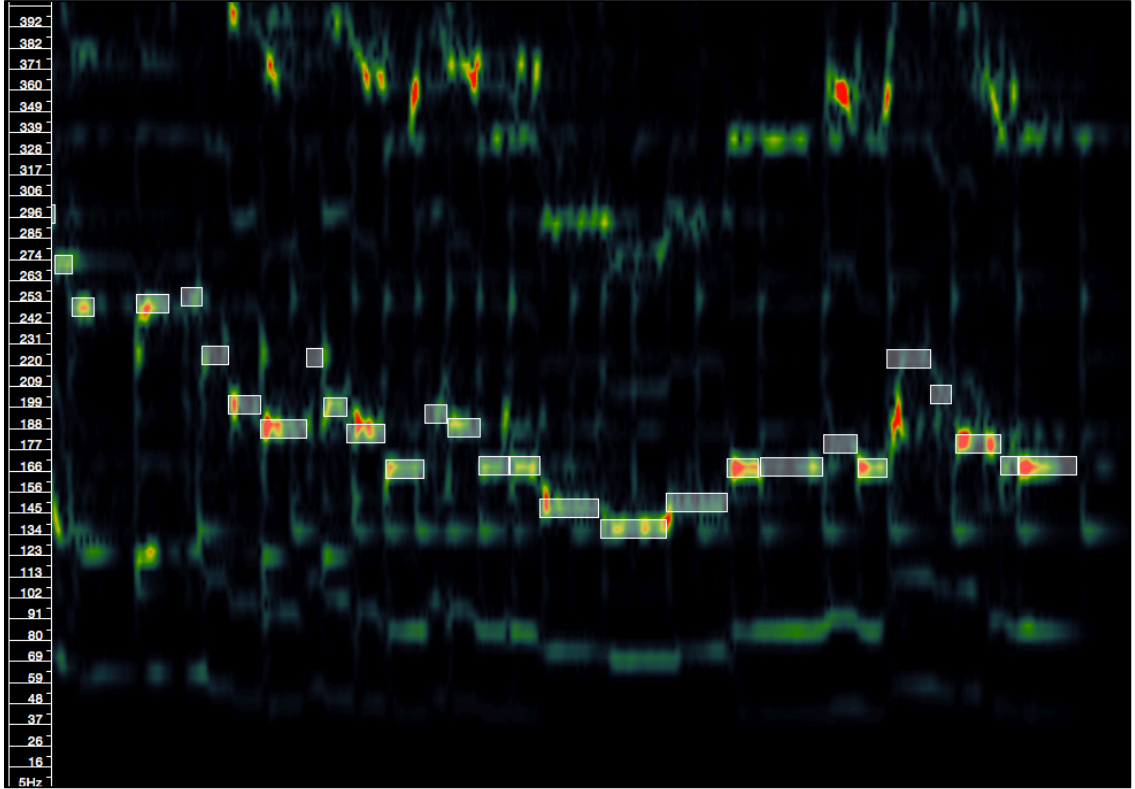
Tablo 6.1: Baskın ezgi kestirimi deney veri kümesindeki eserler

Beste	Besteci	Seçilen Bölüm/Hane	Referans #
Beyati Peşrev	Seyfettin Osmanoğlu	1. Hane	1
Bir Nigah Et	Şekerci Cemil Bey	Zemin	2
Ülfet etsem yâr ile ağyare ne	Şevki Bey	Nakarat 1	3
Hicazkar Sazsemaisi	Tanburi Cemil Bey	1. Hane	4
Hüseyini Peşrev	Lavtacı Andon	Teslim	5
Bekledim Yıllarca Lakin	Rakım Elkutlu	Nakarat 2	6
Muhayyer Sazsemaisi	Tanburi Cemil Bey	Teslim	7
Varsın Gönül Aşkınla Harab Olsun	Lem'i Atlı	Zemin 2 ve Nakarat 1	8
Rast Peşrev	Giriftzen Asım Bey	Teslim	9
Bu Akşam Ay Işığında	Safiye Ayla	Zemin	10
Segâh Peşrev	Neyzen Yusuf Paşa	1. Hane	11
Segah Sazsemaisi	Osman Dede	1., 2. Hane ve teslim	12
Yandıkça Oldu Suzan	Tanburi Ali Efendi	Nakarat 1 ve Nakarat 2	13
Uşşak Sazsemaisi	Neyzen Salih Dede	Teslim	14

Tablo 6.2: Deney veri kümesi için seçilen icralar

Eser ref #	Albüm	İcracı	Makam	Form	Kayıt ref #
1	Rahmi Bey	A.D.K.T.M.K.	Beyati	Peşrev	1
2	Youtube videosu	Kani Karaca	Hicaz	Şarkı	2
3	Kani Karaca	Kani Karaca	Hicaz Uzzal	Şarkı	3
4	Murat Aydemir	Murat Aydemir	Hicazkar	Sazsemaisi	4
5	Rum Bestekârlar	Orkestra	Hüseyini	Peşrev	5
6	Klasikler - 2	B. Sıdkı Sezgin	Hüzzam	Şarkı	6
7	Klasik Osmanlı Saray Müzikleri	Orkestra	Muhayyer	Sazsemaisi	7
7	Ney ile icra edilmiş saz eserleri	Salih Bilgin	Muhayyer	Sazsemaisi	8
8	Arşiv Serisi	Safiye Ayla	Nişaburek	Şarkı	9
9	Osmanlı'dan Bugüne Türk Musikisi-Tanbur	Hulusi Babalık	Rast	Peşrev	10
9	Ney ile icra edilmiş saz eserleri	Salih Bilgin	Rast	Peşrev	11
10	Arşiv Serisi	Safiye Ayla	Saba	Şarkı	12
11	Klasik Osmanlı Saray Müzikleri	Orkestra	Segah	Peşrev	13
12	Lalezar	Lalezar	Segah	Sazsemaisi	14
12	Turquie L'art Du Tanbur	Talip Özkan	Segah	Sazsemaisi	15
13	Klasikler 2	B. Sıdkı Sezgin	Suzidil	Şarkı	16
14	Ney ile icra edilmiş saz eserleri	Salih Bilgin	Uşşak	Sazsemaisi	17
14	Osmanlı'dan Bugüne Türk Musikisi-Tanbur	Hulusi Babalık	Uşşak	Sazsemaisi	18

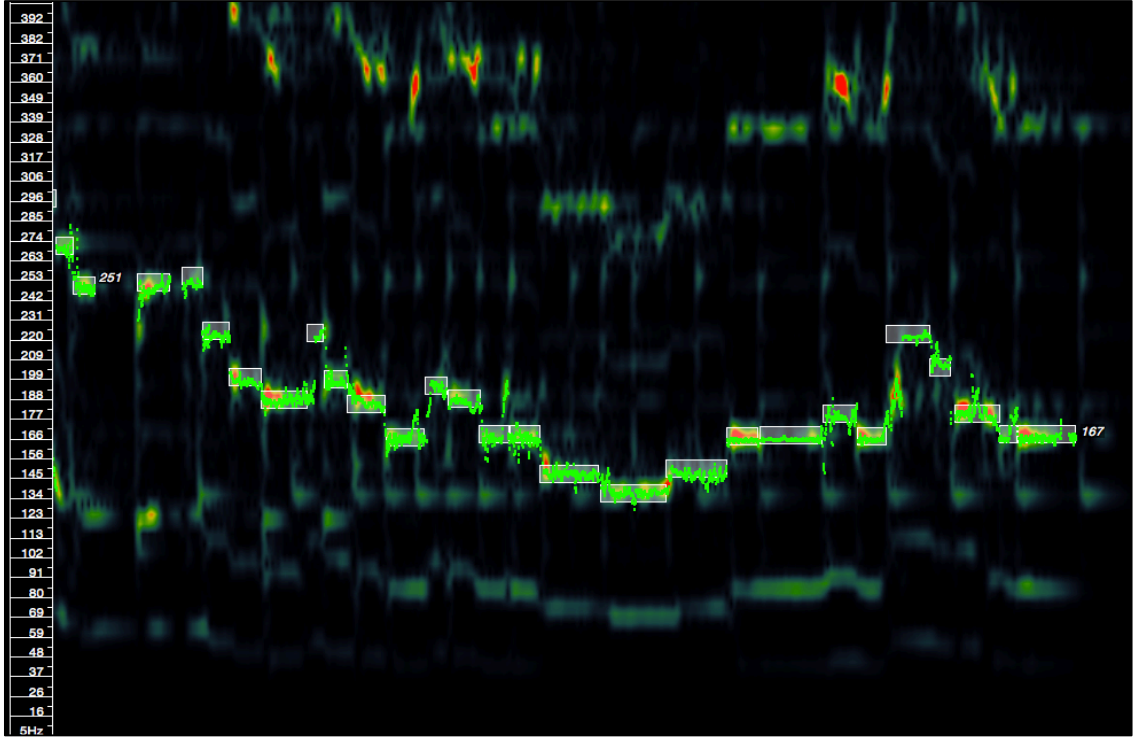
Şekil 6.1: Nota işaretlemesi yapılmış bir örnek



6.1.2 Deney ve Değerlendirme

Baskın ezgi kestiriminin değerlendirilmesi için bir deney yapılmıştır. Seçilen 18 kayıt içerisinde işaretlenen her notanın başlangıç noktaları, bitiş noktaları ve işaretlenen frekans değerleri bir dosya içerisinde tutulmuştur. Hesaplanan baskın ezgi kestirimlerinin, notalar referans alınarak icralar üzerinde yapılan işaretlemelerin içerisine belirli bir tolerans aralığında denk gelip gelmediğine bakılmıştır. Tolerans aralığı için 1 tam ses (9 Holder koması) seçilmiştir. Bu değer, icracıların yapacağı süslemeler gözönünde bulundurularak seçilmiştir. Notaların işaretlendiği zaman aralıkları içerisinde kestirilen tüm frekans değerleri için bu işlem yapılmıştır. Şekil 6.1'de görülen işaretlemeler üzerine, hesaplanan baskın ezgi kestiriminin çizdirilmiş hali Şekil 6.2'de görülmektedir. Şekil üzerindeki beyaz kutular nota işaretlemelerini, yeşil noktalar da baskın ezgi kestirimini anlatmaktadır. Dikey eksen frekans eksenini, yatay eksen de zamanı göstermektedir.

Şekil 6.2: Nota işaretlemeleri ve baskın ezgi kestirimi



Baskın ezgi analizinin değerlendirilebilmesi için yapılan çalışmada, sadece eserlerin içerisinde bulunan notaların yerleri ve frekansları görsel olarak bir bölgede işaretlenmiştir. İşaretlemeler içerisinde müzisyenlerin ekledikleri süslemeler veya ek notalar bulunmamaktadır. Dolayısıyla elimizdeki işaretlemeler, mutlak doğru değerler değildir. Baskın ezgi kestirimlerinin değerlendirilmesi esnasında, kestirilen frekansların yapılan işaretlemelerle ne kadar örtüştüğü hesaplanmıştır. Ancak bu oranlar, mutlak başarı olarak değerlendirilmemelidir.

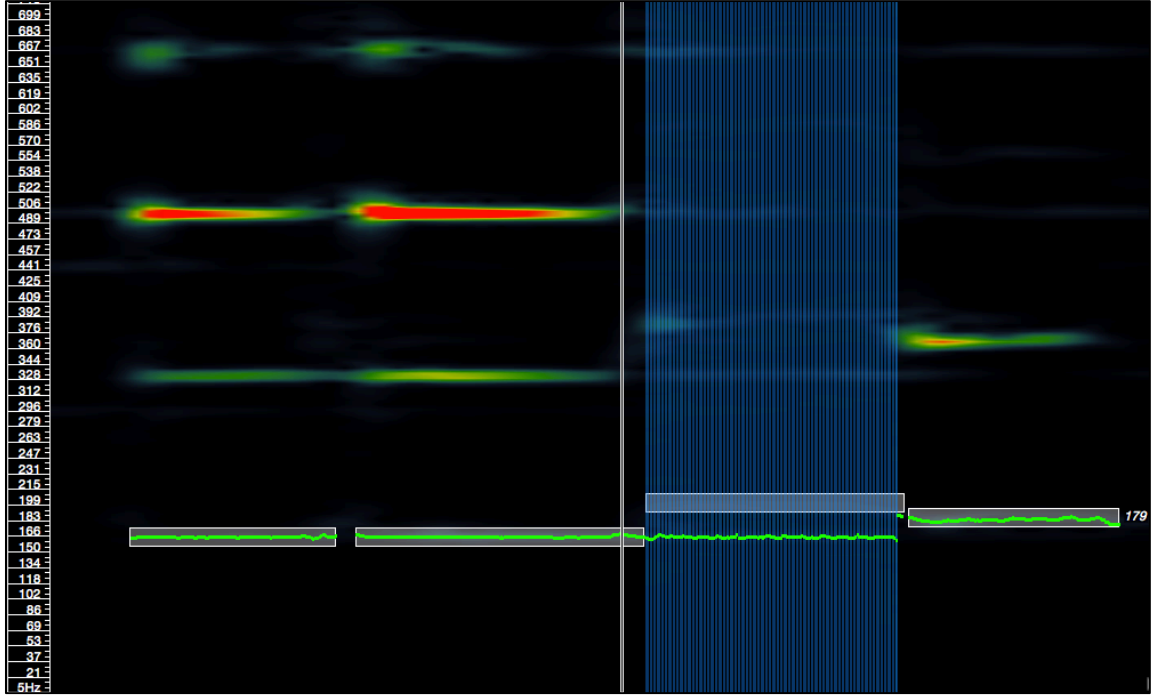
Deney kapsamında 18 icra için toplam 157231 frekans kestiriminin elle işaretlenen nota frekansları ile 1 tam ses tolerans aralığı içerisinde ne kadar örtüştüğü değerlendirilmiştir. Tüm kayıtların değerlendirilme sonrasındaki örtüşme oranları Tablo 6.3'te görülmektedir. Tabloda görülen "Ref #" sütunu ile Tablo 6.2'deki kayıtlar kastedilmektedir.

Tablo 6.3: Deney sonuçlarının istatistikleri

Ref #	Örtüşen	Örtüşmeyen	Oran %	Ref #	Örtüşen	Örtüşmeyen	Oran %
1	8307	414	95,25	11	9548	402	95,96
2	11243	640	94,61	12	6884	738	90,32
3	4244	676	86,26	13	6005	415	93,54
4	4489	700	86,51	14	11076	1219	90,09
5	7433	1010	88,04	15	12475	891	93,33
6	11889	1475	88,96	16	10839	909	92,26
7	6382	541	92,19	17	7629	217	97,23
8	7641	1752	81,35	18	4993	215	95,87
9	6467	952	87,17	Σ	143308	13923	91,14
10	5764	757	88,39				

Yapılan deney sonucunda baskın ezgi kestirimlerinin, oluşturulan veri kümesi üzerindeki işaretlemelerle 1 tam ses tolerans aralığında yüzde 90 civarında bir oranla örtüştüğü gözlemlenmiştir. Gözlemler sonucunda vokal icrası içeren kayıtların frekans kestirimlerinin yüzde 90'ın üzerinde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Yöntemin, müzisyenlerin yaptığı bazı süslemeleri tam olarak doğru zamanda kestiremediği gözlemlenmiştir. Şekil 6.3'te, 1 numaralı kayıttaki bulunan bu duruma benzer bir örnek gösterilmektedir. Şekilde görülen görünge resmi üzerindeki beyaz renkli kutular nota işaretlemelerini, yeşil renkteki noktalar frekans kestirimlerini ve mavi renkte taranmış olan bölgeler de frekans kestiriminin yanlış yapıldığı bölgeleri göstermektedir. Şeklin yatay eksenini zamanı, dikey eksenini de frekansını temsil etmektedir. Bu bölüm içerisindeki tüm şekillerde yer alan gösterimler bu anlamdadır.

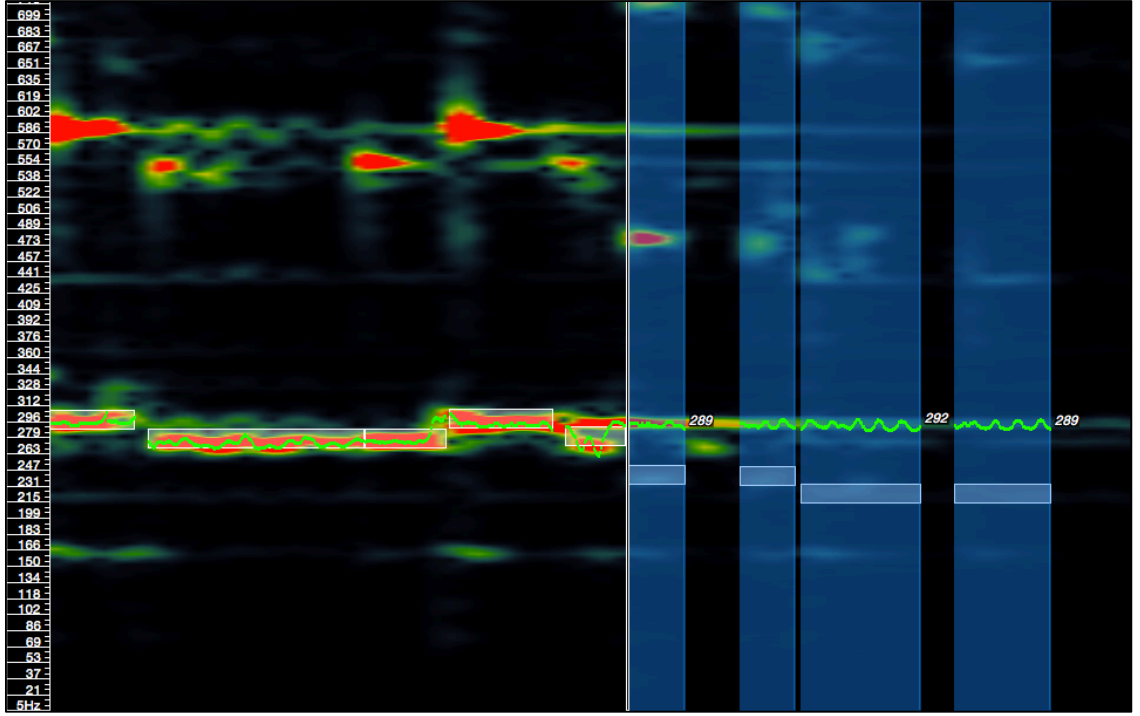
Şekil 6.3: Frekans kestirimi yanlış yapılmış bir süsleme örneği



İcra edilen notanın genliğinin bir önceki notaya göre daha düşük olduğu bölgede frekans kestiriminin işaretlemeye örtüşmediği gözlemlenmiştir. Örtüşmeyen bölge mavi renkle taranmıştır. Bu durumu, orkestra içerisinde değişen enstrüman baskınlık dengesinin yarattığı düşünülmektedir.

Tanburun akustik yapısından ötürü diğer enstrümanlara kıyasla doğuşkanlarındaki genlik farklılıkları da bazı frekans kestirimlerinin yanlış yapılmasına yol açmıştır. Şekil 6.4'te, 4 numaralı kayıt içerisinde bu duruma örnek bir yanlış kestirim görülmektedir.

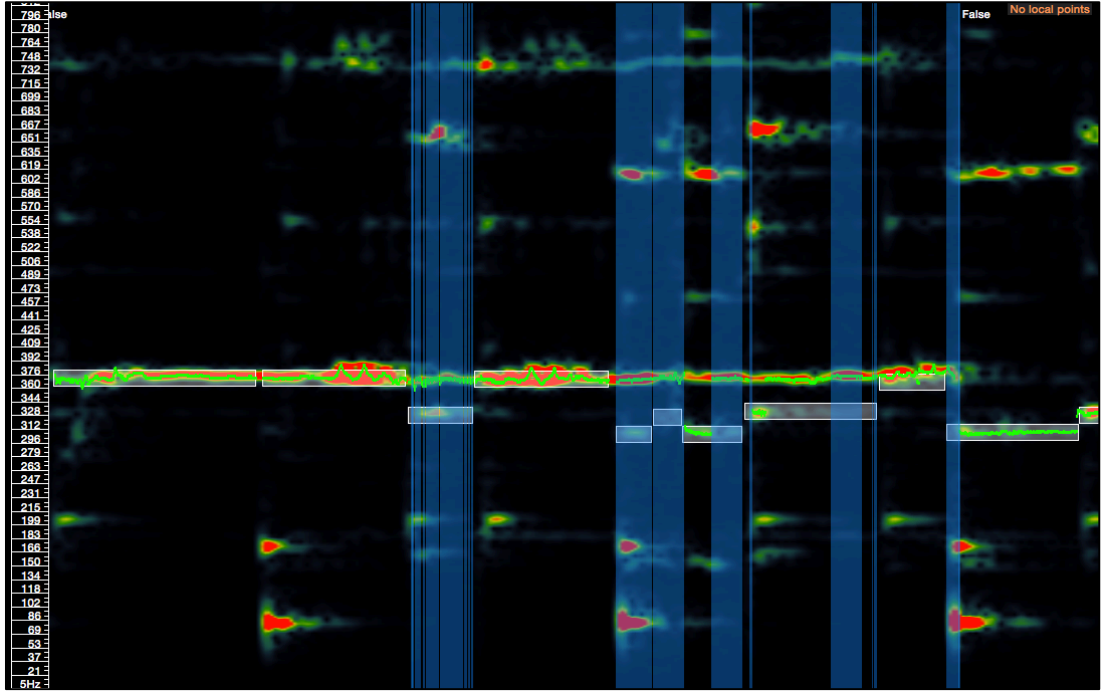
Şekil 6.4: Tanbur icrasında yapılan yanlış frekans kestirimine bir örnek



İcracı, bir notayı sonrasında çaldığı notalara oranla görece daha yüksek tuşeli seslendirdiği için, önceki notaların doğuşkanlarının genliklerinin daha yüksek kalmasına neden olmuştur. Bu duruma, aynı zamanda, kaydın prodüksiyon sürecinde kullanılan efektlerin de (örn: reverb) yol açtığı düşünülmektedir.

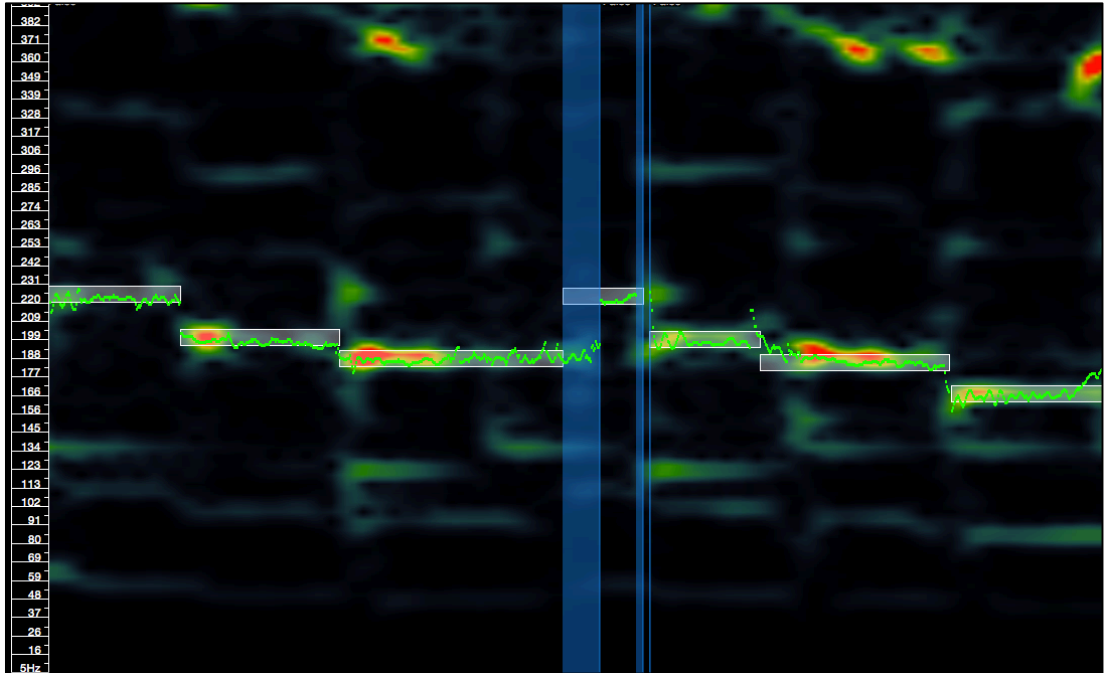
Bazı orkestral icralarda heterofoniden kaynaklı yanlış kestirimler yapıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.5’de heterofoniden kaynaklanan bir yanlış kestirim örneği görülmektedir. Deney veri kümesinde bulunan 14 numaralı kaydın bir bölümünde, eser icrasını ney ile eşlik eden müzisyenin, ana ezgiyi değil de, eserin güçlü perdesini olması gerektiğinden daha uzun bir ritmik değerle çaldığı görülmüştür. Bu esnada diğer müzisyenler eserin normal icrasına devam etmişlerdir. Ancak ney enstrümanının doğuşkanlarının o zaman aralığı içerisinde diğer enstrümanlara kıyasla daha baskın olmasından dolayı yöntem, şekil üzerinde gösterilen zaman aralığı içerisinde baskın ezgi için frekans kestirimini, ney enstrümanının doğuşkanları üzerinden hesaplamıştır.

Şekil 6.5: Heterofoniden kaynaklanan nedenlerle yanlış yapılan baskın ezgi kestirimine bir örnek



Şekil 6.6: Frekans kestirimi ile elle işaretlemenin örtüşmediği bir örnek'da frekans kestirimi ile elle işaretlemenin örtüşmediği bir örnek bulunmaktadır.

Şekil 6.6: Frekans kestirimi ile elle işaretlemenin örtüşmediği bir örnek



6.2 OTOMATİK KARAR PERDESİ TESPİTİ YÖNTEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen son nota ile karar perdesi frekansının kestirimi yönteminin verimliliğin ölçülebilmesi için oluşturulan deney veri kümesi ve deney düzeneği anlatılmaktadır. Bu yöntem, makinece okunur nota yardımı ile karar perdesi frekansı kestirimi yapan yöntemle karşılaştırılmıştır. Bölüm 6.2.1’de deneylerin yapılabilmesi için oluşturulan veri kümeleri, Bölüm 6.2.2’de tasarlanan deney ve sonuçları anlatılmaktadır

6.2.1 Verilerin Oluşturulması

İcra edilen son nota ile karar perdesi frekansı kestirimi yönteminin verimliliğinin ölçülebilmesi için iki ayrı deney veri kümesi derlenmiştir. Derlenen veri kümeleri, daha önceden oluşturulmuş ve CompMusic-makam veri kütüphanesinde kullanıma sunulmuş olan karar perdesi deney veri kümelerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Deney veri kümelerinde toplamda 1889 adet ses kaydı bulunmaktadır. Kayıtlar monofonik ve heterofonik ses kayıtlarından oluşmaktadır.

Oluşturulan ilk veri kümesi (VK1) 763 ses kaydı içermektedir. Seçilen kayıtların tümünün meta-verileri, ayrıca makinece okunur notaları mevcuttur. Bu veri kümesi, makinece okunur nota ile karar perdesi tespiti yönteminin denenebilmesi için hazırlanmıştır. VK1’e ek olarak oluşturulan ikinci veri kümesinde (VK2) ise toplam 1889 adet ses kaydı ve kayıtların tümünün meta-verileri bulunmaktadır. Ses kayıtlarının tümünün karar perdelerinin frekansları ve bulunduğu saniye aralıkları müzisyenler tarafından işaretlenmiştir. Seçilen 1889 ses kaydının baskın ezgi analizleri yapılmıştır.

6.2.2 Deney ve Değerlendirme

Yeni yöntemin verimliliğinin denenebilmesi için iki deney yapılmıştır. VK1 üzerinde her iki yöntem, VK2 üzerinde ise sadece Bölüm 5.1.3’te anlatılan son nota ile karar perdesi frekansı kestirimi yöntemi uygulanmıştır. Her iki deneyde de yöntemlerin verdiği karar

perdesi frekans kestirimleri, müzisyenlerin işaretlemeleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken, yöntemin verdiği frekans kestirimleri ile müzisyenlerin işaretlediği frekans değerleri arasındaki oktav farklılıkları ihmal edilmiştir. Yöntemlerin verdiği frekans kestirimleri, müzisyenlerin işaretledikleri frekans değerlerinin 1 Holder komalık tolerans aralığı içerisinde denk geliyorsa yöntemin yaptığı kestirimin doğru olduğu, bu aralık dışında kalıyorsa da yöntemin kestiriminin yanlış olduğu kabul edilmiştir.

Yapılan deneylerin sonuçları Tablo 6.4'te görülmektedir. *Son nota* ile karar perdesi frekansı kestirimi yöntemi, *MON* ile de makinece okunur nota yardımı ile karar perdesi frekansı kestirimi yöntemi ifade edilmektedir. Tabloda görülen *DS* ile doğru sayısı, *YS* ile de yanlış sayısı belirtilmiştir.

Tablo 6.4: Deneyler sonrası elde edilen başarı istatistikleri

Yöntemler	VK1			VK2		
	DS	YS	Başarı (%)	DS	YS	Başarı (%)
Son nota	571	93	86	1580	303	84
MON	658	5	99	-	-	-

Müzik notası - icra eşleşmesinin görece iyi olmadığı 5 kayıt dışında makinece okunur müzik notası ile karar perdesi frekansı tespiti yapan yöntem tüm kayıtlar için karar perdesi frekansı için doğru kestirim yapmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Ancak yöntemin ses kaydı dışında makinece okunur müzik notasına ve nota içerisinde en çok tekrar edilen bölüm/hanenin de elle işaretlenmesi gibi başka ek bilgilere gereksinim duymasından ötürü çalışma alanını kısıtlamaktadır. Ayrıca bu yöntem, taksim gibi herhangi bir eserin icrası olmayan doğaçlama Türk makam müziği kayıtlarında da kullanılamamaktadır.

Son nota ile karar perdesi kestirimi yapan yöntem, deneyler sonucunda karar perdesi frekansını yüzde 85 civarında karar perdesi frekansını doğru kestirmiştir. Yöntem, ezginin son kısmında notaların birbirine bağlı veya kaydırılarak icra edildiği kayıtların ezgi bölütlenmesi aşamasında ortaya çıkan hatalardan ötürü karar perdesi frekansı kestirimlerini yanlış yapmıştır. Bu durumlarda yöntem, son ezgi parçasının ortanca

değerini kaydın histogramındaki karar perdesi tepe noktasına değil, kaydın içerisinde icra edilen başka bir perde frekansına eşlemiştir.

7. SONUÇ

Yapılan çalışma sonucunda Türk makam müziğinin ezgisel boyutuna yönelik eğitim programı için bir tasarım yapılmış, gerçekleştirilmiş ve sunulmuştur. Araç, halihazırda en yaygın kullanılan beş makam için tasarlanmıştır.

Tez kapsamında hedeflenen sistemin gerçekleştirilmesi için yapılan çalışmalar sonucunda baskın ezgi kestirimi ve otomatik karar perdesi kestirimi için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Yöntemlerin verimlilikleri ve performansları Bölüm 6'da sunulan deneylerle raporlanmıştır.

Baskın ezgi kesitimi yönteminin kestirimlerinin elle yapılan işaretlemelerle yüzde 90 civarında örtüştüğü gözlemlenmiştir. Otomatik karar perdesi frekansı kestirimi yönteminin de yüzde 85 civarında bir başarı oranında çalıştığı raporlanmıştır.

MusicXML formatında yazılmış Türk müziği notalarının görselleştirilebilmesi ve seslendirilebilmesi için yeni araçlar geliştirilmiştir. Araçlar MusicXML formatındaki Türk müziği notalarını otomatik olarak görselleştirmekte ve kullanıcının belirleyeceği kuramdaki aralıklarla veya vereceği bir ses kaydındaki entonasyon ile sentezleyebilmektedir.

Yapılan çalışmaların sürdürülebilir ve ulaşılabilir olması için geliştirilen tüm araçlar Github platformu kullanılarak akademik çalışmalarda kullanılabilir ve geliştirilebilir üzere paylaşımına açılmıştır. Paylaşımına açılan programlama kütüphanelerinin ve araçların tamamı nesneye yönelik programlama (*object-oriented programming*) ilkeleri gözönünde bulundurularak geliştirilmiştir. Böylelikle geliştirilen kodların iyileştirilebilirliği ve okunabilirliği artırılmaya çalışılmıştır. Programlama kütüphanelerinin ve geliştirilen araçların dokümantasyonları ayrıntılı olarak yapılmıştır. Github aracılığıyla sunulan çalışmaların tamamında, geliştirilen araçların ve programlama kütüphanelerinin nasıl kullanılabileceğini gösteren örnek kod parçacıkları

bulunmaktadır. Dolayısıyla kullanıcılar, kolay bir şekilde çalışmalara ulaşabilme, kullanabilme ve geliştirebilme olanağına sahiptirler.

Baskın ezgi analizi hemen hemen tüm ezgisel hesaplamalı araştırmalarda yapılması gereken analizlerden birisidir. Tez kapsamında geliştirilen ve sunulan yöntem, bugüne kadar geliştirilen yöntemlerin aksine Türk müziğı için heterofonik kayıtlar üzerinde de çalışabilme olanağı sağlamaktadır. Böylelikle kullanıcılar, çalışma alanlarını daha geniş tutabilecekler ve daha büyük veriler üzerinde çalışabileceklerdir. Otomatik karar perdesi frekansı kestirimi için sunulan yeni yöntem ise, bugüne kadar Türk müziğı için geliştirilen öteki yöntemlerin aksine, ses kaydı dışında herhangi bir ek bilgiye ve özelliğı gereksinim duymamaktadır. Sunulan yeni yöntem, aynı şekilde daha geniş veriler üzerinde çalışabilme olanağı sunmaktadır. Ayrıca tez kapsamında deneylerin yapılabilmesi ve prototipin çalışabilmesi için geliştirilen veri kümeleri de akademik araştırmalarda kullanılabilme ve geliştirilebilme üzere paylaşıma açılmıştır. Tez kapsamında baskın ezgi çıkarımı ve otomatik karar perdesi frekansı kestirimi yöntemleri otomatik notaya dökme (*automatic transcription*), ses kaydı kaynak ayrıştırımı (*source seperation*) gibi müzik bilgi erişimi problemlerinde kullanılabilir. Tasarlanan sistemin ve geliştirilen yeni yöntemlerin Türk müziğini öğrenmek isteyen kullanıcılara ve Türk müziğı araştırmacılarına yararlı olmasını diliyoruz.

7.1 GELECEK ÇALIŞMALAR

Araç, en sık kullanılan 5 makamı kapsayacak şekilde tasarlanmış olmakla birlikte kapsamı başka makamlar da eklenerek genişletilebilir. Kullanıcı, araçla birlikte gelen SQLite veri kümesi dosyasına eklemek istediğı makamı tanımlayabilmektedir. Araç, tez kapsamında sadece kültürün ezgisel boyutu ile sınırlı tutulmuştur. Türk müziğinin ritmik boyutuna yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. Ayrıca Türk makam müziğı için otomatik şarkı sözü - icra eşleme çalışması da yapılmaktadır (Dzhambazov, Şentürk, & Serra, 2014). Bir karaoke aracı bu yöntem kullanılarak ileriki zamanlarda program bünyesine dahil edilebilir. Sisteme eklenebilecek başka bir çalışma da akort cihazıdır. Türk müziğıne özgü akort cihazı tasarımı çalışılan bir konudur (Bozkurt, 2012). Yakın zamanda gerçekleştirilen bir prototip sunulmuş ve uygulamaları yapılmıştır (Tamer &

Bozkurt, 2013). İleriki bir zamanda kullanıcının seçeceği referans kayda göre enstrümanını akort edebileceği bir araç, tasarlanan sistem kapsamına dahil edilebilir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

Akdoğdu, O. 1989. *Taksim nedir? Nasıl yapılır?* İzmir: İhlas A.Ş.

Arel, H. 1968. *Türk Musikisi Nazariyatı (The Theory of Turkish Music)*. İstanbul: İTMKD.

Ergüner, S. 2007. *Ney, 'Metod'*. İstanbul.

Signell, K. 1986. *Makam: Modal practice in Turkish art music*. Da Capo Press.

Tura, Y. 1988. *Türk Musikisinin Meseleleri*. İstanbul: Pan Yayınları.

Sürelî Yayınlar

- Atlı, H., Bozkurt, B., & Şentürk, S. 2015. A method for tonic frequency identification of Turkish makam music recordings. *5th International Workshop on Folk Music Analysis (FMA)*. Paris: University Pierre et Marie Curie.
- Atlı, H., Uyar, B., Şentürk, S., Bozkurt, B., & Serra, X. 2014. Audio Feature Extraction for Exploring Turkish Makam Music. *3rd International Conference on Audio Technologies for Music and Media*. Ankara: Bilkent University. Faculty of Art, Design and Architecture. Department of Communication and Design.
- Berridge, E., Roudsari, A., Taylor, S., & Carey, S. 2000. Computer-aided learning for the education of patients and family practice professional in the personal care of diabetes. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* , 191-204.
- Bogdanov, D., Wack, N., Gómes, E., Gulati, S., Herrera, P., Mayor, O., et al. 2014. ESSENTIA: an open source library for audio analysis. *ACM SIGMM Records* , 6.
- Bozkurt, B. 2012. A System for Tuning Instruments using Recorded Music Instead of Theory-Based Frequency Presets. *Computer Music Journal* , 36 (3), 43-56.
- Bozkurt, B. 2008. An automatic pitch analysis method for Turkish maqam music. *Journal of New Music Research* , 37 (1), 1-13.
- Bozkurt, B., Ayangil, R., & Holzapfel, A. 2014. Computational analysis of Turkish makam music: Review of state-of-the-art and challenges. *Journal of New Music Research* , 43 (1), 3-23.
- Bozkurt, B., Gedik, A., & Karaosmanoğlu, M. Türk Müziği için Müzik Bilgi Erişimi: problemler, çözüm önerileri ve araçlar. *IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference* (pp. 804 - 807). Antalya: IEEE.
- Cannam, C., Landone, C., & Sandler, M. 2010. Sonic visualiser: An open source application for viewing, analysing, and annotating music audio files. *Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia* (pp. 1467-1468). ACM.
- Cheveigné, A. D., & Kawahara, H. 2002. YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 111 (4), 1917-1930.

- Dzhambazov, G., Şentürk, S., & Serra, X. 2014. Automatic lyrics-to-audio alignment in classical turkish music. *4th International Workshop on Folk Music Analysis*, 12. İstanbul.
- Fraser, B., & Teh, G. 1994. Effect size associated with micro-Prolog based computer-assisted learning. *Computer Education* , 23, 187-196.
- Gedik, A. C., & Bozkurt, B. 2010. Pitch-frequency histogram-based music information retrieval for Turkish music. *Signal Processing* , 90 (4), 1049-1063.
- Good, M. 2001. MusicXML for notation and analysis. *The virtual score: representation, retrieval, restoration* , 12, 113-124.
- Guido, V. R., & others. 2007. Python Programming Language. *USENIX Annual Technical Conference*, 41.
- Hartley, J. 1987. Computer-based support systems for learning and teaching. In Trends in Computer Assisted Education (eds R. Lewis & E.D. Tagg). *Blackwell Scientific Publications* , 3-18.
- Ho, T.-L., Lin, H.-s., Chen, C.-K., & Tsai, J.-L. 2015. Development of a computer-based visualised quantitative learning system for playing violin vibrato. *British Journal of Educational Technology* , 46 (1), 71-81.
- Iglesias, C., Sanchez, M., Guibert, A., Guibertand, M., & Gómez, E. 2006. A Multilingual Web-based Educational System for Professional Musicians. *Proceedings of Fourth International Conference on Multimedia and Information and Communication Technologies in Education*. Seville: FORMATEX.
- Jaffe, C., & Lynch, P. 1995. Computer assisted instruction in radiology: opportunities for more effective learning. *American Journal of Roentgenology* , 463–467.
- Jaffe, D., & Smith, J. 1983. Extensions of the Karplus-Strong plucked-string algorithm. *Computer Music Journal* , 7 (2), 56-69.
- Karaosmanoğlu, M. 2012. A Turkish makam music symbolic database for music information retrieval: SymbTr. *Proceedings of 13th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)* (pp. 223–228). Porto: ISMIR.
- Mayor, O., Bonada, J., & Loscos, A. 2009. Performance Analysis and Scoring of the Singing Voice. *AES 35th International Conference: Audio for Games*, (p. 8). London.

- Nienhuys, H.-W., & Nieuwenhuizen, J. 2003. LilyPond, a system for automated music engraving. *Proceedings of the XIV Colloquium on Musical Informatics* (pp. 167-172). Citeseer.
- Peeters, G., & Fort, K. 2012. Towards a (Better) Definition of the Description of Annotated MIR Corpora. *ISMIR* (pp. 25-30). Porto: Citeseer.
- Perdana, I. 2014. Teaching elementary school students new method of music performance with Leap Motion. *International Conference on Virtual Systems Multimedia (VSMM)* (pp. 273-277). IEEE.
- Salamon, J., & Gómez, E. 2012. Melody Extraction from Polyphonic Music Signals using Pitch Contour Characteristics. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 20, 1759-1770.
- Sastre, J., Cerda, J., Garcia, W., Hernandez, C., Lloret, N., Murillo, A., et al. 2013. New technologies for music education. *Second International Conference on e-Learning and e-Technologies in Education (ICEEE)*, (pp. 149-154).
- Serra, X. 2011. A Multicultural Approach in Music Information Research. *Int. Soc. for Music Information Retrieval Conf. (ISMIR)*, (pp. 151-156). Florida.
- Serra, X. 2014. Creating Research Corpora for the Computational Study of Music: the case of the CompMusic Project. *AES 53rd International Conference on Semantic Audio* (pp. 1-9). London: AES.
- Swartz, A. 2002. Musicbrainz: A semantic web service. *Intelligent Systems, IEEE*, 17 (1), 76-77.
- Şentürk, S., Ferraro, A., Porter, A., & Serra, X. 2015. A Tool for the analysis and discovery of Ottoman-Turkish Makam Music. *Extended abstracts for the Late Breaking Demo Session of the 16th International Society for Music Information Retrieval Conference* (pp. 687–693). Malaga: ISMIR.
- Şentürk, S., Gulati, S., & Serra, X. "Towards alignment of score and audio recordings of Ottoman-Turkish makam music." *4th International Workshop on Folk Music Analysis, Istanbul, Turkey*. Vol. 6. 2014.
- Şentürk, S., Gulati, S., & Serra, X. 2013. Score Informed Tonic Identification for Makam Music of Turkey. *Proceedings of 14th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, (pp. 175-180). Curitiba.

- Şentürk, S., Holzapfel, A., & Serra, X. 2014. Linking Scores and Audio Recordings in Makam Music of Turkey. *Journal of New Music Research* , 43, 34-52.
- Tamer, Y., & Bozkurt, B. 2013. A microtonal tuning method: Test & discussion on the use of microtonal intervals for the performance of traditional Turkish music. *Journal of Interdisciplinary Music Studies (JIMS)* , 7 (1), 73-88.
- Uyar, B., Atlı, H., Şentürk, S., Bozkurt, B., & Serra, X. 2014. A Corpus for Computational Research of Turkish Makam Music. *1st International Digital Libraries for Musicology workshop*, (pp. 57-63). London.
- Van Der Walt, S., Colbert, S., & Varoquaux, G. 2011. The NumPy array: a structure for efficient numerical computation. *Computing in Science & Engineering* , 13 (2), 22-30.

Diğer Yayınlar

Campagnola, L. 2012. PyQtGraph. Scientific Graphics and GUI Library for Python.

Poslední aktualizace .

Holkner, A. 2008. Pyglet: Cross-platform windowing and multimedia library for Python.

Google Code .

Karaosmanoğlu, M., Yılmaz, S., Tören, Ö., Ceran, S., Uzmen, U., Cihan, G., et al. (2008).

Mus2okur. İstanbul, Turkey.

Pham, H. 2006. Pyaudio: Portaudio v19 python bindings. PyAudio.

Yarman, O. 2008. *79-tone tuning & theory for Turkish maqam music. PhD Thesis.*

İstanbul: İstanbul Technical University, Social Sciences Inst.

EKLER

EK 1: VERİ KÜMESİNDEKİ ESERLER VE SES KAYITLARI

SEGAH MAKAMI

Beste	Besteci	Form	İcracı	Albüm
Dönülmez Akşamın Ufkundayız	Münir Nurettin Selçuk	Şarkı	Meral Uğurlu	Segah Şarkılar
Segâh Peşrev	Neyzen Yusuf Paşa	Peşrev	Bekir Sıdkı Sezgin	Bekir Sıdkı Sezgin 15
Segah Sazsemaisi	Osman Dede	Sazsemaisi	Meral Uğurlu	Kubbealtı Türk Musikisi Klasik Eserler Serisi – 4
Tuti-i Mucize Guyem Ne Desem Laf Değil	Buhurizade Mustafa Itri Efendi	Yürüksemai	Orkestra	Meşk-i Safa
Dinle Sözümü Sana Derim Edadır	Lavtacı Hristo Efendi	İlahi	Orkestra	40 Anlam 40 Makam
-	-	Taksim	Udi Yorgo Bacanos	Udi Yorgo Bacanos 1900- 1977
İzmir'in Kavakları	Anonim	Türkü	Süleyman Taşpınarlı	Kanuni

UŞŞAK MAKAMI

Beste	Besteci	Form	İcracı	Albüm
Akşam Oldu Hüzünlendim Ben Yine	Semahat Özdenses	Şarkı	Müzeyyen Senar	Akşam Oldu Hüzünlendim Ben Yine
Uşşak Peşrev	Zurnazenbaşı İbrahim Ağa	Peşrev	İstanbul Sazendeleri orkestrası	Sazende Faslı 1
Uşşak Saz Semâîsi	Neyzen Salih Dede	Sazsemaisi	Murat Aydemir & Derya Türkan	Ahenk 2
Ömrümün Şu Biten Neşvesi	Süleyman Ergüner	Yürüksemai	Müzeyyen Senar	Uşşak
Allah Emrin Tutalım	Zekai Dede Efendi	İlahi	Orkestra	Bestekarlarımız: Zekai Dede / İlahiler
-	-	Taksim	Necdet Yaşar	Necdet Yaşar - Arşiv Serisi
Kadifeden Kesesi	Anonim	Türkü	Hafız Burhan Sesyılmaz	Arşiv Serisi - Gazeller II

NİHAVENT MAKAMI

Beste	Besteci	Form	İcracı	Albüm
Kimseye Etmem Şikayet	Kemani Sarkis Efendi	Şarkı	Melihat Gülses	Türk Müziğinde 75 Büyük Bestekar
Nihavend Peşrev	Tanburi Büyük Osman Bey	Peşrev	Orkestra	1955 - 63 Kayıtları - Arşiv Serisi
Nihavent Sazsemaisi	Mesut Cemil Bey	Sazsemaisi	Necdet Yaşar ve Orkestrası	The Necdet Yasar Ensemble
Ayrıldı Gönül Şimdi Yine Bir Tek Eşinden	Zeki Duygulu	Yürüksemai	Koray Safkan	TRT İstanbul Radyosu - 22.02.1993
-	-	Taksim	Neyzen Tevfik	"Hiç" in "Azab-ı Mukaddes"i
Üsküdar'a Gider İken	Anonim	Türkü	Safiye Ayla	Safiye Ayla - Arşiv Serisi

RAST MAKAMI

Beste	Besteci	Form	İcracı	Albüm
Sevda İle Dillendi	Münir Nurettin Selçuk	Şarkı	Münir Nurettin Selçuk	Münir Nurettin Selçuk – Üstad
Rast Peşrev	Tateos Eñserciyan	Peşrev	Anastas Efendi	Türk Müziği Ustaları – Kemeçe
Gelse O Şuh Meclise	Hafız Post	Yürüksemai	Meral Uğurlu	Türk Müziğinde 75 Büyük Bestekar
Gül Ağacı	Necip Mirkelamoğlu	Türkü	Semahat Özdenses	Unutulmayan Bestecilerin Unutulmaz Eserleri - Semahat Özdenses
-	-	Taksim	Tanburi Cemil Bey	Tanburi Cemil Bey - Volumes II & III

HİCAZ MAKAMI

Beste	Besteci	Form	İcracı	Albüm
Hicaz Peşrev	Neyzen Salim Bey	Peşrev	Zeki Müren	1955 - 63 Kayıtları - Arşiv Serisi
Hicaz Sazsemaisi	Muhittin Erev	Sazsemaisi	Orkestra	Ney ile İcra Edilmiş Saz Eserleri
Yine Neş'e-yi Muhabbet	Dede Efendi	Yürüksemai	Zeki Müren	1955 - 63 Kayıtları - Arşiv Serisi
Dağlar İle Taşlar İle	Kutbi Dede	İlahi	Münir Nurettin Selçuk	Münir Nurettin Selçuk
-	-	Taksim	Necati Çelik	Yasemin

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hasan Sercan Atlı

Doğum Yeri ve Yılı : Ankara, 1990

Yabancı Dili : İngilizce

Orta Öğretim : Bilim Özel Lisesi (2008)

Lisans : Atılım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (2013)

Yüksek Lisans : Bahçeşehir Üniversitesi (2016)

Enstitü Adı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Program Adı : Ses Teknolojileri

Yayımları:

Atlı, H. S., Bozkurt B., & Şentürk S. (2015). A method for tonic frequency identification of Turkish makam music recordings. 5th International Workshop on Folk Music Analysis (FMA).

Atlı, H. S., Uyar B., Şentürk S., Bozkurt B., & Serra X. (2014). Audio Feature Extraction for Exploring Turkish Makam Music. 3rd International Conference on Audio Technologies for Music and Media (ATMM).

Uyar, B., Atlı H. S., Şentürk S., Bozkurt B., & Serra X. (2014). A Corpus for Computational Research of Turkish Makam Music. 1st International Digital Libraries for Musicology workshop.

Çalışma Hayatı:

2016 - ...	Araştırmacı	- Music Technology Group (MTG) – Universitat Pompeu Fabra
2014 – 2016	Araştırmacı	- CompMusic Projesi