

**Klasik Türk müziği kayıtlarının otomatik olarak notaya
dökülmesi ve otomatik makam tanıma**

Proje No: 107E024

Yard. Doç. Dr. Barış Bozkurt,
Ali Cenk Gedik,
Prof. Dr. F. Acar SAVACI,
Mustafa Kemal Karaosmanoğlu,
Dr. Mehmet Erdal Özbek

EYLÜL 2010
İZMİR

Önsöz

Bu proje İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Ağustos 2007 – Ağustos 2010 tarihlerinde Yard. Doç.Dr. Barış Bozkurt yürütücülüğünde gerçekleştirilmiştir. Proje TÜBİTAK tarafından, 1001 araştırma projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Projede otomatik çalgı tanıma konusundaki çalışmalar ve bu raporda ilgili bölümün (Bölüm 7) yazımı bursiyer-doktora öğrencisi Dr. Mehmet Erdal Özbek ve Prof. Dr. F. Acar Savacı tarafından gerçekleştirilmiştir. Bölüm 7 dışındaki tüm çalışmalar, otomatik notaya dökme ve otomatik makam sınıflandırma çalışmaları bursiyer-doktora öğrencisi Ali Cenk Gedik ve yürütücü Yard.Doç.Dr. Barış Bozkurt tarafından, Mustafa Kemal Karaosmanoğlu'nun danışman ve nota yazımı için Mus2 sistemiyle entegrasyon konusunda desteğini de alarak gerçekleştirilmiştir. Bölü 7 dışında raporun tüm bölümleri Yard. Doç.Dr. Barış Bozkurt ve Ali Cenk Gedik tarafından yazılmıştır. Mustafa Kemal Karaosmanoğlu'na tüm metni okuyup yorumlarını bizle paylaştığı için teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

1. Amaç, Kapsam ve Katkıları	7
1.1 Neden Türk müziği için işaret işleme	7
1.2 İşaret işleme açısından Batı müziği ile Türk müziği arasındaki temel farklılıklar	7
1.2 Otomatik notaya dökme	9
1.3 Otomatik makam tanıma	9
1.4 Veritabanlarının oluşturulması ve paylaşımı	10
2. Temel titreşim frekansı(f_0) analizi	11
2.1. f_0 analizinde kullanılacak algoritmanın belirlenmesi	11
2.2. YIN algoritması ve iyileştirme çalışmaları	13
2.2.1 YIN algoritması	13
2.2.2 Düzeltme amaçlı tasarlanan filtreler	14
2.2.3 Melogram/melogram analizi	16
3. f_0 (frekans) dağılımlarının oluşturulması	16
4. Frekans dağılımları kullanarak otomatik karar sesi ve makam tespiti	18
4.1 Otomatik karar sesi tespiti	18
4.2 Testler	22
4.2.1 Sentetik kayıtlar üzerinde yapılan testler	22
4.2.2 Gerçek kayıtlar üzerinde yapılan testler	24
4.3. Otomatik makam sınıflandırılması	24
5. Frekans dağılımları kullanarak kuram - icra uyum analizi	36
6. Otomatik notaya dökme	42
6.1 Başlangıç noktası tespiti	43
6.1.1 Çalgı sınıflandırması ve spektral akı kullanarak başlangıç noktası tespiti	43
6.1.2 Füzyon yaklaşımıyla başlangıç noktası tespiti	47
6.2 Nota frekans nicemlemesi	51
6.3 Ritmik analiz	56
6.4 MIDI oluşturulması ve notaya dökme	66
7. Otomatik çalgı tanıma	76
8. Genel değerlendirme ve gelecekte yapılacak çalışmalar	81
EK-1: Kuram - icra uyum analiz sonuçları	83
EK-2: İkili makam histogram karşılaştırmaları	101

Şekiller:

- Şekil 1.1:** Frekans analizinin işitsel testi için oluşturulan iki kanallı işaretin spektrogram gösterimi.
- Şekil 2.1:** Spektrogram ile temel titreşim frekans analiz sonuçlarının karşılaştırılması.
- Şekil 2.2:** Periyodu bilinen (180 veri noktası olan) bir işaret parçasının kendi üzerine kaydırılmasıyla öz-ilinti hesaplanması.
- Şekil 2.3:** Tasarladığımız filtrelerin YIN sonuçları üzerinde yaptığı iyileştirmelere örnekler
- Şekil 2.4:** Tanburi Cemil Bey (Vol 1, Kayıt 2 – Çeçen kızı (Hüseyini makamı)) kaydı için f0 verisi ve (Y)AEU kuramında belirtilen Hüseyini dizisi aralıkları.
- Şekil 3.1:** Farklı ızgara genişlikleriyle elde edilen histogram örnekleri.
- Şekil 4.1:** Aynı eserin (Hüseyini Peşrev, Lavtacı Andon) iki farklı icrasının frekans histogramları.
- Şekil 4.2:** Otomatik karar tespit algoritması.
- Şekil 4.3:** Hüseyini makamı kuramsal histogram şablonu.
- Şekil 4.4:** Uşşak makamı kuramsal şablonu (kesik çizgi) ile Yorgo Bacanos'un Ud taksimi kaydının f0 histogramının eşleştirilmesi sonucu.
- Şekil 4.5:** Tanburi Cemil Bey'in bir hicaz makamı icrasının f0 dağılımı ile Hicaz makamının kuramsal aralıklarının beraber gösterimi.
- Şekil 4.6:** Tanburi Cemil Bey'in Hicaz taksimi icrasının f0 dağılımının sırasıyla (a) Hicaz (b) Kürdili Hicazkar (c) Segah ve (d) Hüzzam makam şablonları ile birlikte gösterilmesi.
- Şekil 4.7:** Histogram şablonları birbirine benzeyen makamlar.
- Şekil 5.1:** Uşşak makamı için 11 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.
- Şekil 6.1:** Otomatik notaya dökme algoritması akış şeması.
- Şekil 6.2:** Başlangıç noktası tespit örneği.
- Şekil 6.3:** Başlangıç noktası tespit algoritmalarının karşılaştırmalı test sonuçları.
- Şekil 6.4:** Bir ney örneği üzerinde BN tespit sonuçları ve birleştirilmiş yöntemin (Fusion) BN şiddet işareti.
- Şekil 6.5:** Türk müziği enstrümanları ve Batı müziği enstrümanları için başlangıç noktası tespit başarısı karşılaştırması.
- Şekil 6.6:** f0 eğrisinin bölümlenmesi ve 1. aşama nicemleme işlemi.
- Şekil 6.7:** 2. aşama nicemleme işlemi.
- Şekil 6.8:** Özgün f0 eğrisi ve nicemlenmiş f0 eğrisi.
- Şekil 6.9:** nicemlenmiş f0 eğrisi ve iyileştirilmiş hali.
- Şekil 6.10:** f0 eğrisi ve en son nicemlenmiş hali.
- Şekil 6.11:** Ritim incelemesi yapılan çalışmanın notası.
- Şekil 6.12:** Ses işareti ile başlangıç noktası tespit işaretinin beraber gösterimi.
- Şekil 6.13:** Spektral akı işaretinin öz-ilinti fonksiyonu.
- Şekil 6.14:** 3 ritim grubundan toplam 21 eser için spektral akı işaretinin öz-ilinti fonksiyonu.
- Şekil 6.15:** Türk müziği kayıtları için başlangıç noktası tespit sinyalinden elde edilen öz-ilinti fonksiyonları.
- Şekil 6.16:** 180 bpm'de sentezlenmiş "Muhayyer Aranağme" için zaman-öz-ilinti fonksiyonu.
- Şekil 6.17:** Gerçek kayıtlar için başlangıç noktası tespit sinyalinden elde edilen zaman-öz-ilinti gösterimleri.
- Şekil 6.18:** Tanburi Cemil Bey, Hüzzam Taksim (Kayıt-1) için zaman-öz-ilinti grafiği.
- Şekil 6.19:** "Düğün Evinde" için zaman-öz-ilinti grafiği.
- Şekil 6.20:** Yeni örnekleme ile aynı ritme çekilmiş sentetik kayıtların öz-ilinti fonksiyonlarının usul (semai, curcuna ve aksak) sınıflarına göre gösterimi.
- Şekil 6.21:** Bir Uşşak ney taksiminin MUS2 ile notaya dökülmüş hali.
- Şekil 6.22:** Otomatik notaya dökme örneği, neyle Rast makamında icra.

Şekil 6.23: Tanburi Cemil Bey'in Çeçen Kızı eseri notası.

Şekil 6.24: Otomatik nota yazımı için 1. ve 2. dolabın f0 eğrisi üzerinden karşılaştırmalı olarak gösterimi.

Şekil 6.25: Tanburi Cemil Bey'in Ferahfeza Saz Semaisi eseri notası.

Şekil 7.1: Tanbur ve kemençe örnekleri için bulunan mel frekans kepstral katsayıları.

Şekil 7.2: Optimal ayırıcı yüzey ve destek vektörleri.

Şekil 7.3: Değişen parametre değerlerine göre başarı oranları.

Şekil 7.4: Değişen parametre değerlerine göre duyarlılık ve belirleme oranları.

Tablolar:

Table 4.1: Sentetik veriler üzerinde otomatik karar tespit test sonuçları

Tablo 4.2: Şablon eşleştirme(beyaz) ve k-NN(gri) sınıflandırıcılarının karşılaştırmalı değerlendirme sonuçları

Table 4.3: Şablon eşleştirme sınıflandırıcısının değerlendirme sonuçları.

Tablo 4.4: 16 makam için sınıflandırma başarıları.

Tablo 4.5: 16 makam sınıflandırması için karıştırma matrisi.

Tablo 4.6: Dizilerine göre makamların gruplanması.

Tablo 4.7: 16 makamın 6 makam grubu olarak sınıflandırılma başarıları.

Tablo 4.8: Sınıflandırma testlerinde kullanılan 35 makam.

Tablo 4.9: Benzerliklerine göre 10 makam grubu.

Tablo 4.10: 35 makamın 10 makam grubu olarak sınıflandırılma başarıları.

Tablo 4.11: Benzerliklerine göre 10 makam grubu.

Tablo 4.12: 35 makamın 10 makam grubu olarak sınıflandırılma başarıları.

Tablo 5.1: Uşşak makamı için kuramsal aralıklarla ölçülen frekans değerlerinin karşılaştırması.

Tablo 5.2: Kuramlarla icralar arasında uzaklığın ortalama değerleri.

Tablo 6.1: BN tespit algoritmasının ortalama başarı oranları.

Tablo 6.2: Başlangıç noktaları (BN) elle işaretlenmiş veritabanı içeriği.

Tablo 6.3: BN tespit algoritmalarının F değeri(measure) cinsinden ortalama başarı oranları.

Tablo 6.4: MIDI nota numaraları.

Tablo 6.5: MIDI veri yapısı.

Tablo 6.6: Frekans kaydırma mesajı veri yapısı.

Tablo 6.7: 0.5 değerinde bir tizleşme için örnek frekans kaydırma mesajı.

Tablo 6.8: 60.5 MIDI nota numarasına sahip 5 saniyelik bir notanın MIDI formatında gösterimi.

Tablo 6.9: 1. Nota kümesi için özgün nota ile otomatik nota karşılaştırması.

Tablo 6.10: 2. nota kümesi için özgün nota ile otomatik nota karşılaştırması.

Tablo 6.11: 1. nota kümesi için özgün nota ile otomatik nota karşılaştırması.

Tablo 7.1: Çalgı tanıma testlerinde kullanılan 5 saniyelik parça sayıları.

Tablo 7.2: DVM ile belirlenen uzayın veriyi kapsama oranı.

Tablo 7.3: Karışım matrisi.

Özet:

Bu projede Klasik Türk müziği kayıtlarının otomatik olarak notaya dökülmesi ve makamların otomatik olarak tanınması için literatürde ilk defa kullanılan yöntem ve teknikler önerilmiş, yazılımlar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlara ulaşabilmek için bir dizi problem derinlemesine incelenmiştir. Öncelikle temel titreşim frekans(f_0) analizi için literatürde varolan teknikler denenerek en uygun algoritma seçilmiştir. Bu algoritma ile elde edilen sonuçları iyileştirmek için bazı süzgeçler tasarlanmış ve önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Bunu takiben f_0 bilgisinden f_0 dağılımları(kullanım sıklıkları) elde edilmiş, f_0 dağılımlarını kullanarak karar sesi tespiti, kuram - icra uyum düzeyi ölçümü ve otomatik makam tanınması yapan özgün araçlar tasarlanmıştır. Literatürde ilk defa 5 ayrı kuram ve 9 sık kullanılan makamdan güvenilir kayıtlar içeren veri setleri üzerinde kuram - icra uyum düzeyi detaylı olarak incelenmiştir. Yine ilk olarak birçok hesaplamalı müzikoloji çalışmasında kullanılabilecek sembolik bir Türk müziği veritabanı hazırlanmış ve paylaşımına açılmıştır. Otomatik notaya dökme uygulaması için gerekli olan başlangıç noktası tespit algoritması, f_0 nicemleme yöntemi ve MIDI'ye dönüştürme araçları geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Müzik bilgi erişimi, Türk müziği, frekans analizi, makam tanıma, otomatik notaya dökme, başlangıç noktası tespiti, MIDI dönüşümü

Abstract:

In this project, we developed methods and techniques for the automatic music transcription and automatic makam recognition of Turkish Classical music recordings and realized software for these aims for the first time in literature. To achieve these targets, we studied several research problems in depth. As the first step, available fundamental frequency(f_0) detection algorithms are tested on Turkish music recordings and the most effective one is chosen. To improve f_0 detection, post-filters are designed which resulted in considerable improvement. f_0 histograms are computed and used as a feature in various applications: automatic tonic detection, measuring theory-practice mismatches, automatic makam classification. For the first time in literature, scales proposed by 5 different theoretical tuning models are compared to f_0 measurements obtained from solo recordings from 9 different makams. A symbolic database for Turkish music which can be used in various studies on computational musicology is developed and opened to public. The automatic transcription tool implemented includes a novel onset detection algorithm, an f_0 quantization algorithm and a MIDI transcriber.

Keywords: Music information retrieval, Turkish music, frequency analysis, makam recognition, automatic music transcription, onset detection, MIDI transcription

1. Amaç, Kapsam ve Katkılar

1.1 Neden Türk müziği için işaret işleme

Müzik hangi ülkeden olursa olsun, hangi coğrafyada yaşarsa yaşasın insan topluluklarının oluşturduğu kültürün yapıtaşlarından. Müzik bilimi ise bilim tarihinin önemli bir kısmında matematikle birlikte, hatta matematiğin içinde anılmış, bilimsel merakın ve insan yaratıcılığının sonucu olarak sürekli değişmiştir. Bugün modern insan, yaşantısının belki hemen her gününde müzikle karşılaşmakta, müzik endüstrisi ekonomide çok önemli bir pay taşımaktadır. Müzik her zaman olduğu gibi yeni araçlar, yeni yaklaşımlar ile değişimine devam etmektedir.

Günümüzde bu değişimin ana kuvvetlerinden birisi bilişim teknolojileridir. Bilgisayar ve yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ve yaygınlaşması sayesinde insanların hem müziği üretme biçimi hem de dinleme (tüketme) biçimi hızla değişmektedir. Buna paralel olarak müzik bilimi de gelişmekte, hesaplamalı müzikoloji alanı çocukluk çağını geçip yetişkinliğe doğru ilerlemektedir. Bu gelişmedeki en önemli pay bilişim teknolojilerine aittir.

Ne yazık ki müzik için teknoloji ve bilim gelişirken ülkemiz insanları (sınırlı sayıdaki istisna dışında) bu gelişimin izleyicisi ve tüketicisi konumundadır. Burada elbette birinci önemli sorun üretenler arasında varolmayışımızdır. İkinci sorun da tüketici olarak bilinç düzeyimizdedir. Bilim ve teknolojinin bazı sonuç ve ürünleri (örneğin kayıt cihazları) müzik türünden bağımsız olmakla beraber bazı müzik türüyle yakından ilgilidir. Akort cihazları, sentezciler, nota yazım programları gibi müzik türüyle yakından ilgili olan teknoloji ve bilimin, Anadolu müziğinin üretim ve araştırılmasında doğru kullanımı için bu konulardaki bilgi ve farkındalık düzeyinin bugünkü seviyesinin çok ötesine taşınması gerekmektedir. Türk müziği nota frekanslarının Batı müziğinden farklı olduğunu bilen ve dile getiren birçok müzisyen, çalgılarını Batı müziğine göre ayarlanmış akort cihazları yardımıyla akort ederek, çalgı yapımcıları da telli sazların perdelerini ayarlarken Batı müziği akort cihazı kullanarak kendi söylemleriyle çelişmekte, bir yandan da müziği dönüştürmektedirler.

Sürekli tüketici olarak kalmak istemiyorsak ve tüketirken müziğimizi istemediğimiz yönde değiştirmek istemiyorsak Türk müziği için bilim, teknoloji ve beraberinde bilinç düzeyinin gelişmesi için aktif rol almamız gerektiği açıktır. Buna ek olarak, Türk müziğinin ana karakteri olan makam kavramı coğrafya olarak ülkemiz sınırlarını aşmaktadır. Ortadoğu ve Asya'nın önemli bir kısmı ve Kuzey Afrika gibi geniş bir coğrafyada yaşamaya devam etmekte olan müzikal geleneklerle benzerliği düşünüldüğünde, Türk müziği bilgi erişim uygulamalarının geliştirilmesinin Batı müziği dışındaki müzikler için bilgi erişim alanında özel ve merkezi bir öneme sahip olduğunu düşünmekteyiz. Bu alanda ülkemiz bilim insanlarının öncü ve lider olma şansı bulunmaktadır. Bu proje ülkemizde bu altyapının geliştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla tasarlanmıştır. Atılan her adımın araştırmacılara açık, testleri tekrarlanabilir ve hataları bulunarak geliştirilebilir olmasına özen gösterilmiştir.

1.2 İşaret işleme açısından Batı müziği ile Türk müziği arasındaki temel farklılıklar

Batı müziği için hesaplamalı müzikoloji ve müzik bilgi erişimi özellikle son 10 yılda büyük atılımlar gösterilmiş alanlardır. Bu alanda birçok uluslararası bilimsel dergi bulunmakta düzenli olarak konferanslar düzenlenmektedir. Akla gelen ilk sorulardan birisi Batı müziği için geliştirilmiş olan bu teknolojilerin adaptasyon yöntemiyle Türk müziği için kullanılıp kullanılamayacağıdır. Bunun önündeki engeller çeşitli olmakla beraber en önemlileri iki müzik türü arasında ses sistemleri, tartım, icra tavırları ve kuramdaki farklılıklardır.

- Ses Sistemleri: Bugün kullanılan Batı müziği ses sistemi, frekans uzayının logaritmik olarak 12 eşit parçaya ayrılmasıyla oluşmaktadır. Bu parçalamaya bağlı olarak notaların karşılık geldiği frekanslar tanımlanmıştır ve bu tanımlama uluslararası standart haline gelmiştir. Klasik Türk müziği için ise farklı ses sistemlerinden hangisinin icra ile kuramı en iyi birleştirdiği konusunda bir anlaşma/uzlaşma yoktur (frekans uzayını logaritmik olarak 53, 106, 159 eşit parçaya ayıran ses sistemleri bulunduğu gibi, tamsayı oranlı operatörler kullanarak notaların yerlerini tanımlayan ses sistemleri de bulunmaktadır). Ayrıca bu ses sistemleri ancak merkezi frekansları tanımlayabilmekte, notalar/perdeler ise icracılar tarafından farklı frekanslarda icra edilebilmektedir. Bu sebeple bazı notalar belirli frekanslardan çok bir merkezi frekans çevresindeki frekans aralıklarına karşılık gelmektedirler. Buna ek olarak, Türk müziği için, Batı müziğinde kullanılan standart akort frekansı (La4=440Hz) gibi geçerli tek bir akort frekansı bulunmamaktadır. Türk müziği için daha çok ahenk sistemi olarak anılan ve ney boylarıyla ilişkilendirilen birden fazla akort sistemi kullanılmaktadır (ERGUNER, 2007). Sonuç olarak Klasik Türk müziğinde kullanılan notaların sayısı ve frekans uzayı üzerinde buldukları yerler Batı müziğiyle büyük farklılıklar göstermektedir.
- Tartım (Rhythm): Klasik Türk müziğinin Batı müziğine göre çok farklı ve karmaşık tartım (usul) özellikleri vardır. 4/4 ve 3/4'den farklı ve güçlü vuruşları ölçünün birinci vuruşuna denk gelmeyen, güçlü bir vurmali çalgı bileşeni içermeyen kayıtlar çoğunluktadır. Batı müziği için geliştirilmiş ritim analiz araçlarının bu tip kayıtların analizinde başarıları oldukça düşüktür. Ayrıca taksim ve gazel gibi bu müziğin bazı önemli biçimleri (formları) serbest tartımlıdır, yani herhangi bir tartım içermemektedirler.
- Tonalite (Tonality): Klasik Türk müziği ile Batı müziği arasındaki en büyük ayrımlardan birisi de bir ezginin ana karakterini veren tonalite konusudur. Batı müziğinde bu anlamda major, çeşitli minörler ve bunlardan üretilen modların (dorian, firigyan gibi) herbiri bir dizi tanımlamakta ve böylece ezgi karakterini belirlemektedir. Klasik Türk müziğinde ezgi karakteri (sayıları çok fazla olmakla beraber güncel olarak sık kullanılan 30 civarında) makam ile tanımlanır. Her makam, öncelikle bir dizi tanımlamakla beraber kuramda sözel tariflerle anlatılan seyir'le ezgi karakterini belirlemektedir. Seyir makam müziğinin en önemli karakteri olmakla beraber henüz hesaplamalı müzikoloji alanında çalışılmamış bir konudur.
- Ezgisel süslemeler (Tavır): Klasik Türk müziği, çoğunlukla monofonik ya da heterofonik icra edilmesi sebebiyle süslemeler açısından Batı müziğine oranla çok zengindir. Bu durum özellikle temel titreşim frekans analizi ve otomatik notaya dökmenin frekans nicemlemesi adımıyla zorluk oluşturmaktadır.
- Kuramsal: Klasik Türk müziği ile Batı müziği arasında müzik kuramı açısından da belirli ayrımlar vardır. Birincisi Batı müziği kuramı belirli matematiksel temellere dayandırılmıştır ve farklı Batı müziği türleri (klasik, modern, pop, caz vb.) için ayrı ayrı tanımlanmış olsa da üzerinde uzlaşılmış ortak bir kuram özelliği göstermektedir. Klasik Türk müziği kuramı ise farklı okullar tarafından tanımlanmaya çalışılmıştır ve müzik kuramcıları arasında tartışmalar (özellikle dizi konusunda) devam etmektedir. Kuramlarda diziler matematiksel olarak tanımlanmaya çalışılırken seyir sözel ifadelerle açıklanmakta, matematiksel bir formülasyonu verilmemektedir.

Listelenen zorluklar arasında en önemli zorluk en sonuncusudur. Çünkü karmaşıklığı fazla bile olsa net bir şekilde ifade edilmiş, uzlaşılmış ve Batı müziği kuramıyla karşılaştırılabilir bir kuramın varlığında adaptasyon yöntemi uygulanabilirdi. Ancak kuramın sözel ifadelerle dayanması, halen tartışılır duruma olması ve icrayı kapsayamaması sebebiyle adaptasyon yönteminin, daha ilk adımdan sınırlayıcı olacağı düşünülmüştür. Bunun yerine bu projede veriden (kayıtlardan) yola çıkarak, kuramdan ihtiyaç oldukça çok sınırlı düzeyde bilgi alınarak

ilerlemeye karar verilmiştir. Bununla beraber, yaygın olarak kullanılan (Y)AEU ((Yekta)¹, Arel, Ezgi, Uzdilek (YEKTA, 1922, AREL, 1930, EZGİ, 1933) kuramının Batı müziği bilgi erişiminde kuramın kullanıldığı gibi Türk müziği bilgi erişiminde kullanılma potansiyeli de incelenmiştir.

1.2 Otomatik notaya dökme

Otomatik notaya dökme, verilen bir kaydın işaret işleme yöntemleriyle tam otomatik olarak notasının çıkartılması, diğer bir deyişle ham ses verisinin sembolik veriye dönüştürülmesidir. Projemizin hedefi, otomatik notaya dökme uygulaması için gerekli teknolojinin/yazılımların oluşturulmasıdır. Aslen bu, Batı müziği için de tam olarak ulaşılamamış, zor bir hedeftir. Bu raporda, literatürde ilk defa Türk müziği için bir otomatik notaya dökme yazılımı sunmanın yanısıra, bu teknolojiyi geliştirirken attığımız her adımın Türk müziği için bilim ve teknolojinin gelişmesi açısından önemini detaylı bir şekilde açıklayarak ilerleyeceğiz.

Otomatik notaya dökme uzun süredir araştırmacıların üzerinde çalıştıkları bir konudur. Bu konuda uluslararası alanda birçok yayın (özet için bakınız: (KALPURI, 2004b)), doktora tezi (BELLO, 2003, HAINSWORTH, 2003, KLAPURI, 2004a), program (Akoff (<http://www.akoff.com/>), Araki (<http://www.pluto.dti.ne.jp/~araki/amazingmidi/>), Intelliscore (<http://www.intelliscore.net/>), Notechaser (<http://www.tnsoptima.com/soundidea/notechaser.html>), Scoreextractor (<http://www.recognisoft.com/>)) ve patent (SHIGEAKI, 1993, ALEXANDER, 2001, MASAHIRO, 2002) bulunmaktadır. Bugün Türk müziğinin otomatik notaya dökümüyle ilgili benzer bir çalışma yoktur. Projemiz bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Otomatik notaya dökme uygulamasını geliştirebilmek için atılması gereken adımlar kendi başlarına önemli bilimsel sorular - uygulamalar olarak önümüzde durmaktadır. Bunlardan önemli bir tanesi icranın kuramla örtüşme düzeyiyle ilgilidir: Notaya dökme, yapılan icranın kuramdaki seslerden hangilerine karşılık geldiğinin bulunmasını gerektirmektedir. Ancak Türk müziği için nota yazma ve ses kuramı halen tartışmaya açık konulardır². Bu problemin bilimsel olarak çalışılabilmesi için frekans ve aralık ölçme büyük önem taşımaktadır. Ölçme konusunda bu müziğe has zorluk, kayıtların farklı diyapozonlarda / ahenklerde / akortlarda çalınmış olması sebebiyle birden fazla kaydın analiz sonucunun doğrudan birleştirilerek istatistiksel verilerin doğrudan elde edilememesidir. Projemizde 4. bölümde açıklandığı gibi çok sayıda kayıttan tam otomatik ölçümler yapılmasını sağlayan bir teknolojiyi geliştirmiş ve kullanıma sunmuş bulunmaktayız (BOZKURT, 2008).

Otomatik notaya dökme için öncelikle kaydın hangi makamda icra edildiğinin otomatik olarak bulunması gerekmektedir. Çünkü porte üzerinde kullanılan arıza işaretleri makama göre farklılık göstermektedir. Otomatik makam tanıma farklı uygulamaları da olduğu için aşağıda ayrıca ele alınmıştır.

1.3 Otomatik makam tanıma

Otomatik makam tanıma, sadece kayıttan yola çıkarak bir icranın hangi makamda yapıldığının işaret işleme araçlarıyla tam otomatik olarak bulunmasıdır. Otomatik makam tanımının, notaya dökme uygulamasına ek olarak başka bilgi erişim uygulamalarında da kullanımını bulunmaktadır. İnternet ve bilişim teknolojilerindeki gelişmeler sebebiyle hızla büyüyen arşivlerde yapılacak taramalarda bu çeşit araçlar özel bir önem taşımaktadır.

¹ Rauf Yekta'nın kuramı (YEKTA, 1922), Arel-Ezgi-Uzdilek kuramından önemli farklılıklar taşımakla beraber ana diziyi tanımlanırken kullandığı aralıklar aynıdır. Bu projede dizilerin aralık bilgileri kullanıldığı için (aslen Pisagoryen kurama dayanan (YARMAN, 2007)) bu kuramlar birlikte anılmıştır.

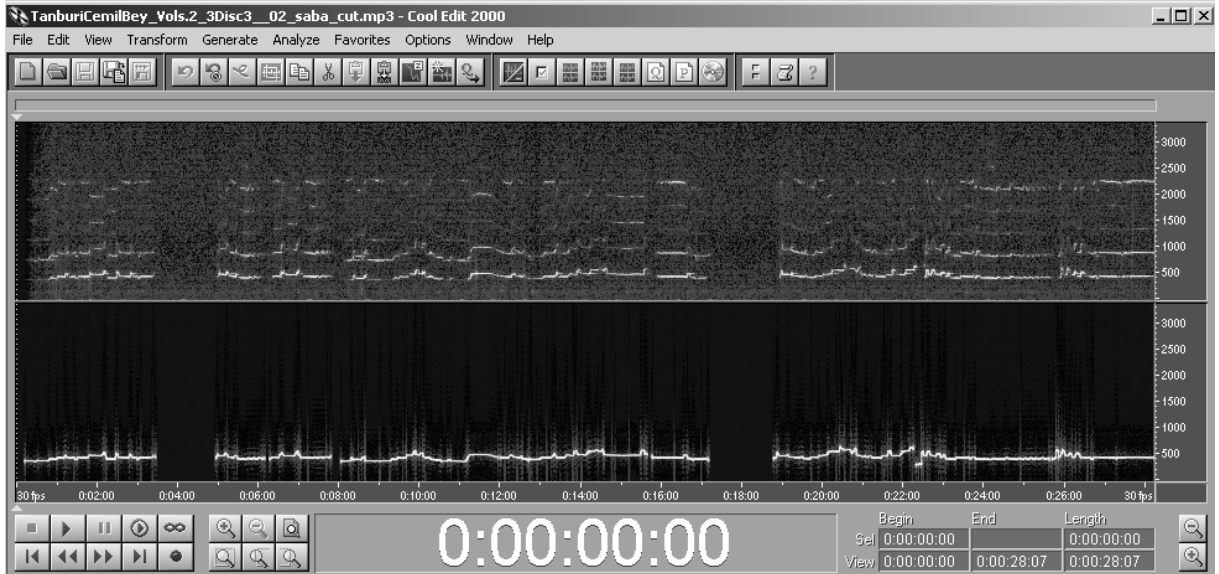
² Sadece bu konuyu ele alan, "Türk Müziğinde Uygulama - Kuram Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çağrılı Kongre" isimli bir kongre İTÜ Türk Müziği Devlet Konservatuvarı tarafından 4 - 6 Mart, 2008 tarihlerinde düzenlenmiştir.

Örneğin Hicaz makamından eserler dinleyip çalışmak isteyen bir öğrenci böyle bir araçla “Hicaz” anahtar kelimesiyle eserleri taratarak büyük bir veritabanındaki ilgili eserlere rahatlıkla ulaşabilecektir. Müzik Bilgi Erişimi (music information retrieval(MIR)) ismi verilen bu araştırma alanı³ Google gibi şirketlerin büyümeleriyle beraber yakın dönemde yoğun ilgi çeken bir alandır.

1.4 Veritabanlarının oluşturulması ve paylaşımı

Proje bütçesinde ayrılan ödenek sayesinde 2007 ekim itibariyle müzik CD’si formatında ulaşılabilen kayıtlardan çok sayıda satın alınarak geniş bir veritabanı oluşturulmuştur. Albüm seçiminde özellikle literatürde güvenilir referans olarak gösterilen müzisyenlerin kayıtlarının tercih edilmesine özen gösterilmiştir. WAV formatında yedeklenen kayıtlar, dosya ismi içerisinde *_[makam]_* şeklinde kodlanarak elle isimlendirilmişlerdir. Benzer şekilde çalgı tanıma çalışması için de *_[çalgı].* şeklinde bir kodlama yapılmıştır. Bu, herhangi bir anda sadece dosya isim taramasıyla aranan bir makamdan (veya çalgı kullanılan) tüm kayıtlara ulaşmaya imkan tanımaktadır. Örnek isimlendirmeler: 06_hicaz_taksim_tanbur.wav, 02_cecenkizi_huseyni_tanbur.wav, vs.

Özellikle makam tanıma çalışması açısından kritik olduğu için kayıtlar içerisinden güvenilir olanların bir altkümeye toplanması önemlidir. Bunun için işitsel-görsel kontrol yöntemleri uygulanmıştır: bütün kayıtlar için temel titreşim frekans (f_0) analizi Bölüm 2’de anlatıldığı gibi yapıldıktan sonra elde edilen f_0 bilgisinden tek armonik içeren ses işareti sentezlenmiştir. Sentezlenen işaret bir kanalda, orijinal kayıt bir kanalda olacak şekilde oluşturulan çift kanallı kayıtlar spektrumları gözlenirken bölgesel olarak dinlenmiş ve kaydın güvenilir veri setine dahil edilip edilemeyeceğine karar verilmiştir. Aşağıda bu şekilde oluşturulan örnek bir spektrum gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Frekans analizinin işitsel testi için oluşturulan iki kanallı işaretin spektrogram gösterimi. Üst kanal orijinal işarete, alt kanal sentetik işarete aittir. (Örnek kayıtlar dinlemek için bakınız CD içerisinde “f0kontrolverisi” isimli klasör.)

Veritabanı paylaşımı:

Türk müziği çalışmalarının önündeki önemli engellerden birisi paylaşımına açık veritabanlarının eksikliğidir. Veritabanı paylaşımının birçok alanda bilimsel araştırmaların önünü açtığı

³ Bu alandaki araştırmaları bir çatı altında toplayan ISMIR organizasyonuna <http://www.ismir.net/> sayfasından ulaşılabilir.

bilindiği için gelişmiş ülkelerde sadece veri toplamaya yönelik birçok proje gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde böyle çabaların sayısı ne yazık ki çok azdır. Bu projeyi gerçekleştirirken maddi kaynak ve işgücü kaynağı aktardığımız veritabanımızı paylaşmaya iten nedenlere, diğer araştırmacıları teşvik amacıyla burada yer vermek istedik. Paylaşılan veritabanları sayesinde:

- Diğer araştırmacılar veri toplama zahmetinden kurtulur, kendi alanlarında araştırma yapmaları için zaman kazanırlar,
- Veri işlemenin bazı kısımlarını kendi başına gerçekleştiremeyecek araştırmacıların genel problemin çözümüne katkı yapmaları mümkün olur,
- Veri toplama için harcanan emeklerin üstüste eklenerek ulaşılabilir verilerin sürekli büyümesi sağlanır,
- Veritabanı kullanıcıları geribildirimde bulunduğu verileri düzeltme olanağı doğar. Birkaç kişilik grupla yapılamayan elle düzeltmeler kullanıcı sayısı fazla olduğunda bütün kullanıcıların katkısıyla rahatlıkla yapılabilir,
- Paylaşılan veritabanı, çeşitli önerilerin uygulanması - denenmesi için referans görevi görür.

Telif hakları engelleri sebebiyle kayıtlar paylaşılamadığı için bu proje içerisinde, her parça için 10 milisaniye'de bir f0 ölçümü içeren bir parametrik veritabanı oluşturulmuş ve <ftp://ftp.iyte.edu.tr/share/ktm-nota/index.htm> adresi üzerinden paylaşımına açılmıştır. Türk müziği için paylaşılan ilk parametrik veritabanını olan TMVB ile ilgili detaylı bilgilere bu adresten ve (BOZKURT et al, 2008b) içerisinden ulaşılabilir.

2. Temel titreşim frekans(f0) analizi

Temel titreşim frekansı (f0), periyodik bir işaretin saniyedeki tekrar sayısına karşılık gelmektedir. Konuşma işlemeden biyomedikal işaret işlemeye kadar birçok alanda ölçülen ve işlenen temel parametrelerden birisidir. Bu sebeple çok çeşitli işaret işleme teknikleriyle gerçekleştirilebilmektedir (HESS, 1983) ve ilgili literatür çok geniştir. Çalışmamızda, varolan teknikler arasında problemimize en uygun olanın seçip iyileştirilme yolunu izledik.

2.1. f0 analizinde kullanılacak algoritmanın belirlenmesi

Öncelikle bütün literatürü taramak yerine 2000 yılından itibaren yapılan çalışmalarda sıkça referans verilen ve kullanılan yöntemleri inceledik. YIN isimli algoritmanın (de CHEVEIGNE et al, 2002) sıkça referans algoritma olarak kullanıldığını gördük ve adaylar arasına dahil ettik. Diğer bir sık kullanılan araç da Praat⁴ isimli konuşma işaret işleme fonksiyonları içeren program içerisindeki f0 analiz fonksiyonuydu. Son olarak projemizle aynı hedefe (otomatik notaya dökme) yönelik (ancak sadece Batı müziği için) tasarlanmış bir ticari ürün olan SoloExplorer⁵,in de karşılaştırmaya dahil edilmesine karar verdik. Sonuç olarak üç algoritmanın performanslarının Türk müziği eserleri üzerinde karşılaştırılmasına karar verdik:

- YIN
- Praat
- SoloExplorer

İlk amacımız bu üç algoritmayı karşılaştırarak kendimize uygun f0 algoritmasını tespit etmektir. Bunu takiben hedefimiz bu algoritmanın gerçekleşmesi, klasik Türk müziği kayıtları üzerinde denenmesi, sıkça yapılan hataların tespiti ve iyileştirmeydi.

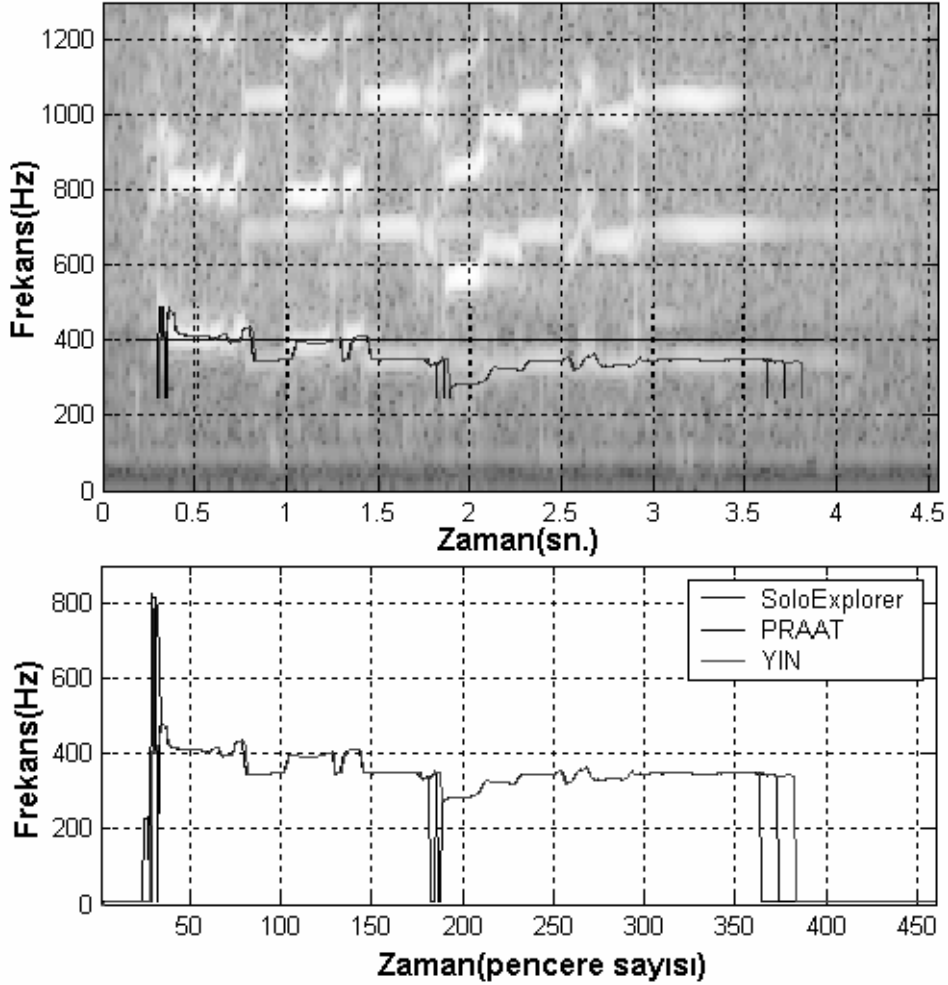
f0 analiz algoritmalarını doğal kayıtlar üzerinde çalıştırarak karşılaştırırken sayısal ve kesin bir karşılaştırmanın yapılması, elimizde doğru f0 bilgisi olmadığı için mümkün

⁴ <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>

⁵ <http://www.recognissoft.com/>

olamamaktadır. Bu sebeple f_0 bilgisi kesin olarak bilinen sentezlenmiş işaretler üzerinden testler yapılması da yaygın bir uygulamadır. Ancak birçok çalışmada sentetik sesler ile doğal seslerin akustik analizinde algoritmaların başarı düzeylerinin farklı olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple üç algoritmanın sadece doğal kayıtlar üzerinde denenmesine ve sonuçların görsel ve işitsel olarak karşılaştırılmasına karar verilmiştir.

Görsel karşılaştırma için en sık kullanılan yöntem olan dar-bant spektrogramındaki selen (harmonic) izleriyle f_0 eğrilerinin karşılaştırılması yöntemini izledik. Şekil 2.1’de bir kemençe kaydı için görsel karşılaştırmada kullanılan çizimler sunulmaktadır.



Şekil 2.1: Spektrogram ile temel titreşim frekans analiz sonuçlarının karşılaştırılması (kemençe örneği): Üst) Spektrogram, Alt) Soloexplorer, Praat ve YIN ile elde edilen sonuçlar (Alt’taki çizim üste karşılaştırma amaçlı yapıştirilmiştir)

Şekil 2.1’de, işarete ait spektrogram, üzerine f_0 sonuçları yapıştirilerek verilmiştir. Spektrogram üzerinde ilk üç selenin izi (geriplana görece açık renkte) net bir şekilde gözlenebilmektedir. f_0 analizinde hedef birinci selenle aynı izi takip eden bir işaret elde etmektir. Bu işaret için birinci selen iziyle f_0 sonuçlarının büyük oranda örtüştüğü gözlenmektedir (bu gözlem burada çizimi verilmeyen birçok başka örnek için de geçerlidir).

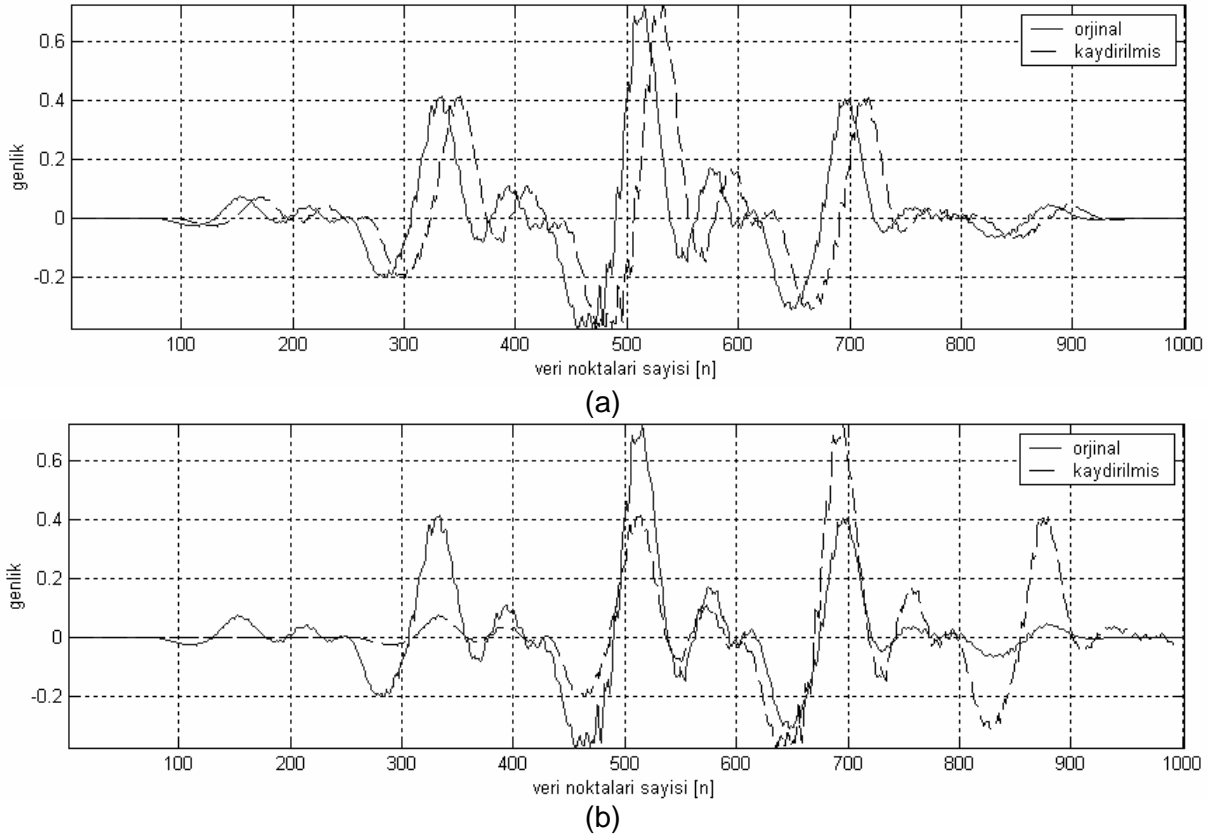
Spektrogramla görsel karşılaştırmalar ney, keman gibi üfleme ve yaylı enstrümanlar için geçerli bir yöntem olmakla beraber “didilerek” (picking) çalınan enstrümanların kayıtları için geçerli bir yöntem olamamaktadır. Birçok ud ve tanbur örneğinde selenlerin gözle takibi zor olmakta, f_0 ölçümleri ile sağlıklı karşılaştırma yapılamamaktadır. Bu nedenle görsel karşılaştırmaya işitsel karşılaştırmının eklenmesine karar verilmiştir. Bu amaçla Bölüm

1.4'te açıkladığımız yöntemle, seçilmiş örnekler [farklı akustik özelliklere sahip 10'ar adet ney, tanbur, ud, keman, insan sesi (gazel), kemençe örneği] üzerinde, çift kanallı kayıtlar oluşturulup spektrogramı izlenirken dinlenmesi yöntemi izlenmiştir. Algoritmaların genel başarı düzeylerinin birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Kalitede büyük farklılık gözlenmemesi ve pratik kolaylıklar sebebiyle YIN algoritmasını f_0 ölçüm aracımız olarak seçtik. YIN algoritması Müzik Bilgi Erişimi (Music Information Retrieval (MIR)) alanında çok sık kullanılan açık kaynak kodlu bir algoritma olup <http://cognition.ens.fr/audition/adc/sw/yin.zip> adresinden paylaşılmaktadır.

2.2. YIN algoritması ve iyileştirme çalışmaları

2.2.1 YIN algoritması

YIN sıkça kullanılan bir yöntem olan öz-ilinti (autocorrelation) temelli bir algoritmadır. Öz-ilinti yardımıyla f_0 hesaplanması herhangi bir işaretin kendi üzerinde kaydırılarak dalga şekillerinin hangi sıklıkla tekrarlandığının bulunmasına dayanır. Şekil 2.2'de bir örnek için orijinal ve kaydırılmış işaretler iki farklı kaydırma miktarı için gösterilmiştir. Amaç kaydırılmış işaretin orijinal işaretle en çok örtüştüğü kaydırma miktarının (Şekil 2.2b'deki gibi) bulunmasıdır.



Şekil 2.2: Periyodu bilinen (180 veri noktası olan) bir işaret parçasının kendi üzerine kaydırılmasıyla öz-ilinti hesaplanması: a) 15 nokta kaydırma, b) 180 nokta kaydırma

Öz-ilinti işareti, W boyutlu bir pencere fonksiyonuyla pencerelenmiş bir x_t sayısal işareti için aşağıdaki hesaplamayla elde edilir:

$$r_t(\tau) = \sum_{j=t+1}^{t+W} x_j x_{j+\tau} \quad (1)$$

Öz-ilinti değeri, $r_i(\tau)$, işaretler örtüştüğünde kaydırma miktarında görece yüksek bir değer alır. Öz-ilinti tabanlı f_0 ölçümünde pencerelemiş işaret parçaları kendi üzerlerinde sistematik olarak kaydırılarak öz-ilinti değerlerinin en yüksek olduğu noktalar bulunur ve kaydırma miktarı temel titreşim periyodu olarak alınır. YIN algoritması bu sıkça kullanılan yöntemin hassasiyetini artırmak için beş değişikliğin yapılmasıyla elde edilmiştir:

- Çarpım yerine çıkarma kullanılması,
- Ortalama değerlerin çıkartılması,
- Eşik değeri uygulanması,
- Parabolik ara-değerleme,
- Bölgesel analiz.

Kendimiz bizzat geliştirmedığımız ve bu algoritmanın ilgili dökümanı olan (de CHEVEIGNE et al, 2002) içerisinde yapılan açıklamaları tekrarlamamak için, burada bu adımların detayına girmeyeceğiz.

2.2.2 Düzeltme amaçlı tasarlanan filtreler

Klasik Türk müziği kayıtlarının akustik özellikleri kayıt koşullarının çok çeşitli olması nedeniyle büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Bazı çok değerli kayıtlar eski teknolojilerle yapılmış gürültülü kayıtlardır (Tanburi Cemil Bey'in 1912-14 yıllarında yapılan kayıtları gibi). f_0 analiz algoritmasının hemen her tür kayıta iyi sonuç vermesi hedeflendiği için bir dizi test yapılmış ve şu hatalar gözlenmiştir:

- Beklenildiği gibi gürültü düzeyi çok yüksek kayıtlarda hatalar genel olarak daha fazladır,
- Farklı akustik özellikler taşıyan çalgıların kayıtlarında algoritmanın başarı düzeyi de farklı olmaktadır: Örneğin ud gibi mızrapla didilerek çalınan çalgılardaki başarı oranı ney gibi güçlü bir veya birden fazla selen içeren çalgılara göre daha düşüktür. Bunun temel nedeni ud kayıtlarında mızrap vuruşuyla oluşan geçici kararsız işaret bölgelerinin sıkça gözlenmesidir.

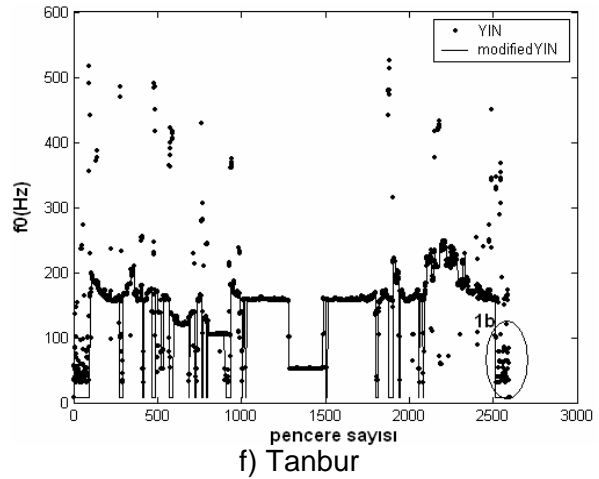
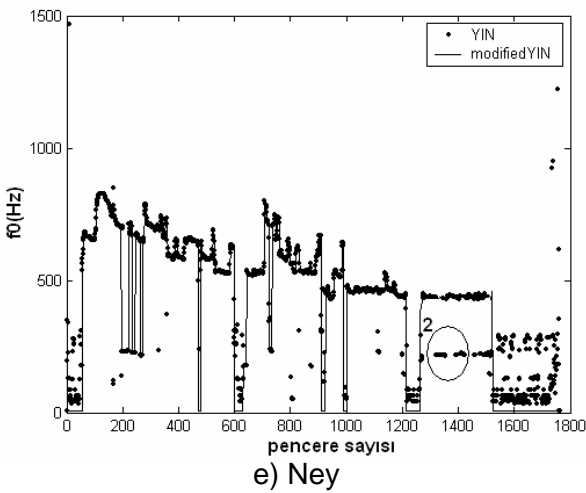
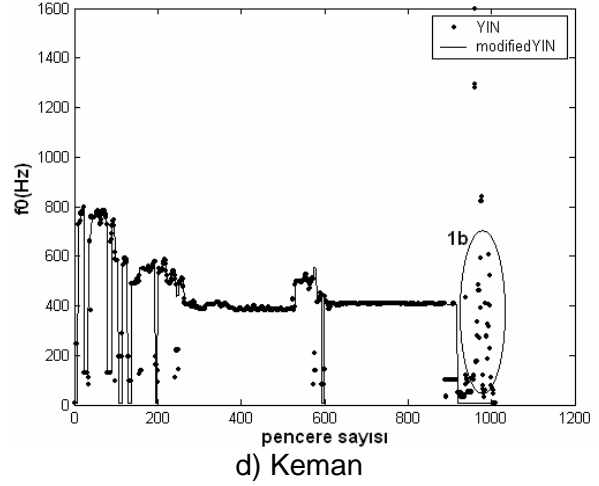
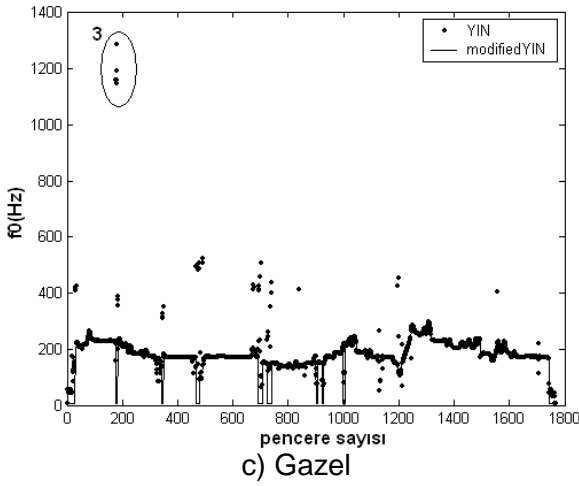
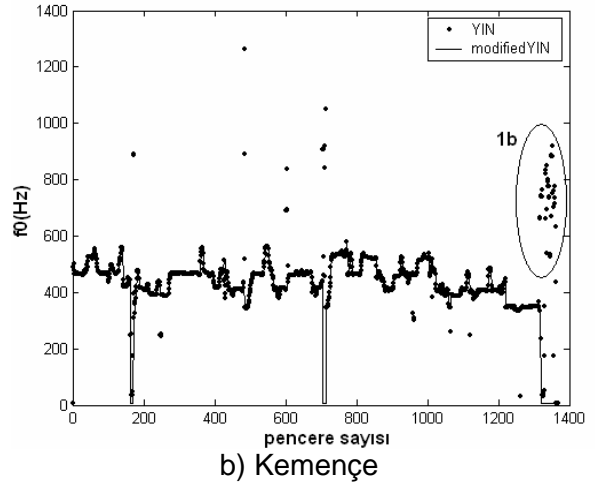
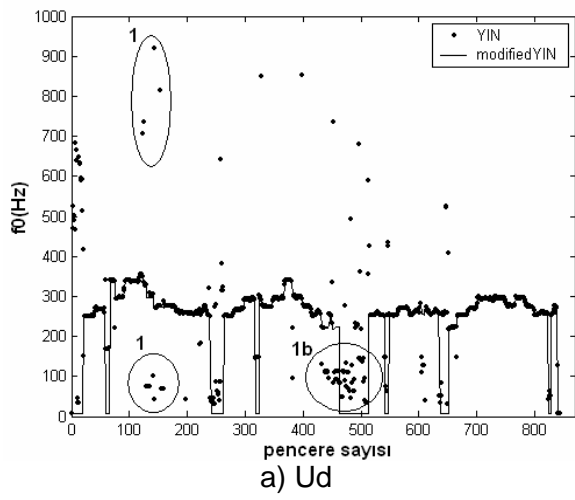
Listelenen bu tip sorunları mümkün olduğunca giderebilmek için YIN'in sorunlarını örnekler üzerinde ayrıntılı olarak inceledik ve bazı ek filtreler tasarladık. Tasarladığımız bu filtrelerin bazıları aşağıda listelenmiştir ve filtreler sonucunda elde edilen iyileştirme örnek şekiller üzerinden açıklanmıştır:

1) Süreklilik koşulu: Ardışık f_0 ölçümleri arasındaki farkın belirli bir eşik değerine göre büyük olması durumunda bir kesiklik oluştuğuna karar verilir. Kesiklik doğal olarak ardışık seslerin arasında da oluşur. Ancak ölçüm hataları ya da gürültü kesikliliğin çok sık olmasına yol açar. Süzgeç olarak kullandığımız "süreklilik koşulu" çok kısa süren ani değişimleri filtrelemeye yarar. Şekil 2.3'teki örneklerde etkisi rahatlıkla gözlenebilmektedir (filtrelenen bölgeler çember içine alınıp, ilgili filtre koduyla numaralandırılmıştır). "Süreklilik koşulu", "görel olarak işaret enerjisinin belirli bir eşik değerinin altına düşmesi koşulu"yla beraber kullanıldığında (filtre 1b), özellikle müzik işaretlerinin olmadığı geri plan gürültüsünün yol açtığı ölçümleri temizlemeye yarar. Şekil 2.3'teki ud örneğinde orta bölgelerde, diğer örneklerde son kısımlarda bu filtrenin etkisi gözlenebilmektedir.

2) Oktav hatalarının düzeltilmesi: Kimi örneklerde, kayıtlardaki gürültü miktarı ve (tanbur gibi çalgılarda) ikinci selenin enerjisinin birinci seleninkinden yüksek olması nedeniyle oktav hataları gözlenebilmektedir. Oktav filtresi f_0 eğrisini süreklilik koşuluyla bloklara ayırır. f_0 değerlerine 0.5 veya 2 çarpanı uygulandığında komşu bloklarla sürekliliği artan bloklara bu çarpanı uygular ve f_0 eğrisinin sürekliliğini artırır. Şekil 2.3'teki ney örneğinde bu tip düzeltmeye örnekler görülebilir.

3) Histograma bağlı olarak filtreleme: f_0 verilerinden yola çıkarak ilgili kayıt için ölçülmesi gereken en yüksek ve en düşük f_0 değerlerini belirler ve ölçümlerden bu sınırların dışında olan değerleri atar. 1 ve 2 numaralı filtreler uygulandıktan sonra elde edilen f_0 ölçümlerinin ortalama değerinin iki oktav alt ve üstü sınır değerleri olarak seçilir. Dört oktavlık bir aralığın kullanılmasının temel nedeni klasik Türk müziği ses sistemi kuramlarında seslerin üç oktavlık aralıkta tanımlanmış, melodilerin de çoğunlukla 2 oktavlık bir saha içerisinde icra

ediliyor oluşudur. Şekil 2.3'teki gazel örneğinde 1200Hz civarında yapılmış hatalı ölçümler bu şekilde filtrelenmiştir.

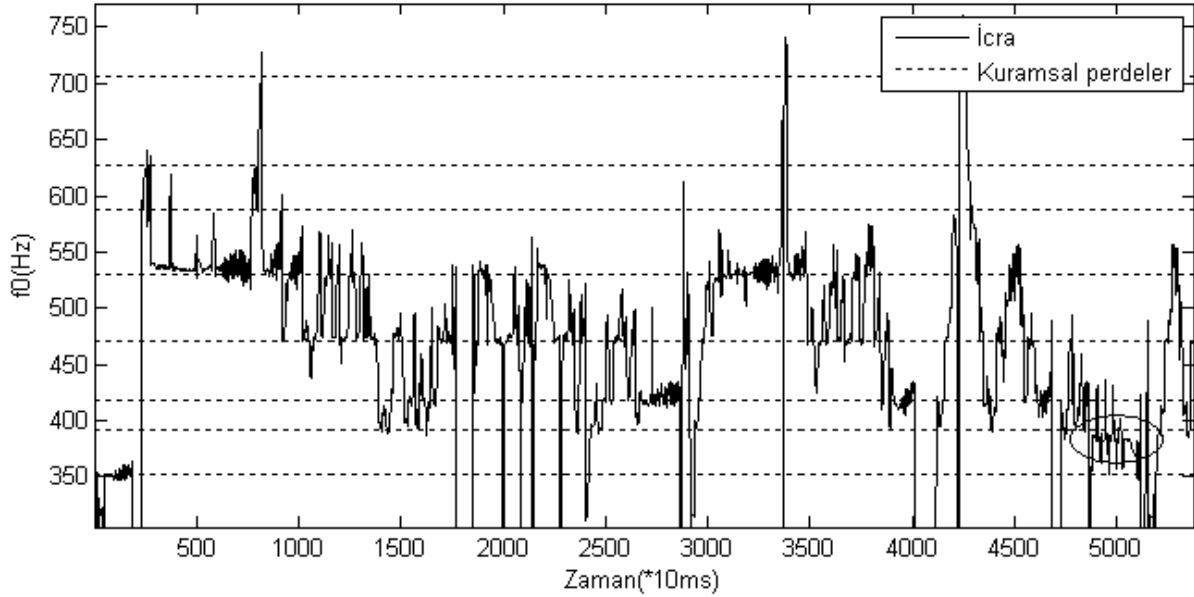


Şekil 2.3: Tasarladığımız filtrelerin YIN sonuçları üzerinde yaptığı iyileştirmelere örnekler: a) Ud, b) Kemeñçe, c) İnsan sesi (gazel), d) Keman, e) Ney, f) Tanbur

Tasarlanan filtrelerle farklı akustik özelliklerdeki kayıtlar üzerinde denenmiş ve (tanbur örneğinde de görülebileceği gibi) önemli oranda düzeltme sağlandığı gözlenmiştir. İyileştirilmiş YIN'le elde edilmiş f_0 bilgileri araştırmamızda temel olarak kullanacağımız f_0 verilerini oluşturmaktadır.

2.2.3 Melogram/melograf analizi

f_0 bilgisinin zamanla değişimini gösteren grafikler melogram veya melograf adıyla da anılmakta (KNOPOFF, 1965, COOPER, 2006) ve uzun süredir müzikoloji araştırmalarında kullanılmaktadır (örneğin (ORNOY, 2006)). Türk müziği için yukarıda açıklanan yöntemle hazırlanan örnek bir melogram(f_0)'ı Şekil 2.4'te sunmaktayız.



Şekil 2.4: Tanburi Cemil Bey (Vol 1, Kayıt 2 – Çeçen kızı (Hüseyni makamı)) kaydı için f_0 verisi ve (Y)AEU kuramında belirtilen Hüseyni dizisi aralıkları

Melogramlar melodi hattının incelikleri üzerinde detaylı çalışmalar yapmak açısından elverişlidirler. Örneğin elips ile işaretlenmiş 50. saniye çevresindeki bölgede (5000. 10 milisaniye), icrada kullanılan perdenin (Y)AEU kuramında tanımlı aralıklarla uyumsuzluğu rahatlıkla gözlenebilmektedir.

Ancak melogramlarla çalışmak çok emek yoğun olup büyük veritabanlarından bilgi çekme için etkin bir yöntem değildir. Bu sebeple melogramlara daha çok özel bir fenomeni birkaç örnek üzerinde detaylı olarak incelemek ve bu probleme dair örnekler verilmek istendiğinde başvurulmaktadır.

Bir kaydın tümünden ya da birçok kayıttan frekans bilgileri toparlanmak istendiğinde f_0 histogramlarına/dağılımlarına başvurmak yaygın bir uygulamadır. Bundan sonraki adımda f_0 verisinden f_0 histogramlarının çıkartılması ve çeşitli uygulamalarda kullanılması konularını ele almaktayız.

3. f_0 (frekans) dağılımlarının oluşturulması

Türk müziği kuramı araştırmalarında f_0 (frekans) verileri birçok çalışmada logaritmik bir skalada histogramları oluşturularak incelenmiştir (AKKOÇ, 2002, ZEREN, 2003). Bunun temel sebebi frekans algısının logaritmik karakteridir. Melograflarda da müzikal frekansların sent veya koma gibi logaritmik birimler kullanılarak gösterimi sık kullanılmaktadır. Türk müziği için birim olarak Holder koması (Holdrian comma (H_c): oktavın 53 logaritmik-eşit parçaya bölünmesiyle elde edilen birim) kullanımı yaygındır. Sonuçlarımızın Türk müziği

literatürüyle karşılaştırılabilmesi için projemiz boyunca ana birim olarak Holder komasını, Batı müziğiyle karşılaştırma yapmamız gereken noktalarda da ek olarak sent birimini kullandık.

$Hf_0[n]$ olarak adlandırılan f_0 histogramı, (f_n, f_{n+1}) tarafından sınırları belirlenen her alan içerisine düşen frekanslar süre olarak sayılarak elde edilmektedir:

$$Hf_0[n] = \sum_{k=1}^K m_k \quad (2)$$

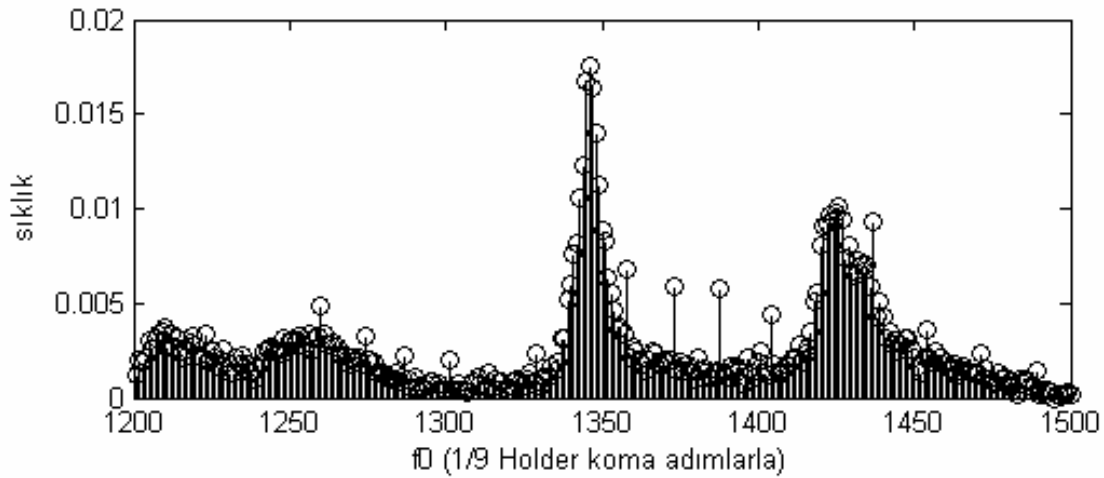
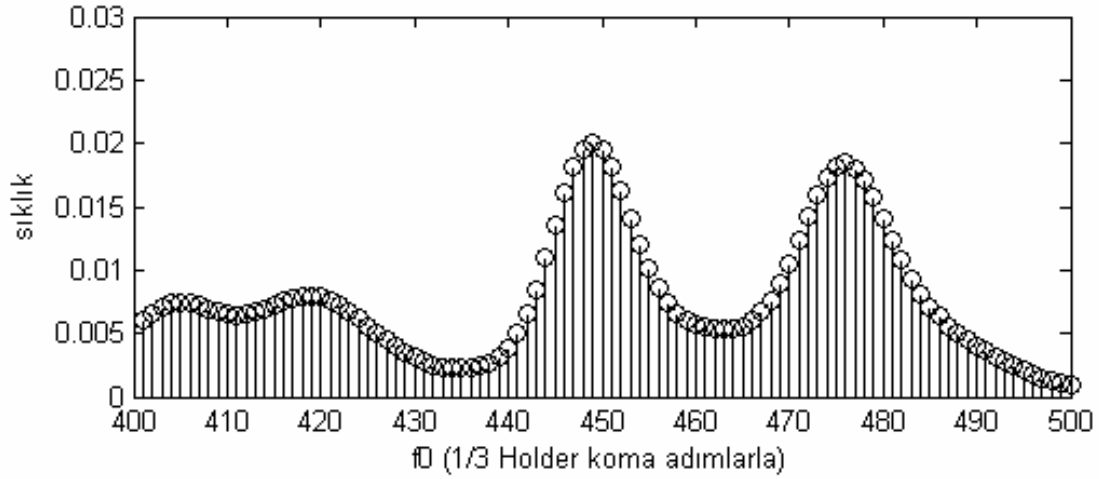
$$m_k = 1, f_n \leq f_0[k] < f_{n+1}$$

$$m_k = 0, \text{diğer} \quad (3)$$

$f_{0_{\max}}$ ve $f_{0_{\min}}$ sınır değerleri için N toplam alan sayısı olarak verildiğinde her bir alanın sınırları (f_n, f_{n+1}) , aşağıdaki formüllerle hesaplanabilmektedir.

$$W_b = \frac{\log_2(f_{0_{\max}}) - \log_2(f_{0_{\min}})}{N} \quad (4)$$

$$f_n = 2^{f_{0_{\min}} + (n-1)W_b} \quad (5)$$



Şekil 3.1: Farklı ızgara genişlikleriyle elde edilen histogram örnekleri: Üst) 1/3 Holder koması ızgarası, Alt) 1/9 Holder koması ızgarası

Histogram hesabında kullanılan ızgaranın boyutları histogramı önemli ölçüde değiştirmektedir. Örnek olarak aynı f0 verisi için 1/3 Holder koması ızgarasıyla ve 1/9 Holder koması ızgarasıyla oluşturulmuş histogramları Şekil 3.1'de sunduk. Çözünürlüğü artırmak için çok dar seçilecek bir ızgara boyutu histogramın çok değişken ('gürültülü') olmasına yol açar. ızgara boyutu çok geniş tutulduğunda ise önemli detaylar kaybolabilir. İki histogram arasındaki tepe sayısı farklılığı rahatlıkla gözlenebilmektedir.

Özellikle geniş veritabanları üzerinden otomatik algoritmalarla tepe bulma gerektiren işlemler açısından histogram ızgara boyutu seçimi önemli olmaktadır. Çeşitli denemeler sonucunda histogram hesaplarında 1/3 Holder koması genişliğinin kullanmasının uygun olduğuna karar verildi. Bu çözünürlük, klasik Türk müziği kuramlarındaki yüksek çözünürlüklü sistemlere (örneğin (YARMAN, 2008)) yeterli çözünürlüğü sağlamanın yanısıra otomatik tepe bulma algoritmaları için histogram şeklinde uygun yumuşaklığın sağlanması açısından da uygun bulunmuştur.

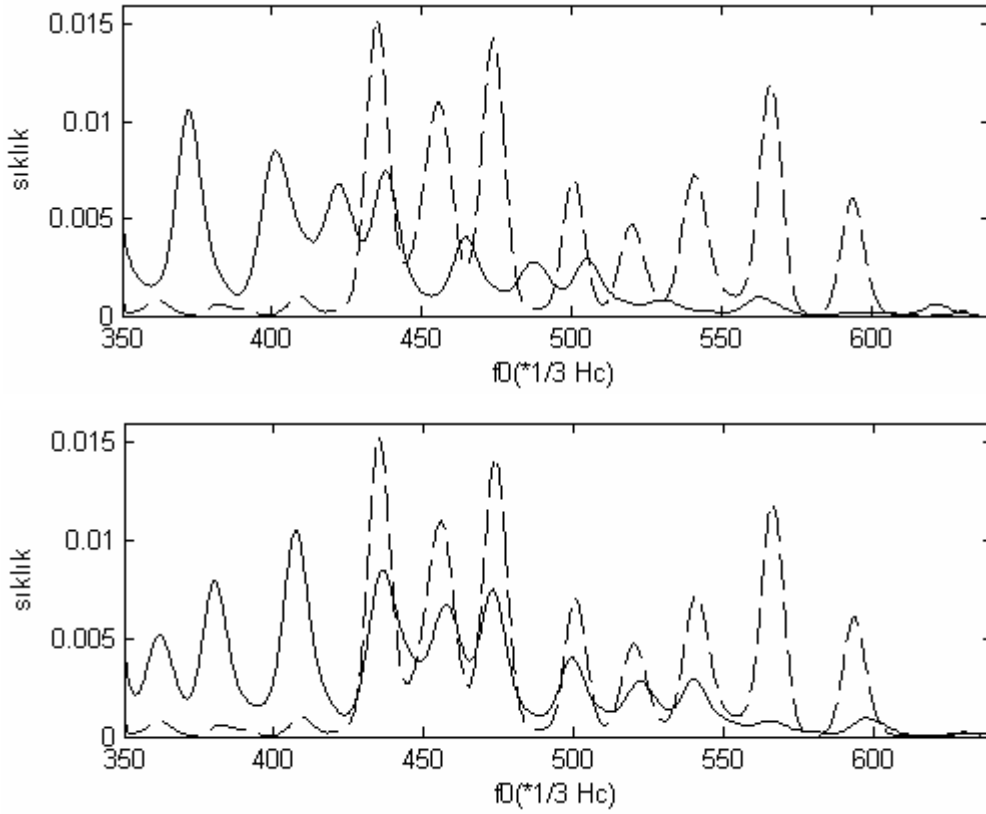
4. Frekans dağılımları kullanarak otomatik karar sesi ve makam tespiti

f0 histogramlarının Türk müziği çalışmalarında yaygın kullanış şekli histogramların çizdirilerek elle tepe noktalarının tespit edilmesi ve yine elle tepeler arasındaki uzaklıklardan müziksel aralıkların hesaplanması şeklindedir. Bu işlemleri kolaylaştırmak ve sistematize etmek için bilinen tek araç da İcra Analizi yazılımıdır (KARAOSMANOĞLU, 2003). Ancak bu aracın da büyük veritabanlarının otomatik işlenmesi açısından pratik olmadığı, histogramlardan yola çıkarak otomatik tanıma yöntemlerinde kullanılmasının ise hiç mümkün olmadığı açıktır. Müzik bilgi erişim uygulamaları için histogramların tam otomatik işlendiği bir yaklaşımın tasarlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

4.1 Otomatik karar sesi tespiti

Batı müziği bilgi erişimi konusunda geliştirilen birçok araç, müzik kayıtlarını La4=440Hz referansına akortlanmış çalgılarla çalındıklarını öngörerek işlemektedir. Bu akort Batı müziğinde çok yaygın bir şekilde kullanıldığı için bu geçerli bir yaklaşım olmakta ve otomatik işaret işleme algoritmalarının tasarımını kolaylaştırmaktadır. Ancak Türk müziği için eski - yeni tüm kayıtlar için kullanabileceğimiz böyle genel geçer bir referans frekansı bulunmamaktadır. Türk müziğinde, "ahenk" olarak isimlendirilen, ney boylarıyla ilişkilendirilen / isimlendirilen bir dizi referans bulunmaktadır. Ahenk sistemi diapozon ya da anahtar değişimine karşılık gelmektedir. Basitleştirilmiş bir ifadeyle, Türk müziğinde nota isimleri, çalgının tutuş pozisyonu ve çalınış şekli tarafından belirlenir ve çalgının boyundan bağımsızdır. Bu ise şu sonucu doğurmaktadır: örneğin herhangi bir ney üzerinde bütün parmaklar kapalı icra edilen rast notası / perdesi, üfleme devri aynı kalmak koşuluyla ney boyutu değiştiğinde (farklı ahenkte bir neyle çalındığında) çıkan sesin frekansı değişmekle beraber ismi değişmemektedir. Bu da nota - frekans ilişkisine bir düzey karmaşıklık daha eklemekte, ahenk tablolarının kullanımını gerekli kılmaktadır. Bir örnek vermek gerekirse: 440Hz frekansındaki bir ses Mansur ahenginde Dügah-La perdesine, Bolahenk ahenginde Neva-Re perdesine, Süpürde ahenginde Hüseyni Aşiran-Mi perdesine karşılık gelmektedir. (Daha fazla bilgi için bakınız: (ERGUNER, 2007), (YARMAN, 2008), http://www.turkmusikisi.com/ahenk_sistemi/index.html)

Aynı parçanın farklı ahenklerde icraları üzerinden hesaplanan f0 histogramları f0 boyutunda benzer şekillere sahip olmakla beraber, frekans ekseninde birbirlerine göre kaymış (transpoze edilmiş) olarak görünürler. Şekil 4.1'de buna bir örnek sunulmuştur.



Şekil 4.1: Aynı eserin (Hüseyini Peşrev, Lavtacı Andon) iki farklı icrasının (Osmanlı Saray Müzikleri, Sofyan Music ve Semahat Özdenes, AJS Yapım) frekans histogramları: Üst) Kayıttan hesaplandıkları haliyle, Alt) tepeleri eşleştirmek için kaydırma işlemi yapılmış haliyle.

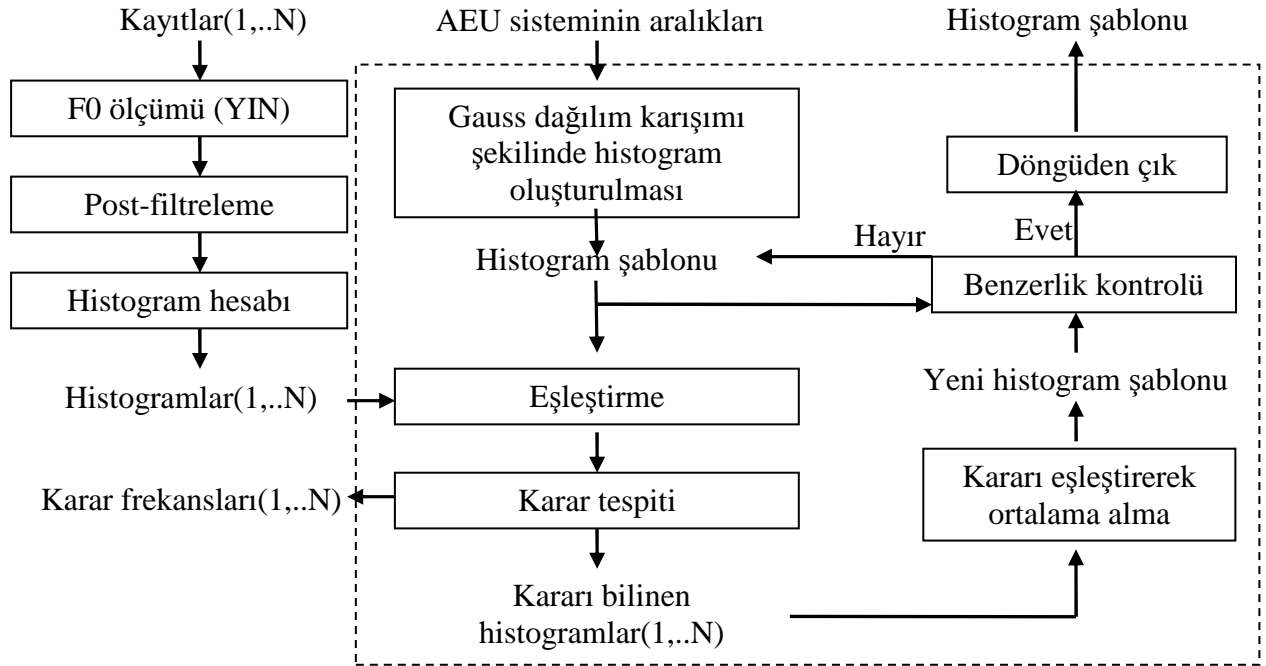
Şekil 4.1’de görüldüğü gibi aynı eserin farklı ahenklerde icralarından elde edilen histogramlar frekans ekseninde bir kaymayla yerleşmektedirler. Kayma ortadan kaldırılıp üstüste oturtulduklarında ise histogramın tepelerinin neredeyse tamamen örtüştüğü görülmektedir. Bu özellik otomatik bilgi erişim uygulamaları açısından kritik önem taşımaktadır.

Örneğin Hüseyini Peşrev’in farklı icracılar tarafından yapılan kayıtlarında kullanılan diziler karşılaştırılmak istendiğinde, ya da bütün histogramlar birleştirilerek bu eserin icralarının içerdiği frekanslara dair genel bir dağılım elde edilmek istendiğinde, bu işlemler ancak kaymalar yok edilerek yapılabilir. Sadece bir eser değil, örneğin kuram - icra uyum düzeyini çalışmak için bir makamın birçok icrası üzerinde de böyle analizler yapılmak istenebilir. Bu durumda birçok kayıttan bu kayma miktarlarını bulup yok edecek [histogramları göçürecek (transpoze edecek) ya da eşleştirecek] ve analiz sonuçlarının birleştirecek bir araca ihtiyaç duyulmaktadır.

Histogramlar arasındaki kayma miktarı belirli bir referans noktası histogramlarda bulunarak yapılabilir. Türk müziği için en uygun referans noktası karar perdesidir. Karar perdesi bilindiğinde, aynı makamdan olan eserlerin histogramları rahatlıkla eşleştirilebilmektedirler. Bu sebeple projemiz içerisindeki en kritik önemdeki adım ilk yıl içerisinde tasarladığımız karar tespit algoritmasıdır.

(BOZKURT, 2008) içerisinde detaylı olarak anlattığımız “Otomatik karar bulma” algoritmamız farklı kayıtların karar sesi üzerinden uyuşturulmasını sağlayan bir araçtır. Bu araç sayesinde projemiz için oluşturduğumuz 1500’den fazla kaydı içeren veritabanımız, histogramları tamamen otomatik olarak uyuşturularak topluca işlenebilmektedir. Ayrıca bu algoritmanın otomatik makam sınıflandırıcımızın eğitim aşamasında önemli bir işlevi vardır. Yine bu araç kullanılarak icra - kuram uyumu / uyumsuzluğu çalışması yapılmış, sonuçlar Bölüm 5’te açıklanmıştır.

Otomatik karar tespit algoritmasının akış şeması Şekil 4.2’de sunulmuştur. Algoritma bir grup kaydı karar sesi üzerinden eşleyerek histogramları birleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Bunun için başlangıç adımı olarak kuramsal değerlerden bir şablon histogramı oluşturulur. Bu şablon histogramı kayıt histogramlarıyla eşlenir ve eşlenmiş histogramların ortalaması alınarak yeni bir şablon oluşturulur. Bir döngü içerisinde bu işlemle yenilenen şablon histogramı, yenileme olmayan tura kadar (yenilemenin sonucu sıfır oluncaya kadar) devam ettirilir. Özet olarak: algoritma aynı makamdan bir dizi kaydı ve kuramdaki ilgili dizi aralıklarını girdi olarak alır. Bir döngü içerisinde makama ait histogram şablonu tekrar tekrar oluşturur. Kayıtları buna eşleyerek karar seslerini bulur ve sonuç olarak kayıtlardan elde edilen bir histogram şablonu oluşturur. Bu histogram şablonu daha sonra makam sınıflandırma çalışmasında ve kuram - icra uyum ölçüm çalışmalarında kullanılmıştır. Algoritmanın her bir adımıyla ilgili detaylı açıklamayı aşağıda sunuyoruz.



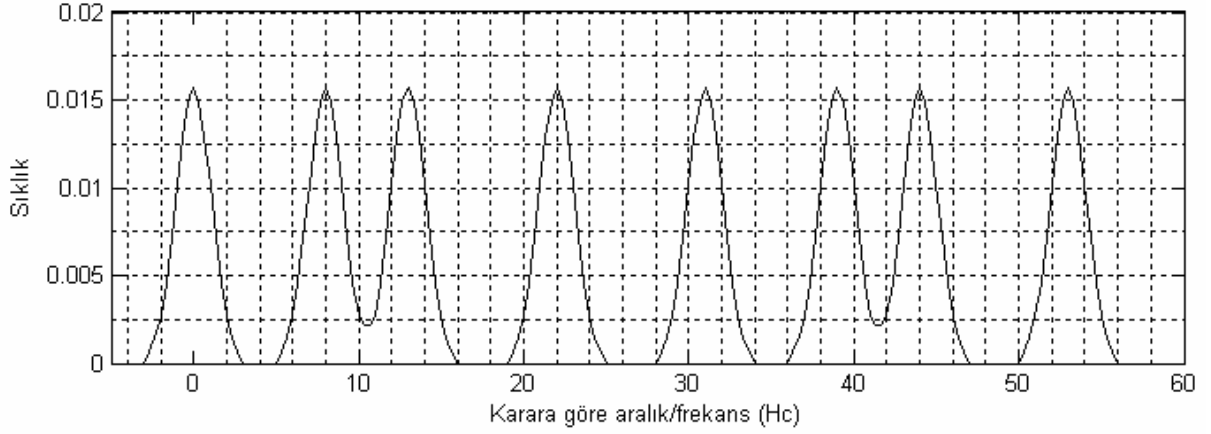
Şekil 4.2: Otomatik karar tespit algoritması

Döngünün başlangıcında kullanılmak üzere, makamın şablon histogramı, (Y)AEU (Yekta-Arel-Ezgi-Uzdilek) kuramında belirtilmiş aralıklara göre oluşturulur. Bir makam için histogram şablonu, $H(f_0)$, Gauss dağılımlar, $G_k(f_0)$, toplamı şeklinde oluşturulur:

$$H(f_0) = \sum_{k=1}^K a_k G_k(f_0) \quad (6)$$

$$G_k(f_0) = e^{-0.5(\alpha \frac{f_0 - f_k}{W_b/2})^2} \quad (7)$$

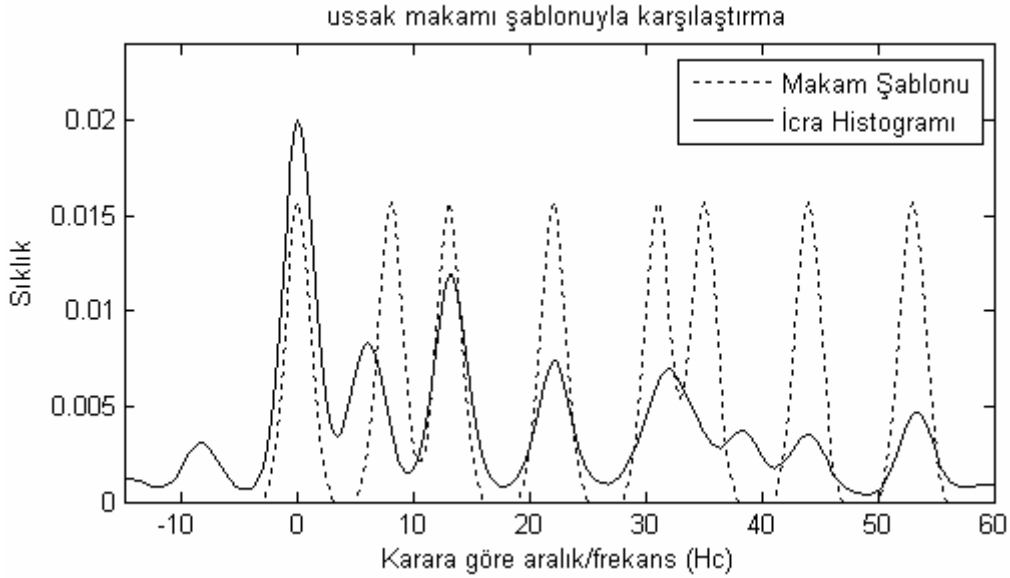
Burada f_k , k yncı Gauss dağılımının merkez frekansı olup karar sesine göre H_c cinsinden uzaklık olarak tanımlanmıştır ve kuramda dizi için belirtilen değerleri alır. α standart sapma tersi; f_k , f_0 and W_b değerleri ise H_c cinsinden ve $1/3H_c$ çözünürlüklü ayrık değerlerdir. Basitlik açısından karışımındaki ağırlıklar, a_k , eşit olarak alınmış, histogram toplamı 1 olacak şekilde belirlenmişlerdir. Standart sapmalar da eşit olarak belirlenmiş olup kullanıcı tarafından tanımlanabilen parametreler arasındadır. Şekil 4.3’te Hüseyini makamı için oluşturulmuş şablon histogram görülmektedir.



Şekil 4.3: Hüseyini makamı kuramsal histogram şablonu. (Y)AEU kuramına göre Hüseyini makamı dizi aralıkları(Hc cinsinden): 8 13 22 31 39 44 53

Histogram “eşleştirme” yapılırken histogramlardan biri diğeri üzerinde kaydırılarak histogramlar arası fark hesaplanmakta, farkın en düşük olduğu yer histogramların eşlendiği yer olarak belirlenmektedir. Çıkış noktası Gauss dağılımlarından sentezlenmiş bir dağılım olduğu için, şablon histogram için karar sesine karşılık gelen histogram tepesi bilinmektedir. Bu sayede eşlemeyi takiben karar perdesine karşılık gelen histogram tepesini bulmak oldukça kolaydır. Bulunan tepenin merkezi frekansı karar notasının frekansı olarak belirlenir.

Eşleştirme sonucunda kuramsal şablonun ilk tepesinin denk geldiği nokta “karar” sesi olarak belirlenir ve bu noktaya 0 Hc (Holder koması) atanarak diğer sesler bu sese referansla gösterilir. Böylece mutlak frekans verisinden Hc biriminde aralık verisine geçilmiş olur. Bu çeşit eşleştirmeye bir örnek Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4: Uşşak makamı kuramsal şablonu (kesik çizgi) ile Yorgo Bacanos’un Ud taksimi kaydının f0 histogramının eşleştirilmesi sonucu.

Şekil 4.4’te görüldüğü üzere şablon histogramı ile icra histogramı başarıyla eşleştirilebilmektedir. Üstelik bu, kuramla icra uyumsuzluğunun yüksek olduğu çeşitli kaynaklarda dile getirilen Uşşak makamı için yapılmıştır. Buradaki uyumsuzluk ancak 1 - 2 nota (örneğin 8 Hc olarak belirlenen 2. nota) için önemli düzeyde olduğu, diğer notalarda uyuşma düzeyi yüksek olduğu için histogram eşlemede bir problem yaşanmadığı görülmektedir. Bu gözlemin çok sayıda kayıt üzerinde doğrulanabilmesi için (Y)AEU kuramı ve şablon eşleştirme yöntemi kullanılarak makam sınıflandırma testleri yapılmış ve belirli

aralıkları icraya uymayan bir şekilde tanımlamasına rağmen AEU sisteminin otomatik bilgi erişim uygulamalarında başarıyla kullanılabilirdiği gözlenmiştir (GEDİK et al, 2009).

Kuramsal şablon ile eşleme ne kadar başarılı olsa da veri-güdümlü oluşturulmuş şablon histogramlarla daha iyi sonuç alınmaktadır. Bu sebeple, kuramsal şablon Şekil 4.2'de gösterilen döngünün sadece ilk adımında kullanılmaktadır. Veriden şablon histogramı oluşturmak için, eşleştirilen histogramların ortalamaları alınır ve böylece kuram dışarıda bırakılarak sadece kayıtların f0 histogramlarından oluşan yeni bir histogram şablonu elde edilmiş olur. Bu şablon, kuramsal şablon ile değiştirilerek döngünün başına dönülür. Döngü, histogram şablonu bir önceki adımdan verili bir eşik değerinden fazla değişmediğinde durur. Böylece N adet kaydın eşleştirilmesi ve histogramlarının ortalamasının alınması işlemleriyle bir şablon elde edilmiş olur.

4.2 Testler

Histogram eşleştirmede kullanılan histogramlar arası fark hesabı için uygun fonksiyonun bulunması amacıyla veri üzerinde kontrollü testlerle literatürdeki çeşitli histogram fark fonksiyonları denenmiştir. h_r şablon histogramı, h_t örnek histogram olmak üzere, fark fonksiyonu, $d[n]$, aşağıdaki şekillerde hesaplanmıştır:

$$\text{L1-norm: } d[n] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |h_r[k] - h_t[n+k]| \quad (8)$$

$$\text{L2-norm: } d[n] = \sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} (h_r[k] - h_t[n+k])^2} \quad (9)$$

$$\text{Kesişim: } d[n] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \min(h_r[k], h_t[n+k]) \quad (10)$$

$$\text{Bhattacharyya fark: } d[n] = -\log \sum_{k=0}^{K-1} \sqrt{h_r[k] h_t[n+k]} \quad (11)$$

Bunlara ek olarak, çapraz ilintinin en yüksek olduğu yer bulunarak da eşleştirme denemiştir.

Testler iki grupta yapılmıştır: i) sentetik kayıtlar üzerinde yapılan testler, ii) gerçek kayıtlar üzerinde yapılan testler.

4.2.1 Sentetik kayıtlar üzerinde yapılan testler

Sentetik kayıtlarla test yapmanın önemli avantajı veriye dair net bilgiler elde bulunduğu için hatanın sayısal tespitinin mümkün olmasıdır. Gerçek kayıtlarda doğru referans tam olarak bilinemediği için gözle/elle yapılan ölçümlerle otomatik ölçümlerin ne kadar tuttuğu incelenmektedir.

Sentetik kayıtlar, Mus2okur programından elde edilen, 7 farklı makamdan 150 adet MIDI verisi üzerinden elde edilmiştir. Her bir makam için sentez aynı ahenkte yapılmıştır ve bu sebeple karar sesi aynı makamın tüm örneklerinde aynı frekanstadır. Sentetik kayıtlara yukarıda anlatıldığı gibi f0 ölçüm, histogram hesaplanması ve otomatik karar tespiti adımları uygulanmış, karar sesleri tam otomatik olarak tespit edilmiştir. Otomatik olarak ölçülen karar seslerinin dağılımına bakarak otomatik algoritmanın hata düzeyine yönelik bilgi edinebiliriz. Tablo 4.1'de sentetik veriler üzerinden yapılan otomatik ölçümlerin dağılımı verilmiştir.

Table 4.1: Sentetik veriler üzerinde otomatik karar tespit test sonuçları

RAST (24 eser)	Çapraz İlinti	L1-norm	L2-norm	Kesişim	Bhattacharyya
Ortalama Karar F0 (Hz)	110.05	109.59	109.51	109.59	109.61
Std Sapma (Hz)	0.42	0.16	0.19	0.16	0.17
En yüksek fark (Hz)	1.12	0.26	0.34	0.26	0.27
Std Sapma (Sent)	6.52	2.54	2.97	2.54	2.62
En yüksek fark (Sent)	17.49	4.03	5.29	4.03	4.32
SEGAH (22 eser)					
Ortalama Karar F0 (Hz)	276.62	274.71	274.44	274.71	274.16
Std Sapma (Hz)	0.48	0.6	0.5	0.6	0.43
En yüksek fark (Hz)	1.18	1.27	0.95	1.27	1.23
Std Sapma (Sent)	3.01	3.8	3.12	3.8	2.72
En yüksek fark (Sent)	7.38	7.96	6	7.96	7.72
HUZZAM (16 eser)					
Ortalama Karar F0 (Hz)	138.17	136.48	136.37	136.48	136.37
Std Sapma (Hz)	0.69	0.19	0.21	0.19	0.2
En yüksek fark (Hz)	1.17	0.38	0.34	0.38	0.32
Std Sapma (Sent)	8.64	2.37	2.61	2.37	2.5
En yüksek fark (Sent)	14.65	4.78	4.28	4.78	4.12
SABA (23 eser)					
Ortalama Karar F0 (Hz)	123.72	123.32	123.39	123.32	123.37
Std Sapma (Hz)	0.49	0.22	0.17	0.22	0.17
En yüksek fark (Hz)	1.08	0.39	0.34	0.39	0.32
Std Sapma (Sent)	6.84	3.08	2.33	3.08	2.42
En yüksek fark (Sent)	15.05	5.41	4.78	5.41	4.46
HICAZ (19 eser)					
Ortalama Karar F0 (Hz)	132.16	123.19	131.93	123.19	123.1
Std Sapma (Hz)	20.81	0.21	20.83	0.21	0.15
En yüksek fark (Hz)	52.59	0.44	52.82	0.44	0.29
Std Sapma (Sent)	253.14	2.93	253.75	2.93	2.15
En yüksek fark (Sent)	579.9	6.22	583.01	6.22	4.13
HUSEYNI (23 eser)					
Ortalama Karar F0 (Hz)	123.54	123.54	123.52	123.54	123.56
Std Sapma (Hz)	0.32	0.12	0.13	0.12	0.14
En yüksek fark (Hz)	1.19	0.21	0.33	0.21	0.33
Std Sapma (Sent)	4.49	1.71	1.89	1.71	1.89
En yüksek fark (Sent)	16.54	3	4.56	3	4.57
USSAK (23 eser)					
Ortalama Karar F0 (Hz)	125.06	123.35	125.1	123.35	123.28
Std Sapma (Hz)	8.37	0.2	8.64	0.2	0.19
En yüksek fark (Hz)	38.25	0.38	39.64	0.38	0.36
Std Sapma (Sent)	112.1	2.85	115.69	2.85	2.64
En yüksek fark (Sent)	461.95	5.3	476.55	5.3	5.05
Ortalama-Std(Sent)	56.39	2.75	54.62	2.75	2.42
En yüksek fark(Sent)	579.9	7.96	583.01	7.96	7.72
Hatalı karar tespit sayısı	4	0	4	0	0

Tablo 4.1'de görüldüğü üzere, beklenildiği gibi her bir makam grubu için elde edilen karar frekansları çok yakındır. Örneğin Uşşak makamdan 23 eser için L1-norm, Kesişim ve Bhattacharyya fonksiyonlarıyla ortalama karar sesi frekansı sırasıyla 123.35Hz, 123.35Hz ve 123.28Hz, standart sapmalar ise 0.2Hz, 0.2Hz ve 0.19Hz bulunmuştur. Diğer bir deyişle 23 eserin çok büyük bir kısmı için ölçülen karar sesi 123Hz-123.7Hz aralığında bir değerdedir ve en uzak ölçümün 123.35Hz değerinden uzaklığı 0.38Hz'tir. Diğer makamlar için elde edilen değerlerin de çok dar standart sapmalı dağılımlar olduğu gözlenmektedir.

Sentetik verilerin karar frekansları bilindiği için karar sesinin histogramın doğru tepesine karşılık gelip gelmediği de saptanabilmektedir. Ölçülen frekans'ın 10 sentten farklı olduğu durumları hatalı olarak değerlendirilerek yapılan sayımda elde edilen hata sayıları tablonun en alt satırında verilmiştir. Buna göre çapraz korelasyon ve L2-norm kullanıldığında 150 eserden 4'ünde yanlış tepe karar sesi olarak seçilmektedir (bu örneklerde güçlü perdesinin yanlışlıkla karar perdesi olarak tespit edildiği gözlenmiştir). L1-norm, Kesişim ve Bhattacharyya fonksiyonlarıyla ise hiçbir hata yapılmadığı gözlenmiştir.

4.2.2 Gerçek kayıtlar üzerinde yapılan testler

Gerçek kayıtlar için listelenen sanatçıların kayıtları kullanılmıştır: Tanburi Cemil (tanbur, kemençe, viyolonsel), Mesut Cemil (tanbur, viyolonsel), Ercüment Batanay (tanbur), Fahrettin Çimenli (tanbur), Udi Hrant (keman), Yorgo Bacanos (ud), Aka Gündüz Kutbay (ney), Kani Karaca (ses), Bekir Sıdkı Sezgin (ses), Necdet Yaşar (tanbur), İhsan Özgen (kemençe), Niyazi Sayın (ney). En eski kayıtlar Tanburi Cemil Bey'inkiler olup (1910-1914), en yeni kayıtlar Niyazi Sayın'ın 2001 yılı kayıtlarıdır (Sada: Niyazi Sayın. Mega Müzik-İstanbul: 2001). Makamlara göre kayıtların dağılımı ise şu şekildedir: Rast (15 eser), Segah (15 eser), Hüzam (13 eser), Saba (11 eser), Hicaz (13 eser), Hüseyini (11 eser), Uşşak (11 eser), Kürdilihicazkar (17 eser), Nihavend (12 eser).

Gerçek kayıtlar için yapılan testlerde herbir histogramda karar sesine karşılık gelen tepenin doğru bulunup bulunamadığı gözle-elle kontrol edilmiştir. Sonuç olarak çapraz ilinti ve L2-norm ile rast makamında 1(aynı) eserde yanlış tespit yapıldığı, L1-norm ve Kesişim ile Uşşak makamında 1(aynı) eserde yanlış tespit yapıldığı ve Bhattacharyya ile Uşşak ve Rast makamlarında 1er eserde yanlış tespit yapıldığı gözlenmiştir.

Sentetik ve gerçek kayıtlarla yapılan testlerin çıktıları toparlandığında en başarılı sonuçlar L-1 norm ve Kesişim fonksiyonları ile elde edilmiştir: bu yöntemlerle toplam 268 kaydın sadece 1 tanesinde karar notası hatalı olarak bulunmuştur. Bhattacharyya farkı kullanarak hata sayısı 2, çapraz ilinti ve L-2 norm ile 5 bulunmuştur. Sonuç olarak Makam Aracı 1.0 içerisinde otomatik karar bulma fonksiyonu L-1 norm ile gerçekleşmiştir.

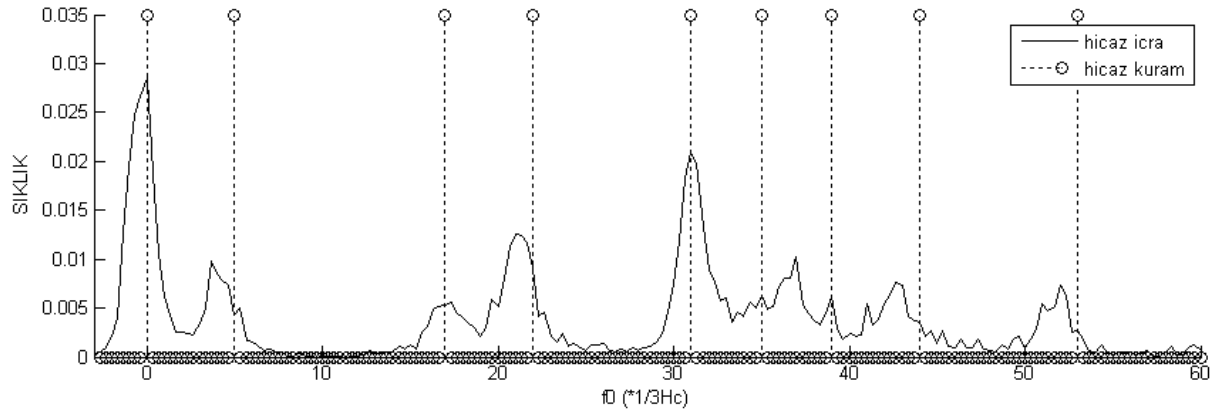
4.3. Otomatik makam sınıflandırılması

Otomatik makam sınıflandırılma çalışmasında amacımız otomatik notaya dökme için olabildiğince fazla sayıda makamı sınıflandırabilen bir sistemin tasarlanmasıdır. Otomatik makam sınıflandırılması proje süresinin tümüne yayılmış şekilde adım adım geliştirilmek üzere planlanmıştır. Bu sebeple burada sınıflandırma çalışmasında atılan bu adımlar sırasıyla 4, 9, 16 ve 35 makam sınıflandırılması olarak altbaşlıklar halinde sunulmuştur. Ayrıntıları proje ara raporlarında ve yayınlarımızda (GEDİK et al, 2008, GEDİK et al, 2009, GEDİK et al, 2010) verilen 4, 9 ve 16 makam sınıflandırmaları özet olarak sunulmuş, bu metinde ağırlık projenin son döneminde gerçekleştirilen 35 makam sınıflandırılmasına verilmiştir.

4.3.1 4 makamın otomatik sınıflandırılması

Sınıflandırma çalışmasının ilk testleri için klasik Türk müziği repertuarının yaklaşık %40'ını oluşturan 6 makamdan 4'ü (Hicaz, Kürdili Hicazkar, Segah ve Hüzam) seçilmiştir (ÇEVİKOĞLU, 2007), (ÖZTUNA, 2006). Burada amaç ilk önce sınırlı sayıda veri üzerinde detaylı gözlemler yaparak ayırıcı özelliği yüksek öz-nitelik vektörleri tanımlamaktır.

Sınıflandırma için öncelikle seçilen 4 makamdan her bir kayıt 2. Bölüm'de açıklanan İyileştirilmiş YIN algoritması ile işlenerek f0 verisi elde edilmiştir. Daha sonra her bir kayıt için 3. Bölümde kullanılan yöntemle f0 dağılım / histogram bilgisi elde edilmiştir. 4. Bölüm'de sunulan otomatik karar sesi tespit algoritması ile de kayıtların karar perdeleri hesaplanmış ve tüm kayıtlar, karar perdeleri 0 endeksine gelecek şekilde kaydırılarak eşleştirilmiştir. Karar perdesine göre eşleştirilen kayıtlar, ait oldukları makamların (Y)AEU kuramsal aralıklarıyla görsel olarak karşılaştırılmış ve karar perdesi hatalı bulunan örnekler sınıflandırma testlerinin dışında bırakılmıştır. Böylece otomatik karar perdesi tespitine dayanan bir sınıflandırıcı için gerekli ilk veritabanı oluşturulmuştur. Diğer bir deyişle sınıflandırıcının bu ilk sürümünde karar sesi bilinen parçaların sınıflandırılması hedeflenmiştir. Veritabanını oluşturan kayıtlar iyileştirilmiş YIN algoritmasının daha başarılı olduğu çalgılar olan ney, keman, kemençe, tanbur taksimleri ve gazel örneklerinden seçilmiştir. Şekil 4.5'te karar perdesi doğru bulunmuş Tanburi Cemil Bey'in bir Hicaz makamı icrasının f0 dağılımı ile Hicaz makamının kuramsal aralıkları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



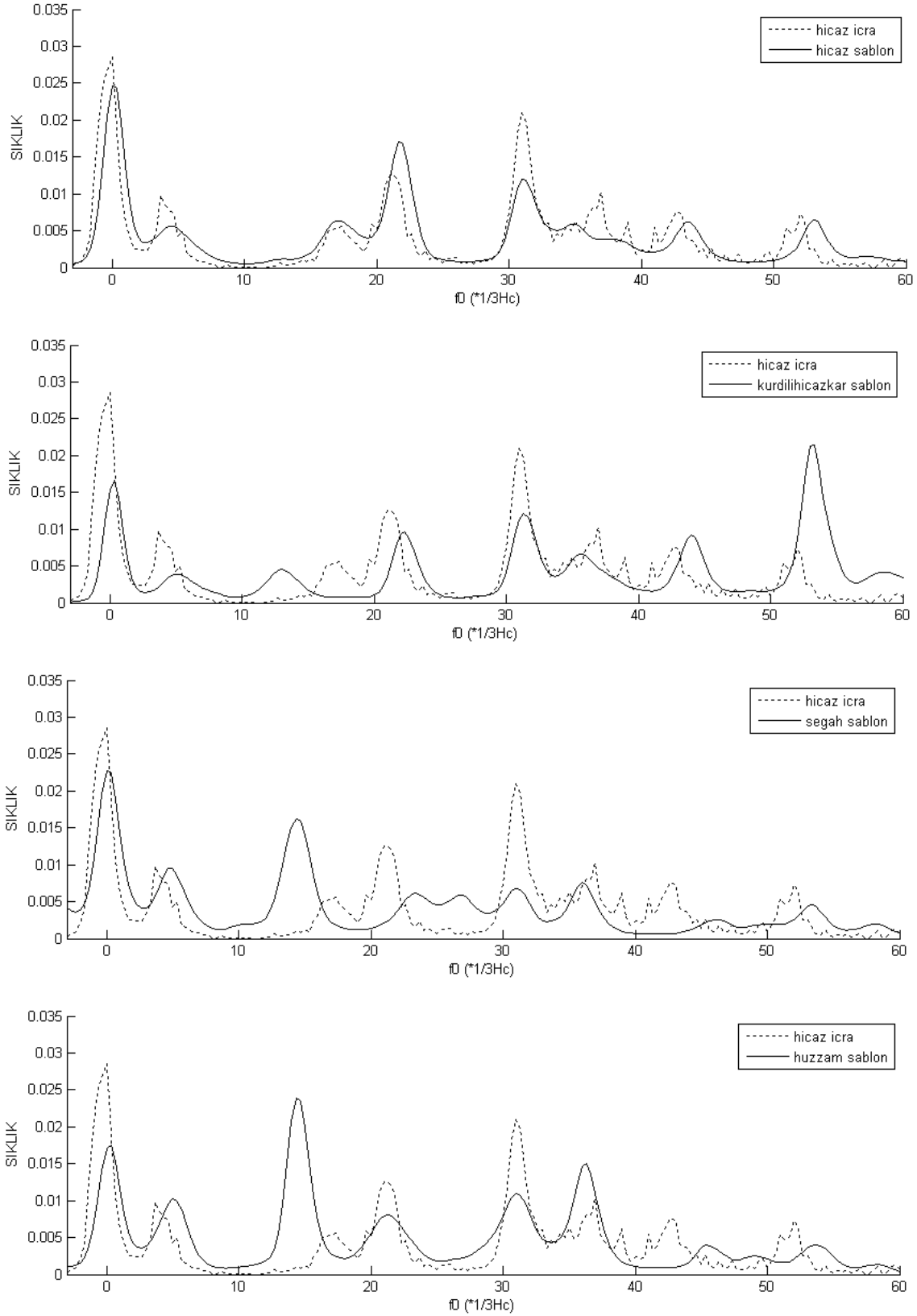
Şekil 4.5: Tanburi Cemil Bey'in bir hicaz makamı icrasının f0 dağılımı ile Hicaz makamının kuramsal aralıklarının(5 17 22 31 35 44 53 Holder koması, kesik çizgi) beraber gösterimi.

İlk olarak her bir makam grubundan karar perdesine göre senkronize edilmiş kayıtların f0 histogramlarının ortalamaları alınarak her bir makam için birer histogram şablonu oluşturulmuştur.

Oluşturulan şablonlar ile aynı sınıftan verilerin histogramlarının benzerlik düzeylerinin yüksek olduğu gözlemlenmiş, literatürde *template matching* (şablon eşleştirme) (THEODORADIS et al, 1999) olarak adlandırılan örüntü tanıma yönteminin makam sınıflandırması için kullanılabileceğine karar verilmiştir. Bu yöntemde her bir örnek varolan şablonlara benzerlikleri üzerinden sınıflandırılır. Yani her örnek en fazla benzediği şablonun sınıfına atanır. Sınıflandırıcı, aşağıda Tanburi Cemil Bey'in bir Hicaz taksimi örneği üzerinden açıklanmıştır. Şekil 4.6'da Hicaz taksimi icrasının f0 dağılımı/histogramı sırasıyla (a) Hicaz (b) Kürdili Hicazkar (c) Segah ve (d) Hüzam makam şablonları ile birlikte gösterilmiştir. Şekildeki makam şablonlarından hem bu makamların kendine özgü bir perde yapılarının olduğu hem de Hicaz icrasının en fazla yine Hicaz şablonuna benzediği görülebilmektedir.

Şablon histogramla örnek histogram arasındaki farkı hesaplamak için ölçüt olarak L1-norm (8) kullanıldığında icranın Hicaz, Kürdili Hicazkar, Segah ve Hüzam makam şablonlarına farkı sırasıyla 0.5962, 0.8197, 0.9320 ve 0.8932 olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi hicaz örneği en fazla Hicaz makamına benzer (farkı en düşük) çıkmıştır. Böylece Hicaz örneği

Hicaz makamı olarak etiketlenecektir. Bu öntestlerin sonucu olarak şablon eşleştirme yönteminin otomatik makam sınıflandırması için başarıyla kullanılabilceği düşünülmüştür.



Şekil 4.6: Tanburi Cemil Bey'in Hicaz taksimi icrasının f0 dağılımının sırasıyla (a) Hicaz (b) Kürdili Hicazkar (c) Segah ve (d) Hüzam makam şablonları ile birlikte gösterilmesi.

4.3.2 9 makamın otomatik sınıflandırılması

İkinci adımda hem makam sayısı 9'a çıkartılmış, hem de şablon eşleştirme yöntemine ek olarak k-NN sınıflandırıcısı tasarlanarak karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir. k-NN sınıflandırıcısı içerisinde kullanılan öz-nitelik vektörü, icra histogramının her bir makam şablonuna uzaklığı bir vektör içerisinde toplanarak elde edilmiştir. Bu adımdaki sınıflandırıcı tasarımımda bir diğer kritik nokta histogramların eşleştirilmesinde karar sesinin referans olarak kullanılmamasıdır. Bir önceki adımda kontrollü deneyler yapmak amacıyla karar sesi bilinen kayıtlar kullanılmıştı. Ancak karar sesi tespit algoritması makam sınıf bilgisine ihtiyaç duyduğu için asıl sınıflandırıcının içerisinde kullanılamaz. Bu sebeple, bu adım bağımsız kullanılabilir sınıflandırıcının ilk sürümünün tasarımı yapıldığı adım olarak da düşünülebilir.

Her iki sınıflandırıcı için repertuarın yaklaşık % 50'sini kapsayan toplam 9 makam; Hicaz, Rast, Segah, Kürdili Hicazkar, Hüzzam, Nihavend, Hüseyini, Uşşak ve Saba makamları seçilmiştir (ÇEVİKOĞLU, 2007).

Sınıflandırıcı tasarımında kullanılacak veri seçiminde kayıtların projenin kapsamı açısından tek sesli (monofonik) olması ve güvenilirlik açısından da Türk müziğinin önemli temsilcileri olan icracılardan alınması kriterleri gözetilmiştir. Veri seçimini belirleyen önemli bir sınırlama, kayıtların öz-nitelik vektörlerinin en başarılı biçimde elde edildiği, yani f0 tahmini için kullanılan iyileştirilmiş YIN algoritmasının başarılı olduğu çalgılardan seçilmesidir. Ayrıca biçemden kaynaklanabilecek makam icra farklılıklarını en aza indirmek için sadece tek bir biçemdeki kayıtlar; sadece taksim kayıtları seçilmiştir. Son olarak veri seçimini belirleyen en önemli etken yukarıda sayılan özellikleri taşıyan ve tasarım sırasında (projenin ilgili aşamasında) elimizde bulunan kayıtların sayısı olmuştur. Diğer bir deyişle yukarıdaki özellikleri taşıyan ancak sayı olarak 10 kaydı geçmeyen makamlar, istatistiksel olarak yeterli düzeyde temsil edilemeyecekleri için çalışmanın bu adımına dahil edilmemiştir.

Sonuç olarak yukarıdaki seçimlere ve kısıtlara bağlı olarak Tanburi Cemil (1873-1916), Mesut Cemil (1902-1963), Niyazi Sayın (d.1927), Necdet Yaşar (d.1930) ve Sadrettin Özçimi (d.1955) gibi önemli icracıları kapsayan, toplam 182 adet ney, tanbur, klarinet, keman, kemençe ve viyolonsel taksim kaydı kullanılmıştır. 182 kaydın kullanılan 9 makama göre dağılımı şu şekildedir: Hicaz: 24, Rast: 20, Segah: 21, Kürdili Hicazkar: 16, Hüzzam: 16, Nihavend: 18, Hüseyini: 22, Uşşak: 24, Saba: 21.

Ayrıca her iki sınıflandırıcının eğitim ve test işlemleri için *leave-one out* (LOO) (birini dışarıda bırak) *cross-validation* (çapraz-onaylama) yöntemi ve sınıflandırıcıların değerlendirilmesi için de aşağıdaki parametreler kullanılmıştır:

- *TP (true positive)(doğru pozitif)*: pozitif sınıf örneklerinin doğru sınıflandırılma sayısı
- *TN (true negative)(doğru negatif)*: negatif sınıf örneklerinin doğru sınıflandırılma sayısı
- *FP (false positive)(yanlış pozitif)*: pozitif sınıf örneklerinin yanlış sınıflandırılma sayısı
- *FN (false negative)(yanlış negatif)*: negatif sınıf örneklerinin yanlış sınıflandırılma sayısı

- *Geri çağırım (Recall)*: pozitif sınıf örneklerinin ne ölçüde başarıyla doğru olarak sınıflandırıldığı:

$$R=TP/ (TP + FN) \quad (12)$$

- *Kesinlik (Precision)*: pozitif olarak sınıflandırılan kaç örneğin ne ölçüde gerçekten pozitif olduğu:

$$P=TP/ (TP + FP) \quad (13)$$

- *Seçicilik (Selectiity)*: negatif olarak sınıflandırılan kaç örneğin ne ölçüde gerçekten negatif olduğu:

$$S=TN/ (TN + FP) \quad (14)$$

- *Doğruluk (Accuracy)*: doğru sınıflandırılan örneklerin tüm örneklere oranı:

$$A=(TP+TN)/ (TP+TN+FP+FN) \quad (15)$$

Aşağıda şablon eşleştirme sınıflandırıcısı ve k-NN sınıflandırıcısı ayrı başlıklar altında ele alınmıştır.

Şablon eşleştirme ile sınıflandırma: I. sürüm

Şablon eşleştirme ile sınıflandırmanın 1. sürümünde makamlar karar perdesi bilgisi olmaksızın sınıflandırılmıştır (GEDİK et al, 2008). Bu yöntemde test kayıt histogramının sırasıyla tüm makam şablonları ile çapraz-farkı hesaplanır. Çapraz-fark, çapraz-ilintiye benzer şekilde ancak çarpma yerine çıkartma işlemi kullanarak hesaplanır. Diğer bir deyişle bir test kaydının histogramı her bir makam şablonu üzerinde kaydırılarak farkları bulunur. Her makam için farkın en küçük olduğu değer test kaydının ilgili makama olan fark değerini verir. Aşağıdaki denklemler kullandığımız çapraz-ilinti ve benzerlik değeri hesaplarını vermektedir:

n. test kaydının m. makam şablonuna olan uzaklıklarını veren çapraz-fark fonksiyonu;

$$d_{nm}[s] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |x_n[k] - v_m[s+k]|, \quad 1 \leq m \leq 9, 1 \leq n \leq 182 \quad (16)$$

n. test kaydının m. makam şablonuna olan uzaklığını veren fonksiyon;

$$d(x_n, v_m) = \min \{d_{nm}\} \quad (17)$$

n. test kaydının m. makama benzerlik değerini veren fonksiyon;

$$U_m(x_n) = \frac{1}{1 + d(x_n, v_m)} \quad (18)$$

U : benzerlik fonksiyonu, d : fark/uzaklık fonksiyonu, x : test kaydı histogramı, n : kayıt endeksi (182 kayıt için), v : makam şablon histogramı,

m : makam endeksi (1:Hicaz, 2: Rast, 3: Hüzam, 4: Segah, 5: Kürdili Hicazkar, 6: Hüseyini, 7: Nihavend, 8: Uşşak, 9: Saba)

Yukarıdaki denklemlerden görülebileceği gibi sınıflandırıcıya verilen bir x_n kayıt histogramının 9 makam şablonuna benzerliği için 9 ayrı benzerlik ölçümü elde edilir ve benzerlik ölçümü en yüksek olan sınıf, ilgili kaydın atanacağı sınıfı belirler.

$$C_T(x_n) = \text{Ind}_U \{(\max \{U_m(x_n)\})\}, \quad 1 \leq m \leq 9, 1 \leq n \leq 182 \quad (19)$$

$$C_T = \{1, 2, 3, \dots, 8, 9\}, \quad C_T(x_n) \in C_T \quad (20)$$

C_T : şablon eşleştirme sınıflandırıcısı makam endeksleri kümesi, Ind_U : benzerlik fonksiyonunun endeksini bulan fonksiyon.

Şablon eşleştirme sınıflandırıcısının eğitim ve test işlemlerinde LOO yöntemi şu şekilde kullanılmıştır: Her bir test verisinin f_0 histogramı her sınıflandırma işleminde ait olduğu makamın şablonunun oluşturulması işleminde dışarıda bırakılmıştır. Böylece LOO yönteminin temel avantajı olan her verinin hem test hem de eğitim seti olarak kullanılması sağlanmıştır. Sonuç olarak 9 makam için sınıflandırıcı başarısı doğruluk ölçütü anlamında ortalama %93 bulunmuş ve ayrıntılı başarı k-NN sınıflandırıcısı ile karşılaştırmalı olarak Tablo 4.2'de sunulmuştur.

k-NN ile sınıflandırma

Şablon eşleştirme sınıflandırıcısından elde edilen benzerlik değerlerinin sadece en yüksek değerine göre bir sınıflandırma yapmak yerine, bir icranın şablonlara benzerlik değerlerini bir vektör içerisinde toplayarak öz-nitelik vektörü olarak kullanan başka bir sınıflandırıcı da

tasarlanmıştır. Türk müziği kayıtlarının ne tür bir dağılıma sahip olduğuna dair bir öngörümüz olmadığı için parametrik olmayan bir sınıflandırıcı, *k-nearest neighbor* (k-NN) (k-en yakın komşu) sınıflandırıcısı tercih edilmiştir. k-NN sınıflandırıcısı kayıtların ve makamların arasında doğrusal bir ilişki olmadığı düşünülerek doğrusal olmayan bir sınıflandırıcı olması ve bir çok sınıflandırma çalışmasında referans olarak kullanıldığı için tercih edilmiştir.

k-NN sınıflandırıcısı kısaca her sınıftan örneklerin bir öz-nitelik uzayında temsil edildiği bir veritabanı ve bir test örneğinin de bu veritabanındaki en yakın komşu sınıf örneklerinin bulunması prensibine dayanır. Test örneği en fazla hangi sınıftan örneklere yakın ise o sınıfa atanır. Kaç tane en yakın komşu örneğe bakılması gerektiğini k (en yakın komşu) sayısı belirler.

Şablon eşleştirme sınıflandırıcısından elde edilen benzerlik değerleri, $U_m(x_n)$, k-NN sınıflandırıcısında da öz-nitelik vektörü oluşturmak için kullanılır: verili bir kaydın makam şablonlarına benzerlik değerlerinin tümü f_x öz-nitelik vektörünü oluşturur ve sınıflandırma bu öz-nitelik vektörü üzerinden gerçekleştirilir.

$$f_x = [U_1(x_n) \quad U_2(x_n) \quad \dots \quad U_9(x_n)] \quad (21)$$

Şablonun oluşturmasına ek olarak, k-NN sınıflandırıcısının eğitiminde kullanılan parametre, test örneğinin en yakın kaç komşu eğitim örneğine olan uzaklığına bakılacağını belirleyen k-komşu sayısı parametresidir. Sınıflandırıcıda test örneğinin eğitim seti örneklerine uzaklığını bulmak için Öklid mesafesi kullanılmıştır:

$$E_{d_n}(x, t_n) = (f_x - f_{t_n})^2, \quad 1 \leq n \leq 182 \quad (22)$$

E_{d_n} : n . eğitim örneğinin t_n test örneğine mesafesi , x: test örneği, t_n : n. eğitim örneği, f_x : test örneğinin 9 boyutlu öz-nitelik vektörü, f_{t_n} : n. eğitim örneğinin 9 boyutlu öz-nitelik vektörü.

Sınıflandırma için test örneğinin tüm eğitim seti örneklerine olan mesafesi hesaplanır ve kaç en yakın komşuya bakılacaksa sırasıyla en yakın eğitim seti örnekleri bulunur. Sonuç olarak test örneği en yakın komşu sayısına göre en fazla hangi sınıfın örneklerine yakınsa o sınıfa atanır.

Optimum komşu sayısının (k) bulunması için aşağıda gösterilen 16 farklı k değeri için (k= {1,3,5,7,...31}) testler yapılmıştır. Optimum k değerini hesaplamak için k değeriyle hata oranının nasıl değiştiğinin gözlenmesi yaygın bir uygulamadır. Bu amaçla hatalı sınıflanan örnek sayısının tüm örneklerin sayısına oranı, hata oranı(error rate) olarak kullanılmıştır:

$$Error_{rate}(k) = \frac{(FP(k) + FN(k))}{182} \quad (23)$$

k-NN sınıflandırıcısının tercih nedenlerinden biri olan öz-niteliklere farklı ağırlık değerleri verilmesiydi. Bu nedenle 9 boyutlu öz-nitelik vektörü üzerinde, (0,1) aralığındaki bir örnek dağılımdan (uniform distribution) 9 ağırlık değeri alacak şekilde rastgele 500 deney yapılmıştır. Optimum başarı oranını veren deneyin ağırlık değerleri ve ilgili k değeri aşağıda sırasıyla şu şekilde bulunmuştur: w_{hicaz} : 0.82648, w_{rast} : 0.5737, w_{segah} : 0.53447, $w_{kürdilih}$: 0.74371, $w_{hüzzam}$: 0.38413, $w_{nihavend}$: 0.317323, $w_{hüseyni}$: 0.68481, $w_{uşşak}$: 0.46244, w_{saba} : 0.317041 ve **k=3**.

k-NN sınıflandırıcısının değerlendirilmesi için LOO çapraz-onaylama yöntemi kullanılmıştır. Kısaca bu yöntemle her seferinde toplam 182 örnekten 1 örnek test için ayrılır ve geri kalan 181 örnek eğitim için (şablon hesaplanmasında) kullanılır. Her seferinde test için dışarıda bırakılan örnek ise makam şablonlarının oluşturulmasında kullanılmaz.

Hem şablon eşleştirme hem de k-NN sınıflandırıcısı için değerlendirme sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2: Şablon eşleştirme(beyaz) ve k-NN(gri) sınıflandırıcılarının karşılaştırmalı değerlendirme sonuçları.

makam	TP	TN	FP	FN	R	P	S	A
Hicaz	12	156	2	12	50	86	93	92
	21	145	13	3	88	62	92	91
Rast	14	156	6	6	70	70	96	93
	16	152	10	4	80	62	94	92
Segah	16	159	2	5	76	89	97	96
	16	157	4	5	76	80	98	95
Kürdili Hicazkar	14	147	19	2	88	42	99	88
	11	159	7	5	69	61	96	93
Hüzzam	14	159	7	2	88	67	99	95
	11	162	4	5	69	73	98	95
Nihavend	5	162	2	13	28	71	93	92
	9	156	8	9	50	53	95	91
Hüseyni	16	144	16	6	73	50	96	88
	15	154	6	7	68	71	96	93
Uşşak	9	152	6	15	38	60	91	88
	8	151	7	16	33	53	96	87
Saba	17	156	5	4	81	77	98	95
	13	158	3	8	62	81	98	94
ortalama	13	154.6	7.2	7.2	66	68	96	93
	13.3	154.9	6.9	6.9	66	66	96	92

Tablo 4.2’den görülebileceği gibi şablon eşleştirme sınıflandırıcısı k-NN sınıflandırıcısından sırasıyla doğruluk ölçütü açısından %1 daha başarılıdır. k-NN sınıflandırıcısının hesaplama maliyeti girdi olarak şablon sınıflandırıcısının çıktısını kullandığı için şablon sınıflandırıcıya göre oldukça fazladır. Bu nedenlerle sınıflandırma çalışmalarının devamında şablon eşleştirme yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir

Şablon eşleştirme ile sınıflandırma: II. sürüm

Şablon eşleştirme ile sınıflandırmanın 2. sürümü (GEDİK et al, 2009) , 1. sürüm üzerinde aşağıdaki şu değişiklikler yapılarak elde edilmiştir:

- Sınıflandırma değerlendirmesinde iyimser sonuçlar verdiği bilinen doğruluk (accuracy) ölçütü yerine daha nesnel sonuçlar veren *F-measure* (f-ölçümü) ölçütü kullanılmıştır:

$$F - measure = \frac{2 \cdot R \cdot P}{(R + P)} \quad (24)$$

R: geri çağırım (*Recall*) (12), *P*: kesinlik (*Presicion*) (13), n_{TP} : doğru pozitif sınıflanan örnek sayısı, n_{TN} : doğru negatif sınıflanan örnek sayısı, n_{FP} : yanlış pozitif sınıflanan örnek sayısı, n_{FN} : yanlış negatif sınıflanan örnek sayısı

- Benzerlik ölçütü olarak 1. sürümdeki *U* benzerlik fonksiyonu(18) yerine doğrudan L1-norm(8) fark fonksiyonu kullanılmıştır.

Sonuç olarak elde edilen yeni şablon eşleştirme sınıflandırıcısının değerlendirme sonuçları Tablo 4.3’te sunulmuştur. Tablodan görülebileceği gibi daha nesnel bir sınıflandırma ölçütü olan f-measure açısından sınıflandırıcı ortalama %79 gibi başarılı bir oran yakalamıştır.

Projenin bundan sonraki sınıflandırma çalışmalarında da bu 2. sürümdeki yaklaşım kullanılmıştır.

Table 4.3: Şablon eşleştirme sınıflandırıcısının değerlendirme sonuçları.

	n_{TP}	n_{TN}	n_{FP}	n_{FN}	R	P	F-measure
Hicaz	16	150	4	2	89	80	84
Rast	18	151	1	2	90	95	92
Segah	17	150	3	2	89	85	87
Kürdili Hicazkar	12	146	4	10	55	75	63
Hüzzam	12	155	2	3	80	86	83
Nihavend	15	154	3	0	100	83	91
Hüseyini	11	144	9	8	58	55	56
Uşşak	17	140	7	8	68	71	69
Saba	17	149	4	2	89	81	85
Ortalama							79

4.3.3 16 makamın otomatik sınıflandırılması

9 makam sınıflandırmasında kullanılan 9 makama ve 172 kayda Türk müziğinde en sık kullanılan 7 makam daha eklenmiş ve tüm makamlardan 450 yeni kayıt eklenmiştir. Böylece toplamda 16 makam/sınıf sayısına ve 622 kayıt sayısına ulaşılmıştır: Hicaz (37), Rast (55), Segah (45), Kürdili Hicazkar (59), Hüzzam (53), Nihavend (50), Hüseyini (56), Uşşak (52), Saba (46), Acem Aşiran (26), Mahur (30), Hicazkar (35), Karcığar (19), Neva (19), Suzinak (23), Beyati (17).

Tablo 4.4'te 16 makamın sınıflandırma başarısı, Tablo 4.5'te karıştırma matrisi sunulmuştur. Makam sayısı yaklaşık 2 kat artmasına rağmen *F-measure* cinsinden ortalama % 60 gibi yüksek sayılabilecek bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir.

Tablo 4.4: 16 makam için sınıflandırma başarısı.

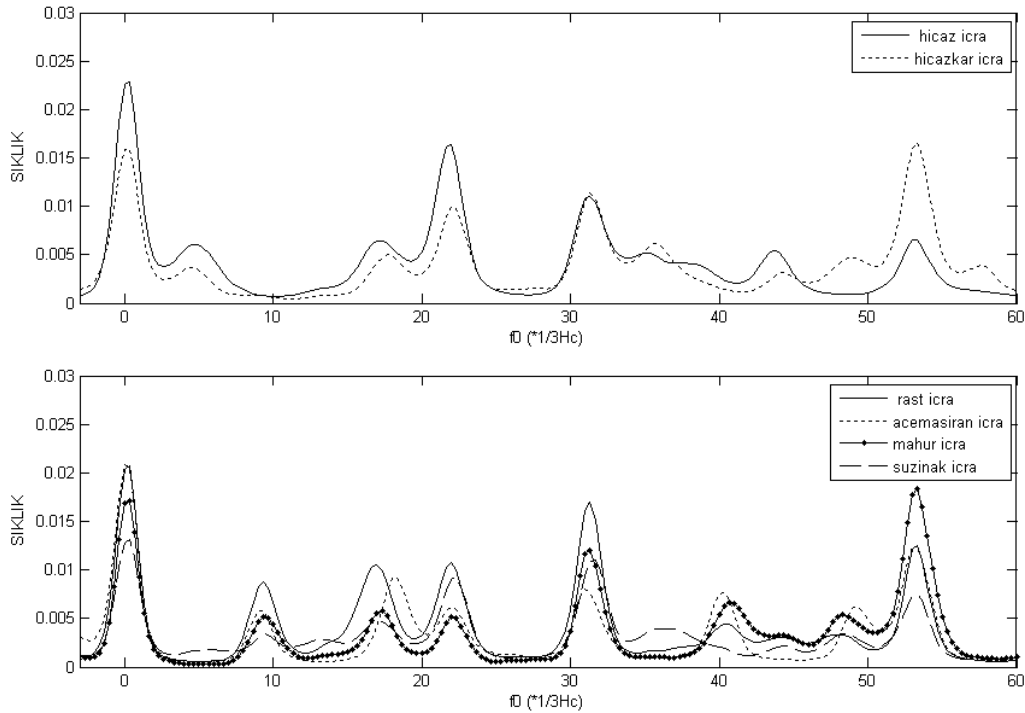
Makam No	Makam Name	n_{TP}	n_{TN}	n_{FP}	n_{FN}	R	P	F-measure
1	Hicaz	29	576	9	8	78	76	77
2	Rast	43	548	19	12	78	69	74
3	Segah	36	573	4	9	80	90	85
4	Kürdili Hicazkar	50	526	37	9	85	57	68
5	Hüzzam	42	560	9	11	79	82	81
6	Nihavend	29	562	10	21	58	74	65
7	Hüseyini	30	547	19	26	54	61	57
8	Uşşak	23	541	29	29	44	44	44
9	Saba	39	571	5	7	85	89	87
10	Acem Aşiran	20	589	7	6	77	74	75
11	Mahur	18	575	17	12	60	51	55
12	Hicazkar	24	580	7	11	69	77	73
13	Karcığar	8	595	8	11	42	50	46
14	Neva	6	597	6	13	32	50	39
15	Suzinak	4	593	6	19	17	40	24
16	Beyati	4	580	25	13	24	14	17
Ortalama								60

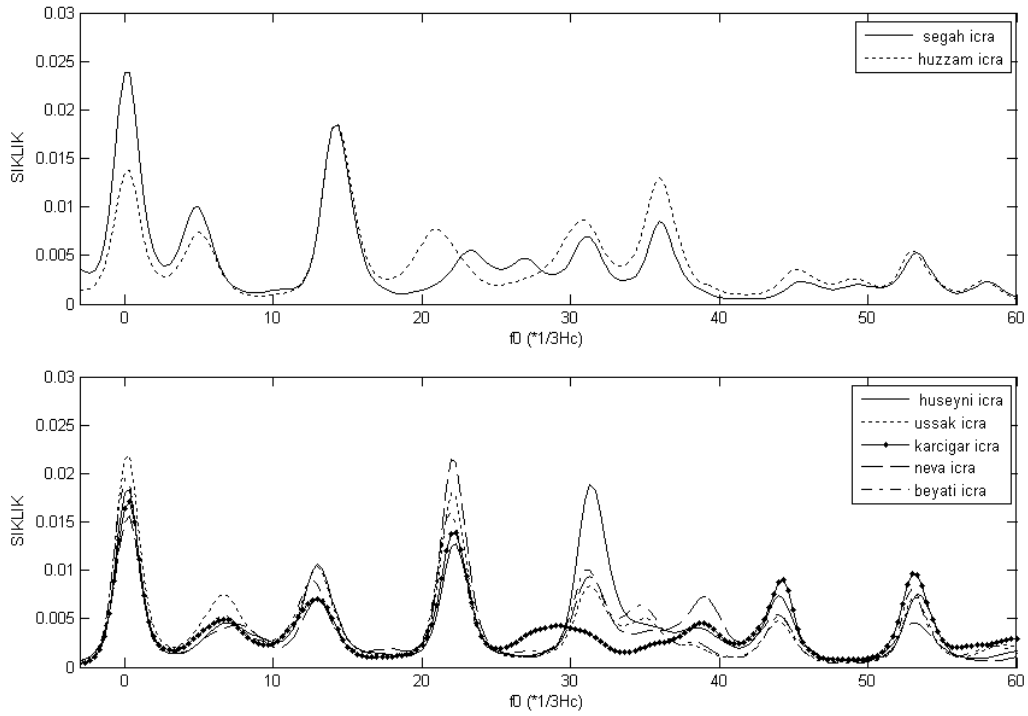
Tablo 4.5: 16 makam sınıflandırması için karıştırma matrisi. (Karıştırma sayısı 5'den büyük olanlar kalın olarak işaretlenmiştir.)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	1	1	0	2	0	0
2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
4	1	0	1	0	5	2	1	1	0	0	0	0	2	0	0	1
5	1	0	3	2	0	2	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0
6	0	2	0	5	0	0	7	1	0	0	0	0	0	1	2	3
7	0	0	0	9	0	0	0	8	0	0	0	0	1	2	0	5
8	0	0	0	6	1	1	4	0	2	0	1	0	2	0	0	13
9	0	2	0	2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0
11	0	7	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
12	5	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
13	2	0	0	2	0	0	1	6	0	0	0	0	0	1	0	1
14	0	1	0	1	0	0	4	3	0	1	0	0	1	0	0	2
15	1	5	0	0	1	1	0	1	0	1	3	4	2	0	0	0
16	0	0	0	3	0	1	0	8	1	0	0	0	0	0	0	0

Karıştırma matrisinden görülebileceği gibi birbiriyle en fazla karışan makam çiftleri arasında Beyati - Uşşak, Uşşak - Hüseyini, Rast - Mahur, Rast - Suzinak, Acem Aşiran – Mahur bulunmaktadır. Diğer yandan Kürdili Hicazkar makamı tek bir makamla değil Nihavend, Hüseyini ve Uşşak makamları başta olmak üzere bir çok makamla önemli oranda karışmıştır.

Karıştırma matrisi yanında makamların benzerliğini gözlemek için makam histogram şablonları incelenmiştir. Birbiriyle yüksek oranda karıştırılan makamların icralardan hesaplanan şablonları Şekil 4.7'de sunulmaktadır.





Şekil 4.7: Histogram şablonları birbirine benzeyen makamlar: **a)** Hicaz - Hicazkar, **b)** Rast - Acem Aşiran – Mahur - Suzinak, **c)** Kürdili Hicazkar - Nihavend, **d)** Hüseyini – Uşşak – Karcigar – Neva - Beyati

Sınıflandırma başarısı düşük makamlar kuramda da benzer dizileri kullanan makamlar olarak açıklanmışlardır. Tablo 4.6'da makamların (Y)AEU sisteminde tanımlanan perde aralıkları, karar notaları ve histogram şablon benzerliklerine göre yapılan makam gruplandırmaları için sunulmuştur.

Tablo 4.6: Dizilerine göre makamların gruplanması.

Makam	AEU sisteminde dizi aralıkları (Hc)							Karar perdesi
Makam sınıfı 1								
Hicaz	5	17	22	31	35	44	53	düğah
Hicazkar	5	17	22	31	36	48	53	düğah
Makam sınıfı 2								
Mahur	4	13	22	31	35	44	53	rast
Rast	9	17	22	31	40	48	53	rast
Suzinak	9	17	22	31	36	48	53	rast
Acem Aşiran	9	18	22	31	40	49	53	acemaşiran
Makam sınıfı 3								
Segah	5	14	22	31	36	49	53	segah
Hüzzam	5	14	19	31	36	49	53	segah
Makam sınıfı 4								
Nihavend	9	13	22	31	35	44	53	rast
Kürdili Hicazkar	4	13	22	31	35	44	53	rast
Makam sınıfı 5								
Hüseyini	8	13	22	31	39	44	53	düğah
Neva	8	13	22	31	39	44	53	düğah
Beyati	8	13	22	31	35	44	53	düğah
Uşşak	8	13	22	31	35	44	53	düğah
Karcigar	8	13	22	27	39	44	53	düğah
Makam sınıfı 6								
Saba	8	13	18	31	35	44	53	düğah

Tablo 4.6'dan görülebileceği gibi histogram şablonları benzeyen makamlar (Y)AEU sisteminde tanımlanan perde aralıkları ve karar sesleri açısından da önemli oranda birbirine benzemektedir.

Nota yazma uygulaması açısından her bir makamın tek tek sınıflandırmasına alternatif olarak benzer müzikal dizileri kullanan makamların grup olarak sınıflandırılması da kullanılabilir. Bu amaçla Tablo 4.4'de sunulan makam gruplarıyla sınıflandırma testleri yapılmıştır. Her makam grubu için makam grup şablonları her makam grubundaki tüm parçaların f0 histogramlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Tablo 4.7'de 6 makam grubu için sınıflandırma başarısı gösterilmektedir.

Tablo 4.7: 16 makamın 6 makam grubu olarak sınıflandırılma başarısı.

Makam Sınıfı #	n_{TP}	n_{TN}	n_{FP}	n_{FN}	R	P	F-measure
1	44	522	28	28	61	61	61
2	77	471	17	57	57	82	68
3	85	492	32	13	87	73	79
4	90	458	55	19	83	62	71
5	112	431	28	51	69	80	74
6	41	563	13	5	89	76	82
ortalama							73

Tablo 4.7'den görülebileceği gibi 16 makamın 6 makam grubu olarak sınıflandırılmasında F-measure cinsinden ortalama % 73'lük bir başarı elde edilmiştir. Böylece 16 makamın ayrı ayrı sınıflandırılması sonucu elde edilen % 60'lık sınıflandırma başarısına göre %12 gibi oldukça önemli bir fark oluşmaktadır. Bu sonuç bize otomatik sınıflandırma için tek tek makamların şablon eşleştirme ile sınıflandırılmadığı durumda da makamların karar notalarına ve dizilerinin benzerliğine göre gruplanarak sınıflandırılabileceğini göstermektedir. Otomatik notaya dökme uygulaması açısından bu alternatif de sınıflandırıcıdan beklenen gerekli bilgileri sağlamaktadır.

4.3.4 35 makamın otomatik sınıflandırılması

Son olarak, proje başvurusunda öngörülen sayıda makamın otomatik sınıflandırılması testlerini yapmak için 19 yeni makam eklenmiş ve toplam örnek parça sayısı 947'ye çıkartılmıştır. Tablo 4.8'de, sınıflandırma için kullanılan makamlar, karar perdeleri ve örnek parça sayıları ile birlikte gösterilmiştir.

Tablo 4.8: Sınıflandırma testlerinde kullanılan 35 makam.

# Makam	Karar perdesi	örnek #	# Makam	Karar notası	örnek #
1_ussak	dügah	52	18_dugah	dügah	13
2_beyati	dügah	17	19_ferahfeza	yegah	25
3_huseyni	dügah	56	20_bestenigar	ırah	20
4_neva	dügah	19	21_evic	ırah	19
5_hicaz	dügah	37	22_ırah	ırah	8
6_karcigar	dügah	19	23_sehnaz	dügah	16
7_saba	dügah	46	24_sedaraban	yegah	28
8_kurdilihicazkar	rast	59	25_neveser	rast	8
9_segah	segah	45	26_sultaniyegah	yegah	29
10_huzzam	segah	53	27_suzidil	hüseyniaşiran	21
11_hicazkar	rast	35	28_gulizar	dügah	15
12_nihavend	rast	50	29_tahirbuselik	dügah	13
13_rast	rast	55	30_muhayyer	dügah	31
14_suzinak	rast	23	31_ısfahan	dügah	17
15_acemasiran	acemaşiran	26	32_beyatiaraban	dügah	14
16_mahur	rast	30	33_sevkefza	acemaşiran	12
17_buselik	dügah	11	34_yegah	yegah	12
			35_nikriz	rast	14

35 makamı gruplara ayırabilmek için şablonların ikili gruplar halinde benzerlikleri görsel olarak incelenmiştir. Yapılan karşılatırmaların bazıları Ek-2'de sunulmuştur. Ek-2'de sunulan örneklerde de görülebileceği gibi bazı makamların histogramları birbirine çok yüksek düzeyde benzerlik göstermektedir. Aynı ayrı makamlara göre sınıflandırma sonucunda bu makamların büyük oranda karıştırılacağı rahatlıkla öngörülebilir. İkili benzerliklerinden yola çıkarak makam grupları oluşturulmuştur. Sonuç olarak, benzerliklerden faydalanarak Tablo 4.9'da gösterildiği gibi 10 sınıftan oluşan bir makam gruplandırılması yapılmıştır.

Tablo 4.9: Benzerliklerine göre 10 makam grubu

#	Makam grubu
1	Tahir Buselik – Beyati Araban - Uşşak - Beyati - Karcığar - İsfahan
2	Hicaz - Hicazkar - Şehnaz - Suzidil - Şevkefza
3	Ferahfeza – Sultaniyegah – Neva – Yegah - Şedaraban
4	Nikriz - Neveser
5	Rast – Suzinak – Acem Aşiran – Mahur
6	Bestenigar - Irak - Eviç
7	Segah - Hüzzam
8	Kürdili Hicazkar - Muhayyer
9	Hüseyni - Nihavend – Buselik - Gülizar
10	Saba - Dügah

Gruplardaki makam sayısı arttıkça alınan ortalamalar sonucu şablonlar yayvanlaşmakta ve şablon eşleştirme sınıflandırıcısı açısından ayrıştırma özelliklerini yitirmektedirler. Bu sebeple alternatif olarak makam grubu için şablon kullanmak yerine 35 makamın şablonları ayrı ayrı kullanılmıştır. Her örneğin sınıflandırılması 35 makam şablonu ile karşılaştırılıp en çok benzediği makam hangi makam grubuna aitse o gruba atanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma başarı oranları Tablo 4.10'da sunulmuştur.

Tablo 4.10: 35 makamın 10 makam grubu olarak sınıflandırılma başarısı.

Makam Grubu #	n_{TP}	n_{TN}	n_{FP}	n_{FN}	R	P	F-measure
1	72	772	43	60	55	63	58
2	60	801	25	61	50	71	58
3	72	778	56	41	64	56	60
4	14	912	13	8	64	52	57
5	98	794	19	36	73	84	78
6	40	889	11	7	85	78	82
7	79	841	8	19	81	91	85
8	68	776	81	22	76	46	57
9	81	789	26	51	61	76	68
10	49	857	32	9	84	60	71
ortalama							67

Tablo 4.10'da görülebileceği gibi 5,6,7, 8, 9 ve 10 numaralı makam grupları dışındaki 1,2,3 ve 4 numaralı makam gruplarının sınıflandırılma başarı oranları düşük çıkmıştır. İkinci bir gruplama stratejisi olarak karar perdelerine göre sınıflandırma yoluna gidilmiştir. Böylece Tablo 4.11'de sunulan makam grupları elde edilmiştir.

Tablo 4.11: Benzerliklerine göre 10 makam grubu.

#	Karar perdesi	Makam grubu
1	Dügah (A4)	Tahir Buselik, Beyati Araban, Uşşak, Beyati, Karcıçar, İsfahan, Saba, Dügah, Hicaz, Hicazkar, Şehnaz, Suzidil, Şevkefza, Hüseyini, Nihavend, Buselik, Gülizar, Kürdili Hicazkar, Muhayyer, Neva
2	Yegah (D4)	Ferahfeza, Sultaniyegah, Yegah, Şedaraban
3	Rast (G4)	Nikriz, Neveser, Rast, Suzinak, Acem Aşiran, Mahur
4	Irak (Gb4)	Bestenigar, Irak, Eviç
5	Segah (B4b1)	Segah, Hüzzam

Sonuç olarak 5 karar sesine göre 35 makam 5 makam grubuna F-measure cinsinden %75 başarı oranıyla sınıflandırılmıştır (Tablo 4.12).

Tablo 4.12: 35 makamın 10 makam grubu olarak sınıflandırılma başarısı.

Makam Grubu #	n_{TP}	n_{TN}	n_{FP}	n_{FN}	R	P	F-measure
1	487	326	69	65	88	88	88
2	65	801	52	29	69	56	62
3	97	759	32	59	62	75	68
4	37	881	19	10	79	66	72
5	79	839	10	19	81	89	84
ortalama							75

Projemiz kapsamındaki makam sınıflandırıcı tasarım çalışmaları, proje başvuru metninde sunulan hedeflere büyük oranda ulaşıldığı için bu noktada durdurulmuştur. Böylece literatürde ilk defa bu konuda bir çalışma gerçekleştirilmiş olmuştur. Ancak otomatik makam sınıflandırması konusu birçok farklı örüntü tanıma yaklaşımıyla çalışılmaya açık bir konudur ve ilerleme için geniş bir potansiyel bulunmaktadır.

5. Frekans dağılımları kullanarak kuram - icra uyum analizi

Daha önce de üzerinde durduğumuz gibi, projemizin hedeflerinden birisi hesaplamalı müzikoloji alanına araçlar sunmaktır. Büyük veritabanlarındaki çok sayıdaki kaydı tam otomatik işleyebilecek araçların bu alanda birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Bölüm 4'te sunduğumuz böyle bir aracın Türk müziği için uygulamasını bu bölümde sunmaktayız.

Ölçmenin gerekliliği üzerine

Çalışmamız boyunca geribesleme alabilmek için çeşitli zamanlarda usta icracılarla biraraya geldik, yaptığımız çalışmalardan söz ettik. Ne yazık ki icracıların (çoğunlukla çalışmanın içeriğini çok bilmeden, ilk tepki olarak) “ölçmenin gereksizliği”ni sıkça dile getirdiklerini gördük. Bu sebeple burada kısaca bu konuyla ilgili yorumlarımıza yer verme ihtiyacı duyduk.

Ölçmeye dair ilk büyük çekincenin kuramın icrayı belirleyeceği (diğer bir deyişle standardizasyon getireceği) kaygısı olduğunu düşünmekteyiz. Oysaki ölçmenin bu problemde kullanılmasındaki amaç kuramın hatalarının tespit edilip icraya uydurulmasıdır. Başka bir deyişle, meşk ile aktarılan sözel kültür mirası olan seslere / perdelere dair temel bilgi kaynağı icra ve icracılardır, kuram bunları izler. Kuramın bir parçası veya bütünü icrayı, meşk sistemini ikame edemez, onu yargılamak için kullanılamaz. Çalışmalarımızda izlediğimiz yol Farabi'nin ortaya koyduğu “kuramla icra arasında bir uyumsuzluk var ise bu kuramın hatasından kaynaklanmaktadır” prensibi üzerine oturtulmuştur. Ayrıca kuramın belirlediği dizi makamın “cansız iskelet”idir (SIGNELL, 1977), ona hayat veren icracıdır.

Türk müziğinde icra edilen perdelerin oynaklığı sebebiyle ölçmenin hiçbir zaman bir sonuç vermeyeceği gibi bir önyargı ile de sıkça karşılaşmaktayız. Buradaki temel sorun ölçümün istatistiksel bir değerlendirmeye tabi olduğunun bilinmemesidir. Perdelerin oynaklıkları farklı farklıdır ve sınırları vardır. En oynak perdeler için bile merkezi frekanstan sapma 5 Holder komasını geçmez. Yine birçok icrada bazı perdeler için 1-2 Holder komalık kaydırmaların bile kulak tırmaladığı bilinmektedir. Üstadlar, eğitimde öğrencilerine “daha pest”, “daha tiz” çalmaları konusunda uyarıda bulunurken kulak aracılığıyla yaptığı subjektif ölçümleri eğitimde kullanmaktadırlar. Bir açıdan bakınca öğrencinin icrasındaki “oynak”lığa sınır koymaktadırlar. Yine birden fazla saz ile beraber icra durumunda kişisel tercihe bağlı “oynak”lık yine sınırlanmak durumunda kalır. İstatistiksel analiz, frekansların kullanım sıklıklarına dair bilgi verir. Sıklık bilgisinden her bir perdenin ne kadar “oynak” olduğu da rahatlıkla görülebilir, makamlar arası farkların ortaya konmasında faydalı olur. Yapılan çalışma, her bir perdeye bir frekans değeri bulma değil her bir perdenin hangi frekanslarda hangi sıklıkta çalındığını ortaya koyma amacı taşır.

Bununla beraber Türk müziğinde kullandığımız sabit perdeli sazlar da bulunmaktadır. Lavta, tanbur gibi sazlarda bir eserin icrası boyunca akort ve perde (örneğin Rast, Dügah perdeleri) yerleri değiştirilmez (“oynak” perdeler için yanyana yakın bir şekilde dizilmiş perdeler kullanılır). Perdesiz sazlarda, örneğin udda bile boş tellere denk gelen perdeler sabittir. Bunların ölçülmesi ve kuramın icrayı ne kadar karşılayabildiğinin bulunması konusunda çekincelerin yersiz olduğunu düşünmekteyiz. Ölçmenin gereksizliği ve mümkün olmayışına dair ifadeler aslında makam müziğinde kullanılan dizilere dair bir kuramın da varolamayacağı, yani bu konuda yüzyıllardır yazılmış bunca “edvar”ın gereksiz olduğu iddiasını taşımış olur. Bilim yaparken en önemli aracımız olan ölçmenin istenmemesi, aslında çok dolaylı olmayan bir şekilde müziğin biliminin yapılmasının istenmemesi anlamını taşımaktadır.

Diğer büyük çekincenin teknoloji kullanımı olduğunu düşünmekteyiz. Ancak teknoloji halihazırda (çekinceyi dile getirenler tarafından da) kullanılmaya başlamıştır. Örneğin Batı müziği için tasarlanmış akort cihazları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Türk müziği için teknolojinin eksikliği, ulaşılabilen diğer teknolojilerin yanlış bir şekilde kullanımını beraberinde getirmektedir. Buna örnek olarak Batı müziği akort cihazlarıyla yapılan ud ve kanun akordu verilebilir. Bu sebeple Türk müziği için teknolojik gelişimin desteklenmesi yanlış uygulamaların azaltılması, bilinç düzeyinin artırılması açısından da önemlidir. Bu konuda yukarıdaki çekinceleri taşıyan icracıların “ölçülmemesi” yönünde verdikleri tepkinin zamanla “doğru ölçülmesi” ve “ölçüm sonuçlarının doğru değerlendirilmesi” için aktif bir çabaya dönüşeceğini ummaktayız.

Kuram - icra uyum/uyumsuzluğunun ölçümü

Türk müziği için önde gelen hesaplamalı müzikoloji problemi kuram - icra uyum/uyumsuzluk düzeyinin ölçülmesi ve icrayı daha iyi açıklayabilecek bir kuramın bulunmasıdır. Yakın dönemde bu konuda birçok çalışma yapılmış (SIGNELL, 1977, KAÇAR, 2002, AKKOÇ, 2002, ZEREN, 2003, KARAOSMANOĞLU et al, 2003) ancak yukarıda açıkladığımız otomatik analiz teknikleri varolmadığı için bu çalışmalar az sayıda kayıt üzerinde yürütülmek durumunda kalmıştır.

Türk müziği perde yerlerinin kuramsal tanımına dair literatür çok eskilere (AL-KİNDİ, 9. yy) uzanmaktadır. Bu teknik rapordaki hedefimiz geliştirdiğimiz teknolojinin bu alanda kullanımını açıklamak olduğu için ve birçok yayında (BUDAK, 2006, YARMAN, 2008, BOZKURT et al, 2009) detaylı özetler verildiği için burada bir Türk müziği kuramlarının literatür özetini yapmayacağız.

Üzerine düşünülmesi gereken ilk konu hangi kuramların icra ile karşılaştırılacağıdır. Çok sayıdaki kuram arasından karşılaştırma için bir altgrup oluştururken şu kriterleri dikkate aldık:

- 1) Birbirini kapsayan, birbirinin türevi şeklinde olan kuramlardan yaygın kullanılan bir tanesini tüm grubu temsilen seçmek.
- 2) Geçmişten (9. yy) günümüze, yaygın olarak kullanılan kuramlardan seçmek
- 3) Yakın dönem önerilerini dahil etmek

Bu kriterleri uyguladığımızda (Y)AEU kuramını hem yaygınlığı, hem de tarih boyunca çeşitli dönemlerde öne sürülen Pitagoryen formülasyona dayalı diğer 17 sesli sistemleri içerdiği için (YARMAN, 2007) seçtik. Töre - Karadeniz sistemini (KARADENİZ, 1965) 20. yy içerisindeki yaygın olarak referans verilen alternatif bir sistem olduğu için, Nail Yavuzoğlu'nun (YAVUZOĞLU, 2008) ve Ozan Yarmen'in (YARMAN, 2008b) yaptıkları önerileri de yakın tarihli öneriler oldukları için seçtik. Bunlara ek olarak elle toplanmış verilere ve 53 Holder komalı bölütlemeyle dayanarak kurulan Mus2 sistemini de veri-güdümlü olduğu, yaygın kullanılan 53 komalı sistemin bir temsili olduğu ve eğitimde sıkça kullanılan bir kaynağın (ÖZKAN, 1998) bilgilerinden dolayı da olsa faydalanmış olduğu için listeye dahil ettik.

Ölçümler için listelenen icracılardan taksim kayıtları kullanılmıştır: Tanburi Cemil Bey, Mesut Cemil, Ercüment Batanay, Fahrettin Çimenli, Udi Hrant, Yorgo Bacanos, Aka Gündüz Kutbay, Kani Karaca, Bekir Sıdkı Sezgin, Necdet Yaşar, İhsan Özgen, Niyazi Sayın. Kayıtların frekans analizi yapılarak sorunlu olan kayıtlar çıkarıldıktan sonra elimizde kalan kayıtların makamlara göre dağılımı şu şekildedir: Hicaz: 17, Hüseyini: 15, Hüzam: 13, Kürdili Hicazkar: 17, Nihavend: 12, Rast: 16, Saba: 11, Segah: 16, Uşşak:11. Hangi müzisyenin kayıtlarının histogramlarda hangi oranlarda katılması gerektiği konusu tartışmaya açık bir konudur. Her icracının çaldığı her eserin dahil edilmesinin uygun olup olmadığı da tartışmaya açıktır, çünkü örneğin Tanburi Cemil Bey'in kendisinin de bazı kayıtlarıyla ilgili memnuniyetsizlik dile getirdiği bilinmektedir (CEMİL, 1947). Verilerin doğruluğunu onaylayan nokta, literatürde sözel olarak ifade edilen (ölçme sonucu verilmeyen) bilgilerle(örneğin (ÖZKAN, 1998)) bizim ölçümle elde ettiğimiz sonuçların tamamen uyumlu oluşudur.

İcrada sık kullanılan perde frekanslarının tespit edilmesi

Şekil 2.4'teki melografta da görülebileceği gibi Türk müziği icrasında süslemeler ve icracının yorumundan kaynaklanan çeşitlilikler sebebiyle bir icra esnasında çok fazla sayıda perde - aralık kullanılmaktadır. Kuramların, kullanılan dizilerin sadece ana perdelerini tanımladığı, bütün çeşitliliği açıklamaya çalışmadığı görülmektedir. Bu sebeple, kuramla icranın karşılaştırılabilmesi bütün çeşitliliklerin (kullanılan bütün perdelerin - aralıkların) ölçülmeye çalışılmasını gerektirmektedir. Sürekli dinamik bir şekilde oluşan her değişimi ölçmek yerine histogramlar aracılığıyla sık kullanılan perdelerin frekanslarının (karar perdesine göre

uzaklıkları) ölçülmesi kuramla yapılacak karşılaştırma için yeterlidir (çünkü kuram da sadece bu sınırlı alanda bilgi vermektedir). İcracılar tarafından "ölçme"ye gösterilen tepki bu önemli detayın anlaşılmasından kaynaklanmaktadır. Amaç kuram tarafından belirlenen ana dizilere ait bilgilerin icra ile örtüşme düzeyinin sık kullanılan perdeler üzerinden (sık kullanılan perdeler için) ölçülmesidir. Bu ölçümler perde frekanslarının dinamik değişimlerine (örneğin inici veya çıkıcı oluşlarına) dair bilgi içermez, sadece sıklık bilgisi içerir.

Önceki bölümlerde açıklanan yöntemlerle her bir makam için histogram şablonları tam otomatik olarak oluşturuldu. Ancak kayıtların histogramları birleştirilirken iki farklı yöntem kullanıldı:

1) Ortalama işlemi: Bu şekilde elde edilen şablon histogramlarda sık kullanılan perdelere karşılık gelen tepelerin belirginleştiği, az kullanılan perde tepelerinin sönmüldüğü görülür. Bu şekilde elde edilmiş histogramlarda geçkilerden kaynaklanan tepeler görece küçüktürler ve histogram görece yumuşak hatlara sahiptir, sık kullanılan perde tepeleri belirgindir.

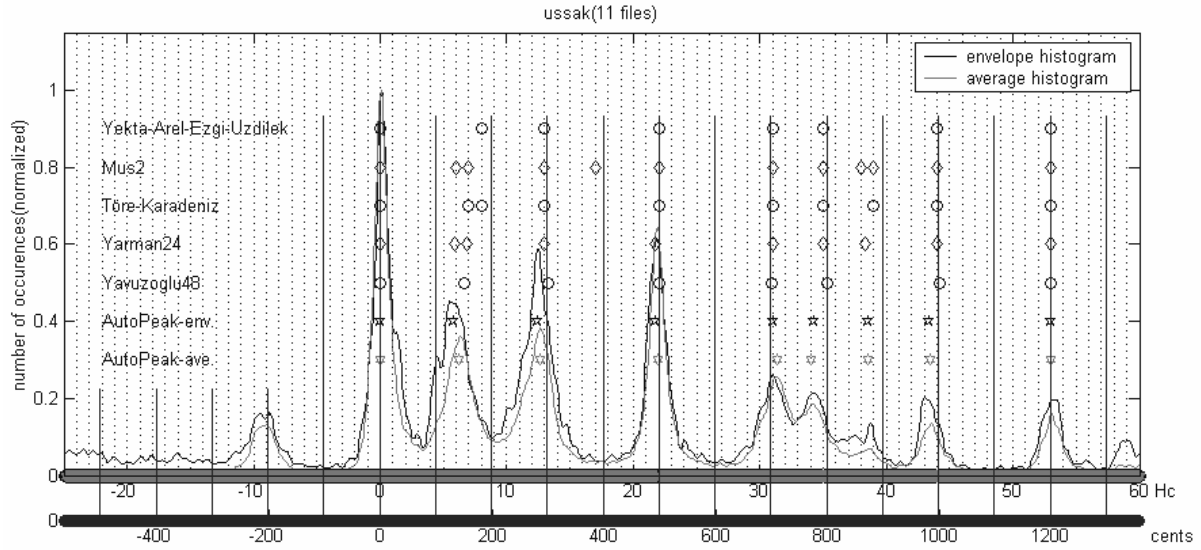
2) En yüksek değer(maksimum) alma işlemi (zarf histogramı elde edilmesi): Bu yöntem, çok sık kullanılmayan perdeler karşılık gelen tepelerin ortalama histogramda kaybolması nedeniyle, bu tepeleri ortaya çıkarmak için kullanıldı. Bunun sonucunda elde edilen şablon histogramlar daha fazla iniş-çıkışlıdır, bazı büyük tepelerde birden fazla yerel tepe gözlenebilmektedir ve bir kayıta uzunca bir süre çalınacak yanlış bir notanın frekans dağılımında görünmesi gibi bir risk taşımaktadır.

Bu iki yöntemin de çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunduğu için iki yöntemin sonuçlarının birarada sunulması tercih edilmiştir.

Her makam için elde edilebilecek olan bu iki tip histogramın tepeleri otomatik bir şekilde bulunduğu icrada kullanılan aralıklar elde edilebilmektedir. Bunun için yine otomatik olarak histogramlar yumuşatılıp lokal tepelerin yerleri tespit edilmiştir. Tepe noktalarının çevresinde alınan 7 noktanın ağırlık merkezi bulunarak yeni tepe noktası değerlerine ulaşılmıştır.

Zarf histogramından elde edilmiş aralıklara AutoPeak-env., ortalama histogramdan elde edilmiş aralıklara AutoPeak-ave. ismi verilmiştir. Şekil 5.1'de Uşşak makamı için hesaplanan ilgili histogramlar kuramsal aralıklarla beraber verilmiştir. Tablo 5.1'de ise otomatik olarak bulunan tepeler ile kuramsal değerler birarada verilmiştir. Raporun sonundaki Ek-1'de, 37 sık kullanılan makam için bu şekilde analiz sonuçları verilmiştir. Batı müziği sesleriyle karşılaştırma yapılabilmesi için de sent birimli bir ızgara x eksenine eklenmiş, her yarım ses adım için (100 sent) bir dikey çizgi eklenmiştir .

Bu gösterimler kuram - icra uyumunun çalışılması için önemli bir imkan sağlamaktadır. Örneğin tipik olarak (Y)AEU kuramının eleştirilmesine neden olan Uşşak makamının ilk aralığı, kuramda belirtilen 8Hc'den daha kısa bir aralık olarak rahatlıkla gözlenebilmektedir. (Y)AEU'ya alternatif olarak sunulan sistemlerin bu aralığı daha kısa olarak gösterdiğini de bu şekil üzerinden görebilmekteyiz.



Şekil 5.1: Uşşak makamı için 11 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi. (BOZKURT et al, 2009)

Tablo 5.1: Uşşak makamı için kuramsal aralıklarla ölçülen frekans değerlerinin karşılaştırması. A.P.Env.: zarf histogramından otomatik olarak hesaplanan aralıklar, A.P.Ave.: ortalama histogramdan otomatik olarak hesaplanan aralıklar. M_e ve D_e : zarf histogramının tepelerinden uzaklıklar, M_a ve D_a ortalama histogramın tepelerinden uzaklıklar. 1. tablo Holder koması cinsinden, 2. tablo sent cinsinden, aynı değerleri içermektedir.

Uşşak	Holder Koması cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a	E	C		
YAEU	7.97	12.99	22	31	34.99			43.99	2.24	0.74	1.69	0.68	100	75		
Mus2	6	7	13	17	22	31	35	38	39	44	0.74	0.43	1.01	0.45	70	86.8
TK	7	8	13	22	31	35		39	44		1.27	0.57	1.01	0.52	87.5	82.9
Yarman24	5.84	6.87	12.99	21.74	31	34.99	38.33	43.99			0.73	0.34	1	0.44	87.5	70.8
Yavuzoğlu48	6.63		13.25	22.08	30.92	35.33		44.17			1.07	0.68	1.35	0.61	100	87.5
AutoPeak-env.	5.73	12.41		21.78	31.04	34.26	38.52	43.34								
AutoPeak-ave.	6.28	12.62		21.89	31.36	33.99	38.53	43.43								

Uşşak	Sent cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU		180.5	294.1		498.1	701.9	792.2		996	50.7	16.8	38.3	15.4	
Mus2	135.8	158.5	294.3	384.9	498.1	701.9	792.5	860.4	883	996.2	16.8	9.7	22.9	10.2
TK	158.5	181.1	294.3		498.1	701.9	792.5		883	996.2	28.8	12.9	22.9	11.8
Yarman24	132.2	155.5	294.1		492.2	701.9	792.2	867.8		996	16.5	7.7	22.6	10
Yavuzoğlu48	150		300		500	700	799.9		1000		24.2	15.4	30.6	13.8
AutoPeak-env.	129.7		281		493.1	702.8	775.7	872.2	981.2					
AutoPeak-ave.	142.2		285.7		495.6	710.0	769.6	872.4	983.3					

Tablo 5.1'de kuramlarda tanımlanan aralıklar ilk beş satırda, histogramlardan ölçülen aralıklar son iki satırda ve bu ikisi arasındaki farklara dair aşağıda tanımlanmış fark ölçümleri sağ kolonlarda verilmiştir.

Kuramla icranın karşılaştırılması pratik olarak bir dağılım ile bir vektör arasında uzaklığı bulmaya karşılık gelmektedir. Bu uzaklığın tanımlanması tartışmaya açık bir konudur. Aşağıda kullandığımız basit uzaklık tanımını sunuyoruz.

Verili bir makam için, verilerden (histogram tepeleri bulunarak) ölçülen aralıklar, I_{ai} , ve kuramda tanımlanan aralıklar, I_{ti} , verildiğinde, ortalama fark, D , ve en yüksek (maksimum) fark, M , aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$D = \frac{1}{N_{tc}} \sum_{i=1}^{N_{tc}} |I_{ai} - I_{ii}| \quad (25)$$

$$M = \max\{|I_{ai} - I_{ii}|\}, i = 1, 2, 3, \dots, N_{tc} \quad (26)$$

N_{tc} ilgili makam için kullanılan aralık sayısıdır. Kuramlarda tanımlanan ve otomatik olarak bulunan aralık sayısı örtüşmeyebilmektedir. Bu sebeple, ortalama fark hesabında sadece 2.5 Hc yakınında bir tepe bulunan aralıklar dikkate alınmaktadır. Bununla beraber kuramda listelenen aralıkların ne kadarının fark hesabına dahil olduğu, yani icrada kaç aralığa karşılık tepe bulunabildiği de verimlilik değeriyle, E , ölçülmektedir. Burada N_t değişkeni toplam aralık sayısını ifade etmektedir.

$$E = (1 - N_{tc} / N_t) * 100 \quad (27)$$

Aynı zamanda verili bir ses sisteminin karmaşıklığını ölçmek için de bir karmaşıklık ölçütü, C , kullanılmıştır. Burada N_z ses sisteminde bir oktav içerisinde kullanılan nota sayısını belirtmektedir.

$$C = (1 - N_{tc} / N_z) * 100 \quad (28)$$

D , M , E ve C parametreleri iki ayrı yöntemle [ortalama alma (ortalama histogram) ve en yüksek değer alma (zarf histogramı) yöntemleriyle] elde edilen şablon histogramların tepelerinden ölçülen aralıklar ile her bir sistem arasında, her bir makam için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Örneğin M_e zarf histogramından uzaklık, M_a ortalama histogramdan uzaklık ölçümünü vermektedir. Verimlilik değeri, E , en yüksek, diğer değerleri en düşük sistem icra ile uyumu en yüksek ve bunu gerçekleştirirken en basit (en az notayı kullanmış) sistem olarak öne çıkmaktadır. Örneğin Uşşak makamı için önerilen kuramlar arasında en az fark (zarf histogramına göre M (en yüksek fark)=0.73, D (ortalama fark)=0.34, ortalama histograma göre M (en yüksek fark)=1, D (ortalama fark)=0.44) ve en düşük karmaşıklık ($C=70.8$) ile Yarman24 kuramı icraya en yakın kuramdır. Farklı makamlar için hesaplamaların sonuçları bu dökümanın sonundaki EK-1'de sunulmuştur ve en düşük farklar ve karmaşıklık değerleri koyuyla işaretlenmiştir.

9 makam için bu şekilde tablolar ve şekiller tam otomatik bir şekilde hazırlanarak Dr. Ozan Yarman, M. Kemal Karaosmanoğlu ve Doç. Dr. Can Akkoç ile beraber (BOZKURT et al, 2009) içerisinde 6 sayfalık tartışma bölümünde değerlendirilmiştir. Bu detaylı tartışmanın özeti tüm makamlar üzerinden alınan ortalama sonuçlarla uyduğu için biz burada sadece genel sonuçları vereceğiz. Tablo 5.2'de M , D , E ve C parametrelerinin genel ortalamaları sunulmuştur.

Tablo 5.2: Kuramlarla icralar arasında uzaklığın (M, D, E ve C) ortalama değerleri. Mem, Dem: Zarf histogramı kullanılarak elde edilmiş değerlerin ortalamaları, M_{am}, D_{am} : Ortalama histogram kullanılarak elde edilmiş değerlerin ortalamaları. E_m, C_m, M_m, D_m : Genel ortalamalar. M_c, D_c : M_m ve D_m değerlerinin C_m ile oranlanmış hali.

128 kayıt	M_{em}	D_{em}	M_{am}	D_{am}	E_m	C_m	M_m	D_m	M_c	D_c
YAEU	0.99	0.35	1.03	0.39	97.62	74.31	1.01	0.37	0.75	0.28
Mus2	0.75	0.32	0.74	0.32	71.42	85.95	0.74	0.32	0.64	0.28
TK	1.01	0.39	1.27	0.47	95.83	83.47	1.14	0.43	0.95	0.36
Yarman24	0.81	0.31	0.86	0.32	89.72	69.21	0.84	0.31	0.58	0.22
Yavuzoglu48	1.03	0.47	1.05	0.51	94.15	86.58	1.04	0.49	0.90	0.42

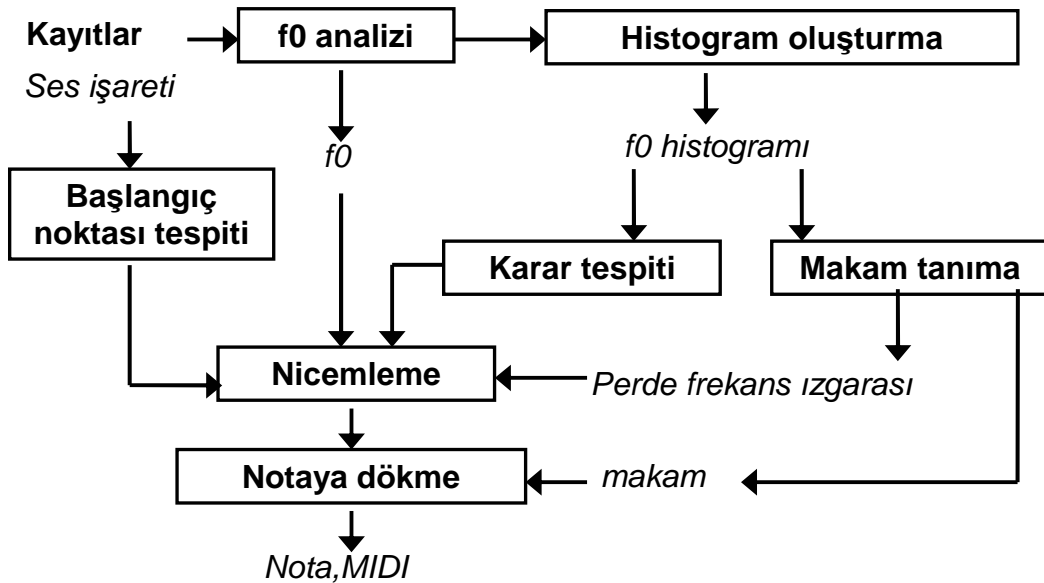
En düşük fark, en yüksek verimlilik (en az sayıda ses ile diziyi ifade edebilme) kriterlerine göre ilgili değerler kalınlıkla işaretlendiğinde görüldüğü üzere, icra ile uyum düzeyi en yüksek (fark değerleri en düşük) ve karmaşıklığı en düşük sistemler Mus2 ve Yarman24 olarak bulunmuştur.

6. Otomatik notaya dökme

Otomatik notaya dökme alanında uluslararası alanda birçok çalışma bulunmasına karşın bu çalışmalarda Batı müziği kayıtları ve ses sistemi esas alınmış, bu müziğin kendine özgü problemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Batı müziğinde bu derece gelişmiş olan yöntem ve teknikler henüz klasik Türk müziği için geliştirilip kullanılmamıştır. Bu alanda literatürde ciddi bir boşluk vardır.

Batı müziğinde notaların karşılığı olan frekanslar net olarak belirli olduğu ve eserler çoksesli yazıldıkları için bu alandaki araştırmacıların yoğunlaştığı temel problem ‘çoksesli müzik kayıtlarının notaya dökülmesi’ olmuştur. Bir müzik eserine karşılık gelen notalar, endüstri standardı haline gelmiş yaygın bir iletişim protokolü olan “Musical Instrument Digital Interface (MIDI)” (DOAN, 1994) protokolünde elektronik dosya olarak yazılmaktadır. MIDI protokolünde doğrudan ses verisi değil, temel bazı değişkenlere ilişkin sayısal bilgiler aktarılır: nota bilgileri (basma anı, susma anı, nota değeri, vb.), çalgı atamaları, tempo değeri gibi bilgiler bunlardan bazılarıdır.

Bu temel problemin en çok emek verilen (literatürü en geniş) alt dalı, aynı anda birçok çalgı tarafından çalınmış notaların (yani çoksesli/polifonik müziğin) tek tek notalarına (temel titreşim frekanslarına) ayrılmasıdır. Bu konuda birçok yayın bulunmaktadır (MARTIN, 1996, BELLO, 2003, HAINSWORTH, 2003, KLAPURI, 2004); ancak yöntemlerin özetlenmesine burada girilmeyecektir. Çünkü Türk müziği otomatik notaya dökme uygulamasında hedefimiz monofonik veya heterofonik kayıtların notaya dökülmesidir. Bu uygulamada temel zorluklar daha çok frekans nicemlemesiyle ilgilidir. Şekil 6.1’de tasarladığımız otomatik notaya dökme algoritmasının akış şeması verilmiştir.



Şekil 6.1: Otomatik notaya dökme algoritması akış şeması.

Kayıttan yola çıkarak notaya dökme işlemi öncelikli olarak Bölüm 2’de açıklanan f0 analizinin yapılmasını gerektirir. Her makam için notadaki arıza donanımı (bemol ve diyezler) değiştiği için otomatik makam tanımının yapılması gereklidir. Buna ek olarak Bölüm 1’de açıkladığımız gibi, notalara karşılık gelen frekanslar, icranın ahenkine göre değişmektedir. Frekansların nota isimlerine doğru eşlemesinin yapılabilmesi için karar sesinin frekansının tespiti gerekmektedir. Bu sayede mutlak frekans değerleri aralık bilgisine dönüştürebilmekte, makam bilgisine beraber aralık bilgisi nota isimlerine dönüştürülebilmektedir. Başlangıç noktası tespiti notaların sürelerinin nicemlenmesinde kullanılmaktadır. Frekans nicemlemesi ve süre nicemlemesi yapıldıktan sonra notaya yazma işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

Otomatik karar tespit algoritması ve otomatik makam tanıma algoritması Bölüm 4’te detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde Şekil 6.1’de sunulan akıştaki diğer algoritmalar açıklanmaktadır.

6.1 Başlangıç noktası tespiti

Müziksel olayların(perde ya da nota) başlangıç noktalarının tespiti üzerine varolan çalışmalarda, algoritmaların başarısı 4 ayrı çalgı/sinyal tipi üzerinden değerlendirilir. Bunlar sırasıyla; perdeli vurmasız (pitched non-percussive-PNP), perdeli vurmali (pitched percussive-PP), perdesiz vurmali (non-pitched percussive-NPP) ve karmaşık karışımdır (complex mixture-CM). Bunun nedeni her algoritmanın belirli çalgı/sinyal tiplerinde daha başarılı, belirli çalgı/sinyal tiplerinde ise daha az başarılı sonuçlar vermesidir (BELLO et al, 2004). Ayrıca her bir algoritmanın farklı çalgı tipleri için başarısı ölçülürken ilgili algoritmada her çalgı tipi için en başarılı olduğu sabit parametre (örneğin eşik değerleri vb.) değerleri kullanılır. Bello ve arkadaşlarının çalışması (BELLO et al, 2004) başlangıç noktası tespit algoritmalarının başarı oranlarının çalgı tipine ve sabit parametre değerlerine göre değişim gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı öncelikle çalgı sınıflandırmasına dayalı bir çalışma yapılmıştır. Daha sonra bu konudaki çalışmalar Girit Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümü (CSD-Girit) ile yapılan bir ortak çalışma çerçevesinde değerlendirilmiştir (HOLZAPFEL et al, 2010). Her iki çalışma da sırasıyla bu bölüm altında kısaca özetlenmiştir.

6.1.1 Çalgı sınıflandırması ve spektral akı kullanarak başlangıç noktası tespiti

Bu ilk adımda tasarladığımız algoritma, analiz edilecek sinyali önce PN(örn. ney) veya PP(örn. tanbur) tipi olarak sınıflandırmakta, ardından bu sınıf bilgisine göre uygun parametreleri kullanarak spektral akı üzerinden başlangıç noktasını tespit etmektedir.

Başlangıç noktası tespitinde literatürde belirtilen yöntemler temelde spektral değişimin hızlı olduğu bölgelerin tespit edilmesine dayanmaktadır. Spektral değişim; spektral genlik bilgisi, faz bilgisi ayrı ayrı veya beraber kullanılarak, çeşitli yöntemlerle işlenerek ani değişim noktaları tespit edilmeye çalışılmaktadır. Başlangıç noktası tespit algoritmasını tasarlarırken ilk adım spektral değişimi ölçmek için hangi yöntemin kullanılacağına karar verilmesidir. 2005 yılından bu yana Uluslararası Müzik Bilgi Erişim Konferansı (International Conference on Music Information Retrieval-ISMIR⁶) komitesi MIREX⁷ adında ortak bir veritabanı üzerinden araştırmacılar arasında bir yarışma düzenlemektedir. Ancak varolan başlangıç noktası tespit algoritmalarını bu veritabanı üzerinden değerlendiren bir çalışma henüz yalnızca Dixon (DIXON, 2006) tarafından gerçekleştirilmiştir.

⁶ <http://www.ismir.net>

⁷ <http://www.music-ir.org/mirex>

Dixon'ın çalışmasının değerlendirilmesi ve literatür taraması sonucunda, çalışmamızda spektral akı (*spectral flux*) (SF) algoritmasını kullanmaya ve problemimize adapte ederek geliştirmeye karar verdik. Bu seçimin nedenleri aşağıda listelenmiştir:

Bello'nun (BELLO et al, 2004) çalışması genel olarak SF algoritmasının tüm çalgı tipleri için daha başarılı sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Aslında SF algoritması tek tek her çalgı tipi ele alındığında en başarılı algoritma değildir ama tüm çalgı tiplerine uygulandığında en optimal sonucu veren algoritmadır.

Bello'ya (BELLO et al, 2004) göre daha yeni tarihli ve ortak bir veritabanında denenmiş olan Dixon'ın (DIXON, 2006) çalışması, SF algoritmasının, aralarında küçük bir fark da olsa kompleks alan (complex domain, CD) algoritmalarından sonra en başarılı algoritma olduğunu göstermektedir.

CD algoritmasının tercih edilmemesinin nedeni SF algoritmasına göre küçük bir başarı üstünlüğü olmasına karşın hesaplama maliyetinin SF'e göre çok daha yüksek olmasıdır (BELLO et al, 2004).

SF algoritması aynı zamanda çalgı sınıflandırmasında kullanılan önemli bir öz-niteliktir. Çalgı sınıflandırmasına dayalı algoritmamızda da aynı (SF) algoritmanın kullanılması hesaplama maliyetini düşürecek önemli bir etkidir.

Genel olarak varolan algoritmalara dair sözü edilebilecek başka bir problem de kullanılan müzik dosyaları ile ilgilidir. Algoritmaların değerlendirilebilmesi için her müzik dosyasında başlangıç noktalarının elle işaretlenmesi gerekmektedir. Bu ise hem çok yoğun bir emek hem de öznel bir sürece karşılık gelir. Öznel olmasının nedeni başlangıç noktalarının elle tespitinin ancak müzik dosyaları dinlenerek gerçekleştirilebilmesi yani müzik algısının öznelliğine dayanmasıdır. Buna ek olarak birçok çalışmada kullanılan müzik dosyası sayısı ve müzik dosyalarının süreleri oldukça sınırlıdır: ortalama 10 müzik dosyası ve ortalama 10 saniyelik bölümler kullanılmaktadır (örnek olarak MIREX 2005⁸ veritabanına bakılabilir).

Müzik dosyalarıyla ilişkili bir problem de kullanılan kayıtların akustik özellikleriyle ilgilidir. Akustik özellikleri, kayıtların yapıldığı tarihte kullanılan teknoloji belirlemektedir. Taş plaklardan ya da vinil plaklardan sayısal ortama aktarılan kayıtlarda, gürültü temizleme işlemlerinin başarılı olduğunu söylemek zordur. Özellikle projemiz söz konusu olduğunda elimizdeki veritabanındaki kayıtların tarihleri 1900'lerle 2000'ler arasında kapsamaktadır ve bu durum akustik olarak çok geniş bir yelpazedeki kayıtlarda başarılı bir algoritma gerçekleştirme zorunluluğunu getirmektedir.

Öncelikle NP ve PP tipi çalgılara örnek olarak veritabanımızdaki 5 ney ve 5 tanbur kaydı seçilmiştir. Kayıtların seçiminde hem önemli icracıların eserleri olması hem de özellikle kötü akustik koşullarını temsil edebilmeleri gözetilmiştir. Tanbur kayıtları için Tanburi Cemil Bey'in (1873-1916) 2 ve Mesut Cemil'in (1902-1963) 3 tanbur taksimi kaydı kullanılmıştır. Ney kayıtları için de Niyazi Sayın'ın (d.1927) 2, Sadrettin Özçimi'nin (d.1955) 1 ve İhsan Bey'in (d.?-1930) 2 ney taksimi kaydı kullanılmıştır. Seçilen her bir kaydın süresi yaklaşık 8 saniyedir. Bu çalışmada kullanılan tüm kayıtlar monoya dönüştürülmüş, normalize edilmiştir ve tüm kayıtların örnekleme frekansı 44.1kHz'tir. Sonuç olarak kullandığımız veritabanının sayı ve süre anlamında literatürdeki çalışmalara yakın olduğu belirtilebilir. Kullandığımız veritabanının literatürden en önemli farkı akustik özellikleri kötü olan kayıtlardan oluşmasıdır.

⁸ http://www.music-ir.org/mirex/wiki/2005:Main_Page

SF algoritması

SF fonksiyonuna dayanan algoritma, sinyalin kısa zamanlı spektrum değişimlerinin ölçüsünü verir. İzgesel değişimlerin yüksek olduğu bölgeler başlangıç noktası adaylarıdır.

Temel olarak L1-norm ve L2-norm olmak üzere 2 tip SF fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$\text{L1-norm: } SF(n) = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} H(|X(n,k)| - |X(n-1,k)|) \quad (29)$$

$$\text{L2-norm: } SF(n) = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} H(|X(n,k)| - |X(n-1,k)|)^2 \quad (30)$$

$$H(x) = \frac{x + |x|}{2}, \text{ yarım dalga doğrultucusu} \quad (31)$$

$X(n,k)$, n . Penceredeki sinyalin kısa zamanlı Fourier dönüşümüdür (short-time Fourier transform - STFT):

$$X_k(n) = \sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x(nh + m)w(m)e^{-\frac{2j\pi k m}{N}} \quad (32)$$

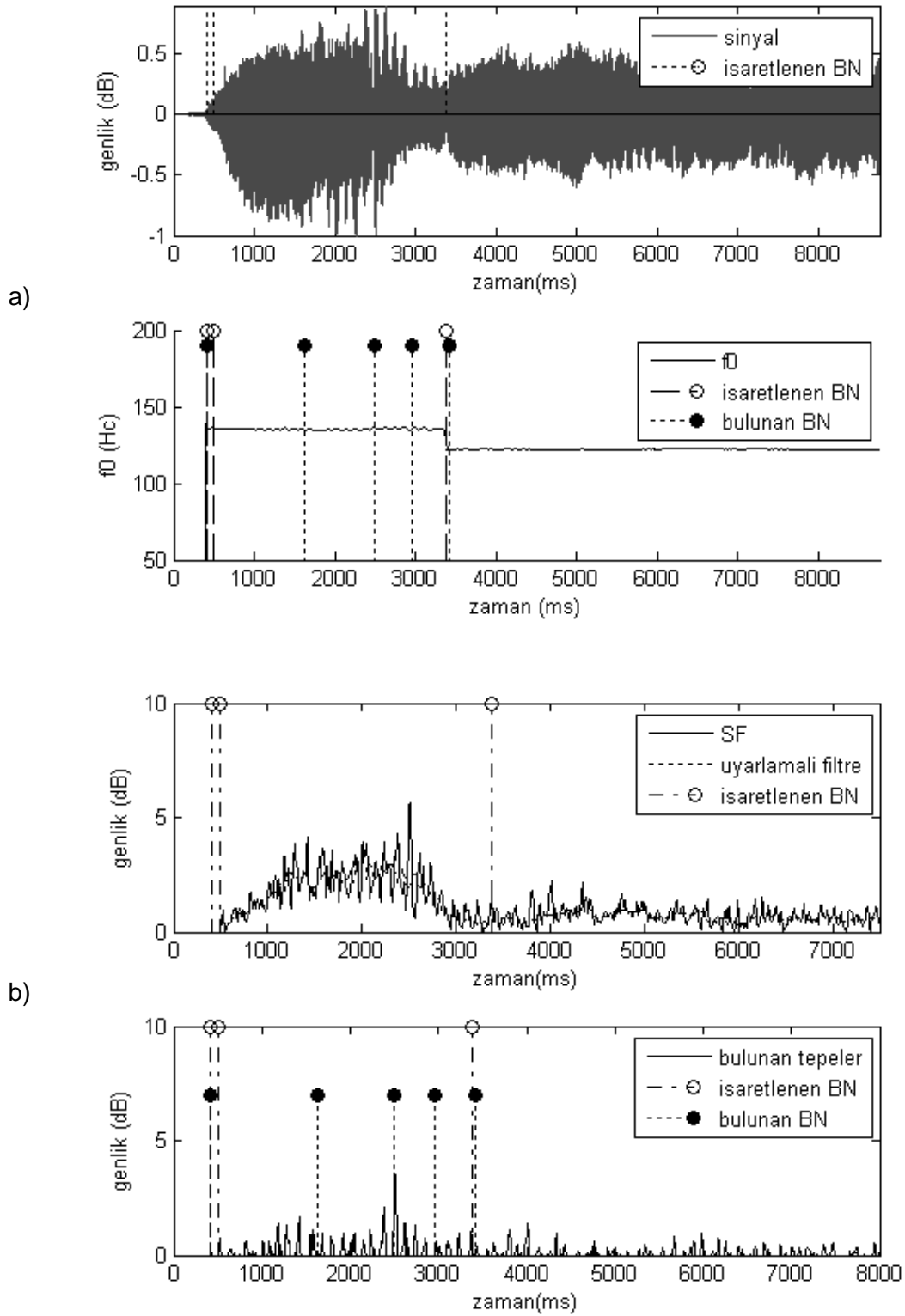
h kaydırma boyu, N pencere boyudur.

Dixon (DIXON, 2006) L1-normun L2-norma göre daha başarılı olduğunu belirtmesine karşın, biz klasik Türk müziğinde hangisinin daha başarılı olduğunu görebilmek için iki fonksiyonu da kullanmayı tercih ettik. Bu noktada önemli seçimlerden birisi kullanılacak pencere boyutunun (N , window size), kaydırma miktarının (h , hop size) ve pencere fonksiyonun ($w(n)$, window function) seçilmesidir. Biz de başlangıç olarak Dixon'ın kullandığı pencere boyutu 45 milisaniye ve kaydırma miktarı 10 milisaniye değerlerini ve Hanning pencere fonksiyonunu kullandık.

Amaç spektral değişimin fazla olduğu yerleri tespit etmek olduğu için, başlangıç noktası tespiti SF fonksiyonunun eşik değerleri üzerinden tepelerinin bulunmasıyla gerçekleştirilir. Bu amaçla literatürde kullanılan en başarılı fonksiyon, uyarlamalı eşik (adaptive threshold) fonksiyonudur:

$$\delta(n) = \delta + \text{median}\{d(n-M) \dots d(n+M)\} \quad (33)$$

M , yerel maksimumları bulmak için kullanılan pencere boyutudur. δ ise araştırmacıların farklı çalgı tipleri için optimal değerini bulmaya çalıştıkları eşik değeri sabitidir. Bello'nun (BELLO et al, 2004) kullandığı fonksiyonla bizim yukarıda gösterdiğimiz fonksiyon arasındaki tek fark bizim medyan hesaplamasında elemanların mutlak değerini kullanmamış olmamızdır. Sonuç olarak sinyalin SF fonksiyonu ile eşik değeri fonksiyonu arasındaki fark başlangıç noktalarını verecek tepelerin bulunmasını sağlar. Şekil 6.2'de başlangıç noktası tespit örneği sunulmuştur.



Şekil 6.2: Başlangıç noktası tespit örneği. a) ses sinyali ve f_0 eğrisi üzerinde işaretlenmiş BN'ler, b) L1 norm SF ve uyarlamalı filtre (kesikli çizgiler) üzerinde işaretlenen ve bulunan BN'ler.

Şekil 6.2.a'da ses sinyali üzerinde işaretlenen BN'ler ve f0 eğrisi üzerinde işaretlenen ve bulunan BN'ler gösterilmektedir. Şekil 6.2.b'de ise SF üzerinde gösterilen uyarlamalı filtrenin, tepelerin tespiti için nasıl kullanıldığı genel olarak gösterilmektedir. Aynı zamanda uyarlamalı filtre uygulandıktan sonra elde edilen işaret üzerinden sabit bir eşik değeri kullanılarak tespit edilen tepeler de gösterilmektedir. Bu şekilde işaretlenmiş olan BN'ler ile hesaplanan BN'lerin örtüşme oranı kullanılan algoritmanın başarısını gösterir. Ancak yine aynı şekilde fazladan bulunan BN'ler (*false onsets*) ise algoritmanın sınırlarına işaret etmektedir.

Yapılan ön testler sonucu SF algoritması için L1-norm kullanılmasına karar verilmiş ve ney ve tanbur çalgıları için ayrı ayrı optimum filtre ve eşik değeri parametreleri belirlenmiştir. Tanbur ve ney çalgılarını spektral merkez (spectral centroid - SC) ve spektral akı (spectral flux - SF) olmak üzere iki boyutlu öz-nitelik vektörü üzerinden 5 ney ve 5 tanbur kaydını sınıflandıran bir k-NN sınıflandırıcısı tasarlanmıştır. Tablo 6.1'de başlangıç noktası tespit algoritmasının başarı oranları sunulmuştur.

Tablo 6.1: BN tespit algoritmasının ortalama başarı oranları. Tanbur ve ney için verilen TP, FP, FN, R, P ve F değerleri de ortalama değerlerdir.

	TP	FP	FN	R	P	F
Tanbur	25.6	0.2	5.4	0.83	0.99	0.90
Ney	4.2	0.4	1.8	0.70	0.91	0.79
Ortalama	14.9	0.3	3.6	0.81	0.98	0.89

Yapılan ilk testlerin sonucu olarak SF algoritmasının Türk müziği sinyallerinin başlangıç noktası tespitinde başarıyla kullanılma potansiyeli olduğuna karar verilmiştir. Buna ek olarak çalgı sınıfına göre eşik değeri atamasının da başarıyı artırdığı gözlenmiştir.

6.1.2 Füzyon yaklaşımıyla başlangıç noktası tespiti

İkinci adım olarak, yukarıda açıklanan ilk sürüm algoritmanın daha geniş veri üzerinde test edilmesi ve spektral akının farklı öz-nitelikler ile beraber kullanıldığında başarının ne düzeyde artacağına incelenmesine karar verilmiştir.

Başlangıç noktası tespiti literatürünün incelenmesi sonucu çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen bunların hemen hepsinin kullandığı öz-niteliklerin temelde birkaç çeşit olduğu görülmüştür: işaret şekline çıkarılan parametreler, spektral genlik bilgisi, spektral faz bilgisi ve temel titreşim frekansı. Ancak bu boyutların ayrı ayrı özelliklerini ve birbirleriyle olan ilişkilerini geniş veri üzerinden inceleyen, bu boyutlardaki bilgileri birleştirerek başlangıç tespit başarısını yükseltebilen bir çalışma bulunamamıştır. Bu boşluğu doldurmak için ilk olarak Girit Üniversitesi'yle beraber veri toplanmış (Batı müziği çalgıları ve Türk müziği çalgıları için), ardından iki kurumda geliştirilen algoritmalar kullanılarak bu veri üzerinden testler yapılmıştır. Bu veritabanı, başlangıç noktası tespiti için toplanmış literatürdeki en geniş veritabanı olup iki kısma ayrılmıştır: algoritmalarındaki uygun eşik değerlerini eğitimle bulmak için kullanılan bir geliştirme / eğitim seti ve algoritmaların başarı düzeylerini ölçmek için kullanılan bir test seti (Tablo 6.2).

Tablo 6.2: Başlangıç noktaları (BN) elle işaretlenmiş veritabanı içeriği (Ali Cenk Gedik, Andre Holzapfel ve Barış Bozkurt tarafından hazırlanmıştır).

Eğitim seti			Test seti		
Enstrüman	BN sayısı	Dosya sayısı	Enstrüman	BN sayısı	Dosya sayısı
Gitar	147	7	Çello	150	5
Ud	207	5	Klarinet	149	5
Piyano	117	6	Gitar	174	5
Keman	203	3	Kemençe	186	5
Toplam	674	21	Ney	147	7
			Ud	211	5
			Piyano	195	5
			Saksafon	148	5
			Tanbur	156	5
			Trompet	140	5
			Keman	173	5
			Toplam	1829	57

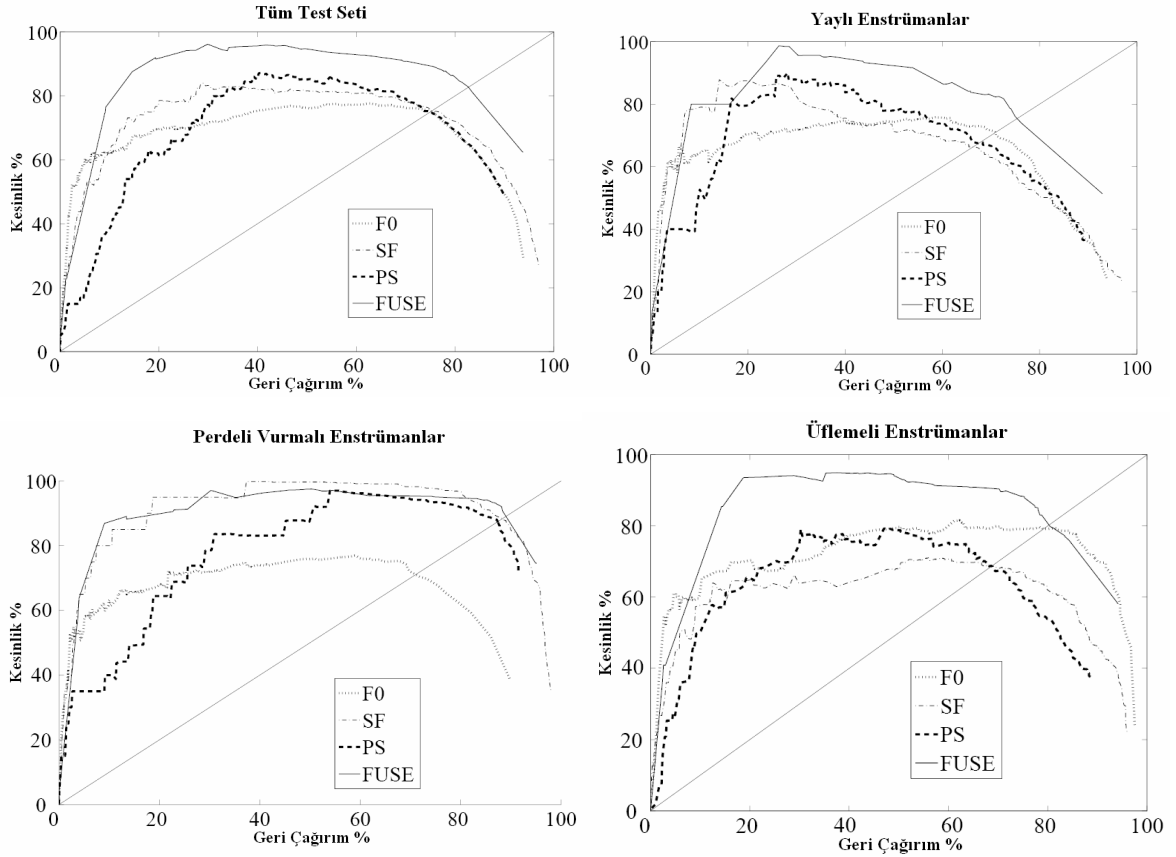
Veri üzerinde test edilen algoritmalarından ikisi, spektral akı (SF) ve temel titreşim frekansına (f0) dayanan algoritmalar, önceki alt bölümde açıklanan algoritmalar. Girit Üniversitesi'nin katkısı ise faz bilgisine (PS) dayalı yeni bir algoritma önererek, testleri gerçekleştirerek ve farklı öz-nitelik parametrelerinin beraber kullanılması (füzyon) konusunu çalışarak olmuştur.

Başlangıç noktası tespiti, parametrelerdeki ani değişimler belirlenerek yapılmakta, bunun için de eşik değerleri kullanılmaktadır. Bu sebeple algoritmaları test ederken standartlaşmış bir uygulama, farklı eşik değerleriyle sonuçlar elde edip bunları Kesinlik / Geri Çağırım⁹ (Precision / Recall) değerlerinin gösterildiği grafiklerde özetlemek şeklindedir¹⁰. Bu şekilde elde edilmiş sonuçlar Şekil 6.3'te sunulmuştur.

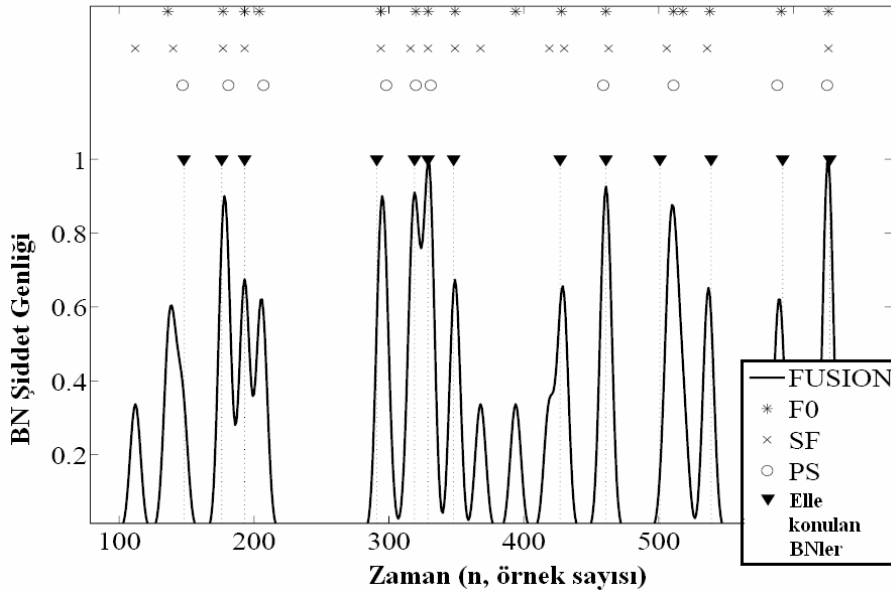
Grafikler literatürde olduğu gibi yaylı çalgılar, üfleme çalgılar, perdeli vurmali çalgılar ve genel toplam olarak dört sınıf için hazırlanmıştır. Hem Geri Çağırım hem de Kesinlik değerinin yüksekliği başarıyı yansıttığı için grafiklerde en dıştan gezinen eğri en başarılı algoritmaya karşılık gelmektedir. Grafikler incelendiğinde algoritmaların başarı sırasının çalgı tipine göre değiştiği gözlenmektedir. Bu da tek başına bir algoritma kullanmak yerine birden fazla algoritmayla elde edilen sonuçların birleştirilmesinin optimum yöntem olacağını düşündürmektedir. Önceki alt bölümde çalgı sınıflandırıcısı kullanarak eşik değerine karar verilen bir yöntem sunmuştuk. CSD-Girit ile beraber yaptığımız çalışmada ise amaç sınıflandırıcı kullanmadan, çalgı sınıfından bağımsız bir şekilde farklı algoritmalarından gelen sonuçları birleştirebilen bir algoritma tasarlamaktır. Bunun için kullanılan yöntem özetle: parametre dizilerinin türevlerinden Başlangıç Noktası (BN) Şiddeti İşaretleri (OSS: Onset strength signal) elde etmek, bunları toplamak ve filtreleyerek yumuşattıktan sonra önceki dönem raporunda açıklanan adaptif yöntemle yerel tepeleri bulmak şeklindedir. Şekil 6.4'te bir örnek sunulmuştur.

⁹ Geri çağırım (R): pozitif sınıf örneklerinin ne ölçüde başarıyla doğru olarak sınıflandırıldığını ölçer. DoğruPozitif/(DoğruPozitif + YanlışNegatif). Kesinlik (P): Pozitif olarak sınıflandırılan kaç örneğin ne ölçüde gerçekten pozitif olduğunu ölçer. DoğruPozitif/ (DoğruPozitif + YanlışPozitif)

¹⁰ Bakınız: http://www.music-ir.org/mirex/2006/index.php/Audio_Onset_Detection_Results



Şekil 6.3: Başlangıç noktası tespit algoritmalarının karşılaştırmalı test sonuçları. İki boyutlu uzaydaki noktalar eşik değerleri sistematik olarak değiştirilerek elde edilmiştir. f0: temel titreşim frekans tabanlı algoritma (IYTE-İzmir), SF: spektral akı tabanlı algoritma (IYTE-İzmir), PS: “phase slope”, faz tabanlı algoritma (CSD-Girit), FUSE: bütün parametrelerin ortak kullanımına dayanan algoritma (CSD-Girit, IYTE-İzmir).



Şekil 6.4: Bir ney örneği üzerinde BN tespit sonuçları ve birleştirilmiş yöntemin (Fusion) BN şiddet işareti.

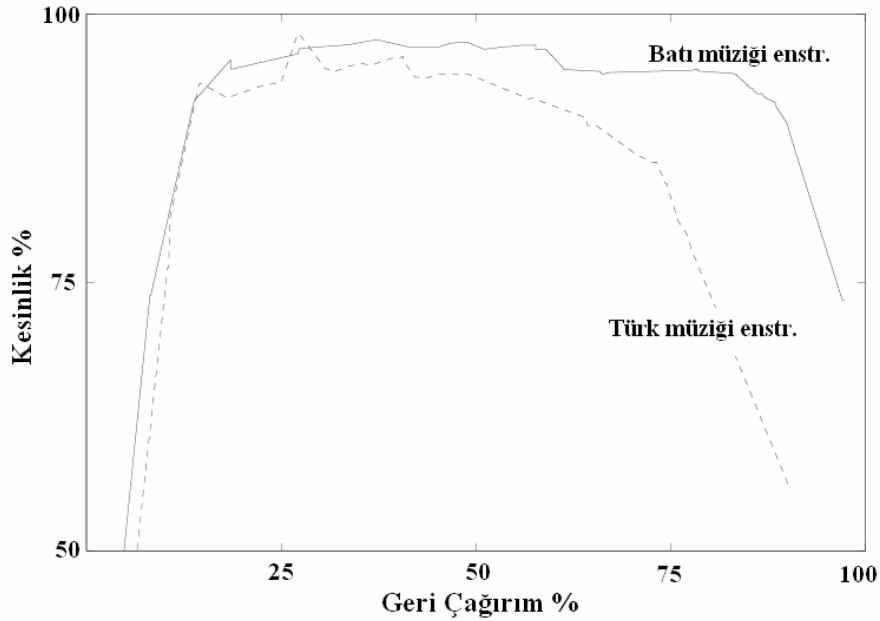
Şekil 6.4'te üç algoritmadan gelen BN şiddet işaretleri toplandıktan sonra yumuşatılarak elde edilen BN şiddeti işareti gösterilmektedir. Koyu üçgenler elle konulmuş BN'lere karşılık gelmekte, her bir algoritma tek başına kullanıldığında elde edilen BN'ler ise şeklin üst kısmında gösterilmektedir. Elle konulan BN'lerin BN şiddet işaretinin yüksek tepelerine karşılık geldiği görülmektedir. Burada temel problem görece küçük genlikli tepelerden kurtularak yüksek tepelerin bulunmasıdır ve daha önce açıkladığımız adaptif yöntemle gerçekleştirilmiştir.

Bu şekilde gerçekleştirilen FUSE algoritmasının başarısının genelde en yüksek olduğu Şekil 6.3 incelendiğinde açıktır. Grafikler üzerinde çizilen doğrular üzerinden alınan genel ortalama F değeri aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 6.3: BN tespit algoritmalarının F değeri (measure) cinsinden ortalama başarı oranları.

BN tespit yöntemi /işareti	F0	SF	PS	FUSE
F (%)	74.1	73.9	73.7	82.1

Bu testlere ek olarak Türk müziği çalgıları ve Batı müziği çalgıları ile elde edilen başarı oranları da Şekil 6.5'de karşılaştırılmıştır. Bu yönüyle bu çalışma Türk müziği üzerinde başlangıç noktası tespiti problemini irdeleyen ilk çalışmadır. Genel başarının Türk müziği çalgıları için düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun temel sebebinin çalma stiline çok daha fazla süsleme (çarpma, kaydırma, vs.) içermesi olduğu işaretler üzerinde yapılan incelemelerde gözlenmiştir.



Şekil 6.5: Türk müziği enstrümanları ve Batı müziği enstrümanları için başlangıç noktası tespit başarısı karşılaştırması.

Sonuç olarak çalışmamızda f0 yönteminin başarısının FUSE yöntemine çok yakın olması ve çalışmamızın ilk adımı f0 bilgisinin elde edilmesinden dolayı hesaplama maliyetinin olmaması nedeniyle notaya dökme uygulamasında f0 yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

6.2 Nota frekans nicemlemesi

Nota yazma uygulaması, bir müzik kaydının tüm f_0 değerlerinin kuramsal perdelere karşılık gelen nota isimlerine atfedilmesini hedefler. Bu, bir anlamda f_0 değerlerinin belirli değerlere nicemlenmesi anlamına gelir.

Bir müzik icrası, ses sisteminde tanımlanan perdelere çok daha çeşitli frekans değerleri içerir. Bu farklılığın birçok nedeni vardır. Örneğin glissando, bir perdeden diğerine kesintili değil sürekli olarak kayarak geçme ve vibrato, belirli bir merkez frekans etrafında sürekli bir salınma gibi icra teknikleri kesikli bir frekans uzayından çok sürekli bir frekans uzayından örnekler içerir. Ayrıca perdesiz çalgılarla yapılan icralarda, icracının aynı notayı her zaman aynı frekansta icra etmesi mümkün değildir. Sonuç olarak müziğin yazılı temsili olan notalar ayrık (discrete) bir frekans temsiline karşılık gelirken, müziğin icrası sürekli bir frekans uzayına karşılık gelir. Bu nedenle tam olarak perde aralıklarına karşılık gelmeyen f_0 değerlerinin ses sistemindeki en yakın perdelere nicemlenmesi gerekir.

Batı müziği üzerine yapılan çalışmalar bölümlere ayrılmış f_0 bilgisinin en yakın perde aralığına (nota) nicemlenmesine dayanır ve kısaca nicemlenen f_0 bilgisi aşağıda gösterildiği biçimde nota bilgisine dönüştürülür:

$$Note_{number} = 12 \log_2 \left(\frac{f_0}{440Hz} \right) \quad (34)$$

440 Hz: Batı müziği referans frekansı (A4=440 Hz).

Böylece her bir oktavda eşit yedirimli (equal tempered) 12 sesin bulunduğu Batı müziği ses sistemine göre bir müzik kaydının her bir f_0 bölümü için bir nota numarası bulunur. Örnek olarak 440 Hz'e nicemlenmiş bir f_0 bölgesi "0" nota numarasına yani A4 notasına karşılık gelecektir ya da 880 Hz'e nicemlenmiş bir f_0 bölgesi "12" nota numarasına yani A4 notasının oktavi olan A5 notasına karşılık gelecektir.

Bununla beraber f_0 zaman serileri Şekil 2.3'te görülebileceği gibi oldukça dinamik bölgeler içermektedir. Özellikle sürekli f_0 uzayında icralar yapılabilen çalgıların kayıtlarında, Batı müziği içerisinde tek sesli müzik icralarının notaya dökülmesinde bile henüz tatmin edici sonuçlara ulaşılamamıştır (KLAPURI, 2004, 2006). Bu uygulama için tatmin edici çıktılar ancak piyano, gitar gibi sabit perdeli çalgılarla yapılan tek sesli icralar için elde edilebilmektedir. Diğer bir deyişle, frekans nicemlemesi problemi, frekans uzayı daha basit bir şekilde bölünmüş ve daha az süsleme içeren Batı müziği için bile henüz çözülememiştir.

Sonuç olarak bu adımda da Türk müziği için Batı müziği konusunda varolan literatürden yararlanmanın önemli kısıtları vardır. Bu anlamda literatür genel olarak gözden geçirilmiş ve Türk müziğine dair problemlere en yakın olan Batı müziğindeki şarkı icrası üzerine varolan çalışmalarda yöntemler incelenmiştir. Şarkı icrası üzerine yapılan çalışmaların Türk müziği üzerine yapılacak bir çalışmaya olan benzerliğinin iki boyutu vardır. Birincisi şarkı icrası Türk müziği icrasında olduğu gibi tek seslidir. İkincisi şarkı icrası icra edilen perde / frekans değerlerinin belirsizliği anlamında Türk müziği icrasına belirli açılardan benzemektedir.

Problemin çözümü için varolan literatürdeki temel iki aşama f_0 bilgisinin bölünmesi (segmentation) ve etiketlenmesidir (labelling). Bölünme kısaca müziksel olayların başlangıç noktalarının tespit edilmesidir. Böylece tüm müzik kaydı başlangıç noktaları ile ayrılmış f_0 bölümleri haline getirilir. Bu f_0 bölümleri aynı zamanda nota isimlerine göre etiketlenecek olan bölümlerdir.

Literatür yöntem anlamında bu iki aşamanın sırayla uygulanması ya da birarada gerçekleştirilmesine göre ayrılır (RYYNANEN, 2006). Bu aşamaların birarada gerçekleştirildiği yöntemler istatistiksel modelleme yaklaşımı olarak adlandırılır. İstatistiksel modelleme yaklaşımındaki en popüler yöntem gizli Markov modellerinin (Hidden Markov Models, HMM) kullanılmasıdır. Kısaca bu yöntem, verili bir eğitim seti üzerinden elde edilen

bir notadan diğerk notalara geçişlerin olasılıksal modellenmesine dayanır. Diğerk bir deyişle elde bu olasılıkların hesaplanabileceği bir veri seti bulunması gerekir. Bu veri seti içinse otomatik olarak notaya dökülmüş müzik kayıtlarına ihtiyaç vardır. Batı müziği için bu tür hazır veri setlerine ulaşmak mümkünken, Türk müziği için benzer veri setlerinin hazırlanması gerekmektedir ve bu yöntem projemiz için oldukça zaman alıcı, pahalı bir yöntemdir. Bu nedenle otomatik olarak notaya dökme çalışması için bu çeşit bir model kullanılmamasına karar verilmiştir.

Bu alanda kullanılan başka bir popüler yöntem kara tahta sistemidir (Blackboard System) (BELLO et al, 2000). Kara tahta sistemi, bir problemin çözümüne dair farklı alandan uzmanların bir kara tahtaya problemin kendi uzmanlık alanlarıyla ilgili özümlemlerini yazması prensibine dayanır. Bu yöntem bir kayıttan f0 bilgisinin elde edilmesinden bu bilginin nota bilgisine dönüştürülmesine kadar olan tüm adımların “uzman” kontrolleri yani “if / then” (önkoşul / eylem) yapıları ile gerçekleştirilmesine dayanır. Bizim projemizde bu konuda ulaşılabilen uzman bilgisi sınırlı olduğu için (ünkü f0 eğrilerini yorumlayabilen uzmanlara ihtiyaç duyulmaktadır) bu yöntemi, bütün tasarımın üzerine kurulacağı sistem olarak almanın yerinde olmayacağını düşünmekteyiz.

Sonuç olarak bu adım için geçekleştirilen literatür araştırmasının sonunda aşağıda anlatılan yöntemin denenmesine karar verilmiştir.

Bölüm 5'te açıklanan kuram - icra uyum düzeyinin incelenmesi çalışmamız sonucunda Türk müziği otomatik notaya dökme uygulaması için en uygun sistemin Mus2 olduğuna karar verilmişti. Nicemleme işleminin hedefi f0 zaman serilerinin, Mus2 sisteminde tanımlı nota dizilerine dönüştürülmesidir.

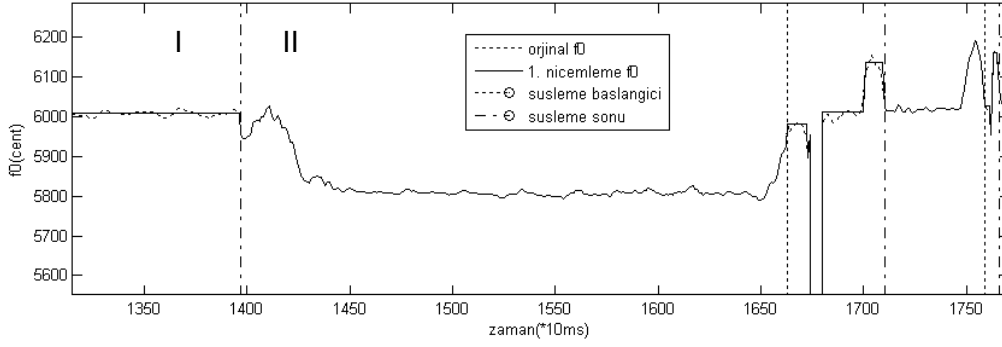
şekil 2.4'teki örnekten de görülebileceği gibi, Türk müziği için notaya dökmenin zor olduğu bölümler glissando ve çarpma gibi f0 dinamiğinin çok yüksek olduğu bölgelerdir. Bunun dışındaki görece düz olan bölgelerde nicemleme yapmak görece çok daha kolay olacaktır. Tespiti zor bölgelerin nicemlemesini önce ve sonra gelen bölgelere bağlı olarak f0 eğrisinin türevini kullanan kurallar aracılığıyla (*rule-based*) gerçekleştirmeyi hedeflemekteyiz. Bunun için ilk adım olarak glissando ve çarpma gibi işlenmesi zor bölgelerin otomatik işaretlenmesini gerçekleştirecek bir algoritmanın gerçeklenmesi hedeflenmektedir.

Problemliler bölgeler çıkarıldıktan sonra, önceki adımlarda geliştirdiğimiz otomatik karar sesi tespit algoritması ve otomatik makam tanıma algoritmasının kullanılmasıyla verili parçanın karar notası tespit edilecek (makamın kullanıcı tarafından belirlenmesine de olanak tanınacaktır), ilgili parçanın perde - frekans histogramından perdelere karşılık gelen frekanslara karar verilecektir.

Problemsiz bölgelerin nicemlendirilmesi, belirlenen bu perde frekans değerlerine göre yapıldıktan sonra problemliler kısımların kurallar aracılığıyla nicemlenmesi gerçekleştirilecek, ardından da notaya dönüştürme işlemi yapılacaktır.

Nicemleme işlemi temel olarak 2 adımdan oluşmaktadır: 1. aşama nicemleme ve 2. aşama nicemleme. Bu bölüm bir Segah ney taksimi üzerinden, aynı örnek kullanılarak anlatılmaktadır.

1. aşama nicemleme: İlk önce f0 eğrisi şekil 6.6'da gösterildiği gibi bölgelere ayrılır. Bu bölgelerin tespiti için şu kural uygulanmıştır: Eğer ardışık olarak iki f0 değerleri arasında 2 Hc'den daha büyük bir fark varsa yeni bir f0 bölümü oluşturulur, değilse f0 değerleri aynı bölüm içine alınırlar. Bu kuralın müziksel olarak karşılığı şudur: eğer ardışık iki f0 değerleri arasında 2 Hc'den daha büyük bir aralık varsa bu durum bir notadan başka bir notaya doğru geçiş olarak yorumlanabilir.



Şekil 6.6: f0 eğrisinin bölümlenmesi ve 1. aşama nicemleme işlemi.

Bu bölümlenme gerçekleştirildikten sonra her bir bölüm yeni bir sorgulamaya tabi tutulur. Her bölüm için şu kural uygulanır: Eğer bir f0 bölümü içindeki maksimum ve minimum f0 değerleri arasındaki fark 3 Hc'dan küçükse, bu durum vibrato olarak yorumlanır ve ilgili bölüm içindeki f0 değerlerinin medyanı alınarak ilk nicemleme işlemi gerçekleştirilir.

Şekil 6.6'da I numaralı bölüm için bu kuralın uygulandığı ve vibratolu bölümün nicemlenerek düz bir f0 bölümüne dönüştürüldüğü görülmektedir. Diğer yandan bu kurala uymayan II numaralı bölge nicemlenmeden kalmıştır. Diğer bir deyişle eğer bir f0 bölümü içindeki maksimum ve minimum f0 değerleri arasındaki fark 3 Hc'dan büyükse, bu durum olası bir glissando olarak yorumlanır ve ilgili bölüm için 2. aşama nicemleme işlemi gerçekleştirilir.

2. aşama nicemleme: Bu aşamada glissando olarak tespit edilen f0 bölümü (Şekil 6.6'da II numaralı bölüm) için glissando nicemlemesi kuralı uygulanır. Bu kural için tüm aşamalar sırasıyla Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

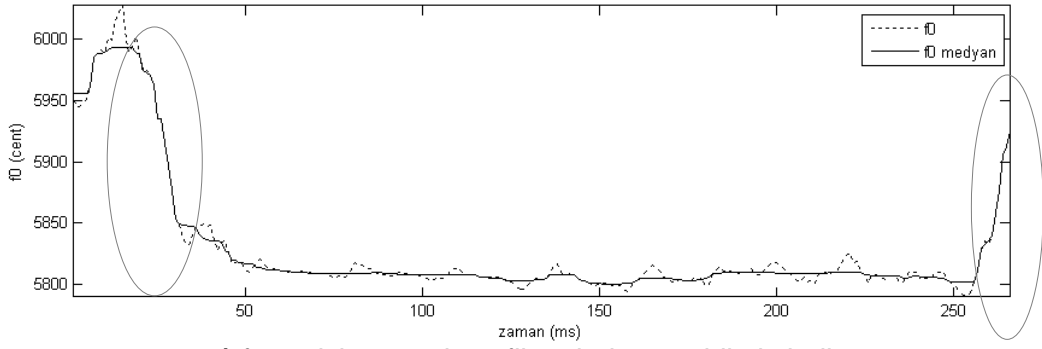
İlk önce ilgili f0 bölümü bir medyan filtresinden ($M=15$) geçirilir:

$$f0_{med}(n) = \text{median}\{f0(n-M) \dots f0(n+M)\} \quad (35)$$

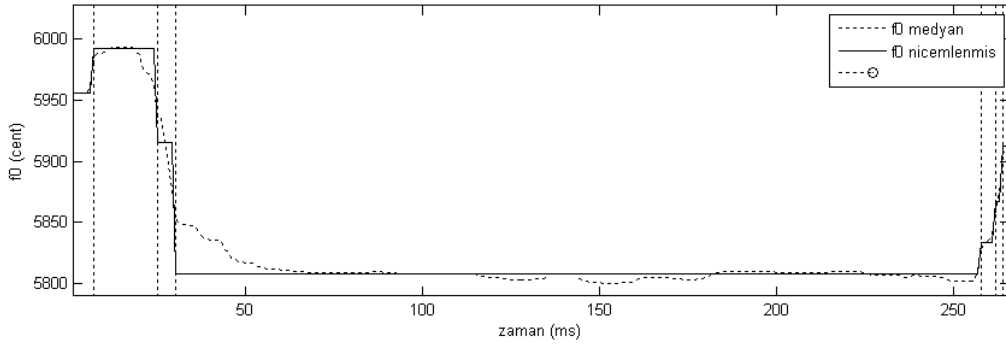
Şekil 6.7a'da f0 eğrisi ve medyan filtresinden geçirilmiş hali gösterilmiştir. f0 eğrisinin başlangıç ve sonunda sırasıyla inici ve çıkıcı glissandolar aynı şekilde elips içinde görülmektedir. Daha sonra f0med eğrisine 1. aşamadaki aynı nicemleme kuralı uygulanır: önce bölümlere ayrılır (segmentation) sonra da nicemleme uygulanır (Şekil 6.7b).

Son aşamada glissandoların nicemlenmesi için şu kural uygulanır: Eğer 20 msec'dan daha kısa bir bölüm inici ya da çıkıcı bir hareketin içindeyse o bölüm iptal edilir. İptal edilen bölümün süresi önceki ve sonraki bölümlere paylaşılır. Böylece Şekil 6.7c'de görülen iyileştirilmiş nicemleme gerçekleştirilmiş olur. Şekil 6.7d'de ise f0 eğrisi ve son nicemlenmiş hali görülmektedir.

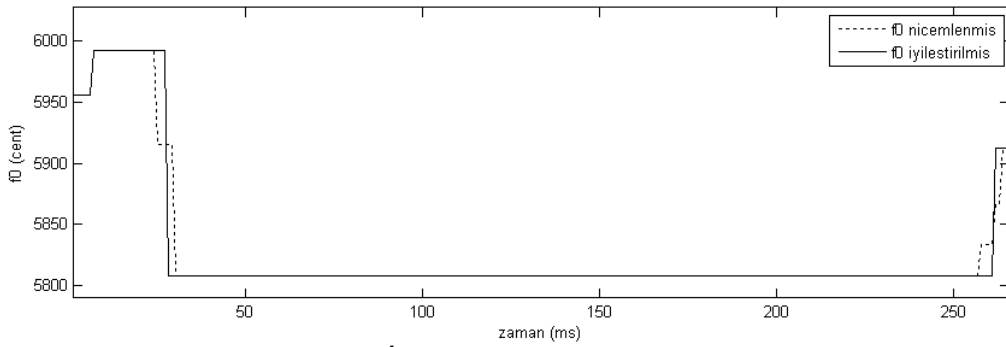
Sonuç olarak, bu ney örneği için özgün f0 eğrisinin tamamen nicemlenmiş hali Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



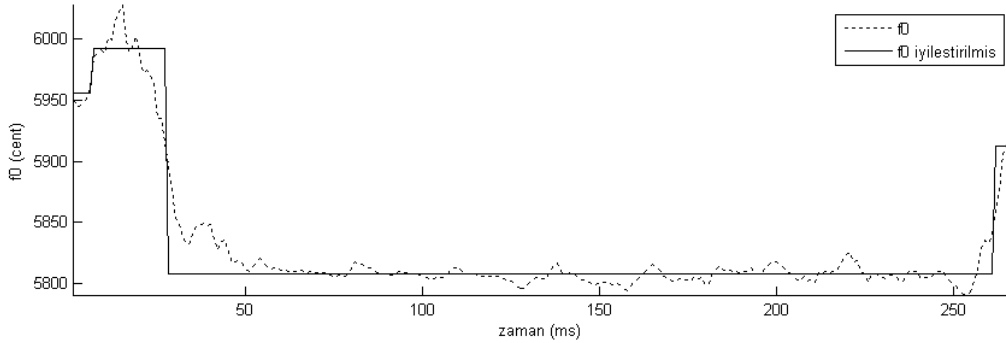
a) f0 eğrisi ve medyan filtresinden geçirilmiş hali



b) f0 eğrisinin bölümlere ayrılması ve f0 eğrisinin nicemlenmesi

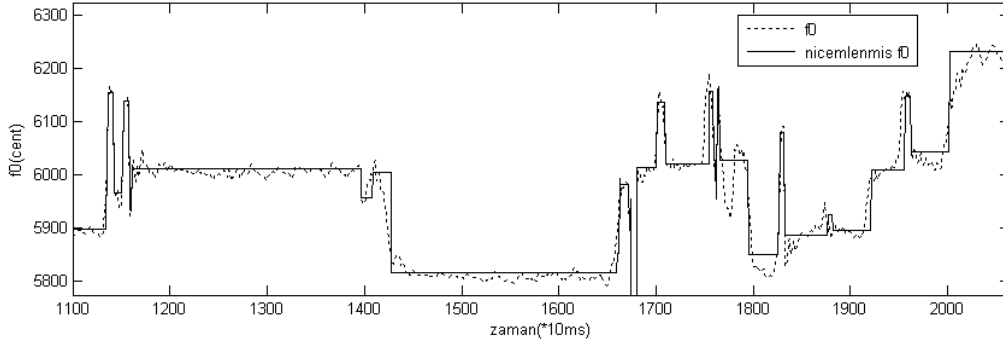


d) İyileştirilmiş nicemleme



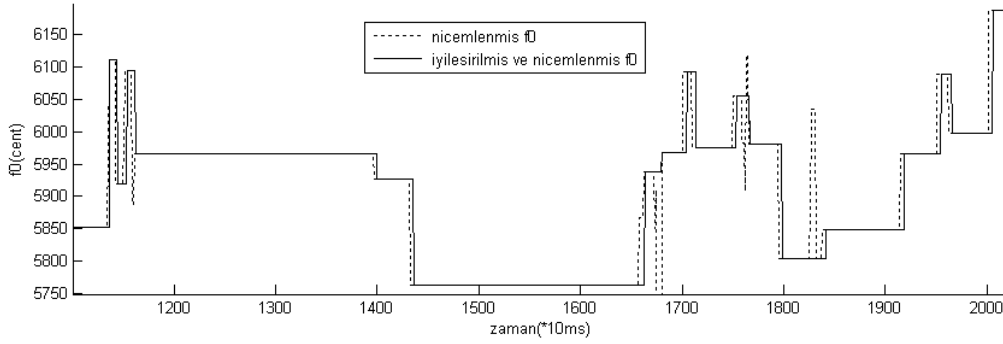
e) f0 eğrisi ve son nicemlenmiş hali

Şekil 6.7: 2. aşama nicemleme işlemi.



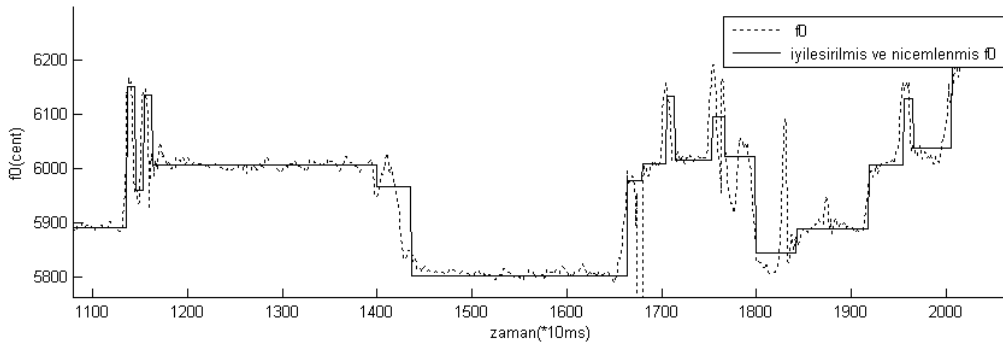
Şekil 6.8: Özgün f0 eğrisi ve nicemlenmiş f0 eğrisi.

Son olarak işitsel olarak tek bir perde / nota algısının oluşabilmesi için akustik titreşimlerin birbirlerine 5 msec'dan daha yakın olması gerektiği tespiti kullanılmıştır (SNYDER, 2000). Böylece 5 msec'dan daha kısa olan bölümlerin süreleri kendisinden önce ve sonra gelen f0 değerlerine eklenerek nicemlenmiş f0 eğrisinden iptal edilmiştir. Nicemlenmiş f0 eğrisinin bu iyileştirilmiş hali Şekil 6.9'da sunulmuştur.



Şekil 6.9: nicemlenmiş f0 eğrisi ve iyileştirilmiş hali.

Sonuç olarak özgün f0 eğrisi ve en son nicemlenmiş hali Şekil 6.10'da gösterilmektedir.



Şekil 6.10: f0 eğrisi ve en son nicemlenmiş hali.

6.3 Ritmik analiz

Otomatik notaya dökme uygulamasının adımlarından birisi de usul ve tempo gibi ritmik değişkenlerin otomatik olarak tespittir. Birçok otomatik notaya dökme çalışması (örneğin: (DIXON, 2001, RAPHAEL, 2001, GOTO et al, 1997, SCHEIRER, 1998, LAROCHE, 2001, SETHARES et al, 2001) içerisinde ele alınmış bu konuda kullanılan yöntemlerin hemen hepsi başlangıç noktası tespit işaretlerinin periyodik özelliklerinin incelenmesine dayanmaktadır. Çalışmaların ortak paydası olarak şu adımlar listelenebilmektedir:

- i) Verili ses işaretinden başlangıç noktası tespit işareti elde edilir
- ii) Başlangıç noktası tespit işaretinin öz-ilinti fonksiyonu (1) hesaplanır
- iii) Öz-ilinti fonksiyonunun tepelerinden tekrar sıklığı ölçülür ve ritim buradan hesaplanır

Henüz bu noktada, Türk müziği ritim analizine başlarken, şu zorluklar öngörülebilmektedir:

- İlgili kayıtlar vurmali çalgı işaret bileşeni içermediğinde (elimizdeki tek sesli Türk müziği kayıtlarının büyük kısmı bu özelliğindedir), başlangıç noktası tespit sinyali keskinliklerini kaybetmekte ve bu sebeple analizleri zorlaşmaktadır
- Türk müziğinde ritmik yapılar Batı müziğine göre çok daha karmaşıktır (Batı müziğinde kullanılan 3/4 ve 4/4 kalıplarına ek olarak 5/8, 7/8, 9/8 gibi kalıplar sıkça kullanılmaktadır). Ayrıca belirtilen yöntemin dayandığı temel özellik olan, tam zamanlarda güçlü vuruşun vurgulanması, Türk müziği kayıtlarında görece azdır.
- Proje kapsamında belirlenen veriler (tek enstrümanlı kayıtlar) büyük oranda ritmik yapının serbest olduğu kayıtlara karşılık gelmektedir. Örneğin bir taksim kaydında ritim sürekli değişebilmektedir, hatta "off-rhythm" yani serbest ritim olabilmektedir.

Bu zorluklarına rağmen, bu konuda hiçbir çalışmaya rastlanmadığı için, Batı müziği analiz literatüründe kullanılan temel yöntemin Türk müziği verileri üzerinde denenip tartışılmasının faydalı olacağı düşünülmüştür. Türk müziği için otomatik işaret işleme yöntemleriyle ritmik analiz birkaç doktora konusunda incelenebilecek genişlikte bir araştırma alanıdır. Burada sadece başlangıç noktası tespit işaretinin periyodunun ölçülmesine dayalı yöntemin Türk müziği için uygulanabilirliği ele alınacaktır. Bu bölümde incelenen yöntemler başarı düzeyleri düşük olduğu için otomatik notaya dökme algoritması dışında tutulmuşlardır.

Yukarıda belirtilen her bir işaret işleme adımının detaylı incelenebilmesi için iki farklı veri seti oluşturulmuştur: 1) MIDI'den sentezlenen veriler, 2) Kayıtlardan seçilen veriler (**analizlerde kullanılan tüm veriler ekteki CD'de "Veri" isimli klasörde sunulmuştur.**)

MIDI'den veri sentezlemek kontrollü testlerin yapılabilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla Mus2okur¹¹ programı kullanılarak 8 farklı usulden birkaç ritimde veri sentezlenmiştir.

Kayıtlardan kesilen verilerde ise yine kontrollü deney yapılabilmesi için şu yöntem uygulanmıştır: aynı eserin birden fazla icrası bulunmuş, bunlardan aynı müzikal cümleleri içeren kesitler elde edilmiştir. Ayrıca müzikal içerikten bağımsız olarak ritimsel farklılıkların işitsel olarak rahatlıkla farkedilebileceği örneklerden de bir küme oluşturulmuştur.

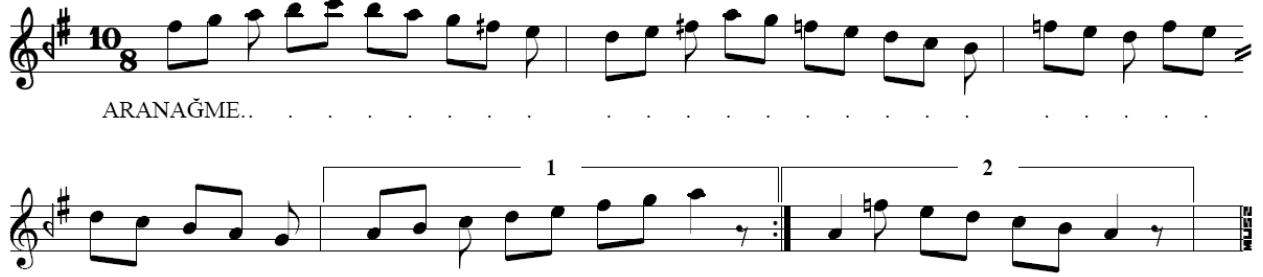
Bu veriler kullanılarak yukarıda listelenmiş üç adımlı yöntemin ritim analizi için kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir. İnceleme, Mus2okur kütüphanesinden alınmış "Muhayyer Aranağme"(no: 830) eserin MIDI'sinden sabit ritimle sentezlenen ses işareti üzerinden açıklanmaya başlanacaktır.

¹¹ <http://www.musiki.org/>

Muhayyer Aranağme (Curcuna)

Üsul: Curcuna
♩ = 180 ⇒ 27 Sn

Beste: ?



Şekil 6.11: Ritim incelemesi yapılan çalışmanın notası. Mus2okur'dan alınmıştır.

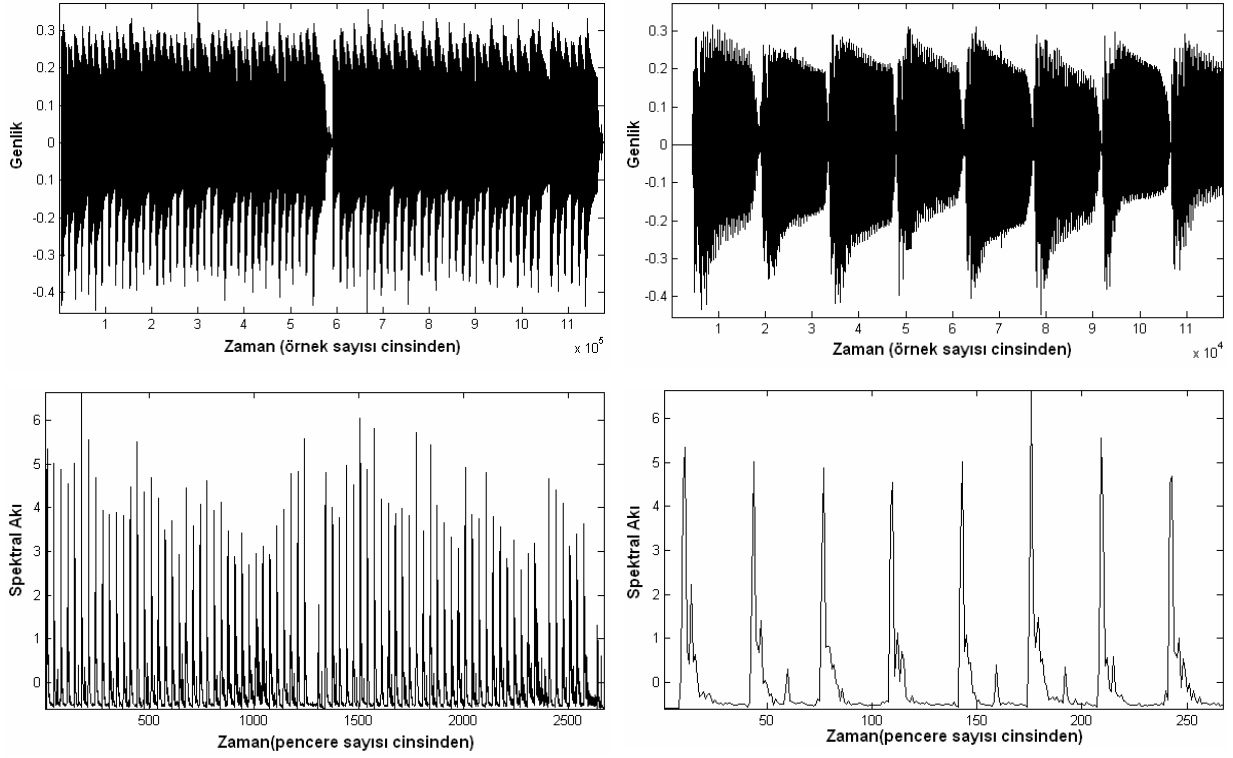
i) Verili ses işaretinden başlangıç noktası tespit işareti elde edilmesi

Başlangıç noktası tespiti konusu önceki bölümlerde detaylı olarak ele alınmıştı ve başlangıç noktası tespit işareti olarak aşağıda belirtilen (L-1 norm spektral akının, $SF(n)$, (29)) başarıyla kullanıldığı gösterilmişti.

Pencere fonksiyonu, olarak *Hanning* kullanılmış, pencere uzunluğu 30milisaniye, kaydırma miktarı 10milisaniye olarak alınmıştır. Spektral akı, spektrumun toplam genlik değişimini göstermeye yarayan bir fonksiyondur. İşaretin kararlı olduğu bölgelerde düşük, kararsız olduğu geçiş bölgelerinde yüksek değer alması beklenir. Nota başlangıç noktalarında yüksek değer aldığı için başlangıç noktası tespitinde başarıyla kullanılmaktadır.

Ritim çalışmamızda bu test edilmiş başlangıç noktası tespit fonksiyonunu kullanmaya karar verdik. Aşağıda ilgili kayıt (Muhayyer Aranağme) için elde edilen spektral akı (başlangıç noktası tespit işareti), sentezlenmiş ses işaretiyle beraber verilmektedir.

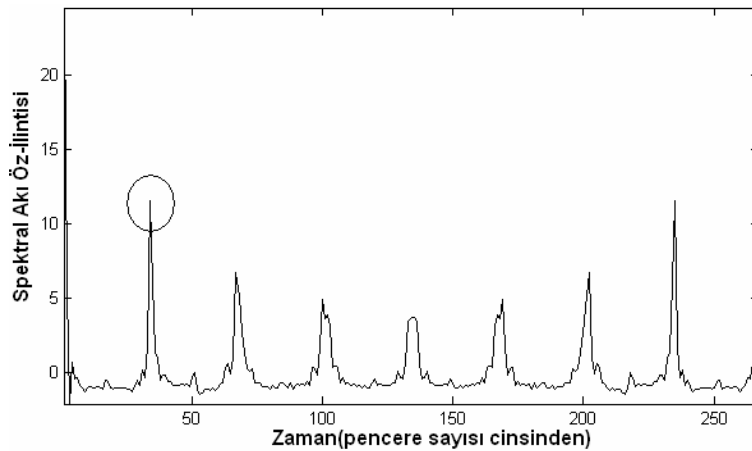
Şekil 6.12'den görüldüğü üzere bu sentetik ses işaretinde her bir notaya karşılık gelen işaret gözle rahatlıkla ayrıştırılabilmekte, başlangıç noktası tespit işareti (spektral akı) de nota başlangıç yerlerinde tepe yapmaktadır. Bunun sebebi nota başlangıç bölgelerinde spektrumun hızlı değişimidir.



Şekil 6.12: Ses işareti ile başlangıç noktası tespit işaretinin beraber gösterimi. Üst satır: Ses işareti ve yaklaşmış hali, Alt satır: karşılık gelen spektral akı işareti

ii) Başlangıç noktası tespit işaretinin öz-iliinti fonksiyonunun hesaplanması

Başlangıç noktası tespit işareti elde edildikten sonra ritim analizi için yapılması gereken bu işaretin ana periyodunun bulunmasıdır. Buradaki varsayım nota başlangıçlarının ritimle orantılı bir şekilde tekrar edeceğidir. Aşağıda Şekil 6.12'deki spektral akı işaretinin öz-iliinti fonksiyonu Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.13: Spektral akı işaretinin öz-iliinti fonksiyonu.

iii) Öz-ilinti fonksiyonunun tepelerinden tekrar sıklığı ve ritim hesaplanması

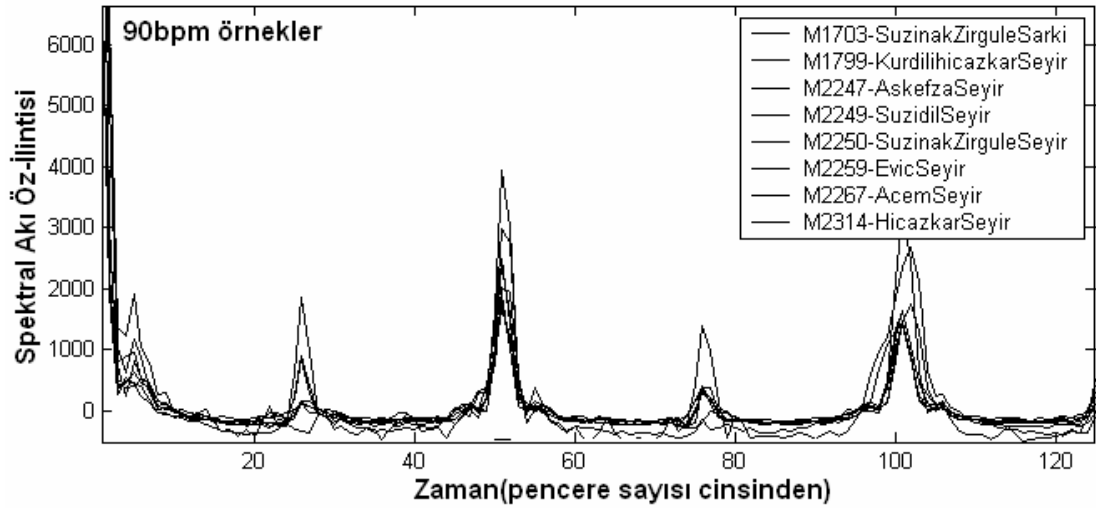
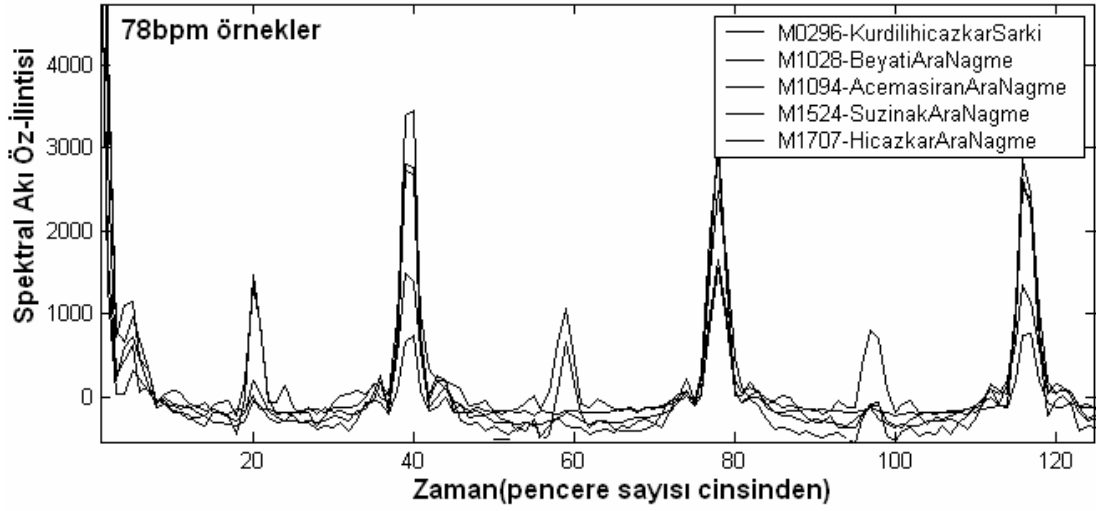
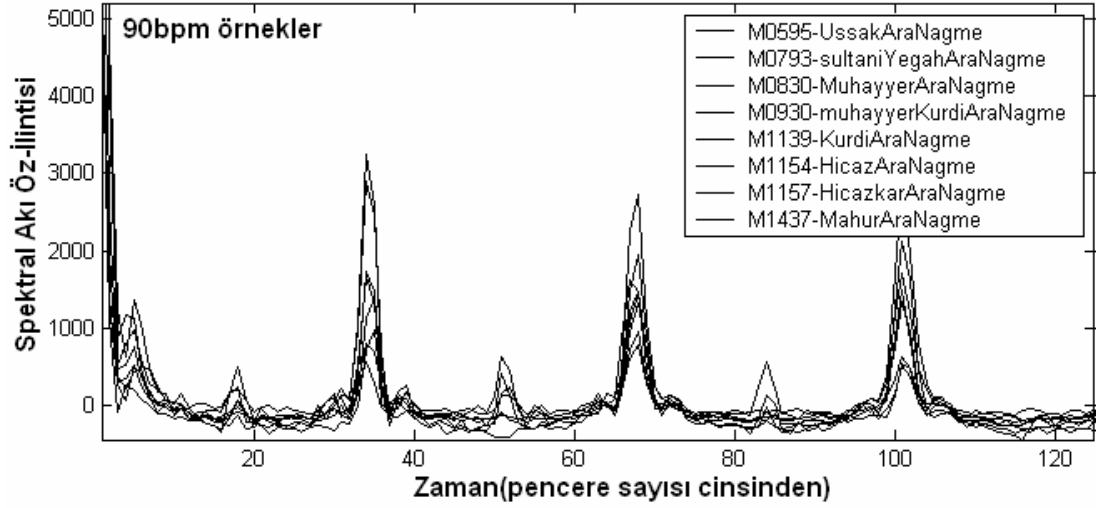
Şekil 6.13'te gözlenen ilk tepe şekilde işaretlendiği gibi öz-ilinti vektörünün 34. elemanıdır. n . penceredeki ritim, $r[n]$, dakikadaki vuruş sayısı (bpm: beats per minute) olarak tanımlandığı için basitçe tepe yeri bilgisiyyle ölçülen periyot bilgisinden, ($T[n]$ endeks ve w_s pencere kaydırma miktarı olmak üzere $periyot=T[n]*w_s$), aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$r[n] = \frac{60}{T[n]*w_s} \quad (36)$$

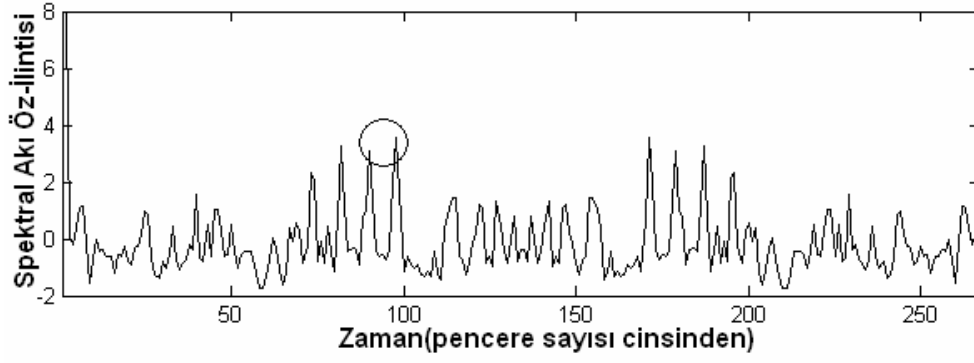
Pencere kaydırma miktarı 10 milisaniye olan bu analiz için 34 numaralı endeks ritmin 176.47 bpm olarak bulunmasını sağlar. Bu nota üzerinde de belirtilen değere, yarım vuruşluk nota=180 bpm (Şekil 6.11'de notanın sol üst köşesinde belirtilmiştir), oldukça yakındır. (Parçanın asıl ritmi tek vuruşlarla 90bpm'dir, yarım vuruşluk notalar düzeyinde sayıldığında dakikada 180 tekrar olmaktadır.)

Bu örnek üzerinde gözlenen özelliğin diğer veriler için de geçerliliğini araştırmak amacıyla sentetik veritabanındaki kayıtlar ritimlerine göre gruplanıp öz-ilinti fonksiyonları üstüste çizdirilerek incelenmiştir. Şekil 6.14'de 90 bpm, 78 bpm ve 60 bpm ritimlerinde sentezlenmiş verilerin öz-ilinti fonksiyonları gösterilmiştir. Bir önceki örnekte olduğu gibi yarım vuruşluk nota sayısı fazla olduğu için bu kayıtlar öz-ilinti fonksiyonunda 180 bpm, 156 bpm ve 120 bpm'ye karşılık gelecek şekilde tepeler gözlemekteyiz. Ritim azaldıkça periyot artmakta, karşılık gelen tepe sağa doğru kaymaktadır. Ritmi ölçmek için kullanılacak tepenin grup içindeki tüm kayıtların öz-ilinti fonksiyonlarında üstüste geldiği görülmektedir.

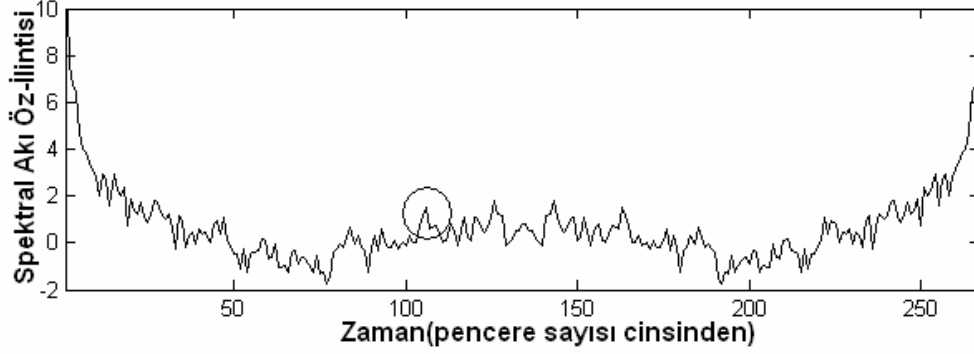
Şekil 6.13 ve 6.14 incelendiğinde spektral akı işaretinin öz-ilinti fonksiyonundaki güçlü tepenin bulunması yönteminin ritim analizi için uygun olduğu düşünülebilmektedir. Ancak gerçek Türk müziği kayıtları üzerinden elde edilen işaretler nadiren bu özellikleri göstermektedir. Aşağıda gerçek Türk müziği kayıtlarından seçilmiş parçalar için öz-ilinti fonksiyonu gösterilmektedir (Şekil 6.15). Bu kayıtlar için elle ritim tespiti yapılmıştır: vuruşlar sayılmış, toplam süresiyle beraber vuruş sayısından ritim ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlere karşılık gelen periyot bilgisine göre öz-ilinti fonksiyonunda hangi bölgede tepe olması beklendiği şekiller üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 6.15 incelendiğinde ancak son örnek için diğer yerel tepelerden ayırdedilebilir ve yüksek genlikli bir tepe bulunmaktadır. Bu örnek dinlendiğinde (CD'de sunulmuştur) diğer kayıtlara göre nota vuruşlarının güçlü olduğu ve ritme uyulduğu görülmektedir. Diğer birçok örnek üzerinde yapılan testlerde de aynı sonuca varılmıştır. Öz-ilinti tabanlı sistemle güvenilir bir ritim ölçümü yapılabilmesi için: i) tam zamanlarda (1, 2, 3, 4 gibi) güçlü vuruşlar olmalı, ii) ritme uyulmalıdır. Ne yazık ki otomatik notaya almayı hedeflediğimiz verilerin çok azı bu özelliklere uymaktadır. Kayıtların büyük kısmında (özellikle ney icrası içeren kayıtlarda) arada nefes alınan bölümler bulunmaktadır ve bu anlarda ritmin devamı gözetilmemektedir. Ritim zamanla değişmektedir ve notalar aksanlı çalınmaktadır. Taksimler ritimsiz (serbest ritimle) icra edilmekte ve çok sayıda süsleme içermektedir.



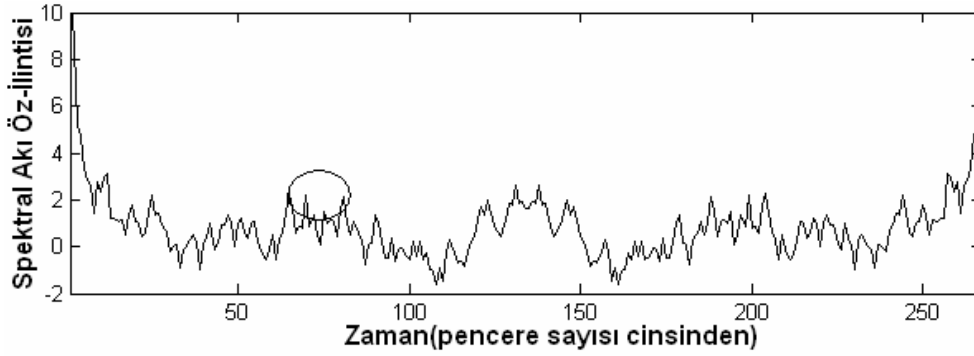
Şekil 6.14: 3 ritim grubundan (tam vuruş 90 bpm, 78 bpm ve 60 bpm, yarım vuruş 180 bpm, 156 bpm ve 120 bpm) toplam 21 eser için spektral akı işaretinin öz-ilinti fonksiyonu.



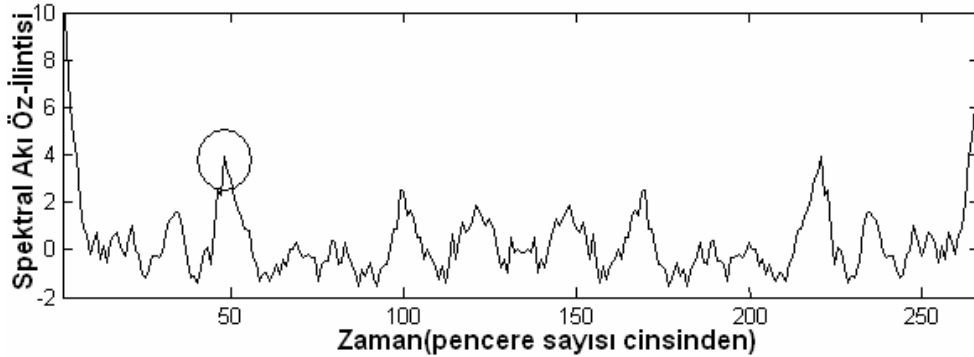
04_bestenigar_pesrevi_tanbur.wav (sayılan ritim~=69bpm, endeks~=90)



03_bestenigar_pesrevi_ney.wav (sayılan ritim~=55bpm, endeks~=109)



07_nihavend_sazSemaisi.wav (sayılan ritim~=81bpm, endeks~=74)



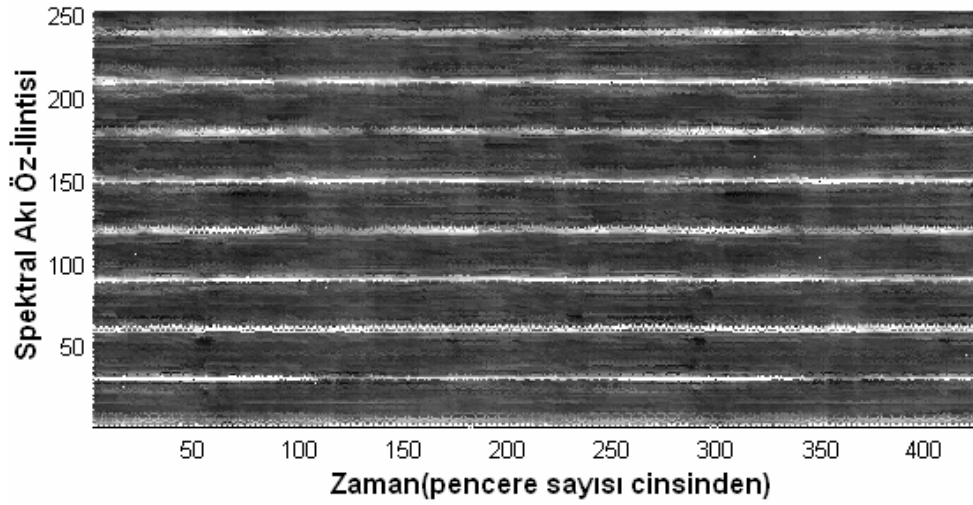
08_nihavend_sazSemaisi.wav (sayılan ritim~=130bpm, endeks~=47)

Şekil 6.15: Türk müziği kayıtları için başlangıç noktası tespit sinyalinden elde edilen öz-ilinti fonksiyonları. (Çemberle işaretlenen bölgeler ritim tespiti için tepe bulunması gereken yerleri göstermektedir.)

Bu gözlemler üzerine, ritmin bölgesel olarak sabit olabileceği ve ölçülebileceği fikrinden yola çıkarak öz-ilinti fonksiyonun zamanla değişimi de incelenmeye karar verilmiştir. Bunun için bir zaman - frekans gösterimi olan spektrogram benzeri bir **zaman - öz-ilinti fonksiyonu** kullanılmıştır. ((FOOTE et al, 2001) içerisinde bu fonksiyona “beat spectrogram” adı verilmiştir. Ancak bu fonksiyonun spektrogramla doğrudan ilişkisi olmadığını düşündüğümüz için doğrudan çeviri yöntemini izlemedik ve “zaman - öz-ilinti fonksiyonu” terimini kullanmayı tercih ettik.). SF_m m . işaret penceresinden hesaplanmış spektral akı işareti olmak üzere, zaman - öz-ilinti fonksiyonu $r(m,k)$ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$r(m,k) = \sum_{n=0}^{N-1} SF_m[n]SF_m[n+k] \quad (37)$$

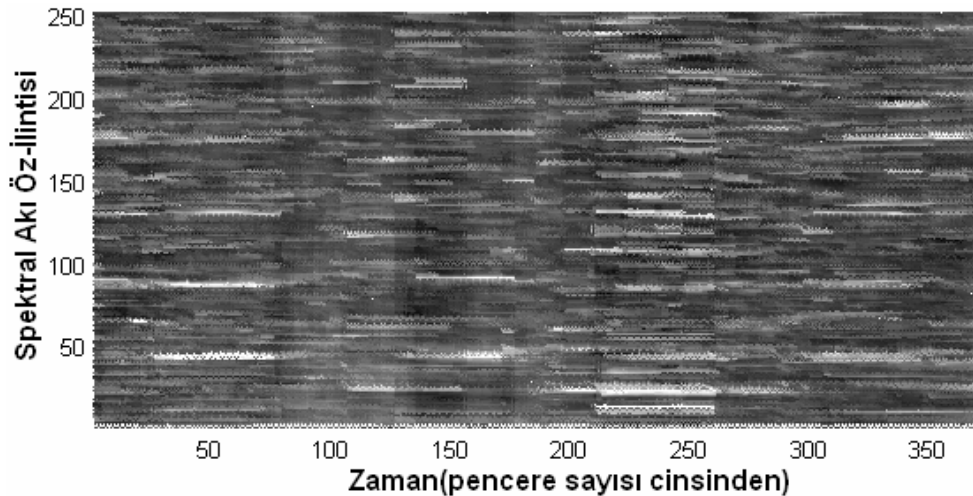
MIDI'den elde edilen sentetik bir kayıt için zaman-öz-ilinti fonksiyonu Şekil 6.16'da sunulmuştur:



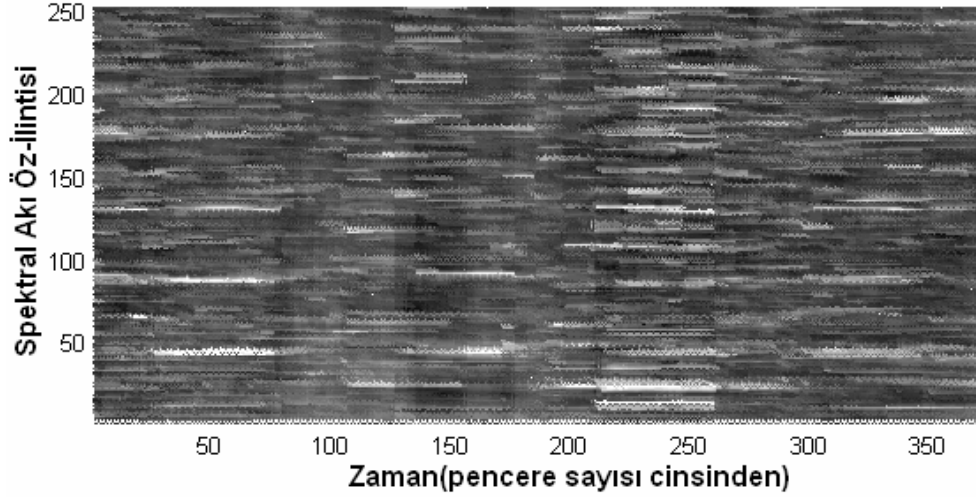
Şekil 6.16: 180 bpm'de (karşılık gelen öz-ilinti endeksi ~34) sentezlenmiş “Muhayyer Aranağme” için zaman-öz-ilinti fonksiyonu.

Şekil 12.6'da görüldüğü üzere sabit ritim zaman - öz-ilinti grafiğinde gözlenebilmekte, her öz-ilinti fonksiyonu için ritim ölçümü doğru yapılabilmektedir.

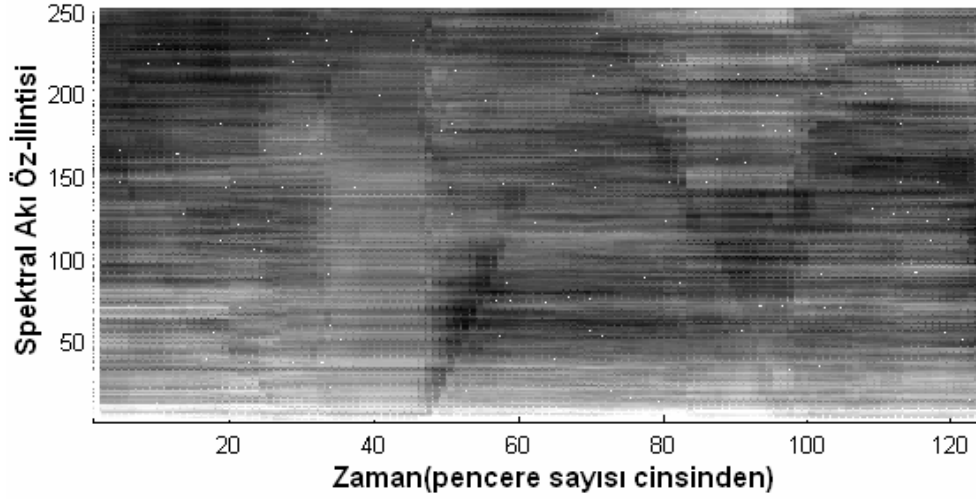
Aynı şekilde gerçek kayıt örneklerini incelediğimizde Şekil 6.17'yi elde etmekteyiz.



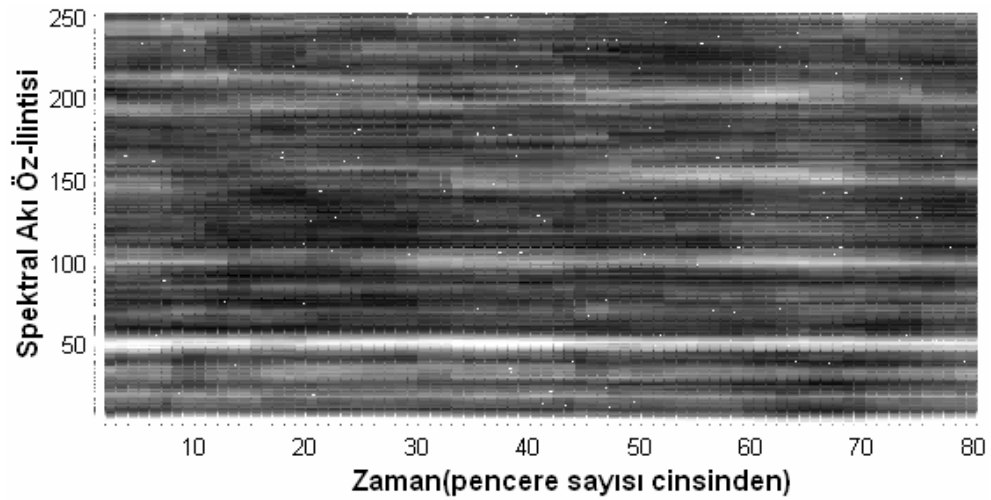
04_bestenigar_pesrevi_tanbur.wav (sayılan ritim ~69bpm, endeks ~90)



03_bestenigar_pesrevi_ney.wav (sayılan ritim~=55bpm, endeks~=109)



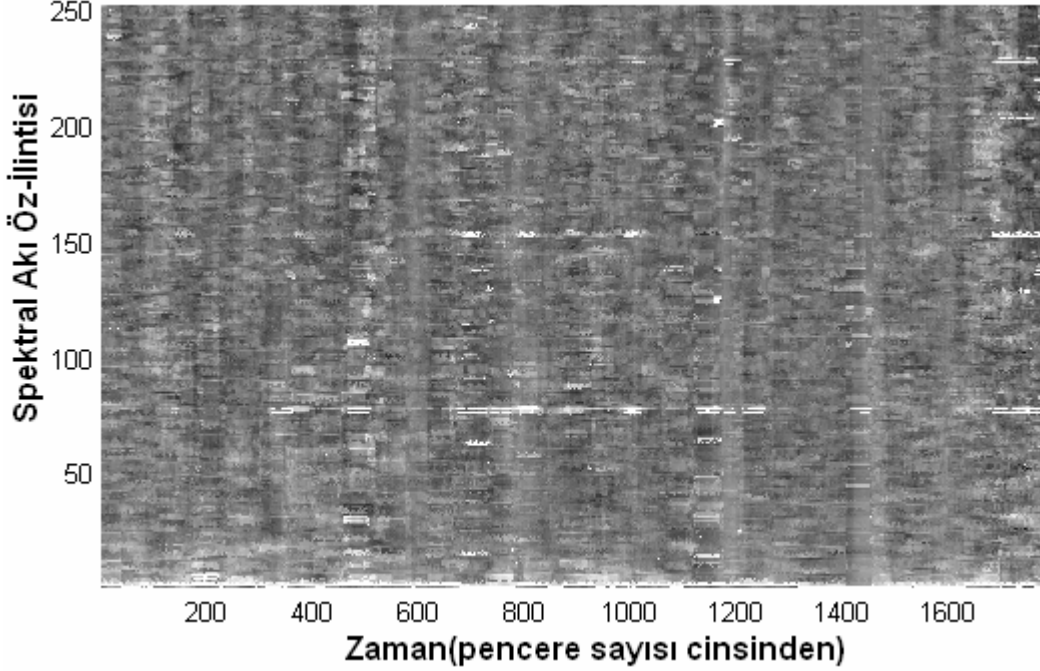
07_nihavend_sazSemaisi.wav (sayılan ritim~=81bpm, endeks~=74)



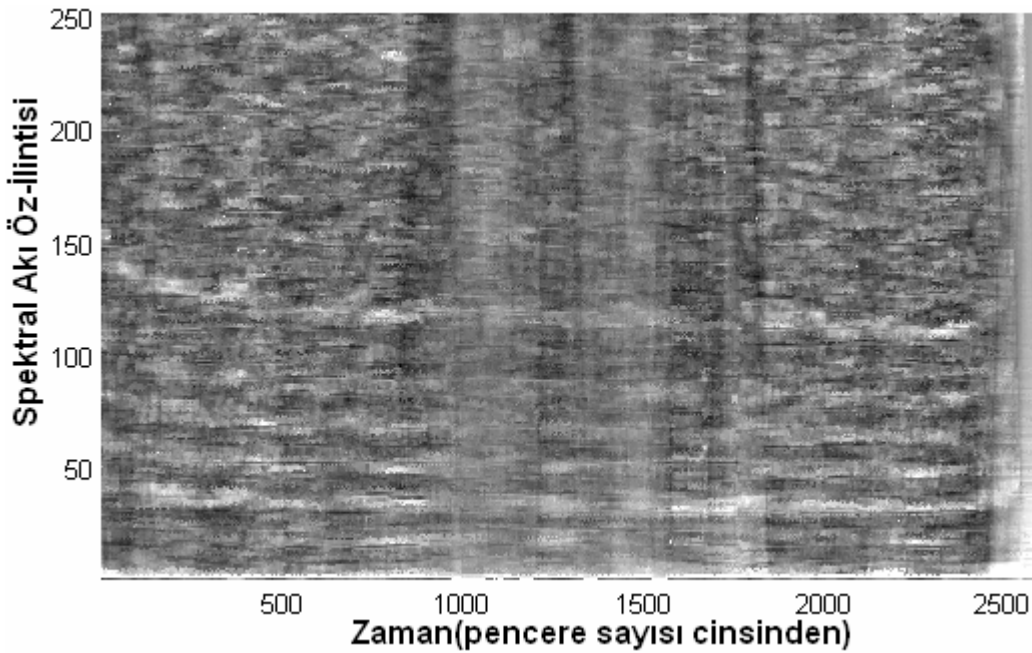
08_nihavend_sazSemaisi.wav(sayılan ritim~=130bpm, endeks~=47)

Şekil 6.17: Gerçek kayıtlar için başlangıç noktası tespit sinyalinden elde edilen zaman - öz-
ilinti gösterimleri.

Şekil 6.17'den görüleceği üzere bir önceki testlerdeki gibi sadece son örnek'te ölçülebilir sabit bir ritim doğrusal bir çizgi olarak gözlenmektedir. İlk örnek için ise bölgesel olarak (25-75 ve 150-175 numaralı pencere aralığında) ritim ölçülebildiği gözlenmiştir. Son olarak bir taksim kaydı ve bir saz eseri için zaman - öz-ilinti grafiklerini sunuyoruz. Birinci kayıt için işitsel olarak bir ritim algılanamıştır. Buna rağmen 76 numaralı endekste gözlenen düz çizgi bu kaydın ritminin 79bpm olabileceğini önermektedir. İkinci kayıt için ise ritmin zamanla hızlandığı algılanabilmiştir ve buna uygun bir şekilde zaman - öz-ilinti fonksiyonunda periyotta azalma gözlenebilmektedir. İki kayıda da CD'den ulaşılabilir.

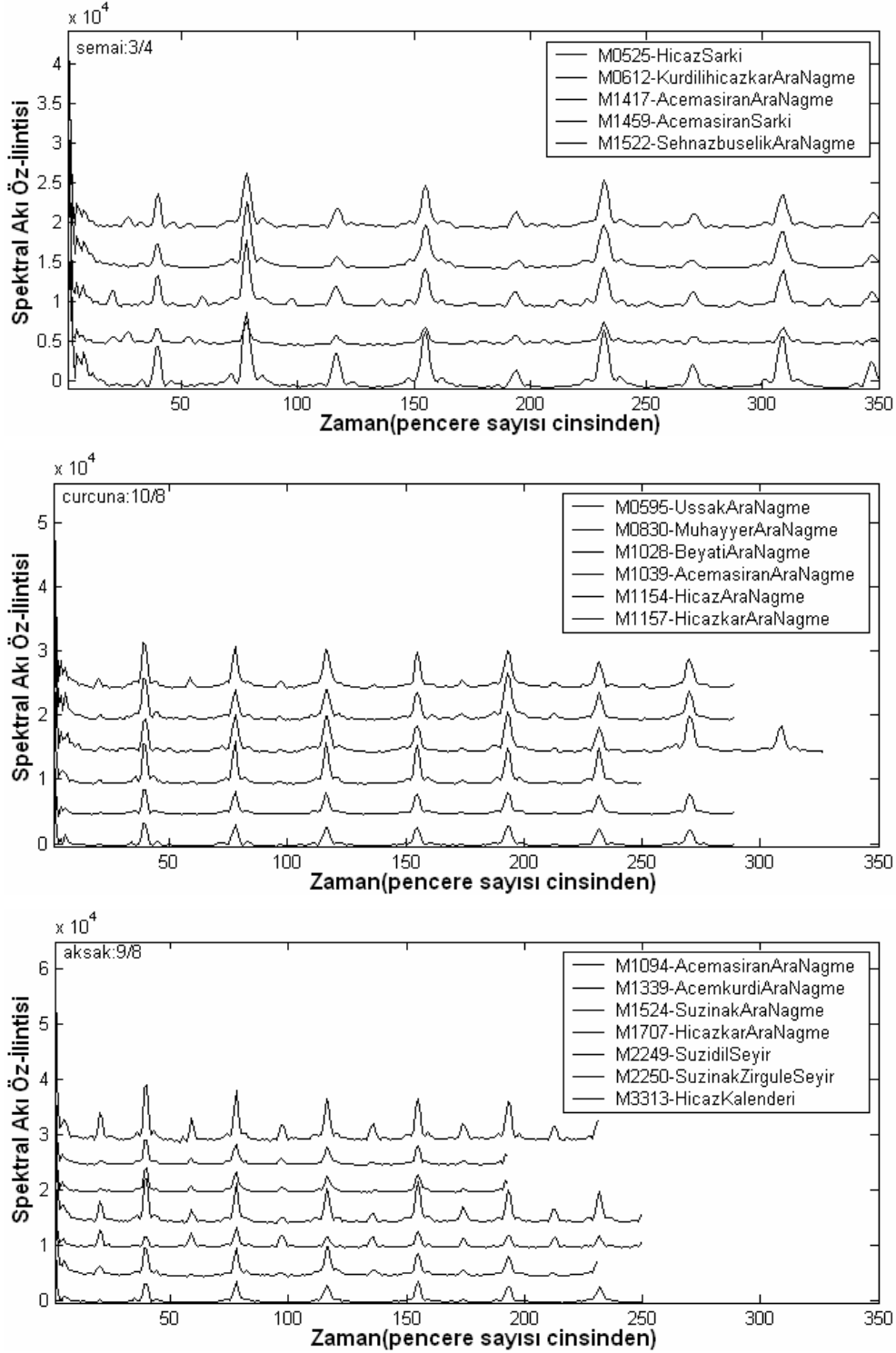


Şekil 6.18: Tanburi Cemil Bey, Hüzzam Taksim (Kayıt-1) için zaman - öz-ilinti grafiği.



Şekil 6.19: "Düğün Evinde" için zaman - öz-ilinti grafiği.

Bu testlere ek olarak Usul'ün öz-ilinti fonksiyonları üzerinde olası etkisini gözleyebilmek için usullerine göre sınıflanmış verileri tekrar örnekleyerek aynı ritme getirdik ve öz-ilinti fonksiyonlarını beraber çizdirerek inceledik. Şekil 6.20'de bu çizimlere örnekler gösterilmektedir.



Şekil 6.20: Yeni örnekleme ile aynı ritme çekilmiş sentetik kayıtların öz-ilinti fonksiyonlarının usul (semai, curcuna ve aksak) sınıflarına göre gösterimi.

Öz-ilinti fonksiyonlarının usul grubu içerisinde benzerlikler taşıdığı gözlenebilmektedir, ancak doğrudan usul ayrımı sağlayabilecek bir özellik ayırt edilememiştir. Bu gözlem, usul belirlemesinin öz-ilinti fonksiyonları üzerinden sınıflandırma algoritmalarıyla çalışılabileceğini düşündürmektedir. Ancak şekilde gösterilen öz-ilinti fonksiyonları sentetik verilerden hesaplanmıştır. Gerçek kayıtların öz-ilinti fonksiyonlarının çok daha gürültülü ve karmaşık olduğundan hareketle bu tip çalışmalar ileriki tarihlere bırakılmıştır.

Sonuç

Bu bölümde literatürde ilk defa işaret işleme teknikleriyle Türk müziği ritim analizi problemi incelenmiştir. Batı müziği ritim analiz çalışmaları literatürü taraması sonucunda, kayıtların polifonik yapısını inceleme amaçlı işlemler dışarıda tutularak çalışmalardaki ortak bir yöntem olan 'başlangıç noktalarının tekrar sıklığının öz-ilinti yöntemiyle ölçmesine dayanan ritim tespiti'nin Türk müziği kayıtları üzerinde denenmesine karar verilmiştir. Yöntemin her bir adımı veriler üzerinde denenmiş ve yöntemin sentetik verileri incelemede başarılı olduğu ancak gerçek verilerin analizinde oldukça sınırlı kullanılabileceği gözlenmiştir: sadece tam zamanlarda güçlü vuruşlar içeren ve ritme uyulan kayıtlarda ölçüm yapılabilmektedir. Öz-ilintinin zamanla değişimini gözleyebilmek için zaman - öz-ilinti grafikleri de incelenmiş ve bunların ritmin görsel analizi açısından etkin olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

6.4 MIDI oluşturulması ve notaya dökme

Bu adımda nicemlenen f_0 verisinin notaya çevrilmesi, yani nicemlenen bölgelerin, frekans değerlerine göre isimlendirilmesini gerçekleştirecek araçların tasarımı açıklanmaktadır. Daha önce değindiğimiz gibi, Türk müziği ahenk sistemi verilen bir transpozisyon sistemi kullanmaktadır. Nicemlenmiş frekans bilgisi, ahenk bilgisi olmadan bir perde / nota ismiyle ilişkilendirilemez. Bu sebeple, öncelikle makam ve karar sesi frekansı bilgisinin çıkartılması (bu aynı zamanda ahenk bilgisini vermektedir), ardından gerçek frekans değerlerinin karar sesine göre uzaklık bilgisine dönüştürülmesi ve perde isimlendirmesinin makam ve aralık bilgisi kullanılarak yapılması gerekmektedir.

Daha önceki bölümlerde makam ve karar sesi tespit yöntemlerimizi açıklamıştık. Ölçülen frekans bilgisinin karar sesine göre Holder koması cinsinde aralık bilgisine dönüştürülmesi basitçe aşağıdaki formülle gerçekleştirilebilir:

$$I_i = \log_2 \left(\frac{f_0^i}{f_0^K} \right) * 53 \quad (38)$$

Burada f_0^i (hertz cinsinden) ölçülen i . frekans değeri, f_0^K , (hertz cinsinden) karar sesi frekans değeri ve I_i Holder koması cinsinden aralık bilgisidir.

Bir makamdan eserin notası yazılırken karar sesinin hangi notaya karşılık geldiği kuramca belirlendiği şekliyle kullanılır. Örneğin bir Segah taksim icrasını notaya dökerken, (Hertz cinsinden frekansı ne olursa olsun) karar sesine karşılık gelen bölgelerin "segah"(B4b1) olarak yazılması gerekmektedir.

MIDI ise Batı müziği aralık sistemine göre tasarlanmış bir protokol olup Batı müziğindeki en küçük aralık olan yarım ses aralığı MIDI'de 1 adıma karşılık gelmektedir. Aşağıdaki Tablo'da notalara karşılık gelen MIDI numaraları verilmiştir.

Tablo 6.4: MIDI nota numaraları.

Oktav #	MIDI Nota Numaraları											
	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
0	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
2	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
3	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
4	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
5	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
6	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
7	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
8	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
9	120	121	122	123	124	125	126	127				

Bir oktav, MIDI gösteriminde 12 adıma, Holder koması cinsinden ise 53 adıma karşılık gelmektedir. Bu sebeple aralık bilgisinin MIDI ve Holder koması adımları cinsinde dönüşümü basit bir oranlama işlemiyle yapılabilir:

$$I_{MIDI} = I_{Hc} * 12/53 \quad (39)$$

Bu noktada artık hem karar sesine karşılık gelen nota ismi (Segah makamı için “segah (B4b1)”), hem bu karar sesine karşılık gelen MIDI numarası (B4b1 için $MIDI_No_K=71-12/53$, 71: B4, 12/53: b1 (tek Holder komalık bemol)), hem de nicemlenmiş karar sesine göre (MIDI cinsinden) aralık değerleri bulunmaktadır. Her bir nicemlenmiş bölgeye karşılık gelen MIDI numarası,

$$MIDI_No_i = MIDI_No_K + I_{MIDI} \quad (40)$$

olarak bulunur.

Son olarak, frekanslı nicemlenmiş bölgelerin sürelerinin de nicemlenmesi gerekmektedir. Bu, notaları dörtlük, sekizlik, otuzikilik gibi en küçük zaman biriminin tam katları şeklinde gösterme gereğinden kaynaklanmaktadır. Süre nicemlemesi, en küçük zaman değerli notanın süresi 1/16'lık nota olarak temsil edilmesi ve bütün bölgelerin sürelerinin bu zaman biriminin tam katı olarak nicemlenmesi şeklinde elde edilmiştir.

MIDI formatında dosya yazımı

MIDI verisi 16 ayrı kanal üzerinden çeşitli mesajların seri olarak okunup kaydedildiği bir formata sahiptir. Temel olarak MIDI veri formatı *status byte*'ı (SB) takibeden 1 ya da 2 *data byte*'tan (DB) oluşur. MIDI veri formatına örnek olarak aşağıdaki tabloda SB ve DB'nin nasıl kullanıldığı gösterilmektedir.

Tablo 6.5 MIDI veri yapısı

Status Byte (SB)	Channel # (15)	Data Byte 1 (DB1)	Data Byte 2 (DB2)
Note-on/off (On)		Note # (60=C4)	Velocity (96)
1001	1110	0011 1100	0110 0000

SB'nin ilk 4 biti notanın basılı olup olmadığını (*Note-on*) , ikinci 4 biti de verinin hangi kanaldan (kanal 15) gönderileceğinin bilgisini taşımaktadır. DB1 ve DB2 ise sırasıyla hangi notanın (4. oktavdaki Do notası) hangi şiddette (96 şiddetinde) basıldığı bilgisini taşımaktadır.

MIDI verileri örnekte görüldüğü gibi nota, hız ve kanal bilgileri gibi temel icra mesajları ile birlikte program değişimi, kontrol değişimi, sisteme özel mesajlar gibi çok kabaca 4 tip mesaj tipi altında sınıflandırılabilir.

Temel icra mesajları: Bu mesajlar arasında Türk müziği kayıtlarının MIDI formatında yazımı açısından en önemli mesaj *pitch bend* (perde kaydırma) mesajıdır. Bu mesaj sayesinde Batı müziği için belirlenmiş standart MIDI notaları dışında kalan notaların MIDI formatında okunulup yazılması olanaklıdır. Aşağıdaki tabloda *pitch bend* mesajının veri yapısı bir örnek üzerinden gösterilmektedir.

Tablo 6.6: Frekans kaydırma (Pitch Bend) mesajı veri yapısı.

Status Byte (SB)	Channel # (1)	Data Byte 1 (DB1)	Data Byte 2 (DB2)
Pitch bend code	Channel # (1)	Most Sig. Bit (MSB)	Least Sig. Bit (LSB)
1110	0001	0011 1100	0001 0011

Pitch bend verisi SB'nin ilk 4 biti *pitch bend* kontrol komutunu (1110), ikinci 4 biti ise kanal numarasını (kanal 1) verir. DB1 ve DB2 ise sırasıyla kaba (MSB) ve hassas (LSB) olmak üzere toplamda perde kaydırma değerini verir. *Pitch bend* için DB1 (MSB) ve DB2'nin (LSB) ilk bitleri kullanılmadığı için kaydırma değerinin 14 bitlik bir veri yapısı vardır. Bu anlamda perde kaydırma miktarının onlu (decimal) sayı olarak en yüksek değeri 16383'tür. Yine onlu sayı olarak 8192 değerinde bir kaydırma değeri verili nota değerinin değiştirilmemesi anlamına gelir. Yani bir notanın 8192 değerinden 16383 değerine kaydırılması ilgili notanın 1 tam ses tizleşmesine, 0 değerine kaydırılması ise ilgili notanın 1 tam ses pesleşmesi anlamına gelir. Tablo 6.6'da sunulan örnekte MSB, 011 1100 değerinde, LSB ise 001 0011 değerindedir. Bu 14 bitlik verinin onlu sayı olarak karşılığı 7699'dur. Yani verili bir nota 8192-7699 = 493 pitch bend birimi değerinde pesleşecektir, ki bu yaklaşık 6 sent veya çeyrek Hc anlamına gelmektedir.

Örnek olarak Do4 notası basılı iken 0 değerinde bir perde kaydırma ilgili notanın Bb3 (1 tam ses pes) olarak icra edilmesine, 16383 değerinde bir perde kaydırma ise ilgili notanın Re4 (1 tam ses tiz) olarak icra edilmesine neden olacaktır. *Pitch bend* mesajı kullanılarak perde kaydırma değerlerinin Türk müziği kayıtlarının MIDI formatında okunup yazılabilmesindeki asıl anlamı da buradadır.

Bu anlamda *pitch bend* mesajı sayesinde 1 tam sesi 8192 eşit parça olarak temsil etmek, (Y)AEU sistemi ile tam olarak örtüşmeyen perde aralıklarının dahi çok yüksek bir çözünürlükte MIDI formatında okunup kaydedilmesini sağlayabilmektedir.

Channel and polyphonic aftertouch (kanal ve çok sesli nota çalma sonrası) çalınan bir notanın *aftertouch* mesajı gönderilmesiyle vibrato ve wah-wah gibi farklı ses efektlerinin üretilmesini sağlar. *Channel aftertouch* mesajı çalınmakta olan tüm notaları etkilerken, *polyphonic aftertouch* mesajı sadece tek bir notayı etkiler.

Program değişimi mesajları: Bu mesajlar kullanılan MIDI çalgısının bağlı olduğu diğer çalgıları kontrol etmesi amacıyla kullanılır.

Kontrol değişimi mesajları: Çalgı bankasından belirli çalgıların tınısını simüle eden çalgıların seçilmesini, geçki (modulation), ses şiddeti, ses parlaklığı gibi parametrelerin belirlenmesini sağlayan kontrol mesajlarıdır.

Sisteme özel mesajlar: Ana ses kontrolü, stereo ses dengesi, zaman işareti (time signature) gibi parametre değerlerinin kontrolünü sağlayan mesajlardır.

Türk müziği kayıtlarının MIDI formatında yazılıp okunması

Türk müziği kayıtlarının MIDI formatına dönüştürülmesinin temel nedeni kayıtların otomatik olarak notaya dökülmesi olduğu için, MIDI yazımında MIDI notaları ve nota süreleri dışındaki tüm parametreler sabit olarak tutulmuştur. Bu parametrelere aşağıda MIDI yazımının nasıl gerçekleştirildiği açıklanırken değinilecektir.

MIDI veri yapısının seri olarak kaydedilip okunacak şekilde tasarlandığı yukarıda açıklanmıştı. MIDI verisi bu anlamda ardışık olarak *header chunk*, meta olayları ve MIDI olayları olmak üzere ardaşık veri külçelerinin biraraya gelmesinden oluşur.

Header chunk dizisi standart bir 4 baytlık kodla başlar: 77 85 104 100

Bu kodu takiben *Header chunk* dizisinin uzunluğunu belirten 4 baytlık veri gelir: xx xx xx xx
Daha sonra dosya formatı dizisi ise dosyanın kaç kısımdan oluştuğuna dair bilgi veren 2 baytlık bir veri gelir:

- 0: tek kısım (single track)
- 1: çok kısımlı (multi track) eşzamanlı
- 2: çok kısımlı (multi track) ard zamanlı

Header chunk son olarak 2 baytlık kısım sayısı bilgisi ve MIDI verisinin uzunluğunu belirten 4 baytlık veri ile sona erer.

Burada kısım (*track*) sayısının anlamı ilgili MIDI kanalı içindeki müzik kaydında, örneğin vurma çalgıları, ezgi ve armonik eşlik gibi ayrı bölümlerin ayrı kısımlar olarak yazılmasına olanak sağlanması ile ilgilidir. Proje sadece tek sesli müzik kayıtları ile sınırlı olduğu için MIDI verisi içindeki bu parametre sabit olarak 0, yani tek kısım olarak alınmıştır. Bu nedenle yine *header chunk* dizisi içindeki kısım sayısı parametresi de sabit olarak 1 olarak alınmıştır. Sabit olarak alınan diğer parametreler tempoyu belirleyen tempo ve *ticks per quarter note* parametreleridir. Bu parametreler de sırasıyla 500000 ve 300 olarak alınmış ve saniye cinsinden nota süre değerlerinin MIDI verisine dönüştürülmesinde yine bu parametre değerleri kullanılarak notaların gerçek süre değerlerinde icra edilmesi sağlanmıştır. Son olarak MIDI veri uzunluğu bilgisi ise en son ilgili müzik kaydının MIDI formatına dönüştürülmesinden sonra veri uzunluğu hesaplanarak kaydedilir.

Header chunk dizisini takiben kontrol ve program değişim mesajları dizisi gelir. MIDI yazımında kullandığımız kontrol mesajı hangi çalgının seçileceğidir. 176 kodu kontrol değişimi olacağını belirtirken, 0 kodu çalgı bankasından çalgı seçimi yapılacağını belirtir. Bu dizinin ardından gelen program değişimi kodu ise hangi çalgının seçileceğini belirtir. MIDI yazımı için ney sesine benzeyen 75 kodlu çalgı sabit olarak seçilmiştir. Son olarak tüm kanallar için sabit bir nota çalma şiddeti değeri belirleyen 208 kodlu *channel pressure* mesajı sabit 96 değeri ile birlikte kullanılmıştır.

MIDI yazımında sabit olarak kullanılan bir diğer veri ise MIDI verisinin en sonunda yer alan ve kaydın sona erdiğini belirten 4 baytlık bir mesajdır: 24 255 47 0

Böylece geriye aşağıda gösterildiği gibi *header chunk* veri dizisinin ardından gelen program ve kontrol değişim mesajları ile kayıt sonu mesajı arasına, çalınma sırasına göre nota ve süre değerlerine dair mesajları eklemek kalır:

- Header chunk mesajları
- Program Değişimi mesajı
- Kontrol değişimi mesajı
- Nota ve süre değerleri mesajları
- Kayıt sonu mesajı

Nota ve süre değerleri mesajlarında ise her bir nota için sabit bir ses şiddeti (*velocity*) değeri, 70 kullanılmıştır. Sonuç olarak MIDI verisi içine yazılacak olan 3 değişken parametrenin sırasıyla belirlenmesi işlemi kalmaktadır: nota değeri, *pitch bend* değeri, süre değeri. Bu parametre değerleri ise ses kaydından elde edilen MIDI matrisi içinden çekilerek kullanılmıştır.

MIDI nota numarasının nasıl elde edildiği bölüm başında açıklanmıştı. Batı müziği için tamsayı olan MIDI nota numaralarının Türk müziği kayıtları için kesirli olarak nasıl ifade edildiği de bir MIDI matrisi örneği üzerinden yine bölüm başında gösterilmişti.

Bu kesirli MIDI nota değerlerinin MIDI formatına nasıl dönüştürüldüğü aşağıda bir örnek üzerinden açıklanmaktadır. Örnek olarak elimizde 60.5 nota değeri olsun. Bunun anlamı MIDI nota numarası 60 (Do4) olan notanın 0.5 değerinde tizleştirilmesi gerektiğidir. Şimdi *pitch bend* mesajı kullanılarak bunun nasıl gerçekleştirildiğini görelim.

Öncelikle bir tam sesin *pitch bend* mesajında 8192 eşit parçaya bölündüğünü belirtmiştik. Bir tam ses aralığı MIDI nota numaralarında 2 değerine karşılık gelir. Örneğin aralarında yarım ses aralığı olan ve sırasıyla 60, 61 ve 62 MIDI nota numaraları ile temsil edilen Do4, Do#4 ve Re4 notaları ele alındığında aralarında bir tam ses aralık olan Do4 ve Re4 notalarının MIDI nota numaraları farkı (62-60) 2'dir. Buradan bir yarım ses aralığın *pitch bend* mesajında 4196 eşit parçaya bölündüğü sonucu rahatlıkla çıkarılabilir.

Örneğimize dönersek MIDI nota numarası 60 olan Do4 sesinin 0.5 değerinde tizleştirilmesi $0.5 \times 4196 = 2048$ değerinde bir *pitch bend* uygulanması anlamına gelecektir. *Pitch bend* mesaj yapısında 0 bilgisinin ilgili notayı 8192 değerinde pesleştirdiği, 8192 bilgisinin ilgili notayı değiştirmeden bıraktığı ve 16383 bilgisinin de ilgili notayı 8192 değerinde tizleştirdiği düşünülecek olursa ilgili notanın pesleştirilme ve tizleştirilme işlemi 8192 *pitch bend* bilgisi merkeze alınarak yapılmalıdır. Öyleyse 2048 değerinde bir tizleşmeyi ifade etmek için merkez *pitch bend* bilgisi 8192'ye bu değer eklenmeli ve $8192 + 2048 = 10240$ değeri kullanılmalıdır.

MIDI mesajı olarak bu bilgi MIDI formatında aşağıdaki tabloda gösterildiği biçimde kodlanır.

Tablo 6.7: 0.5 değerinde bir tizleşme için örnek frekans kaydırma (*pitch bend*) mesajı.

Status Byte (SB)		Data Byte 1 (DB1)	Data Byte 2 (DB2)
Pitch bend code	Channel # (1)	Most Sig. Bit (MSB)	Leas Sig. Bit (LSB)
1110	0001	0101 0000	0000 0000

Bu bilgi MIDI veri dizisi içinde şu şekilde yer alır: 224 (*pitch bend* mesajı) 80 (MSB) 0 (LSB). Ne kadarlık bir tizleşme / pesleşme yapılacağı bilgisinden sonra bu işlemin hangi notaya uygulanacağı ve nota süresi bilgileri gelir. Bunun için sırasıyla *Note-on* mesajı, MIDI nota değeri, ses şiddeti değeri (*velocity*), nota süresi değeri ve son olarak da *Note-off* mesajı yazılır. Nota süre değeri yukarıda belirtildiği gibi sabit tempo ve *ticks per quarter note* parametre değerleri kullanılarak MIDI verisine dönüştürülür.

Örnek notamızın 5 saniye icra edildiği düşünülürse bu değerın MIDI verisi olarak karşılığı 2 baytlık 151 56 değerlerine karşılık gelir. Aşağıda örnek nota için yazılan bir MIDI verisinden otomatik olarak elde edilen açıklamalar gösterilmektedir. Görüldüğü gibi MIDI verisi tüm kontrol mesajları ve nota olaylarını seri olarak işlemektedir.

0	0	0:0.000	Controller Change	ctrl=BANK SELECT value=0
0	0	0:0.000	Program Change	instr=75
0	0	0:0.000	Channel Key Pressure	vel=96
0	0	0:0.000	Pitch Bend	change=10240
0	0	0:0.000	Note on	nn=60 vel=70
0	456	0:0.500	Note off	nn=60 vel=70
-	24	0:0.500	meta	End of Track

Aşağıdaki tabloda ise örnek olarak ele alınan 60.5 MIDI nota numarasına sahip 5 saniyelik tek bir notanın buraya kadar açıklanan MIDI mesajları ile birlikte bir MIDI verisi olarak nasıl temsil edildiği gösterilmektedir.

Tablo 6.8: 60.5 MIDI nota numarasına sahip 5 saniyelik bir notanın MIDI formatında gösterimi. (Değişken olarak kullanılan mesajlar italik olarak işaretlenmiştir)

MIDI message	Code
	77
	84
Start of MIDI data	114
	107
	0
	0
Track length	0
	34
File format	0
	176
	0
Control change	0
	0
Bank select	192
	75
Instrument	0
Channel pressure	208
	96
Pressure value	0
Pitch bend message	224
<i>Pitch bend value (MSB)</i>	<i>80</i>
<i>Pitch bend value (LSB)</i>	<i>0</i>
Note-On message	144
<i>MIDI note number</i>	<i>60</i>
Velocity	70
<i>Note Duration (MSB)</i>	<i>151</i>
<i>Note Duration (LSB)</i>	<i>56</i>
Note-Off message	128
<i>MIDI note number</i>	<i>60</i>
Velocity	70
	24
	255
End of MIDI data	47
	0

Sonuç olarak bir ses kaydından elde edilen MIDI matrisi her bir nota için burada açıklanan işlemler yapılarak MIDI verisine dönüştürülmüş ve bu sayede MIDI yazımı başarıyla gerçekleştirilmiştir. MIDI verisinin okunması ise varolan herhangi bir MIDI okuyucu (synthesizer / player) programı yoluyla gerçekleştirilebilmektedir.

Notaya dökme

f0 bilgisinin notaya dökülmesi için proje araştırmacılarından M. Kemal Karaosmanoğlu ve yer aldığı ekipten Utku Uzmen'in geliştirdiği Mus2 Türk müziği nota yazım programı¹² kullanılmıştır. Programın girdi olarak kabul ettiği format 53 Hc çözünürlükte nota isimleri ve nota süre değerleridir.

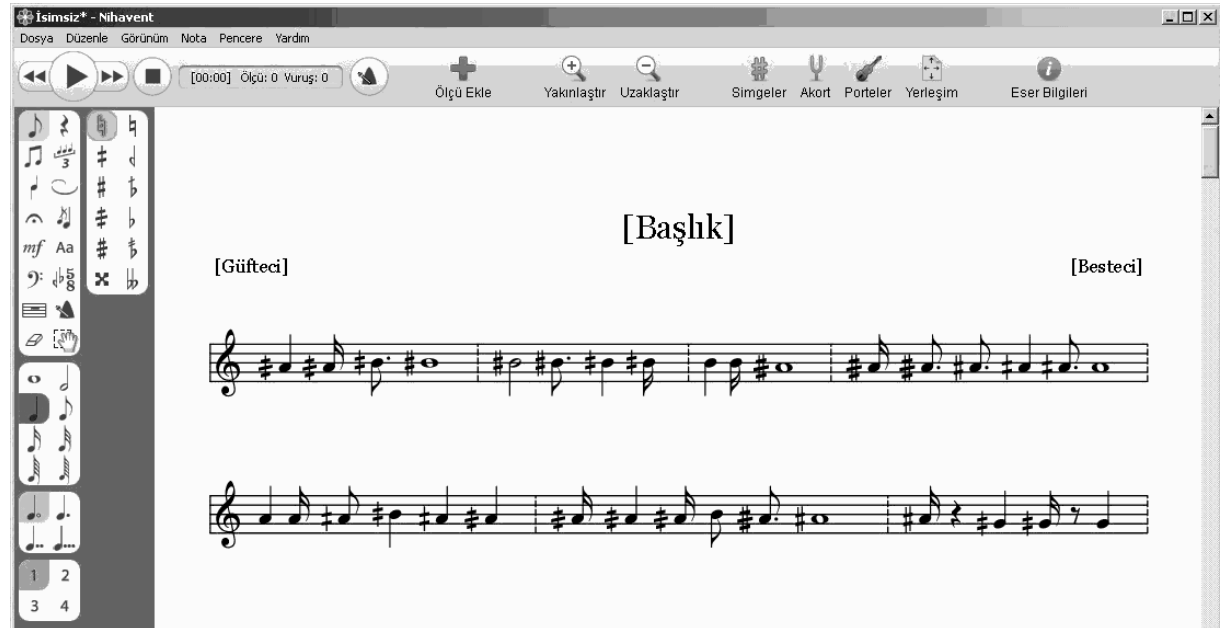
¹² <http://www.mus2.com.tr>

Bu bölümün girişinde açıklandığı gibi elimizdeki veri karar notası belli olan 53 Hc çözümlülükteki f0 verisi ve nota değeri süreleridir. Bu f0 verisinin nota isimlerine dönüştürülmesi için 8 oktavlık bir nota isim tablosu kullanılmıştır. Nota isim tablosunda her nota arasında 1 Hc fark vardır: C1...C4#1 C4#2 C4#3 C4#4 C4#5 C4#6 C4#7 C4#8 D4..C8. Her f0 verisinin karar notasına uzaklığı bu tablodan hesaplanarak ilgili f0 verisinin karşılık gelen nota ismi bulunur. Örneğin karar notası D4 (yegah) olarak bulunan bir parçada bir f0 verisi karar sesinden 4 Hc daha pesse, nota isim tablosunda karar notasından itibaren yukarı doğru 4 adım (4 Hc) sonraki nota sesi, yani C4#5 bulunur.

Böylece verili bir parça gerekli işlemlerden geçtikten sonra nota ismi ve nota değeri süresinden oluşan bir metin dosyasına çevrilir. Aşağıda örnek bir Uşşak ney taksiminin ilk 11 notasının metin dosyasında nasıl temsil edildiği gösterilmektedir. Her bir nota ismini takip eden iki rakam nota değeri süresini vermektedir. İlk nota örneğini ele alacak olursak önce nota ismi A4#6 daha sonra da ¼'lük nota değeri süresini gösteren 1 ve 4 rakamları gelmektedir.

(A4#6 1 4) (A4#6 1 16) (B4#2 3 16) (B4#3 1 1) |
 (B4#3 1 2) (B4#3 3 16) (B4#2 1 4) (B4#2 1 16) |
 (B4 1 4) (B4 1 16) (A4#7 1 1) |

Sonuç olarak oluşturulan bu metin dosyası Mus2 programı ile açıldığında f0 verisinin notaya dökülmüş hali elde edilmektedir. Şekil 6.21'de sunulan nota dökümünde ilk 11 notanın yukarıda verilen metin dosyası ile uyumlu olduğu görülmektedir.

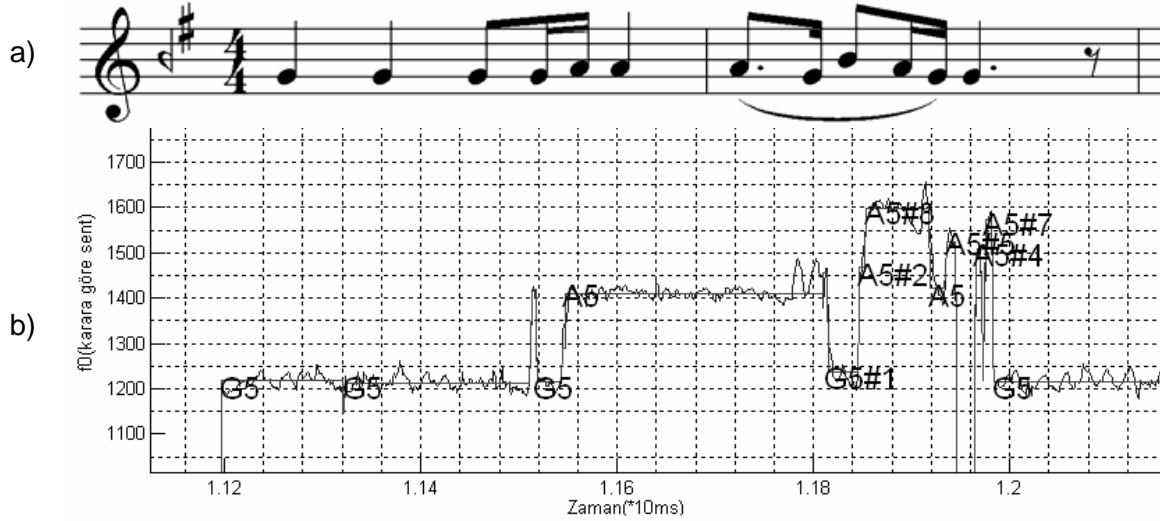


Şekil 6.21: Bir Uşşak ney taksiminin Mus2 ile notaya dökülmüş hali.

Buna ek olarak, sonuçların test edilmesi için ölçülen f0 bilgisi, nicemlenen f0 bilgisi ve nota ismi gösteren bir arayüz tasarlanmıştır. Bu arayüz sayesinde frekans nicemlemesiyle ilgili tüm adımların sonuçları gözlenip orijinal notayla karşılaştırılabilmektedir. Bir örnek Şekil 6.22'de sunulmuştur.

Şekil 6.22 incelendiğinde otomatik notaya dökme işleminin notaları büyük oranda doğru ancak fazla detaylı bir şekilde bulmuş olduğunu görmekteyiz. Özellikle son kısımda(1.19 - 1.2) icranın (orijinal notada bulunmayan) tüm detayları notaya dökülmüştür. Varılan noktada

nota yazma aracımız icrayı “fazla” hassasiyetle takip eden bir nota yazımı gerçekleştirmektedir. Türk müziğinde nota, icranın tüm detaylarını içermeyen bir özet bilgi dizisi olduğu için bu noktada etkin bir “özetleme” algoritmasına ihtiyaç duyulduğu açıktır.



Şekil 6.22: Otomatik notaya dökme örneği, neyle Rast makamında icra. a) orijinal nota, b) kayıttan otomatik olarak elde edilen f0, nicemlenmiş f0 ve nota isimleri.

Sonuç

Bu adıma varıldığında, kayıttan yola çıkarak nota dökümü yapan algoritmalar zinciri tamamlanmış olmaktadır. Çeşitli örnekler üzerinde yapılan testlerde notaların 1 Holder koması hassasiyetle nicemlenmesi sonucu alışıldık nota gösterimlerine göre çok fazla sayıda arıza işaretlerinin (diyaz ve bemol) olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak süre nicemlemesinde de hassasiyet fazlalığı, f0 ölçümü sırasında hata yapılan küçük bölgelerin ayrı notalar (veya sus'lar) şeklinde ifade edilmesi ve icracının ritimde yaptığı küçük oynamalar sonucu notaların zamansal bölünmesinin problemliliği gözlenmiştir.

Çalışmanın başında belirttiğimiz gibi, otomatik notaya dökme Batı müziği için de çözülmemiş zor bir problemdir. Frekans uzayının karmaşıklığı, süslemeler ve ritmik çeşitlilik göz önünde bulundurulduğunda Türk müziği için özel problemlerin eklendiği açıktır. Projenin son adımında varılan örnekler, algoritmalar dizisinin sonuna ek olarak etkin “özetleme” filtrelerinin tasarlanması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu filtrelerin frekans ve zaman nicemlemesinde sadeleştirmeler oluşturularak notayı daha okunur ve elle az miktarda yapılacak düzeltmeyle kullanılabilir hale getirebilmesi gerekmektedir. Bu geniş konu ileriki çalışmalarımıza bırakılmıştır.

Aşağıda iki kalitesi düşük eski kayıt için eserlerin hali hazırda varolan notalarıyla sistemimizin ses dosyalarından otomatik olarak elde ettiği notaları göstermekteyiz: Tanburi Cemil Bey'in Hüseyini Saz eseri, Çeçen kızı ile aynı bestecinin Ferahfeza Saz Semaisi.

Şekil 6.23'te Tanburi Cemil Bey'in Çeçen Kızı eserinin varolan notası ve otomatik olarak elde edilen notası sunulmuştur. Şekilde özgün nota üzerinde 1 ve 2 olarak işaretlenen nota kümeleri 1. ve 2. dolapta tekrarlanmaktadır. Otomatik olarak elde edilen nota üzerinde bunu ifade edebilmek için bu notalar sırasıyla 1. dolap için 1.1 ve 1.2 olarak 2. dolap için de 2.1 ve 2.2 olarak işaretlenmiştir. Özgün notada ifade edilen 1 ve 2 numaralı nota kümelerinin otomatik olarak elde edilen nota kümelerinde aynı olması beklenmesine karşın aralarında farklılıklar olduğu görülmektedir. Tablo 6.9 ve 6.10'da otomatik nota ile özgün nota arasındaki farklılıklar (*italik*) gösterilmektedir.

Sofyan HÜSEYİNİ SAZ ESERİ
" Çeçen Kızı " Tanburi Cemil Bey

♩ = 96

a)

b)

1.1

1.2

b)

2.1

2.2

Şekil 6.23: Tanburi Cemil Bey'in Çeçen Kızı eseri notası. a) Orijinal nota, b) kayıttan otomatik olarak elde edilen nota.

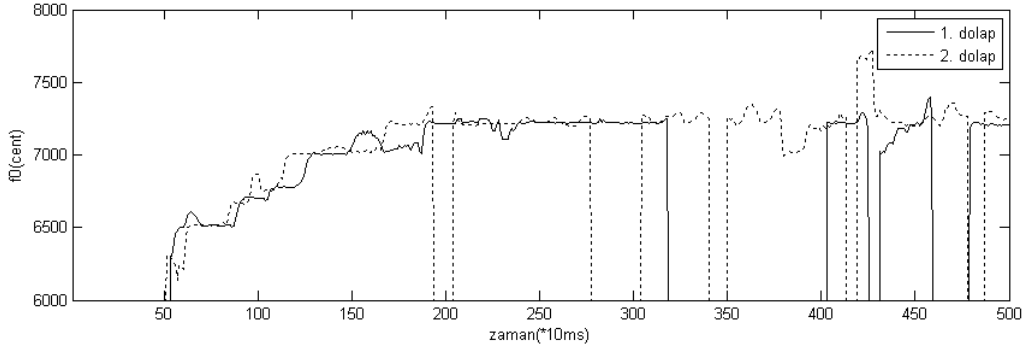
Tablo 6.9: 1. nota kümesi için özgün nota ile otomatik nota karşılaştırması.

	1	2	3	4	5
1. dolap 1. küme	A4	B4#1	D5	D5#1	E5
özgün nota	A4	B4b1	C5	D5	E5
2. dolap 1. küme	A4	-	D5#1	E5	

Tablo 6.10: 2. nota kümesi için özgün nota ile otomatik nota karşılaştırması.

	1	2	3	4	5
1. dolap 2. küme	E5	-	D5#8	-	-
özgün nota	E5	D5	E5	A5	E5
2. dolap 2. küme	E5#1	-	D5#1	E5	E5#1

Buna ek olarak, icradan ölçülen birinci ve ikinci dolap f0 değişimi de Şekil 6.24'te gösterilmiştir. Tablo 6.9 ve 6.10 ve Şekil 6.24 incelendiğinde görüleceği gibi, icradaki varyasyonlar nota yazımında büyük zorluk oluşturmaktadır. Özgün nota ile nota ismi açısından farklar çok büyük olmamasına rağmen nota gösterimi çok karmaşıklaşmaktadır. Yine notaların zamansal bölünmesi de oldukça karmaşıktır. Hem isimlendirme hem de zamanlama açısından etkin yumuşatma filtrelerine duyulan ihtiyaç açıktır. Benzer bir örnek Şekil 6.25 ve Tablo 6.11'de sunulmuştur.



Şekil 6.24: Otomatik nota yazımı için 1. ve 2. dolabın f0 eğrisi üzerinden karşılaştırmalı olarak gösterimi.

Aksak Semai $\text{♩} = 192$ **FERAHFEZA SAZ SEMAİSİ** Tanburi Cemil Bey

Yürük Semai

1. HANE

a)

b)

Şekil 6.25: Tanburi Cemil Bey'in Ferahfeza Saz Semaisi eseri notası. a) Orijinal nota, b) otomatik olarak elde edilen nota.

Tablo 6.11: 1. nota kümesi için özgün nota ile otomatik nota karşılaştırması.

	1	2	3	4	5	7	8
otomatik nota	F5#1	A5	G5#1	F5#1	E5#1		
özgün nota	F5	A5	G5	F5	E5	D5	E5

7. Otomatik algı tanıma

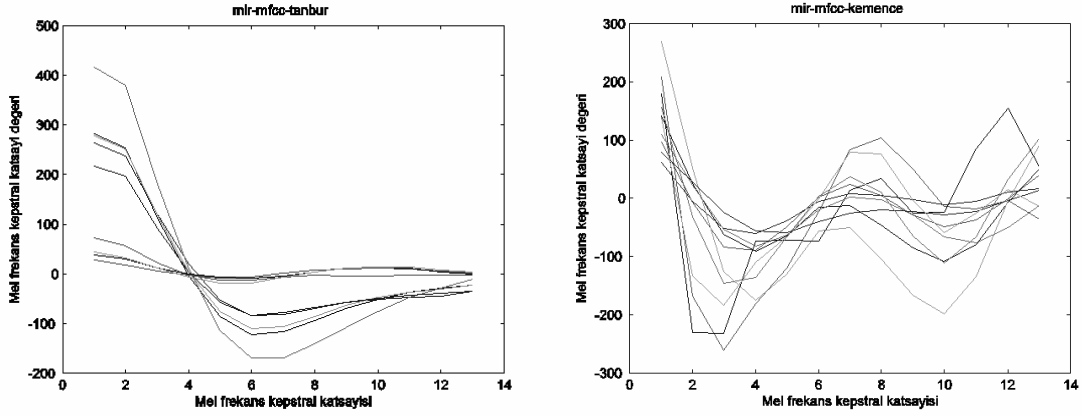
Projemizde Türk müziği çalgılarını, ya da çalgı gruplarını tanıyan bir programın yazılması da öngörölmüştür. Buradaki amaçlardan ilki çalgı sınıfı bilgisini başlangıç noktası tespitinde kullanmak olup bu raporun önceki bölümlerinde ilgili gerekçe açıklanmıştır. Ayrıca Türk müziği algılarının akustik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar çok kısıtlı düzeydedir. Bu alana da katkı hedeflenmiştir. Bununla beraber, projemizin genel hedefleri düşünöldüğünde diğer adımlara göre az öneme sahip bir kısmını oluşturmaktadır.

7.1 Sınıflandırıcı tasarımı

Batı müziği algılarının tanınmasında literatürde birbirinden farklı teknikler kullanılarak yapılmış ve sınıflandırıcı tasarımında farklı problemleri çözmeye yönelik sonuçları içeren birçok çalışma bulunmaktadır. Konuşma işleme çalışmalarında sıkça kullanılan öz-niteliklerin bu alanda da etkili bir şekilde kullanılabileceği öngörölerek, öz-ilinti işlevi, spektral akı, spektral kütle merkezi, mel-frekans kepstral katsayıları gibi birçok öz-nitelik kullanılmaktadır (ESSID, 2006). Sınıflandırılacak müzik kayıt örneklerinden çıkartılan bu öz-nitelikler daha sonra birçok öğrenme algoritmaları yardımıyla sınıflara ayrıştırılmaktadır. Bunlar arasında destek vektör makinaları (DVM/SVM) (VAPNIK, 1995, VAPNIK, 1998), sağladıkları yüksek başarımla nedeniyle tercih edilmektedir (MARQUES, 1999, ESSID, 2006).

Sınıflandırıcı tasarımında temel problemlerden ilki uygun (ayırıcı) akustik öz-niteliklerin seçilmesidir. Büyük çalışmalarda genel yöntem literatürde kullanılmış tüm öz-nitelikleri listelemek, buna ek olarak faydalı olabileceği düşünölen öz-nitelikleri ekleyerek listeyi genişletmek, daha sonra da bu öz-niteliklerin hangi uygun birleşiminde en iyi sınıflandırma sonucunun elde edildiğini bulmak şeklindedir. Biz alışmamızda, ihtiyacımız ve ayırdığımız insan kaynağı açısından planlama yaparak problemi daha pratik bir şekilde özölecek hale indirgemiş bulunuyoruz. Literatür taramasını takiben oluşturduğumuz öz-nitelikler listesinin çok büyük bir kısmını spektral özellikler oluşturmaktadır. Bu özelliklerden bazıları şunlardır: harmonik spektrum merkezi (harmonic spectral centroid), harmonik spektrum sapması (harmonic spectral deviation), harmonik spektrum yayılımı (harmonic spectral spread), harmonik spektrum değişimi (harmonic spectral variation), atak zamanı logaritması (log attack time), spektral kütle merkezi (spectral centroid), zamansal kütle merkezi (temporal centroid), mel frekans kepstral katsayıları (mel frequency cepstral coefficients, MFCC), atak zamanı (attack time), parlaklık (brightness), entropi (entropy), spektral düzlük (spectral flatness), harmonik olmama (inharmonicity), spektral düzensizlik (spectral irregularity), etkin değer (rms), etek değer (spectral rolloff), spektral yamukluk (spectral skewness), spektral yayılma (spectral spread), sıfır geçiş sayısı (zero-crossing rate).

Listedeki spektral özellikler temelde spektrumun genel şeklini (eğimini, enerjinin yoğunlaştığı bölgeyi, vs.) parametrize etmektedirler. MFCC, birçok uygulamada başarıyla kullanılmış bir öz-nitelik vektörü olarak burada listelenmiş spektral öz-niteliklerin taşıdığı bilgileri zaten içermekte olduğu için (ünkü spektrumun genel şeklinin bir nevi özetine karşılık gelmektedir) alışmamızda kullanılacak ana öz-nitelik vektörü olarak seçilmiş, diğer spektral öz-niteliklerle çok detaylı karşılaştırmalara girilmemiştir (bazı karşılaştırmalar yapılmış ancak her boyutuyla incelenmemiştir). Bu seçim önce seçili veri üzerinden bu öz-nitelik vektörünün ayırıcı olup olmadığı görsel olarak kontrol edilerek yapılmıştır (yukarıda listelenen öz-nitelikler için de benzer bir yaklaşım uygulanmıştır). Şekil 7.1'de bir dizi tanbur ve kemençe örneği için ortalama MFCC (verili bir kaydın, sessiz kısımları dışındaki bütününden elde edilen tek MFCC vektörü) vektörleri verilmiştir. Kullanılan kayıtlar tek çalgıyla yapılmış taksimleri içermektedir. Tanbur ve kemençe ortalama-MFCC vektörlerinin kendi içlerinde benzeşmeleri ve birbirlerine benzememeleri bu öz-nitelik vektörünün sınıflandırıcıda başarıyla kullanılabileceğini düşöndürtmektedir.



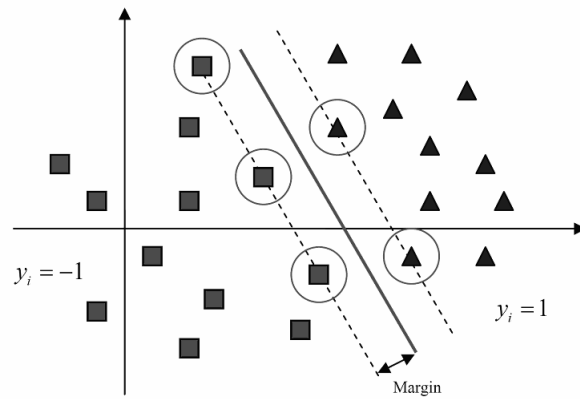
Şekil 7.1: Tanbur ve kemençe örnekleri için bulunan mel frekans kepsral katsayıları.

Benzer şekilde birçok öz-nitelik için dağılımlar görsel olarak incelenmiş, ortalama-MFFC'nin tek başına bir sınıflandırıcı içerisinde denenmesine karar verilmiştir.

İkinci ana problem ise uygun sınıflandırıcının seçilmesidir. Bunun için başarı düzeyinin yüksekliği ve yakın dönemdeki popülerliği düşünülerek destek vektör makinaları (Support Vector Machines, SVM) kullanılmasına karar verilmiştir. Destek vektör makinalarının temelleri istatistiksel öğrenme kuramına dayanmaktadır (VAPNIK, 1995). Bu kurama göre belirli bir öğrenme işlemi için sınırlı sayıda veri verildiğinde en iyi genelleştirme, sınıflandırma işlevinin kapasitesinin eğitim kümesinin boyutu ile uyumlu olduğu durumda elde edilir (BURGES, 1998). Lineer bir sınıflandırma probleminde n boyutlu eğitim örnekleri \mathbf{x} ve sınıf etiketi \mathbf{y} ($\mathbf{y}_i \in \{-1,1\}, i=1,2,\dots,n$) verildiğinde algoritma $\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b = 0$ ile verilen en iyi ayırıcı yüzeyi bulmaya çalışır. Bu durumda $\min \|\mathbf{w}\|^2 / 2$ öyle ki:

$$\mathbf{y}_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1 \geq 0, \quad \forall i \quad (41)$$

şeklinde yazılan optimizasyon problemi en yakın eğitim örneği ile ayırıcı yüzey arasındaki uzaklık $2/\|\mathbf{w}\|$ en büyük olacak şekilde kısıtlandırılır. Şekil 7.2'de gösterildiği gibi daire içine alınan ayırıcı yüzeye en yakın eğitim örnekleri, tüm eğitim örneklerinin küçük bir alt kümesini oluşturur ve destek vektörleri olarak adlandırılır (CORTES, 1995, VAPNIK, 1998, CRISTIANINI, 2000).



Şekil 7.2: Optimal ayırıcı yüzey ve destek vektörleri.

Optimizasyon sırasında $\|\mathbf{w}\|$ enküçüklenirken aralık da enbüyüklenmiş olur. Optimizasyon problemi α_i 'ler Lagrange çarpanları olmak üzere

$$L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1] \quad (42)$$

ile verilen Lagrange denklemi kullanılarak çözülür ve çözümde,

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (43)$$

elde edilir. Burada destek vektörleri sıfır olmayan α_i 'lere karşılık gelen veri altkümesidir.

En büyük aralık sınıflandırıcısı basittir ve doğrusal ayrıştırılabilen sınıflandırma için önerilmiştir. Ancak veriler doğrusal olarak sınıflandırılmadığında ya da gürültü nedeniyle sınıflar üstüste çakıştığında, optimizasyon problemine yanlış sınıflandırmayı içeren ek bir değer ($\xi_i \geq 0$) ilave edilir (CORTES, 1995).

$$y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \quad \forall i \quad (44)$$

Bu durumda kullanılan işlev $\Phi(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i$ şekline dönüşür ve $C > 0$ parametresi

Lagrange çarpanlarını üstten sınırlayarak aralık enbüyüklemesi ile eğitim hatası enküçüklemesi arasındaki ilişkiyi belirler.

Verilerin doğrusal olarak ayrıştırılmadığı her iki durum için de, giriş uzayı X 'ten verilerin doğrusal olarak sınıflandırılabilceği daha büyük (bazen sonsuz) boyutlu H Hilbert uzayına ϕ dönüşümü ile geçişi sağlayan bir çekirdek işlevi, K , kullanılmaktadır.

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \phi(\mathbf{x}) \cdot \phi(\mathbf{z}), \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{z} \in X \quad (45)$$

H 'daki iç çarpım, çekirdek hilesi olarak bilinen bir değişim sayesinde ϕ işlevinin açık ifadesine gerek kalmadan hesaplanmaktadır. Böylece bir uzayda iç çarpım olup olmadığını belirleyen Mercer şartını sağladığı sürece en iyi ayırıcı yüzeyi oluşturmak için herhangi bir işlev kullanılabilir (CORTES, 1995). En sık kullanılan çekirdek işlevleri,

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{z} + 1)^d \quad : \text{çokterimli}$$

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad : \text{radyal taban işlevi}$$

olarak verilebilir. Ayrıca belirli amaçlar ve uygulamalar için bir çok çekirdek işlevi bulunmaktadır (SHAWE-TAYLOR et al, 2004). Bir çekirdek işlevi kullanıldığında elde edilen sınıflandırıcı

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, \mathbf{x}_i) + b\right) \text{ ile ifade edilir.}$$

Destek vektör makinaları esas olarak iki sınıf sınıflandırması için tasarlanmış olmasına rağmen birebir ve bire-tüm metotları kullanılarak çok sınıflı sınıflandırma gerçekleştirilmektedir. Her ikisi de çok sınıflandırma problemini iki sınıf sınıflandırma problemlerinin toplamı olarak ele almaktadır. k sınıf sınıflandırma için, bire-tüm metodu bir sınıf ile kalan $k - 1$ sınıf arasında yüzeyi oluştururken, bire-bir metodunda her olası sınıf çifti

arasındaki $k(k-1)/2$ sayısındaki yüzeyler oluşturulmaktadır. Her iki yöntemde de belirlenen bir seçme kuralı ile karar verilmektedir (WESTON, 1998). Bu proje dışında yapılmış daha önceki çalışmalarımızda elde ettiğimiz sonuçlara dayanarak bu çalışmada bire-tüm yöntemi seçilmiştir.

7.2 Sınıflandırıcının eğitim ve test edilmesi

Testlerde amaç öz-nitelik vektörü ve sınıflandırıcı seçiminin yerinde olup olmadığının doğrulanmasıdır. Bunun için çok sayıda veri noktası elde edip testler yapmak gerekli görülmüştür. Toparlanan kayıtlar 5 saniyelik parçalara ayrılmış ve 13 boyutlu ortalama-MFCC vektörleri hesaplanarak 13 boyutlu parametre uzayında veri noktaları elde edilmiştir. Daha sonra bu veri noktaları, farklı kayıtlardan alınmak şartıyla eğitim ve test için ayrılarak sınıflanma başarısı ölçülmüştür.

Testler, Veri:

7 adet çalgı için 7 adet sınıf oluşturulmuş ve testler için herbir çalgıdan aşağıdaki sayıda kayıtlar veritabanından toplanmıştır:

Kanun: 21 kayıt, Keman: 32 kayıt, Kemençe: 24 kayıt, Klarnet: 30 kayıt, Ney: 44 kayıt, Tanbur: 93 kayıt, Ud: 40 kayıt.

5 saniyelik parçalara ayrıldığında ve ortalama-MFCC vektörleri hesaplandığında elde edilen veri noktalarının sayısı Tablo 7.1'de belirtildiği gibidir.

Tablo 7.1: Çalgı tanıma testlerinde kullanılan 5 saniyelik parça sayıları.

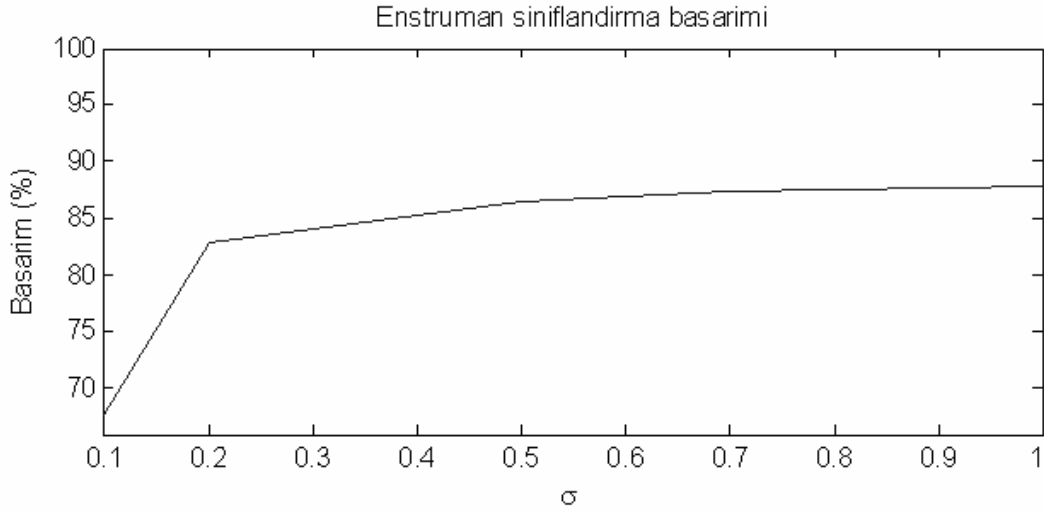
	Eğitim	Test	Toplam
Kanun	260	264	524
Keman	593	629	1222
Kemençe	257	281	538
Klarnet	715	727	1442
Ney	498	516	1014
Tanbur	2926	3032	5958
Ud	1000	1046	2046
Toplam	6249	6495	12744

(Eğitim ve testte kullanılan parçalar farklı kayıtlardan alınmaktadır.)

Testler, Eğitim ve Başarı oranları:

Elimizdeki verilerin rasgele olarak ayrıştırılan yarısı DVM'yi eğitmek, kalan yarısı da test etmek amacıyla kullanılmıştır. DVM'de kullanılan çekirdek işlevi olarak önceki çalışmalarımıza dayanarak radyal taban baz işlevi seçilmiş, parametre değeri σ ise, 0.1 den 1'e kadar 0.1'er adımla değiştirilmiştir. Sonuçlar elde edilirken istatistiksel analiz amacıyla çapraz-onaylama yöntemi kullanılmış, çapraz-onaylama set sayısı olarak 10 alınarak, set içindeki sınıfa ait eleman sayısı eşit oranlanacak şekilde seçilmiştir.

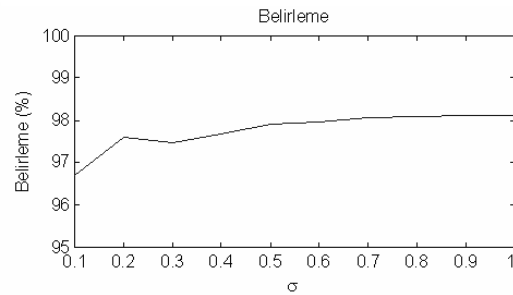
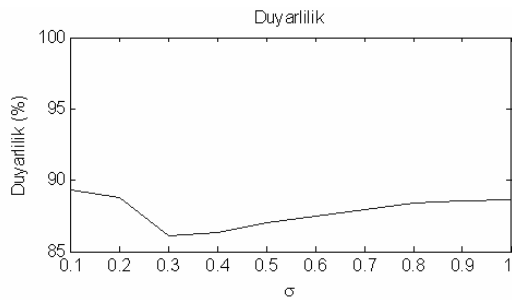
Sonuçlar, test örneklerinden her bir parametre değeri için elde edilen ortalama başarımlar olarak şekillerde verilmiştir. Ayrıca her bir parametre için ortalama karışım matrisleri hesaplanmış benzer değerlere örnek oluşturması açısından sadece $\sigma = 1$ için bulunan değerler tablolarda verilmiştir.



Şekil 7.3: Değişen parametre değerlerine göre başarımları.

Tablo 7.2: DVM ile belirlenen uzayın veriyi kapsama oranı.

Enstruman	Eğitim Seti		Test seti	
	5sn'lik parça sayısı	DVM ile belirlenen uzayın veriyi kapsama oranı (%)	5sn'lik parça sayısı	Başarı oranı (%)
Kemençe	240	99	274	94
Klarinet	696	99	716	87
Ney	471	86	500	68
Tanbur	2962	97	2882	86
Ud	984	100	1012	97
Kanun	233	82	269	37
Keman	581	91	609	76



Şekil 7.4: Değişen parametre değerlerine göre duyarlılık ve belirleme oranları.

Tablo 7.3: Karışım matrisi ($\sigma = 1$).

	Kanun	Keman	Kemence	Klarnet	Ney	Tanbur	Ud
Kanun	0.6225	0.0487	0.0233	0.1695	0.0165	0.2360	0.0021
Keman	0.0163	0.8185	0.0023	0.0476	0.0173	0.1062	0.0074
Kemence	0.0003	0	0.7797	0	0.0283	0.0180	0.0015
Klarnet	0.0129	0.0070	0.0018	0.8598	0.0018	0.0244	0.0038
Ney	0.0311	0.0119	0.0110	0.0302	0.7384	0.1139	0.0069
Tanbur	0.0165	0.0284	0.0210	0.0077	0.0403	0.9258	0.0126
Ud	0.0038	0.0065	0	0.0034	0.0013	0.0042	0.9546

Değerlendirme:

Sonuçlardan da gözleneceği gibi genel olarak başarı düzeyleri yüksek olup en düşük başarı kanun için elde edilmiştir. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü kanunun diğer çalgılardan farkı çok değişik boylarda teller içermesi bu sebeple genel tınısının çok renkli olmasıdır. Kısa telleri kullanıldığında ve uzun telleri kullanıldığında spektral enerji dağılımı farklılık gösterebilmektedir. Çok telli bir başka çalgı olan tanburla yüksek oranda karıştırılmış olması beklenen bir sonuçtur. Duyarlılık ve belirleme değerlerinin de yüksek olması, sonuçların istatistiksel olarak da doğruya yakınlığını göstermektedir.

8. Genel değerlendirme ve gelecekte yapılacak çalışmalar

Bu projede klasik Türk müziği kayıtlarının otomatik olarak analizi için literatürde ilk defa kullanılan yöntem ve teknikler önerilmiş, yazılımlar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların özellikle frekans verisinin dağılımsal özelliklerine dair bilgi birikimine önemli katkıda bulunduğu inanıyoruz. Bu alanda önerdiğimiz algoritmaların Türk müziği için kuramın iyileştirilmesi, akort cihazı tasarımı, çalgı yapımında kullanılacak araç tasarımı, interaktif eğitim sistemleri tasarımı konularında kullanılma potansiyelleri açıktır. Özellikle otomatik notaya dökme uygulaması birçok işaret işleme adımını içerdiği için projede birçok alanda öncü çalışma yapılmıştır.

Öncelikle temel titreşim frekans analizi ve analizin başarısının test edilmesi için yazılımlar gerçekleştirilmiş, sonuç olarak oldukça yüksek düzeyde başarıyla çalışan bir sistem kurulmuştur. Toplanan ham ses verileri makamlarına göre sınıflanarak ve frekans analizleri yapılarak bir sembolik veritabanı oluşturulmuştur. Frekans analiz aracı ve veritabanı diğer araştırmacıların kullanımına açılmıştır¹³.

İkinci adım olarak frekans bilgisinden dağılımlar hesaplanmış ve bu dağılımlar, otomatik karar tespiti ve otomatik makam tanıma uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmıştır. Batı dışı müzikler için bilinen ilk otomatik karar sesi tespit algoritması olan yazılımımız çok yüksek düzeyde başarı oranıyla çalışmaktadır: yapılan testlerde 268 (150 sentetik, 118 gerçek) kayıttan sadece 1 tanesinde hata yaptığı gözlenmiştir.

¹³ <http://likya.iyte.edu.tr/eee/labs/audio/Main.html>

Kayıtlardan yola çıkarak otomatik makam sınıflandırması yapan literatürdeki ilk algoritma da projemiz dahilinde gerçekleştirilmiştir. 9 makam ayırmada %79, 16 makam ayırmada %60 (F ölçütü cinsinden) başarıyla çalışan algoritmamız temelde aynı veya çok benzer dizileri kullanan makamları karıştırmakta, farklı dizileri kullanan makamları büyük başarıyla birbirinden ayırabilmektedir. Makam sınıflandırma testleri 35 makama kadar genişletilmiş, makamlar 10 grupta toplandığında başarı düzeyi (F ölçütü cinsinden) %75 olarak gözlemlenmiştir.

Yine literatürde ilk defa Türk müziğinin otomatik ritmik analizi üzerine bir ön çalışma yapılmış, Batı müziği ritmik analiz literatüründe en sık kullanılan algoritmanın Türk müziği analizi açısından potansiyeli incelenmiştir.

Türk müziği için kuram - icra uyum / uyumsuzluk düzeyinin ölçümüne dair bugüne kadar yapılmış en kapsamlı çalışma da (proje dışından araştırmacıların da katkısıyla) bu proje içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Türk müziği işaretlerinin başlangıç noktası tespiti üzerine yapılan özgün bir araştırma da Girit Üniversitesiyle işbirliğine gidilerek genişletilmiş, çeşitli algoritmaların Batı müziği ve Türk müziği işaretlerinde performanslarını karşılaştıran bir çalışma olarak sonlandırılmıştır.

Türk müziği çalgılarının otomatik sınıflandırılması üzerine özgün bir çalışma sonlandırılmıştır.

Son olarak kayıttan yola çıkarak nota ve MIDI yazmak için özgün bir yaklaşım kullanılmış, tasarlanan yapının bütün adımları sonuca ulaştırılarak algoritma bütünüyle gerçekleştirilmiştir. Varılan noktada nota ve MIDI yazımında hassasiyeti çok yüksek bir yazılım oluşturulmuştur. Ancak notada icranın tüm ayrıntılarının gösterilmesi kullanıcı açısından sorunludur. Müzisyenlerin etkin olarak kullanabileceği bir otomatik nota yazımına ulaşmak için algoritmanın son kısmına özetleme filtrelerinin eklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelecekte yapılmasını önerdiğimiz çalışmaları iki grupta düşünmek mümkündür: i) geliştirilen teknolojinin iyileştirilmesi, ii) çalışılan konular dışında kalan Türk müziği işaret işleme alanları.

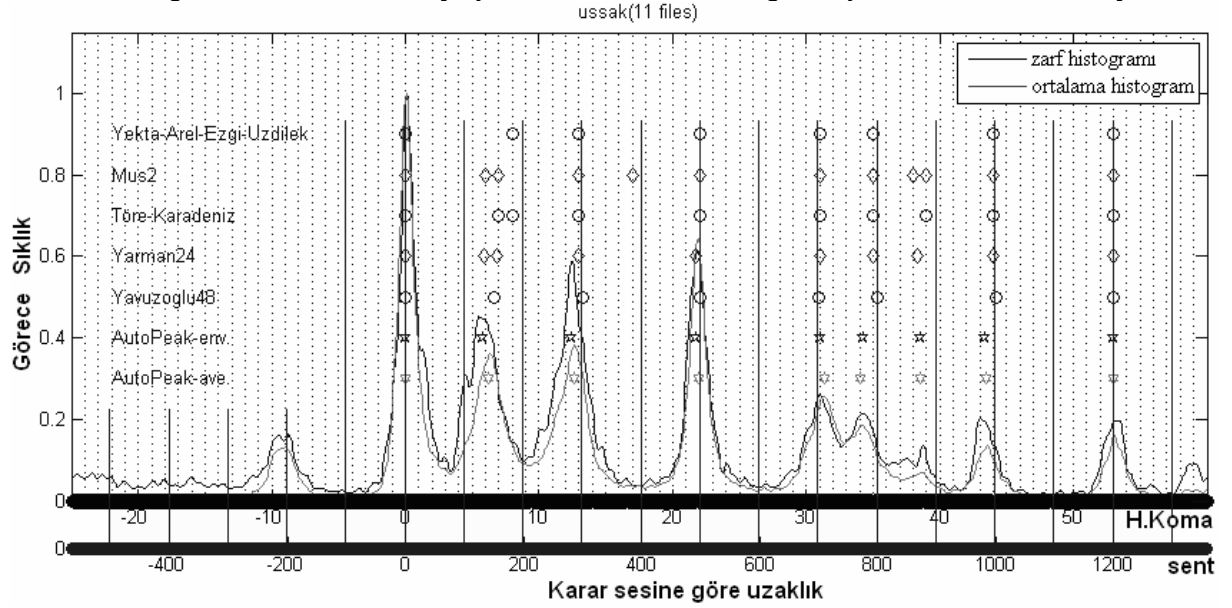
i) Sonuçlanan çalışmaların büyük kısmında başarı düzeyleri yüksek olmakla beraber bu projede ilk defa çalışılmış konular olmaları sebebiyle hemen hepsi geliştirilmeye açık konulardır. Özellikle nota yazımının son adımı olarak eklenecek özetleme filtrelerinin uygulamanın kullanılabilirliğini artıracığı açık olduğu için bu noktadan başlayarak algoritmadaki her bir adımın kalitesini artıracak çalışmalar yapmayı hedeflemekteyiz.

ii) Bununla beraber bu projede girilmeyen önemli bir alan, frekans verisinin zamansal değişim özelliklerinin, diğer bir deyişle "seyir" in incelenmesidir. Bu alanda birçok problem çalışılmayı beklemektedir. Çıkış noktası olarak kullanılabilir bir dizi sorudan hemen aklı gelenler: Kuramda tarif edilen "seyir" e dair özellikler nasıl ölçülebilir? İcrayı müzikal cümlelerine nasıl ayırabiliriz? Müzikal cümleleri sınıflandırmak ve makamlara göre dağılımını incelemek mümkün müdür? İcra "tavır" ının hesaplamalı incelenmesi mümkün müdür? Makam algısı hangi değişkenlere bağlı olarak oluşur? Benzer müzikal kültürlerle karşılaştırmalı çalışma yapabilmek için uzaklık metrikleri tanımlamak mümkün müdür?

EK-1: Kuram - icra uyum analiz sonuçları

Bu kısım Bölüm 5'in eki olarak hazırlanmıştır. Verilerin hazırlanmasıyla ilgili detaylar için Bölüm 5'e bakınız. Veriler iki grup halinde sunulmuştur:

- 9 sık kullanılan makam için histogram ve tablolar 5 ayrı kuramla karşılaştırmalı olarak ve Batı müziğinde kullanılan 12 eşit yedirimli ses kuramı ızgarasıyla beraber sunulmuştur. Bu gruptaki tüm şekil ve tablolar (BOZKURT et al, 2009)'tan alınmıştır. Tablolarda icraya en uyumlu kuramı belirtebilmek için en düşük fark ve karmaşıklık değerleri koyu olarak işaretlenmiştir. Farklar hem zarf histogramı kullanılarak (M_e ve D_e için), hem de ortalama histogram kullanılarak (M_a ve D_a için) hesaplanmıştır.
- 28 diğer makam için histogramlar (Y)AEU kuramıyla karşılaştırmalı olarak ve Batı müziğinde kullanılan 12 eşit yedirimli ses kuramı ızgarasıyla beraber sunulmuştur.

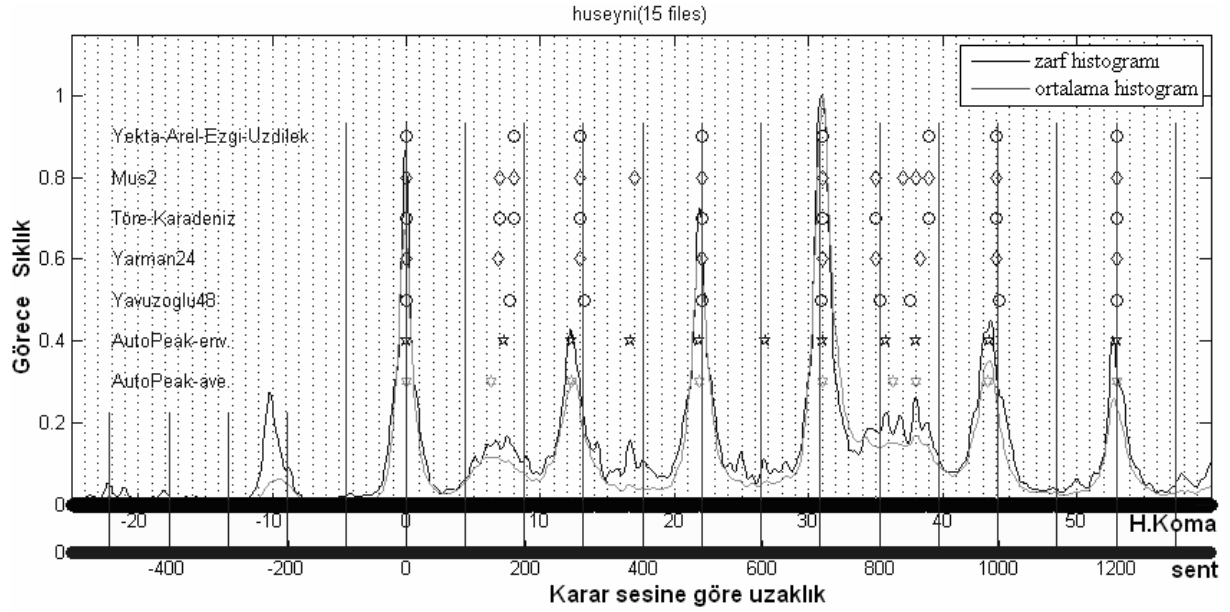


Şekil EK-1.1: Uşşak makamı için 11 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.1: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Uşşak	Holder Koması cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a	E	C		
YAEU	7.97	12.99	22	31	34.99			43.99	2.24	0.74	1.69	0.68	100	75		
Mus2	6	7	13	17	22	31	35	38	39	44	0.74	0.43	1.01	0.45	70	86.8
TK	7	8	13		22	31	35		39	44	1.27	0.57	1.01	0.52	87.5	82.9
Yarman24	5.84	6.87	12.99		21.74	31	34.99	38.33		43.99	0.73	0.34	1	0.44	87.5	70.8
Yavuzoğlu48	6.63		13.25		22.08	30.92	35.33			44.17	1.07	0.68	1.35	0.61	100	87.5
AutoPeak-env.	5.73	12.41			21.78	31.04	34.26	38.52		43.34						
AutoPeak-ave.	6.28	12.62			21.89	31.36	33.99	38.53		43.43						

Uşşak	Sent cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU		180.5	294.1		498.1	701.9	792.2		996	50.7	16.8	38.3	15.4	
Mus2	135.8	158.5	294.3	384.9	498.1	701.9	792.5	860.4	883	996.2	16.8	9.7	22.9	10.2
TK	158.5	181.1	294.3		498.1	701.9	792.5		883	996.2	28.8	12.9	22.9	11.8
Yarman24	132.2	155.5	294.1		492.2	701.9	792.2	867.8		996	16.5	7.7	22.6	10
Yavuzoğlu48	150		300		500	700	799.9			1000	24.2	15.4	30.6	13.8
AutoPeak-env.	129.7		281		493.1	702.8	775.7	872.2		981.2				
AutoPeak-ave.	142.2		285.7		495.6	710.0	769.6	872.4		983.3				

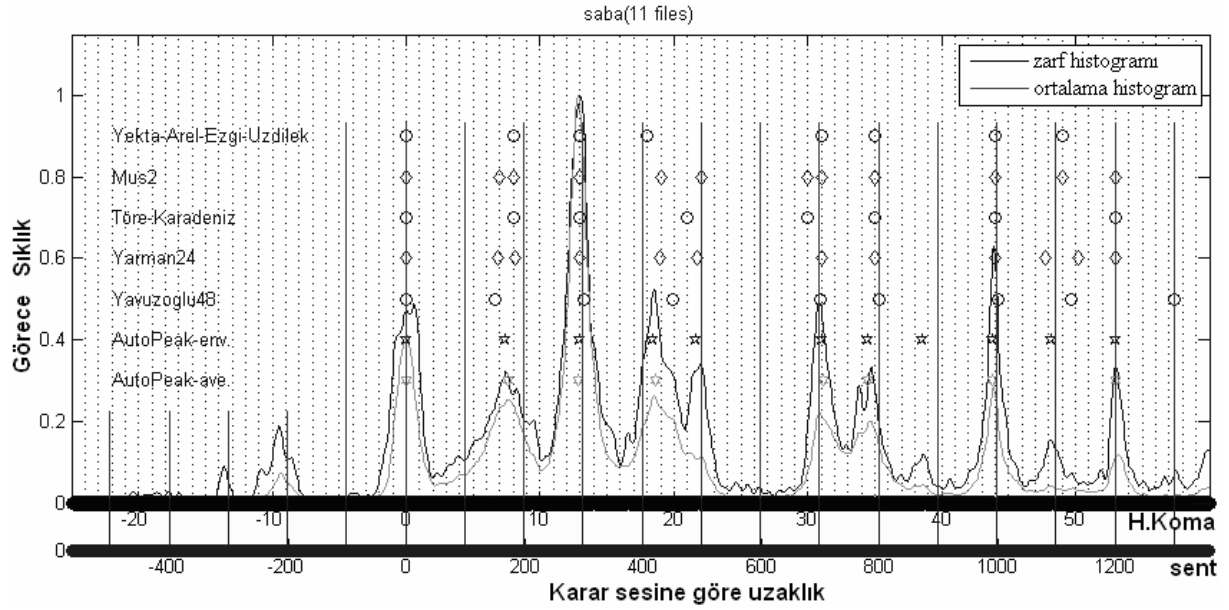


Şekil EK-1.2: Hüseyni makamı için 15 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.2: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Hüseyni	Holder Koması cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a	E	C	
YAEU	7.97	12.99	22	31					38.97	43.99	0.96	0.52	1.6	0.68	100	75	
Mus2	7	8	13	17	22	31	35	37	38	39	44	0.71	0.34	0.66	0.41	68.2	85.8
TK	7	8	13	22	31	35			39	44	0.99	0.5	1.34	0.65	87.5	82.9	
Yarman24	6.87	12.99	22	31	34.99	38.33			43.99		0.73	0.42	1.35	0.53	100	70.8	
Yavuzoglu48	7.73	13.25	22.08	30.92	35.33	37.54			44.17		0.92	0.48	1.36	0.7	100	85.4	
AutoPeak-env.	7.28	12.33	16.74	21.81	26.76	30.98	35.71		38.01	43.38							
AutoPeak-ave.	6.37	12.35	21.81	31.05	36.34	37.98			43.36								

Hüseyni	Sent cinsinden aralıklar									M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU	180.5	294.1	498.1	701.9				882.3	996	21.7	11.8	36.2	15.4		
Mus2	158.5	181.1	294.3	384.9	498.1	701.9	792.5	837.7	860.4	883	996.2	16.1	7.7	14.9	9.3
TK	158.5	181.1	294.3	498.1	701.9	792.5			883	996.2	22.4	11.3	30.3	14.7	
Yarman24	155.5	294.1	498.1	701.9	792.2			867.8		996	16.5	9.5	30.6	12	
Yavuzoglu48	175	300	500	700	800			850		1000	20.8	10.9	30.8	15.8	
AutoPeak-env.	164.8	279.2	379	493.8	605.9	701.4	808.5		860.6	982.2					
AutoPeak-ave.	144.2	279.6	493.8	703.0	822.8			859.9		981.7					

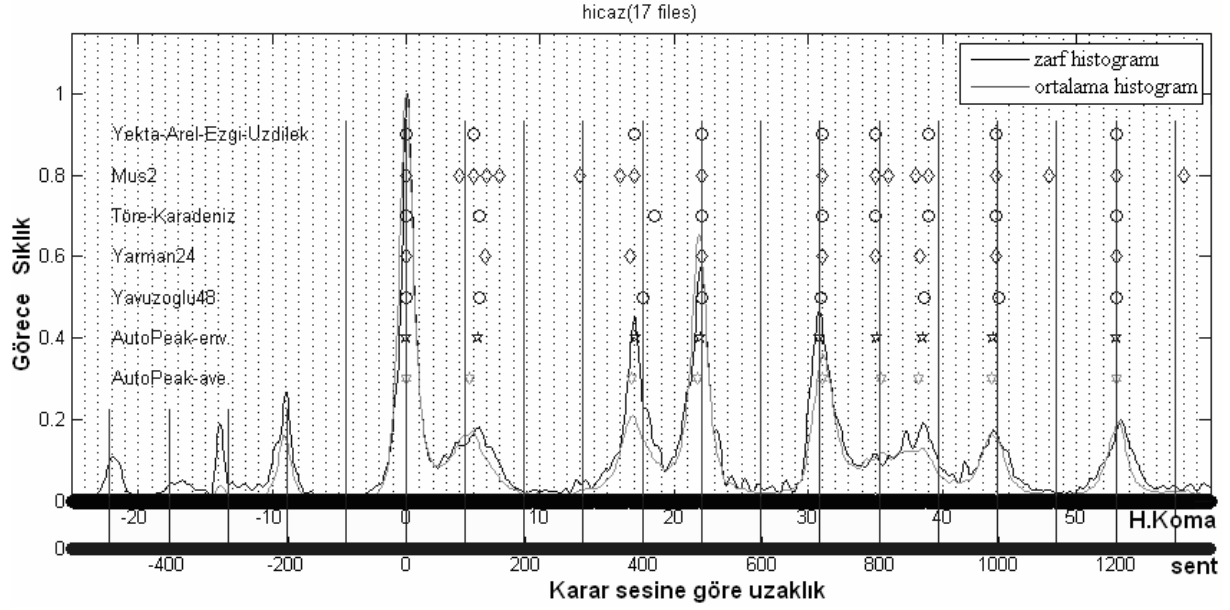


Şekil EK-1.3: Saba makamı için 11 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.3: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Saba	Holder Koması cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a	E	C
YAEU	7.97	12.99	18.01		31	34.99	43.99	49.02			0.88	0.37	0.69	0.33	92.8	72.9
Mus2	7	8	13	19	22	30	31	35	44	49	0.86	0.37	0.46	0.28	70	86.8
TK	8		13		21		30	35		44	0.97	0.49	2.3	0.78	100	85.4
Yarman24	6.87	8.06	12.99	18.88	21.74		31	34.99	43.99	47.72	0.52	0.27	0.45	0.26	70	70.8
Yavuzoglu48	6.63		13.25	19.88			30.92	35.33	44.17	49.69	1.55	0.76	1.18	0.67	92.8	86.5
AutoPeak-env.	7.39		12.89	18.42	21.67		30.97	34.53	38.49	43.85	48.14					
AutoPeak-ave.	7.61		12.79	18.7			31.14	34.54	43.81							

Saba	Sent cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a
YAEU	180.5		294.1	407.8			701.9	792.2	996	1109.9	19.9	8.4	15.6	7.5
Mus2	158.5	181.1	294.3	430.2	498.1	679.2	701.9	792.5	996.2	1109.4	19.5	8.4	10.4	6.3
TK	181.1		294.3		475.5		679.2	792.5	996.2		22	11.1	52.1	17.7
Yarman24	155.5	182.5	294.1	427.5	492.2		701.9	792.2	996	1080.5	11.8	6.1	10.2	5.9
Yavuzoglu48	150		300	450			700	800	1000	1125	35.1	17.2	26.7	15.2
AutoPeak-env.	167.3		291.8	417.1	490.6		701.2	781.8	871.5	992.8	1090			
AutoPeak-ave.	172.3		289.6	423.4			705.1	782.0	991.9					

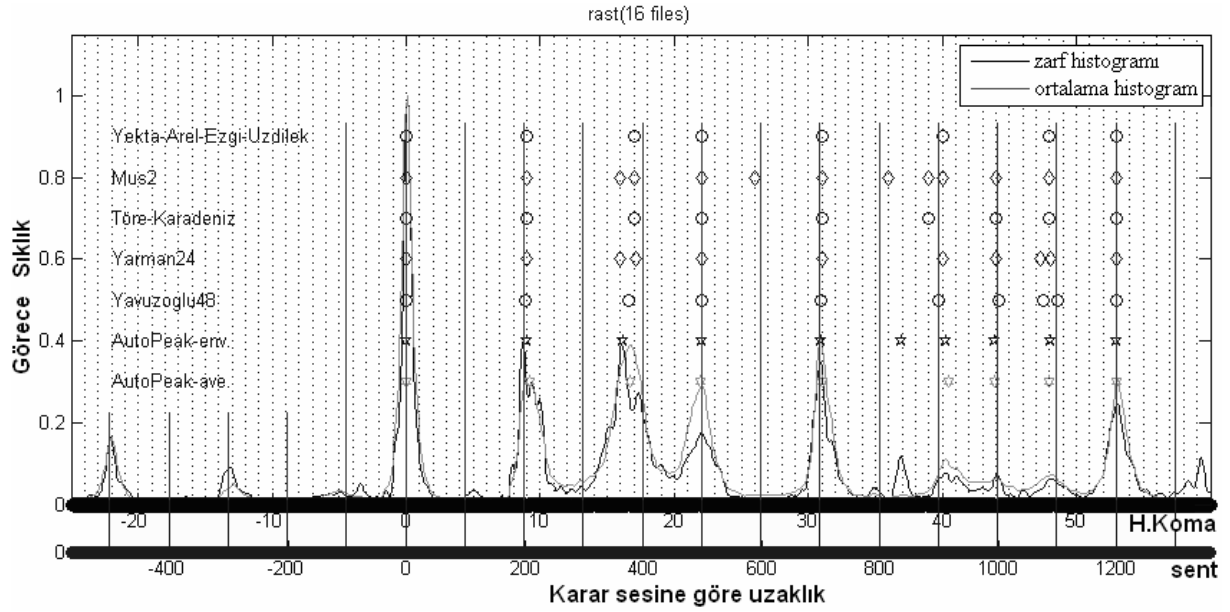


Şekil EK-1.4: Hicaz makamı için 17 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.4: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Hicaz	Holder Koması cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a	E	C							
YAEU	5.02	16.98	22	31	34.99	38.97	43.99	0.4	0.18	0.74	0.32	100	70.8								
Mus2	4	5	6	7	13	16	17	22	31	35	36	38	39	44	48	0.43	0.19	0.38	0.25	46.7	86.8
TK	5.5	18.5	22	31	35	39	44	1.46	0.38	1.69	0.61	100	82.9								
Yarman24	5.84	16.79	22	31	34.99	38.33	43.99	0.54	0.23	1.19	0.33	100	70.8								
Yavuzoglu48	5.52	17.67	22.08	30.92	38.65	44.17	0.62	0.26	0.87	0.51	100	87.5									
AutoPeak-env.	5.3	17.04	21.92	30.84	35.05	38.57	43.75														
AutoPeak-ave.	4.65	16.81	21.79	31.09	35.38	38.23	43.7														

Hicaz	Sent cinsinden aralıklar													M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU	113.7	384.5	498.1	701.9	792.2	882.3	996	9.1	4.1	16.8	7.2								
Mus2	90.6	113.2	135.8	158.5	294.3	362.3	384.9	498.1	701.9	792.5	815.1	860.4	883	996.2	1086.8	9.7	4.3	8.6	5.7
TK	124.5	418.9	498.1	701.9	792.5	883	996.2	33.1	8.6	38.3	13.8								
Yarman24	132.2	380.2	498.1	701.9	792.2	867.8	996	12.2	5.2	26.9	7.5								
Yavuzoglu48	125	400	500	700	875	1000	14	5.9	19.7	11.5									
AutoPeak-env.	120	385.8	496.3	698.3	793.6	873.3	990.6												
AutoPeak-ave.	105.3	380.6	493.4	703.9	801.1	865.6	989.4												

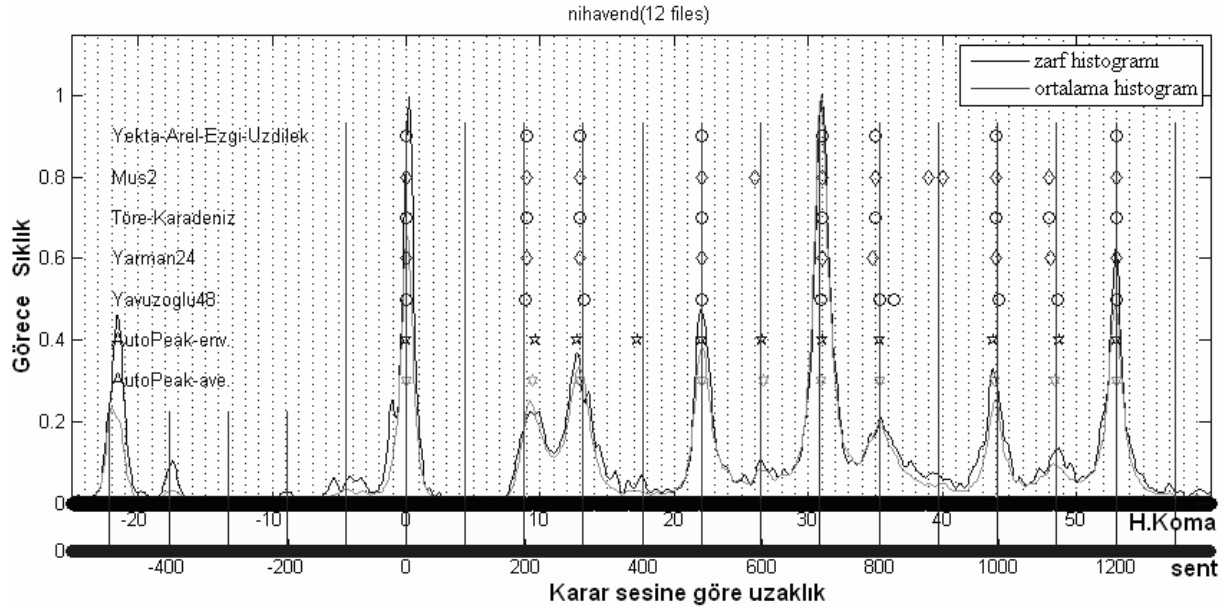


Şekil EK-1.5: Rast makamı için 16 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.5: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Rast	Holder Koması cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a	E	C		
YAEU	9.01	16.98	22	31		40.01				47.98	0.85	0.23	0.4	0.18	100	75		
Mus2	9	16	17	22	26	31	36	39	40	44	48	0.93	0.2	0.41	0.17	68.2	85.8	
TK	9		17	22		31			39	44	48	1.24	0.35	1.41	0.31	100	82.9	
Yarman24	9.01	15.88	17.06	22		31			40.01	43.99	47.33	48.07	0.26	0.11	0.42	0.18	77.8	70.8
Yavuzoglu48	8.83		16.56	22.08		30.92			39.75	44.17	47.48	48.58	0.49	0.27	0.66	0.31	87.5	85.4
AutoPeak-env.	9	16.13	21.99	30.88	36.93	40.24	43.94	48.12										
AutoPeak-ave.	9.17	16.64	21.9	31.02		40.41	43.91	48.01										

Rast	Sent cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU	204	384.5	498.1		701.9				905.9		1086.3	19.2	5.2	9.1	4.1	
Mus2	203.8	362.2	384.9	498.1	588.7	701.9	815.1	883.0	905.7	996.2	1086.8	21.0	4.5	9.3	3.8	
TK	203.8		384.9	498.1		701.9			883.0	996.2	1086.8	28.1	7.9	31.9	7.0	
Yarman24	204	359.5	386.3	498.1		701.9			905.9	996	1071.6	1088.4	5.9	2.5	9.5	4.1
Yavuzoglu48	200		375	500		700			900	1000	1075	1100	11.0	6.1	14.9	7.0
AutoPeak-env.	203.8	365.2	497.9		699.2	836.2	911.1	994.9	1089.5							
AutoPeak-ave.	207.6	376.8	495.8		702.3		914.9	994.2	1087.0							

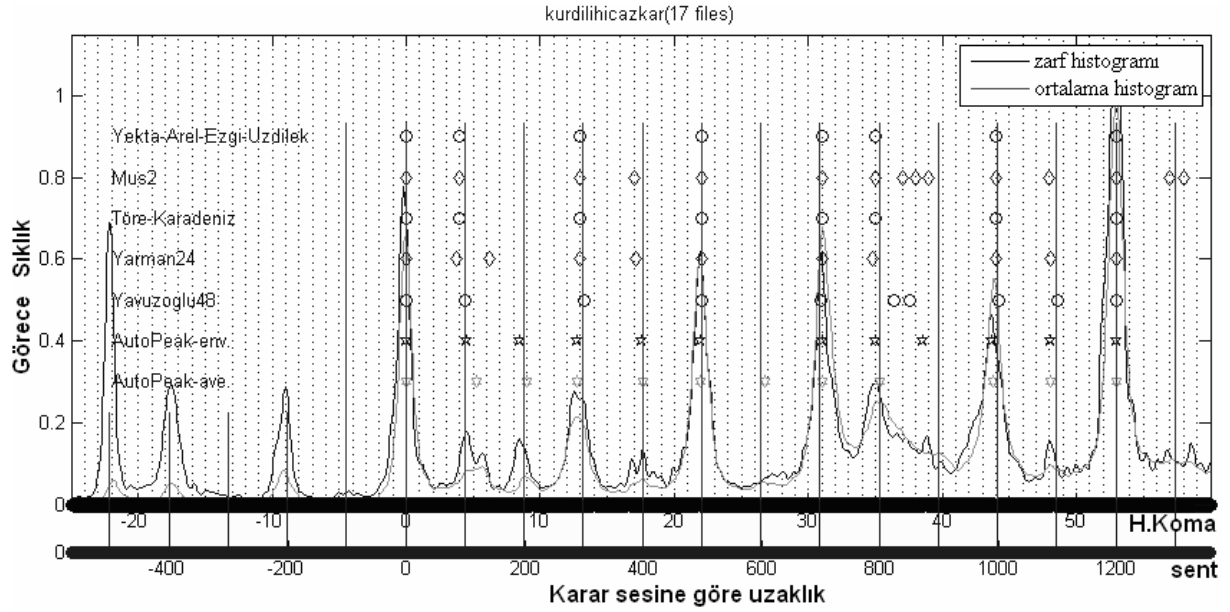


Şekil EK-1.6: Nihavend makamı için 12 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.6: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Nihavend	Holder Koması cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a	E	C		
YAEU	9.01	12.99	22	31	34.99			43.99	0.57	0.24	0.37	0.16	100	75		
Mus2	9	13	22	26	31	35	39	40	44	48	0.63	0.32	0.68	0.25	80	84.9
TK	9	13	22		31	35			44	48	0.63	0.3	0.38	0.19	100	82.9
Yarman24	9.01	12.9	22		31	34.82			43.99	48.07	0.58	0.3	0.49	0.19	100	70.8
Yavuzoglu48	8.83	13.25	22.08		30.92	35.33	36.44		44.17	48.58	0.75	0.25	0.55	0.2	87.5	85.4
AutoPeak-env.	9.58	12.74	17.26	22.08	26.48	31	35.35		43.8	48.63						
AutoPeak-ave.	9.38	12.9	22.07	26.68	30.95	35.31			43.94	48.36						

Nihavend	Sent cinsinden aralıklar								M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU	204	294.1	498.1		701.9	792.2			996	12.9	5.4	8.4	3.6	
Mus2	203.8	294.3	498.1	588.7	701.9	792.5	883.0	905.7	996.2	1086.8	14.3	7.2	15.4	5.7
TK	203.8	294.3	498.1		701.9	792.5			996.2	1086.8	14.3	6.8	8.6	4.3
Yarman24	204	292.1	498.1		701.9	788.4			996	1088.4	13.1	6.8	11.1	4.3
Yavuzoglu48	200	300	500		700	800	825		1000	1100	17.0	5.7	12.5	4.5
AutoPeak-env.	216.9	288.5	390.8	499.9	599.5	701.9	800.4		991.7	1101.1				
AutoPeak-ave.	212.4	292.1	499.7	604.1	700.8	799.5			994.9	1094.9				

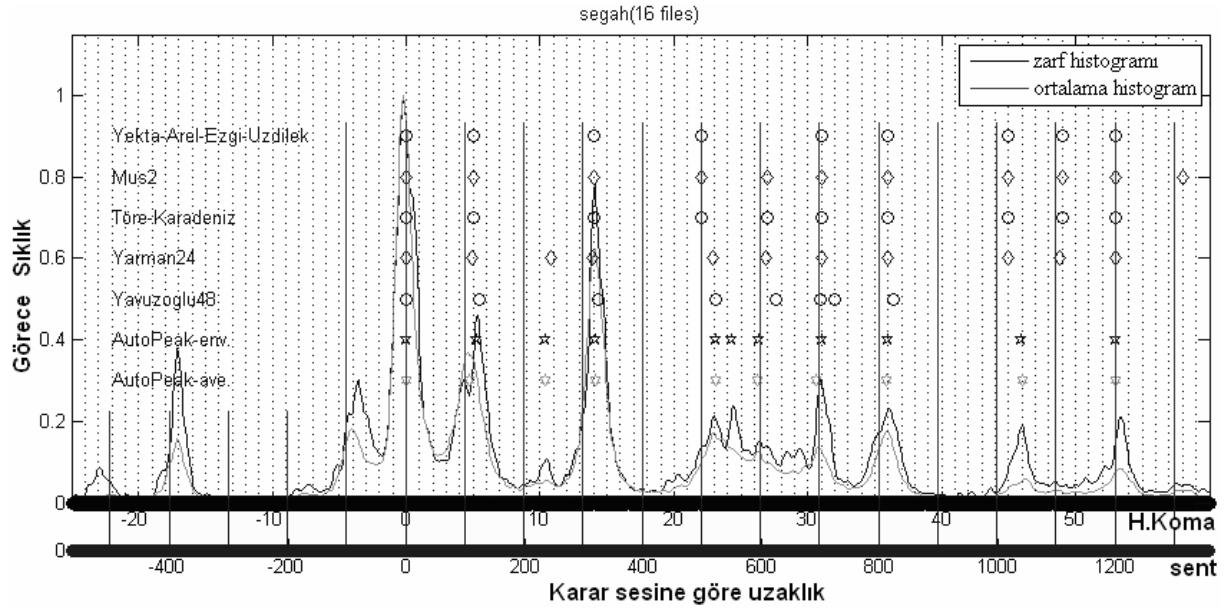


Şekil EK-1.7: Kürdilihicazkar makamı için 17 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.7: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

K.Hicazkar	Holder Koması cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a	E	C	
YAEU	3.99	12.99	22	31	34.99	43.99	0.53	0.2	1.27	0.39	100	75					
Mus2	4	13	17	22	31	35	37	38	39	44	48	0.58	0.25	1.26	0.38	77.3	84.0
TK	4	13	22	31	35	44						0.52	0.2	1.26	0.39	100	85.4
Yarman24	3.73	6.29	12.9	17.06	22	31	34.82	43.99	48.07			2.19	0.47	1.03	0.35	94.4	64.6
Yavuzoglu48	4.42	13.25	22.08	30.92	36.44	37.54	44.17	48.58				1.46	0.54	1.09	0.54	93.7	84.4
AutoPeak-env.	4.52	8.48	12.76	17.58	21.93	31.02	34.98	38.55	43.67	48.06							
AutoPeak-ave.	5.26	9	12.71	17.64	21.9	26.74	31.1	35.35	43.77	48.05							

K.Hicazkar	Sent cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a	
YAEU	90.3	294.1	498.1	701.9	792.2	996	12	4.5	28.8	8.8					
Mus2	90.6	294.3	384.9	498.1	701.9	792.5	837.7	860.4	883	996.2	1086.8	13.1	5.7	28.5	8.6
TK	90.6	294.3	498.1	701.9	792.5	996.2						11.8	4.5	28.5	8.8
Yarman24	84.5	142.4	292.1	386.3	498.1	701.9	788.4	996	1088.4			49.6	10.6	23.3	7.9
Yavuzoglu48	100	300	500	700	825	850	1000	1100				33.1	12.2	24.7	12.2
AutoPeak-env.	102.3	192	288.9	398.0	496.5	702.3	792	872.8	988.8	1088.2					
AutoPeak-ave.	119.1	203.8	287.8	399.4	495.8	605.434	704.1509	800.4	991	1087.9					

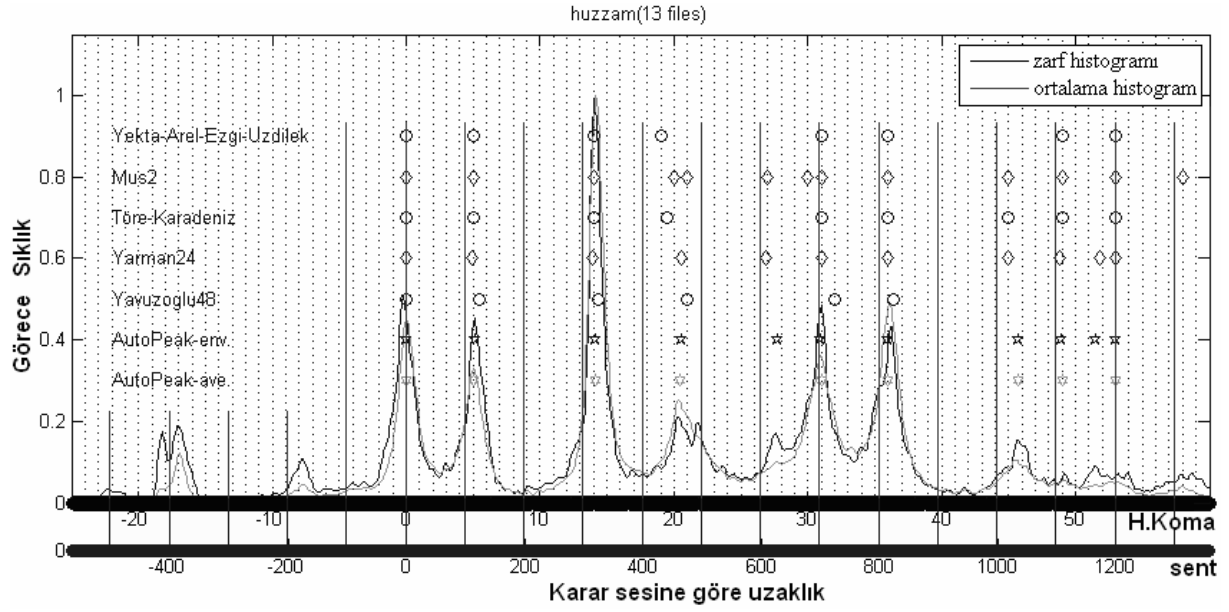


Şekil EK-1.8: Segah makamı için 16 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.8: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

Segah	Holder Koması cinsinden aralıklar								M _e	D _e	M _a	D _a	E	C	
YAEU	5.02	14.03	22		31	36.02	45.03	49.02	1.08	0.4	1.11	0.49	85.7	75	
Mus2	5	14	22		27	31	36	45	49	1.08	0.45	1.11	0.53	87.5	86.8
TK	5	14	22		27	31	36	45	49	1.08	0.45	1.11	0.53	87.5	82.9
Yarman24	4.93	10.82	13.94	22.95	26.93	31	35.94	44.94	48.84	0.96	0.34	1.06	0.4	88.9	66.7
Yavuzoglu48	5.52	14.35	23.19		27.6	30.92	32.02	36.44		1.29	0.42	1.34	0.55	85.7	87.5
AutoPeak-env.	5.23	10.33	14.15	23.08	24.28	26.31	31.03	35.95	45.9						
AutoPeak-ave.	4.68	10.32	14.08	23.11		26.27	30.69	35.87	46.01						

Segah	Sent cinsinden aralıklar								M _e	D _e	M _a	D _a		
YAEU	113.7		317.7	498.1		701.9		815.5	1019.5	1109.9	24.5	9.1	25.1	11.1
Mus2	113.2		317	498.1		611.3	701.9	815.1	1018.9	1109.4	24.5	10.2	25.1	12
TK	113.2		317	498.1		611.3	701.9	815.1	1018.9	1109.4	24.5	10.2	25.1	12
Yarman24	111.6	245	315.6	519.6		609.7	701.9	813.7	1017.5	1105.8	21.7	7.7	24	9.1
Yavuzoglu48	125		325	525		625	700	725	825		29.2	9.5	30.3	12.5
AutoPeak-env.	118.4	233.9	320.4	522.6	549.7	595.7	702.6	814	1039.2					
AutoPeak-ave.	106	233.7	318.8	523.2		594.8	694.9	812.2	1041.7					



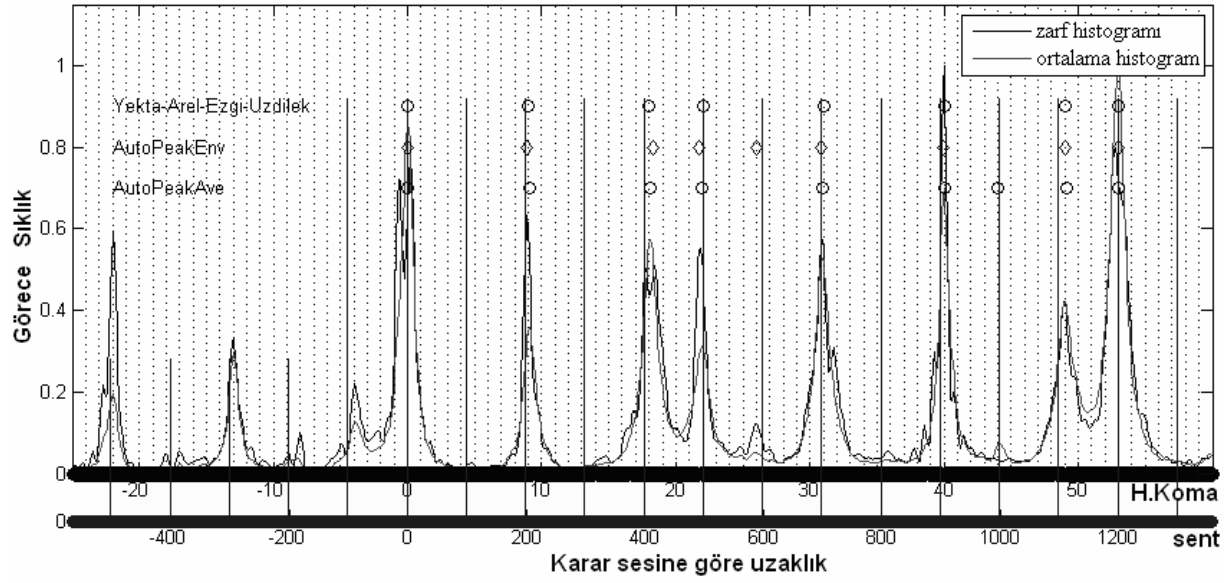
Şekil EK-1.9: Hüzam makamı için 13 kayıttan elde edilen ortalama ve zarf histogramlarının kuramsal aralıklarla beraber gösterimi.

Tablo EK-1.9: Kuramsal aralıklar, icradan yapılan ölçümler ve fark değerleri.

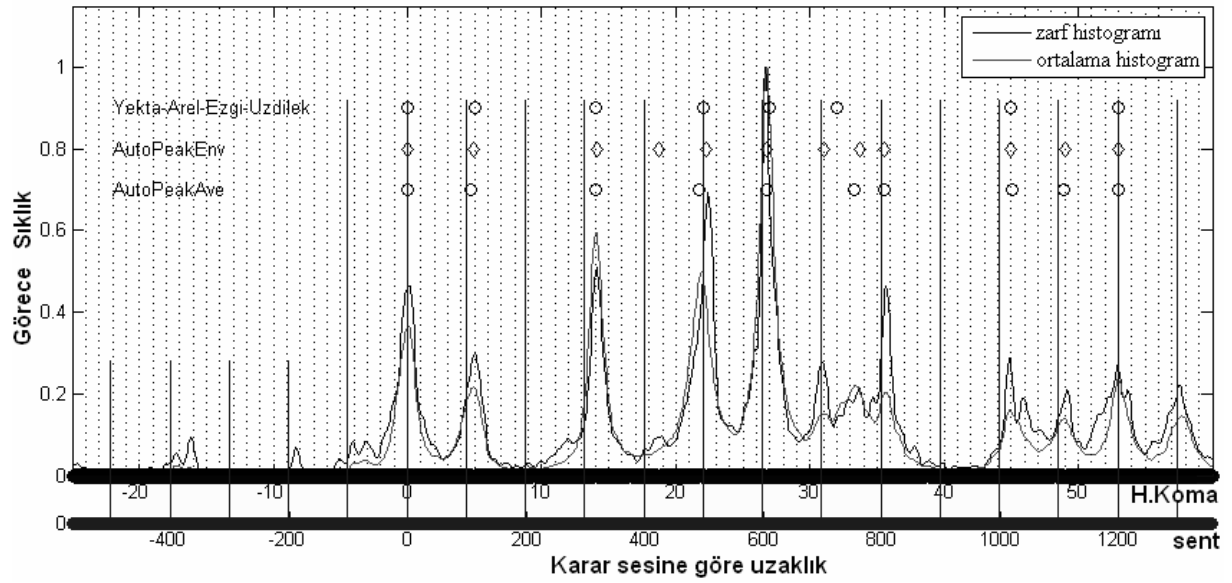
Hüzam	Holder Koması cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a	E	C
YAEU	5.02	14.03	19.05				31	36.02	49.02		1.42	0.3	1.4	0.28	100	75
Mus2	5	14	20	24	27	30	31	36	45	49	0.75	0.29	0.66	0.2	75	85.8
TK	5	14	19.5				31	36	45	49	0.97	0.3	0.95	0.27	100	82.9
Yarman24	4.93	13.94	20.59		26.93		31	35.94	44.94	48.84	0.82	0.3	0.71	0.2	88.9	66.7
Yavuzoglu48	5.52	14.35	20.98				32.02	36.44			1.11	0.54	1.05	0.54	100	89.6
AutoPeak-env.	5.11	14.12	20.47		27.75		30.91	35.98	45.74	48.95	51.46					
AutoPeak-ave.	4.99	14.17	20.45				30.97	36.03	45.66	48.98						

Hüzam	Sent cinsinden aralıklar										M_e	D_e	M_a	D_a		
YAEU	113.7	317.7	431.3					701.9	815.5	1109.9	32.2	6.8	31.7	6.3		
Mus2	113.2	317	452.8	475.5	611.3	679.2		701.9	815.1	1018.9	1109.4	17	6.6	14.9	4.5	
TK	113.2	317	441.5					701.9	815.1	1018.9	1109.4	22	6.8	21.5	6.1	
Yarman24	111.6	315.6	466.2		609.7			701.9	813.7	1017.5	1105.8	1173.1	18.6	6.8	16.1	4.5
Yavuzoglu48	125	325	475					725	825				25.1	12.2	23.8	12.2
AutoPeak-env.	115.7	319.7	463.5		628.3			699.8	814.6	1035.6	1108.3	1165.1				
AutoPeak-ave.	113	320.8	463.0					701.2	815.8	1033.8	1109					

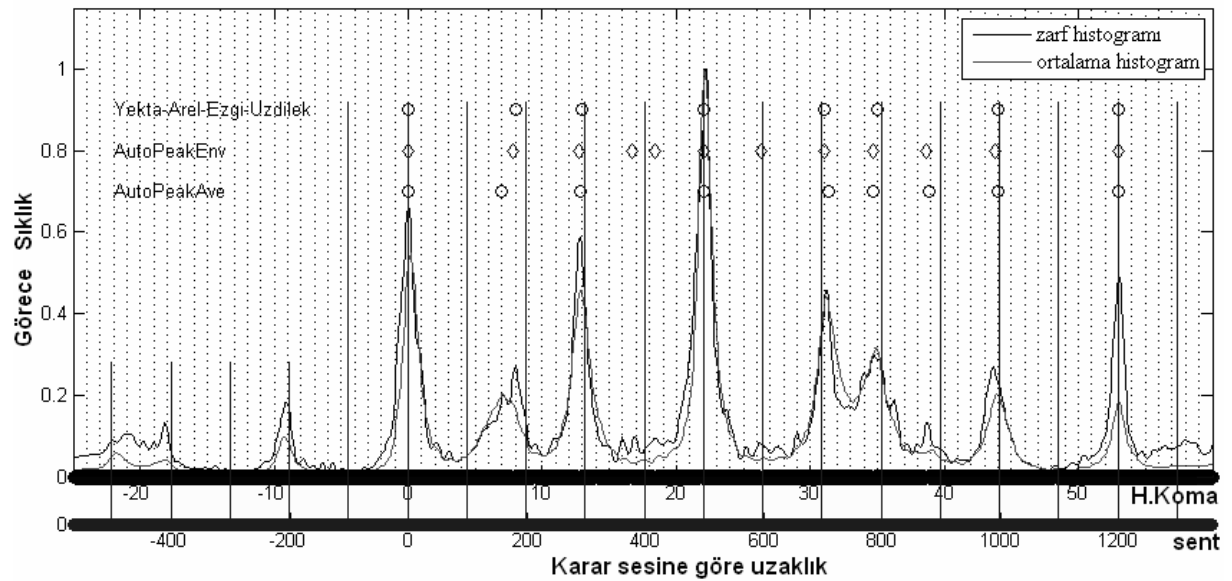
acemasiran(18 files)

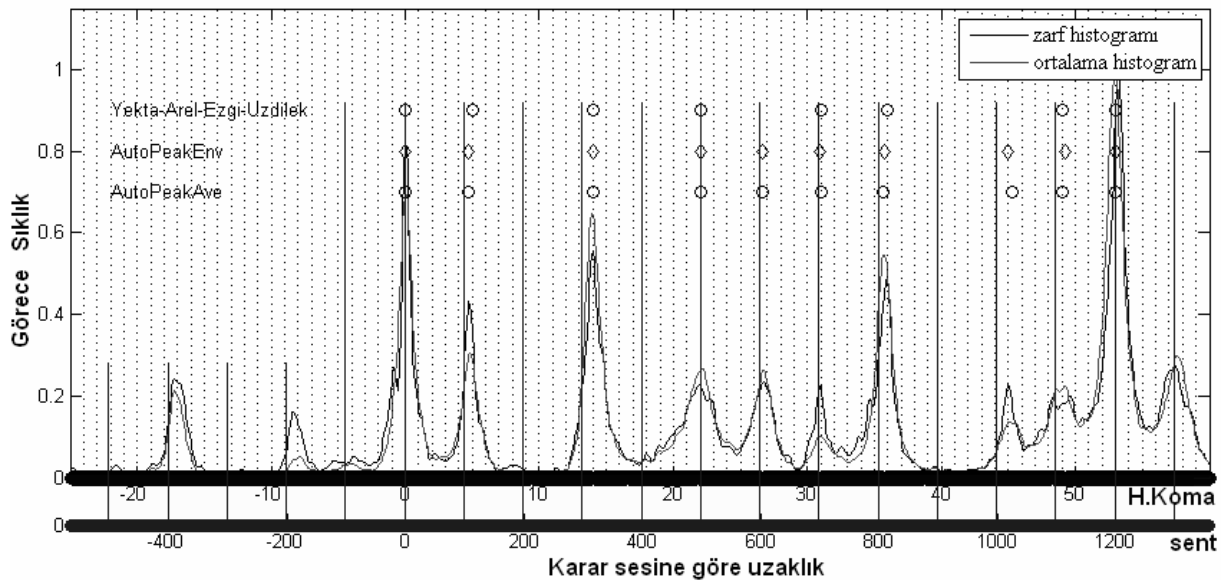
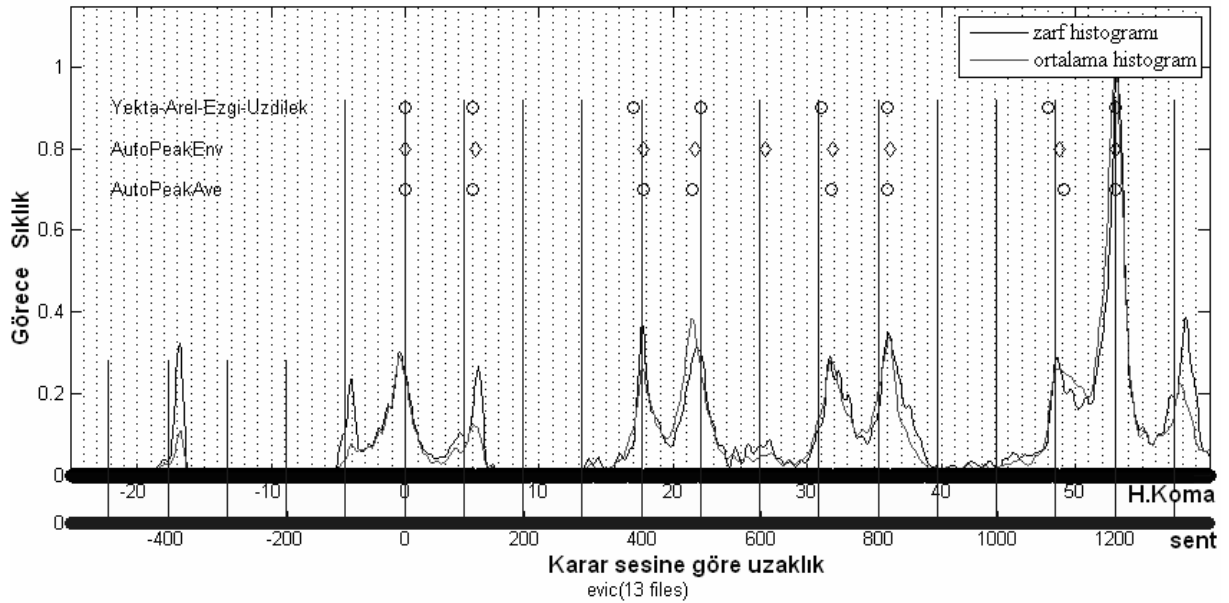
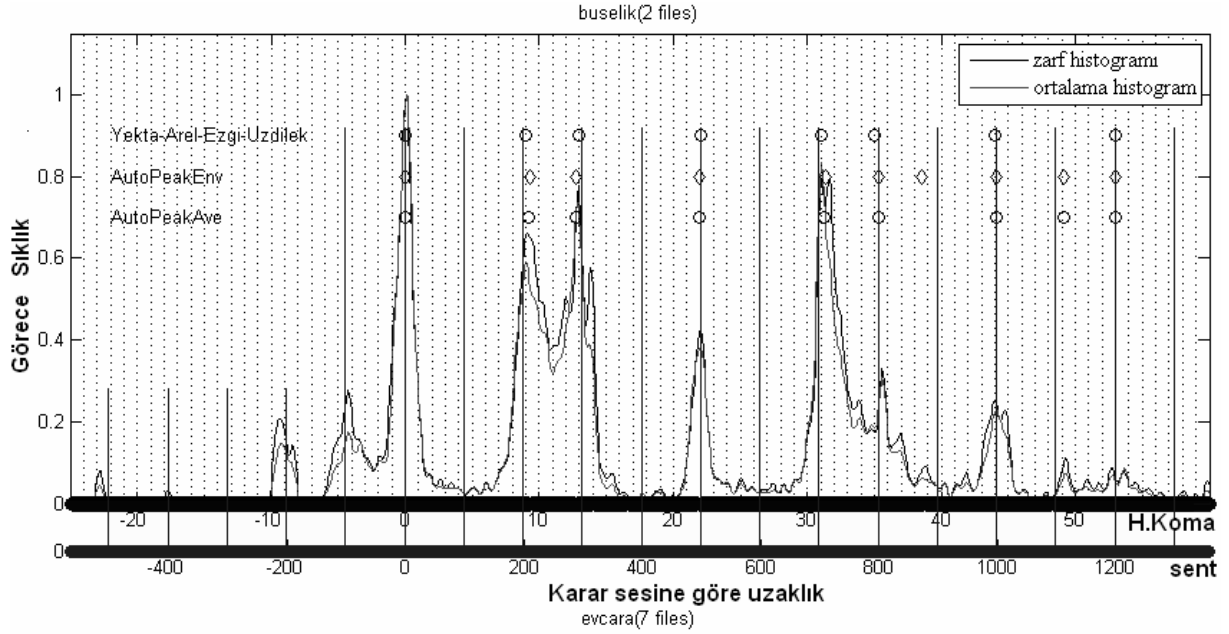


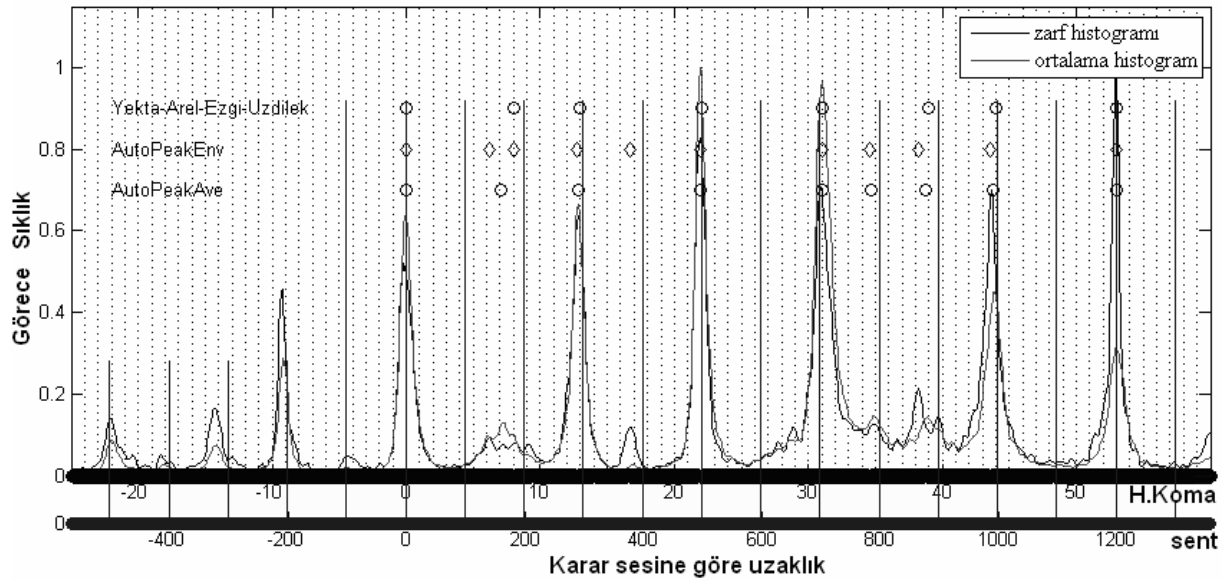
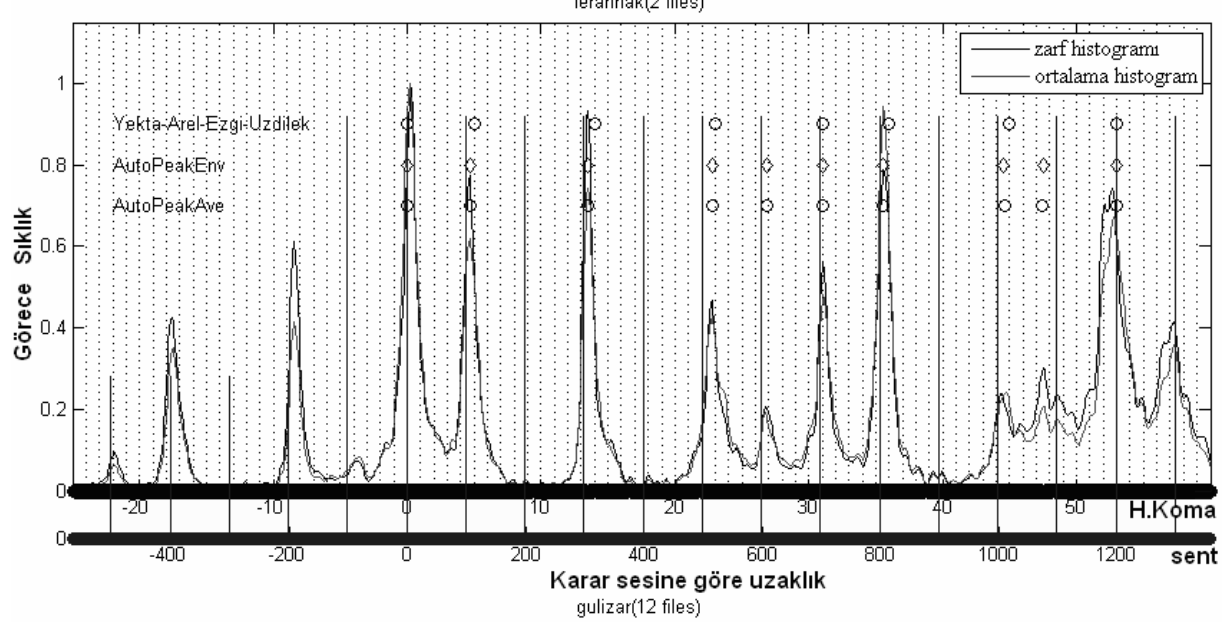
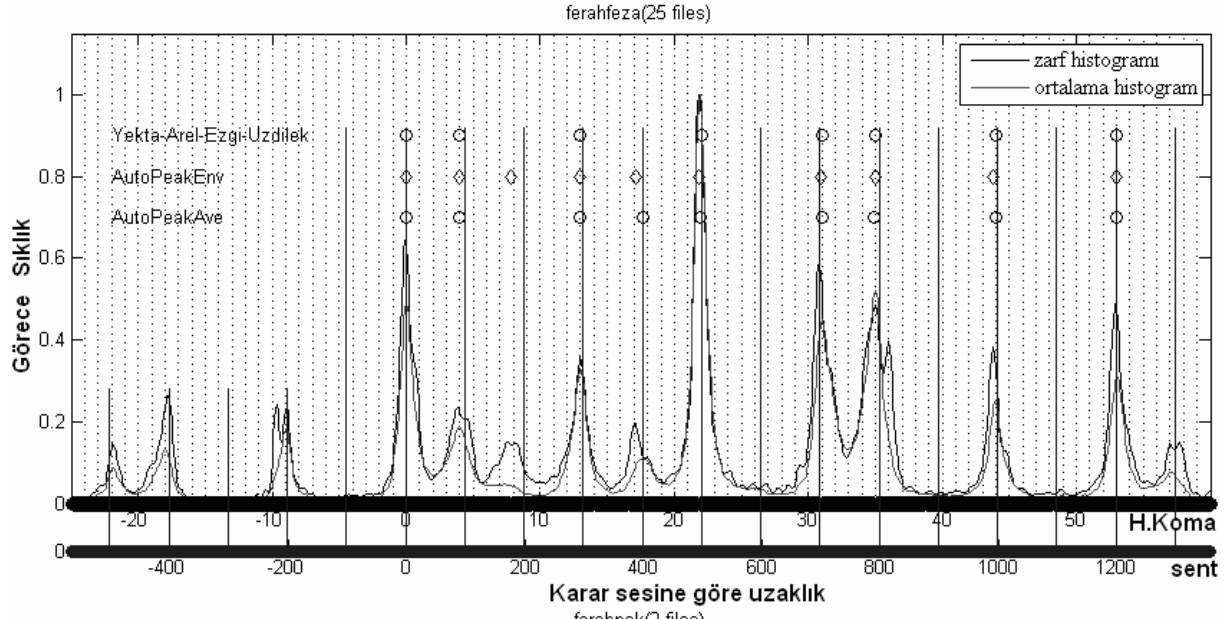
bestenigar(20 files)

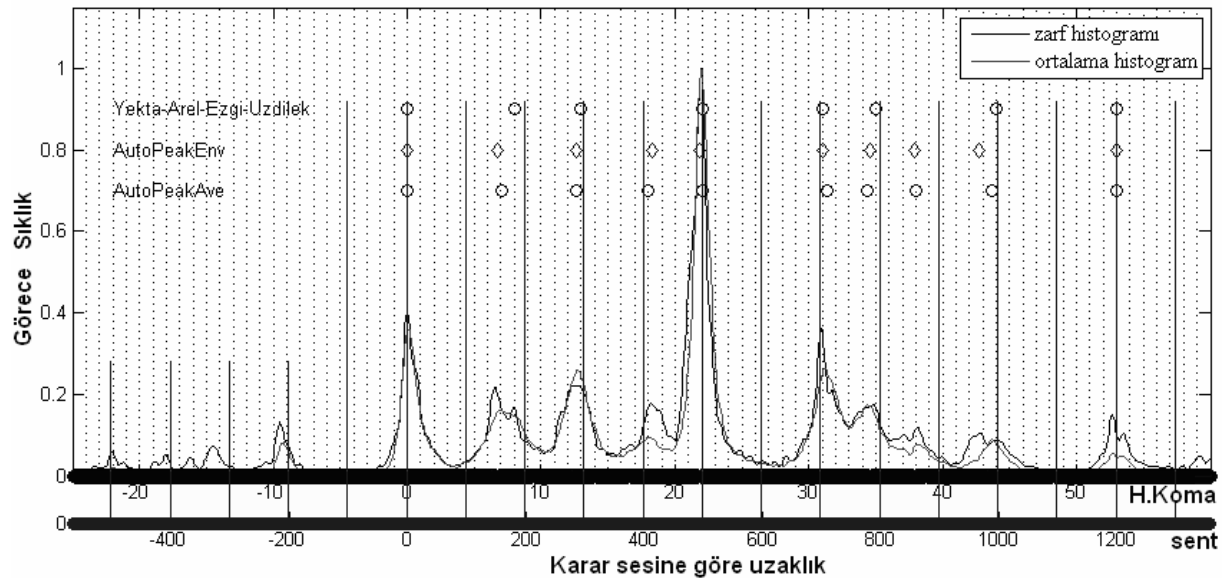
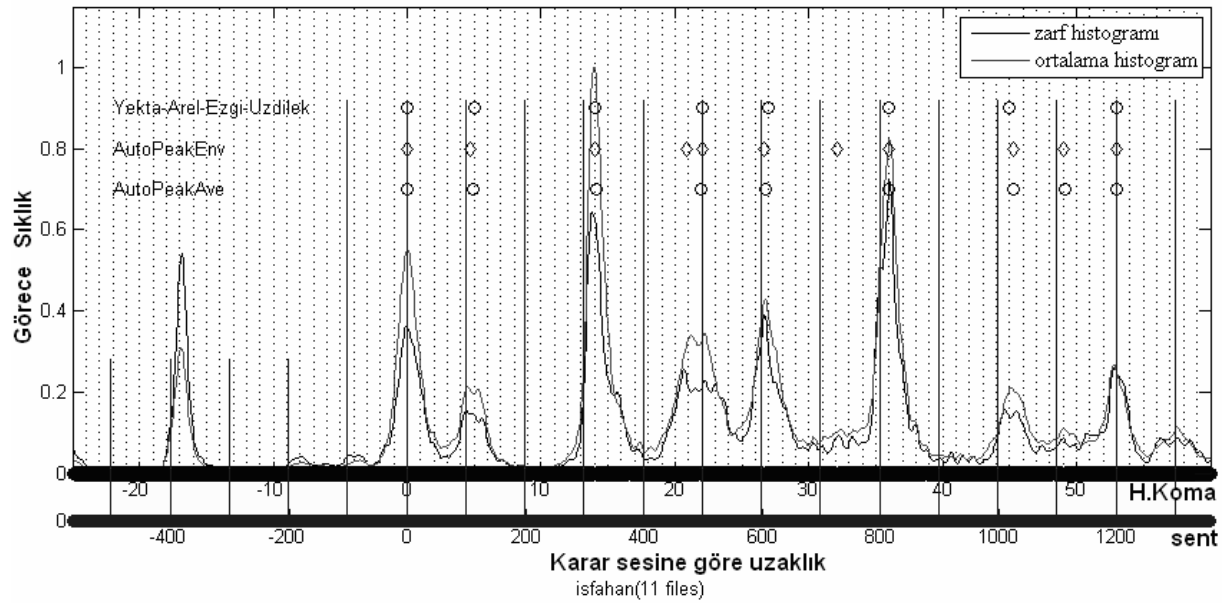
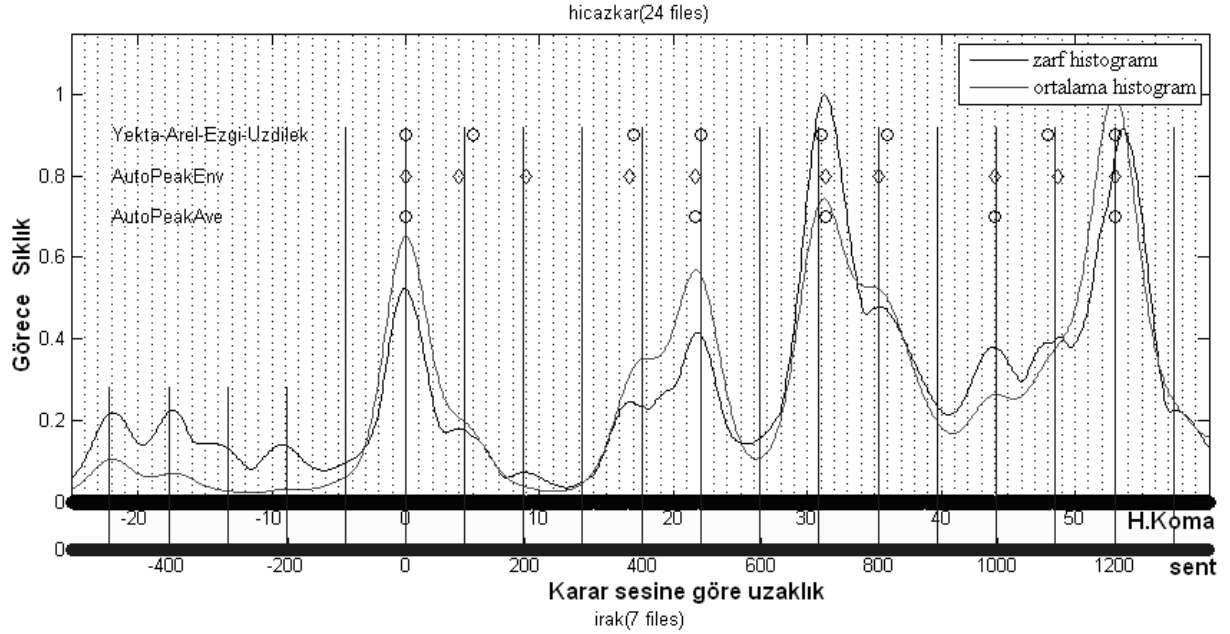


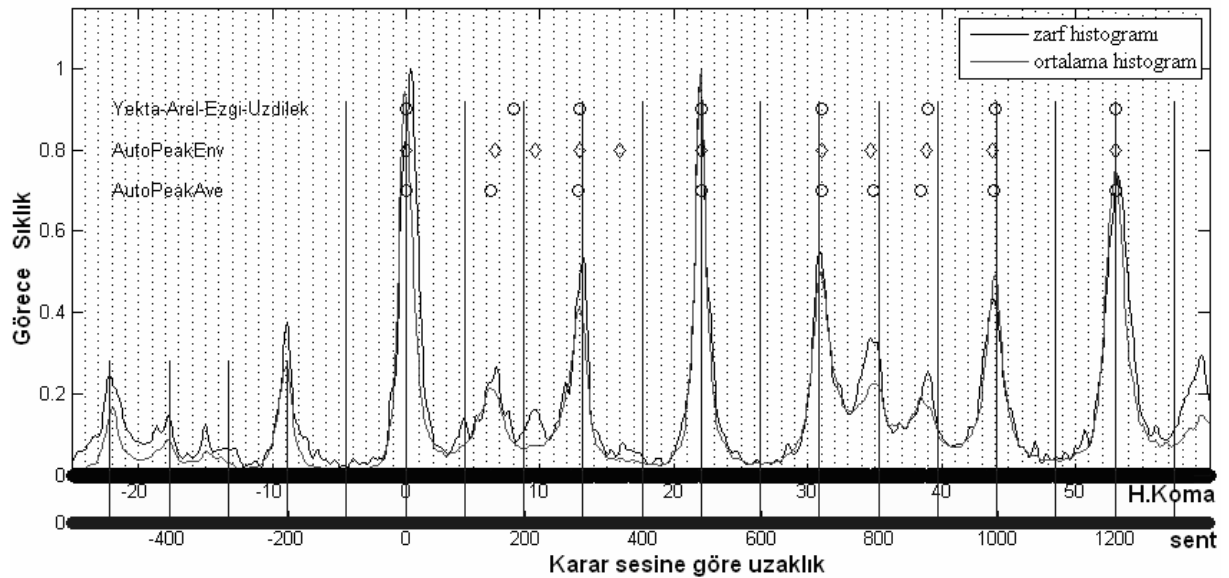
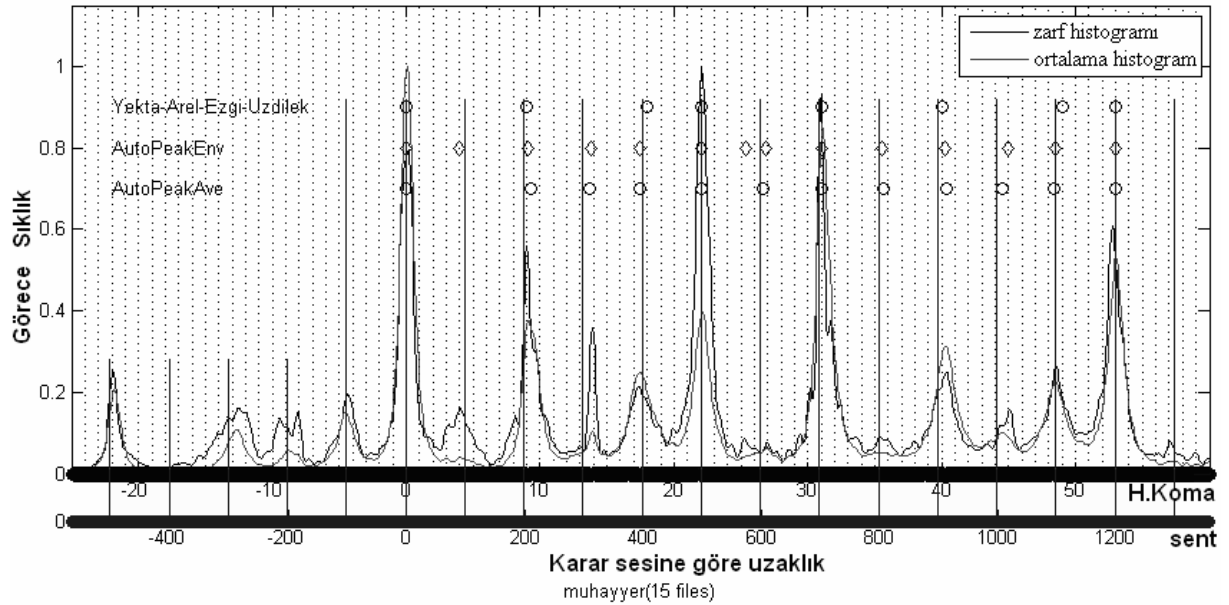
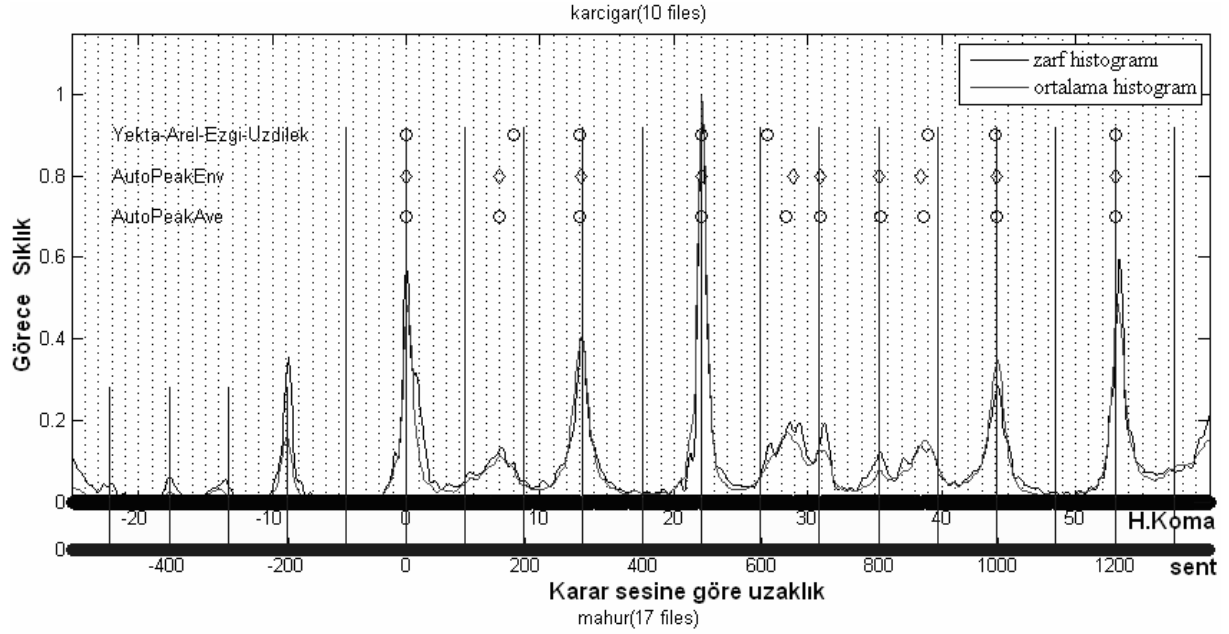
beyati(18 files)

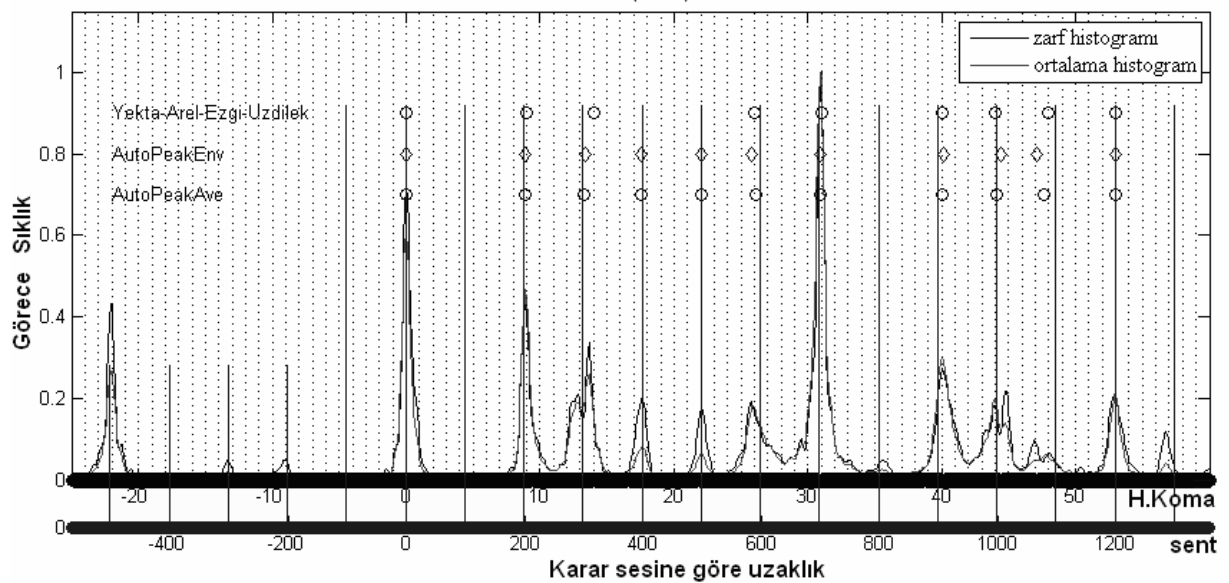
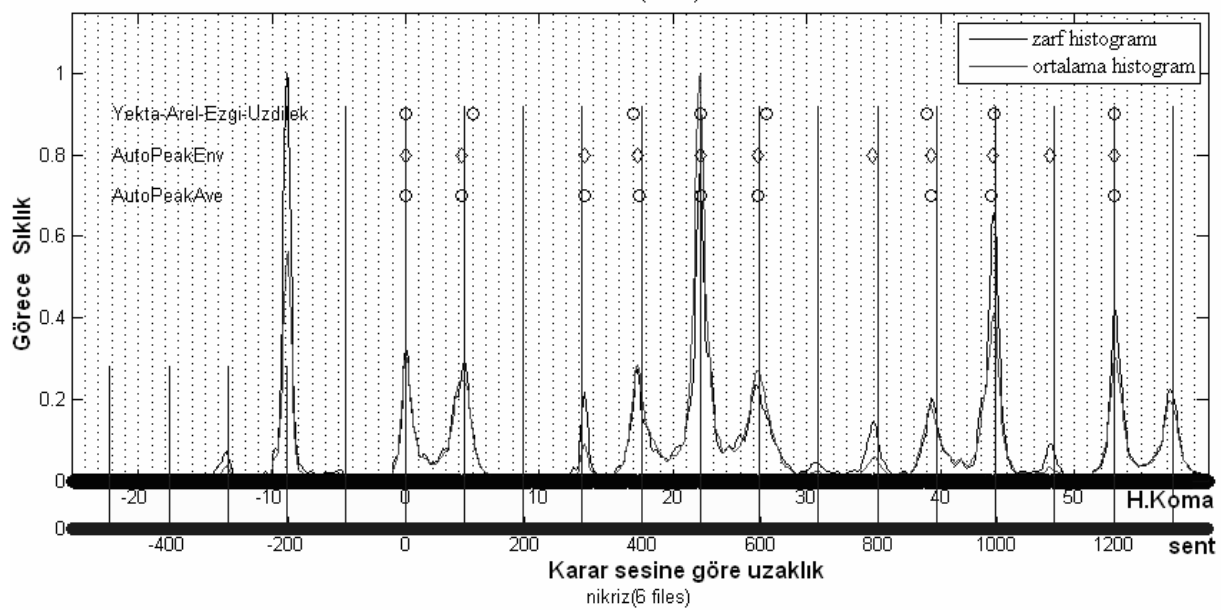
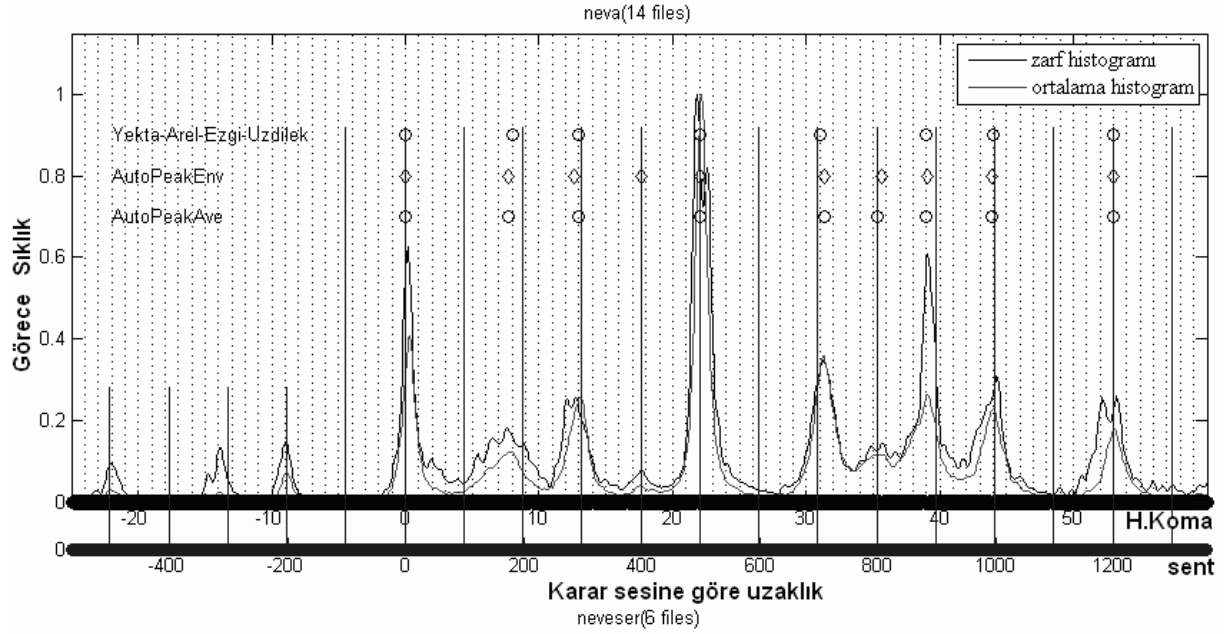


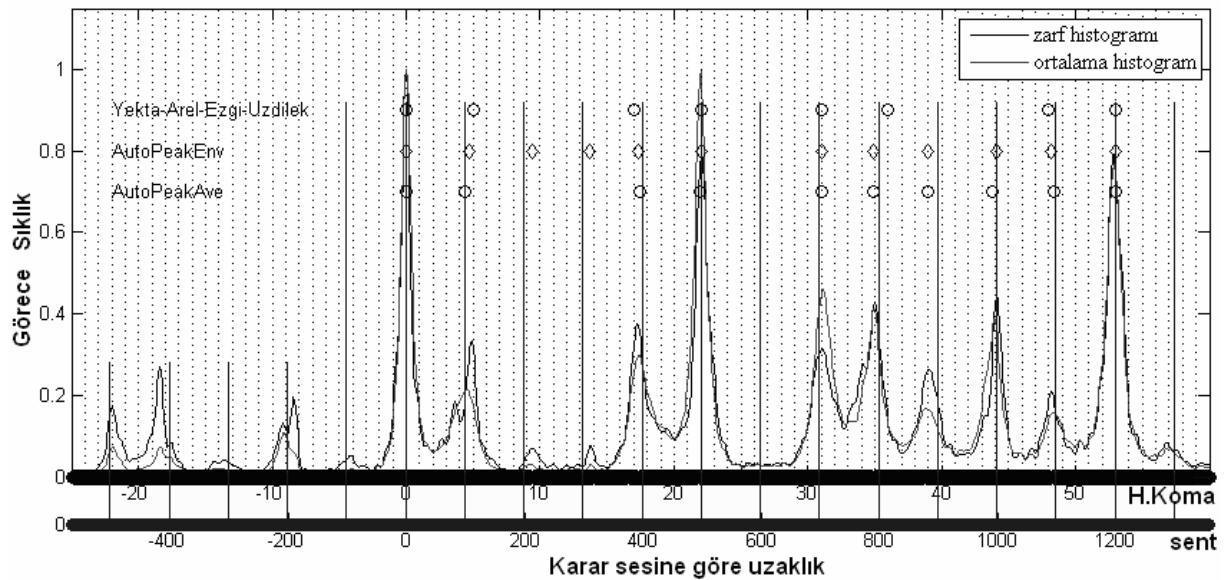
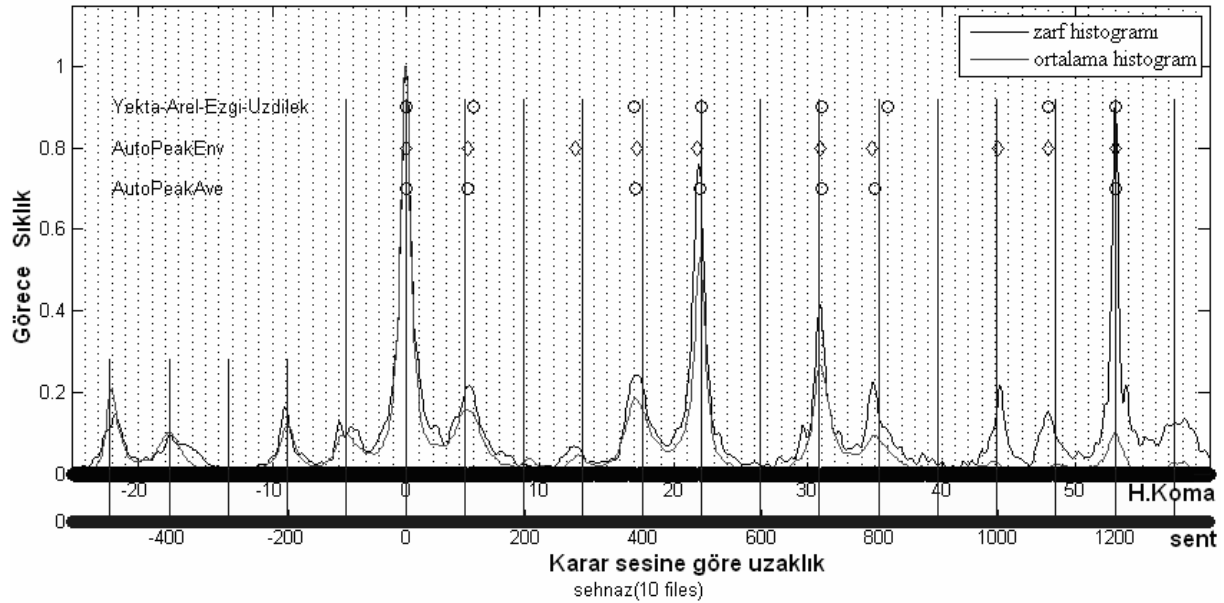
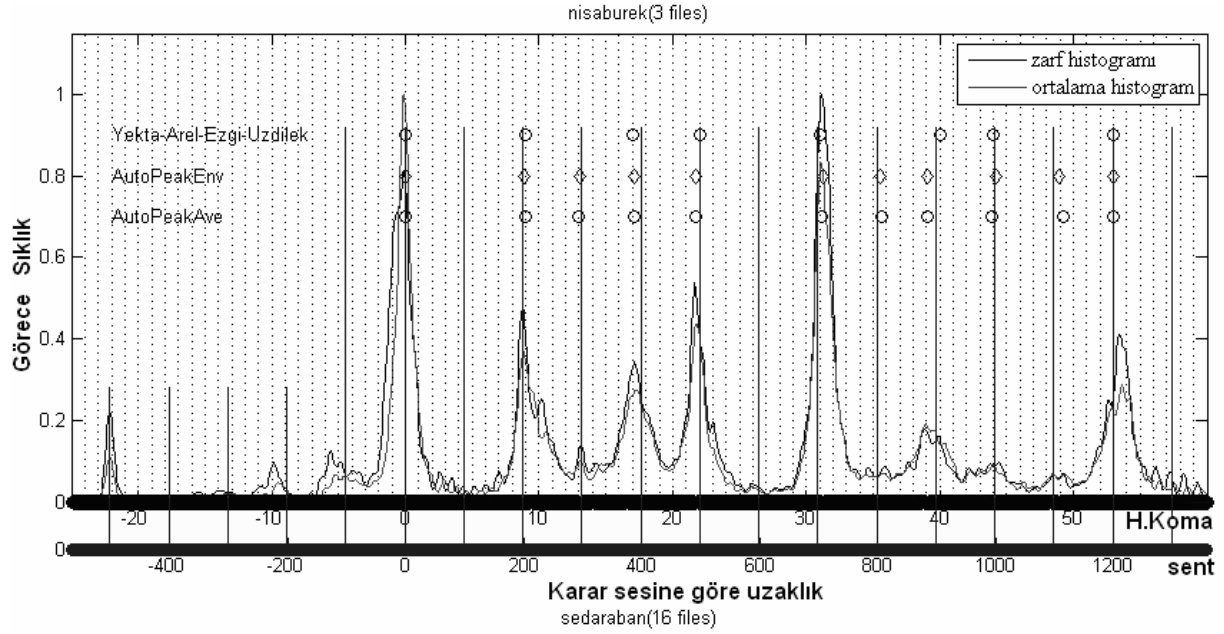


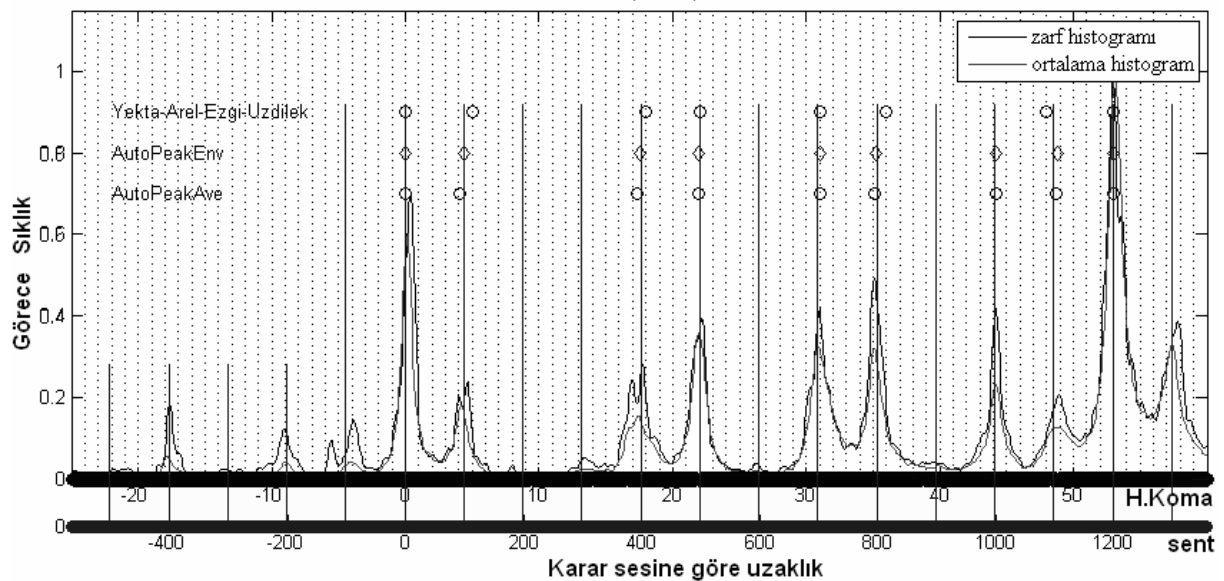
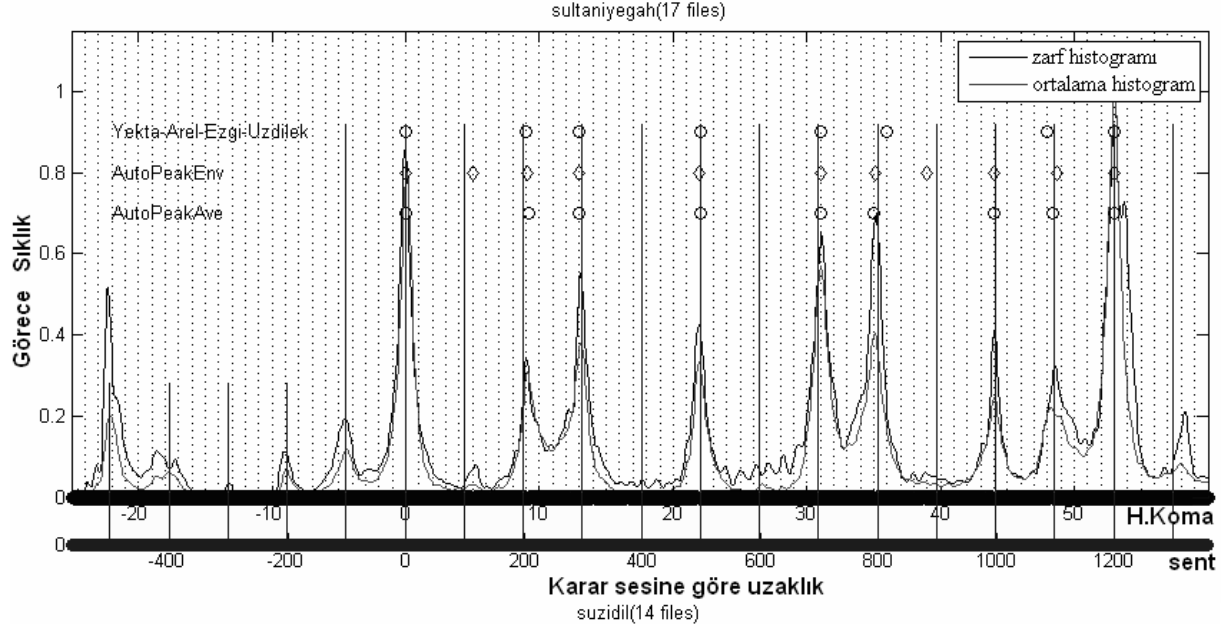
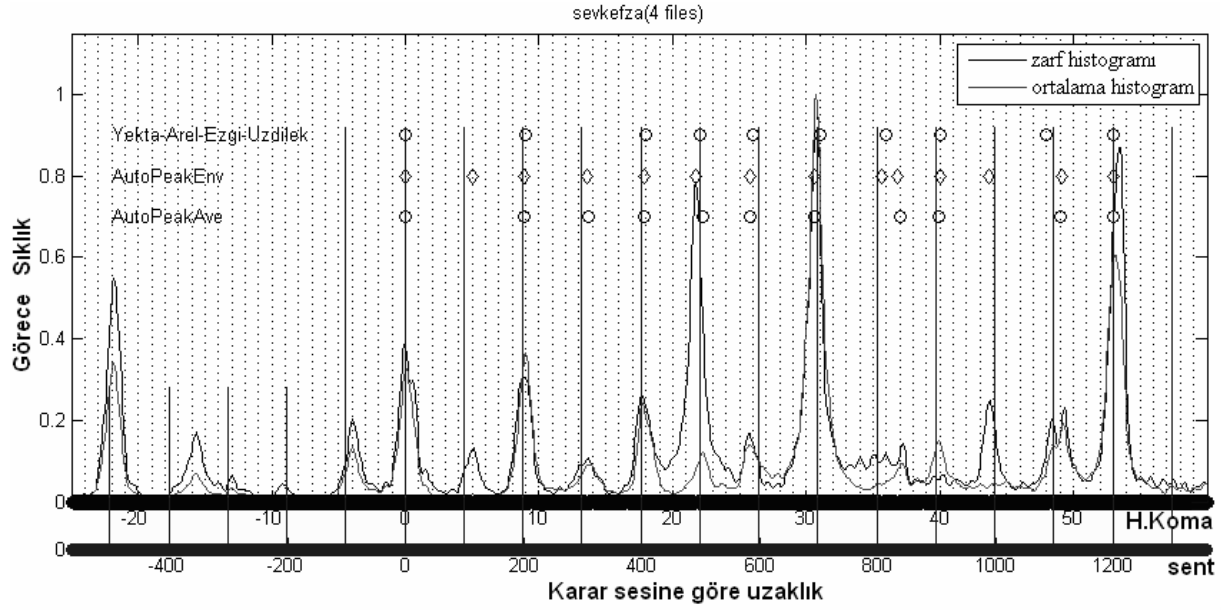


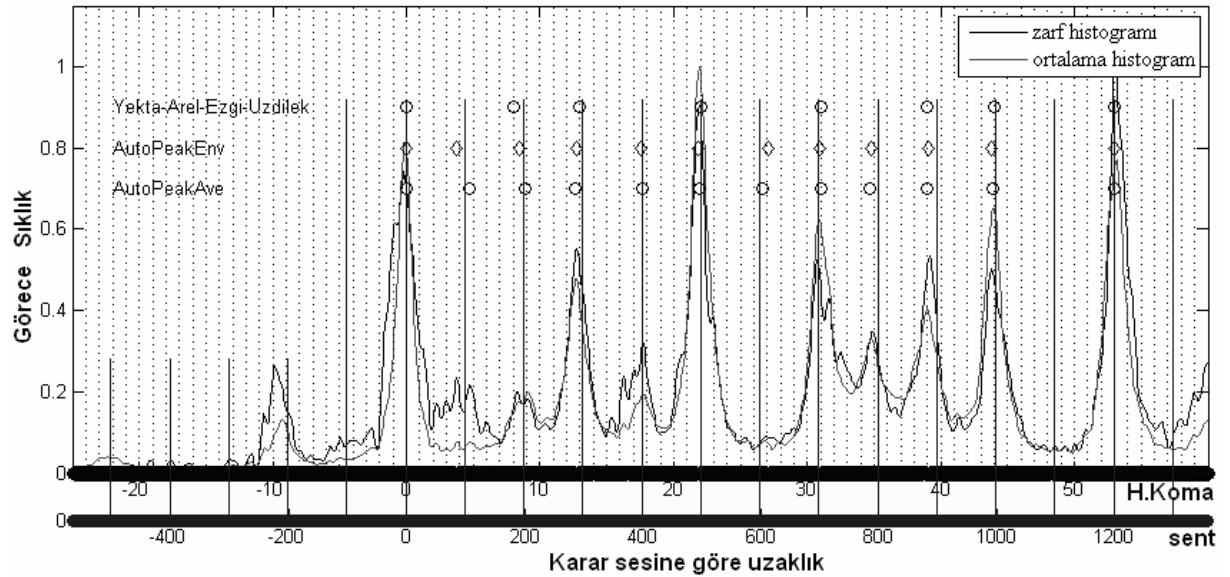
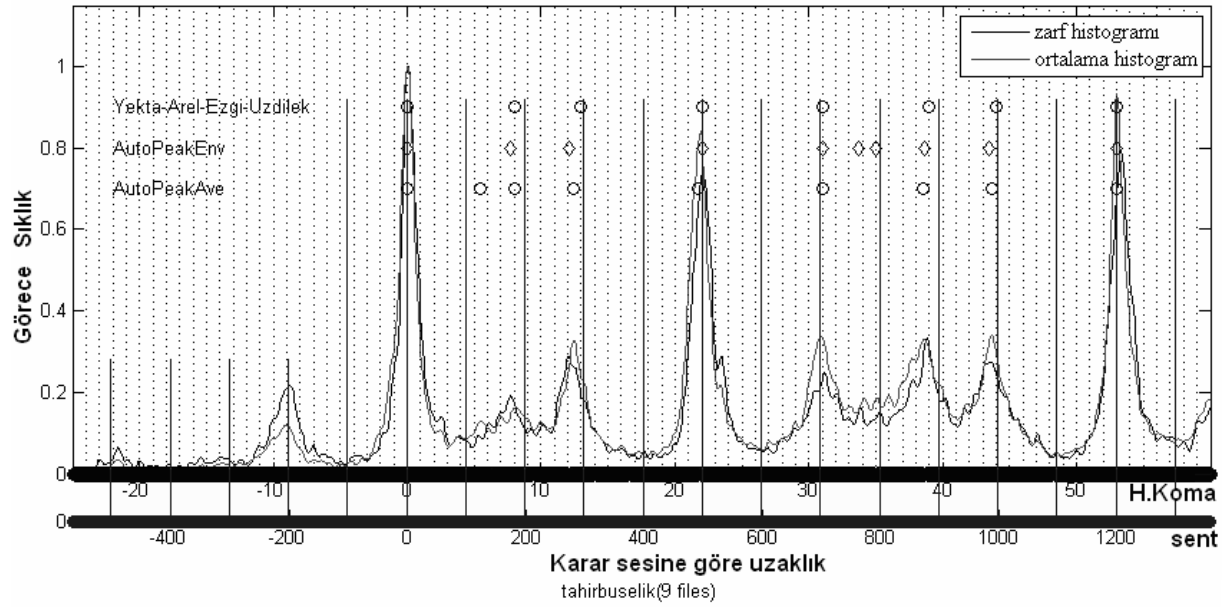
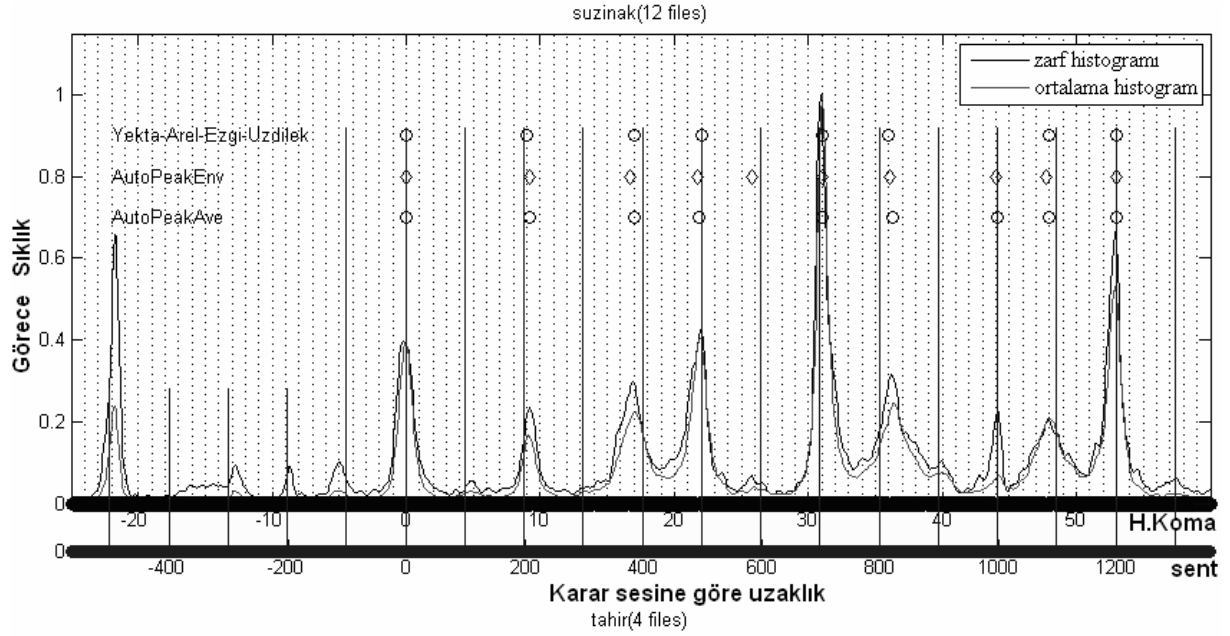


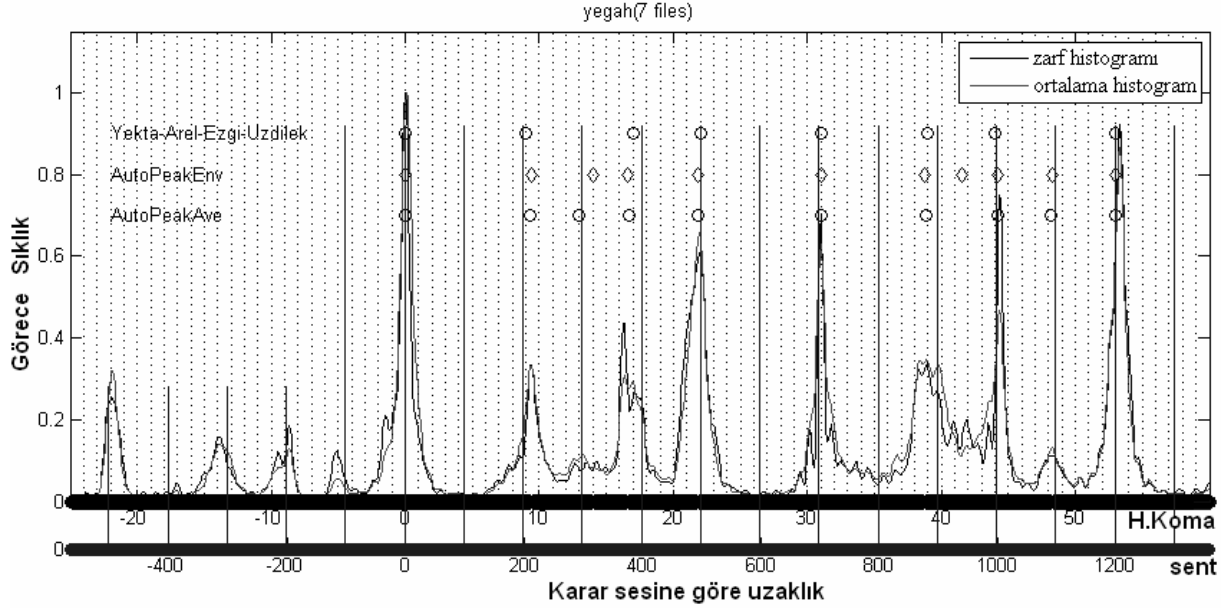






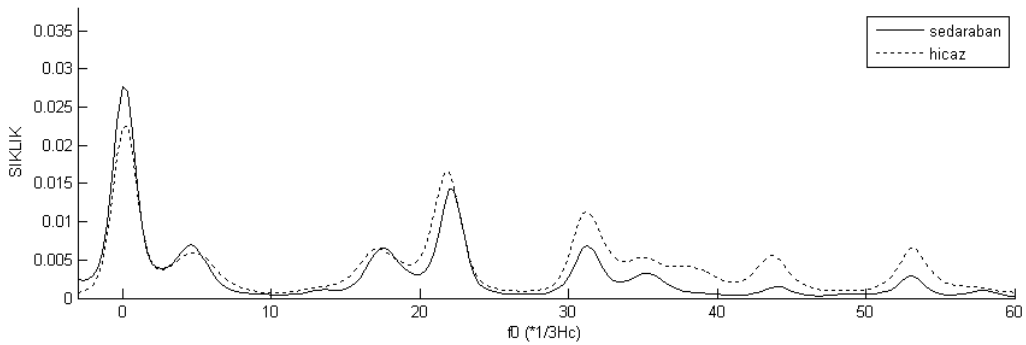
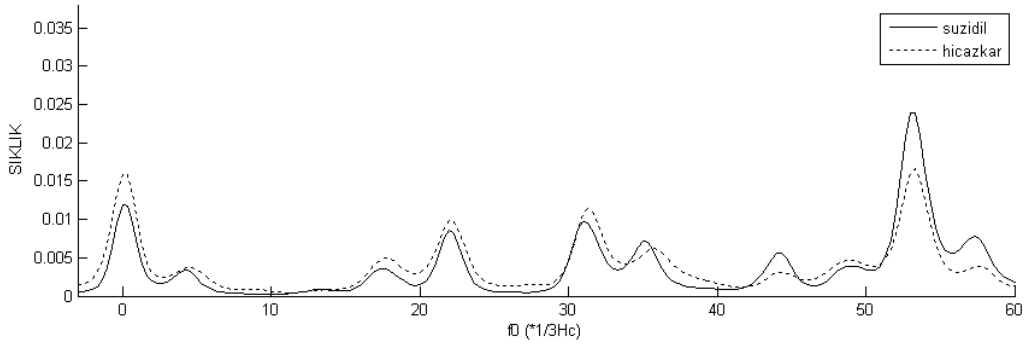


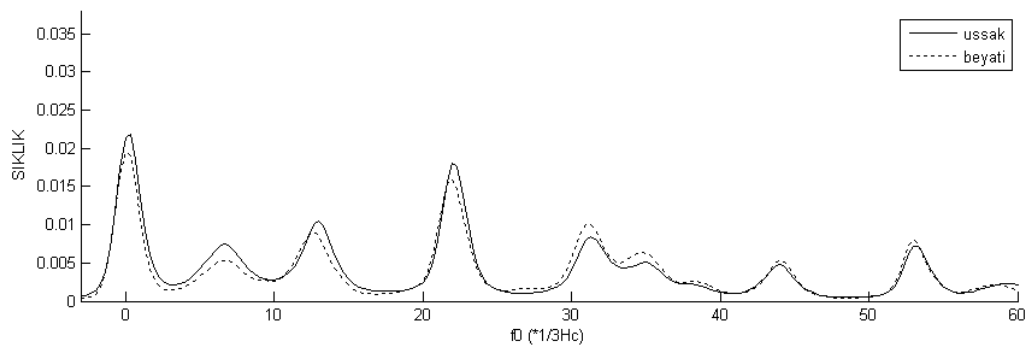
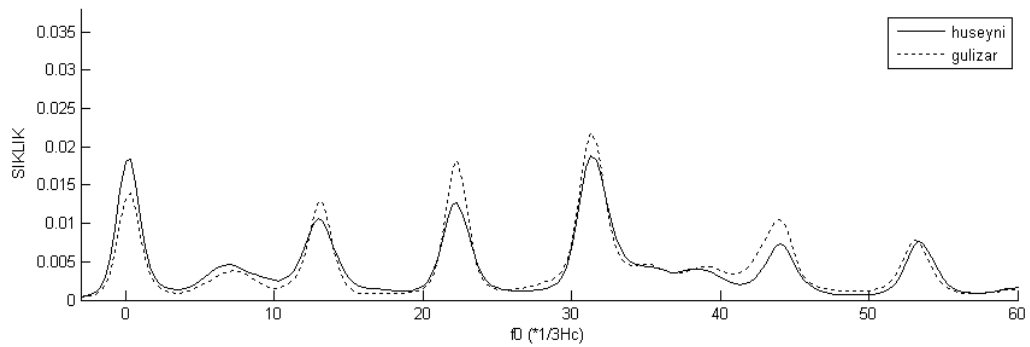
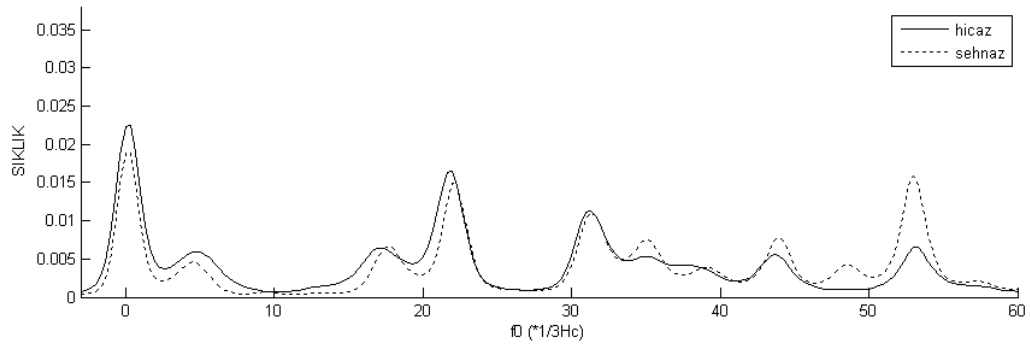
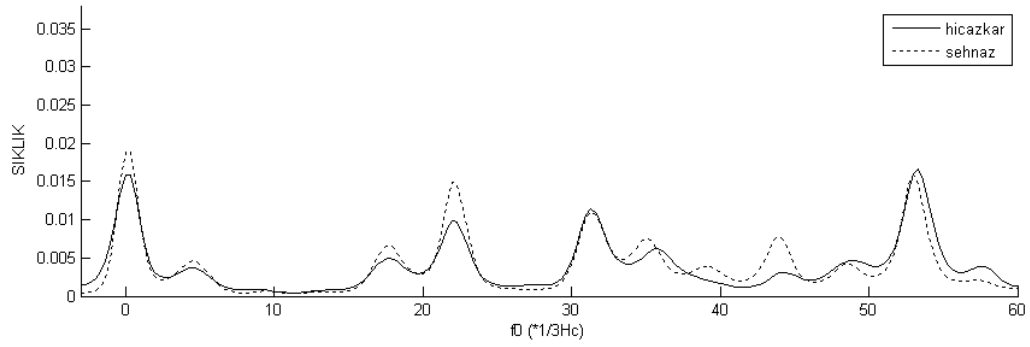
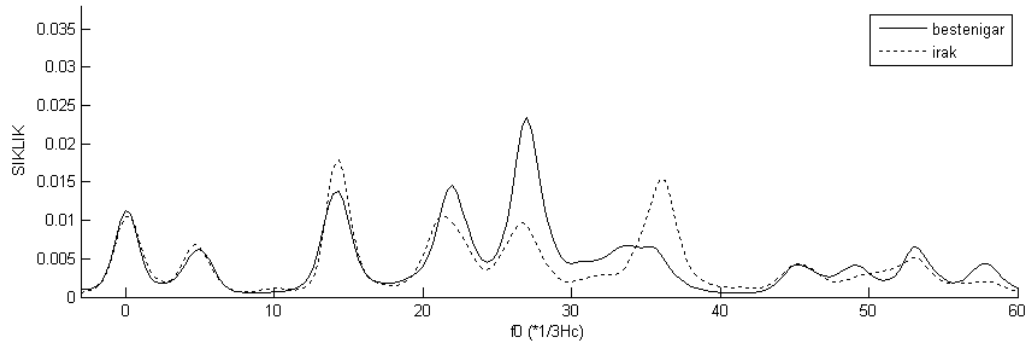




EK-2: İkili makam histogram karşılaştırmaları

Bölüm 4.3'te anlatıldığı gibi makamların f_0 dağılımsal benzerlikleri sınıflandırıcıda oluşturulacak makam gruplarının belirlenmesi açısından önemlidir. Bu amaçla yapılan karşılaştırma çalışmalarının (özellikle birbirine çok yakın dağılımların gözleendiği) bir kısmına aşağıda yer vermekteyiz. Verilerin hazırlanmasıyla ilgili detaylar için Bölüm 4.3.3'e bakınız.





Kaynakça

- [AGOSTINI et al, 2003] AGOSTINI G., Longari M., Pollastri E., Musical Instrument Timbres Classification with Spectral Features, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 1, 1-11, (2003).
- [AKAN, 2007] AKAN, E., *Tanbur metodu*, Çağlar Musiki Yayınları, İstanbul, (2007).
- [AKDOĞU, 1989] AKDOĞU O., *Taksim Nedir, Nasıl Yapılır?*, İzmir, (1989).
- [AKDOĞU, 1999] AKDOĞU O., *Türk Müziğinde Perdeler*, Müzik Ansiklopedisi Yayınları, Ankara, (1999).
- [ALEXANDER et al, 2001] ALEXANDER J. S., Daniel K. A., Katsianos T. G., *Apparatus for detecting the fundamental frequencies present in polyphonic music*, United States Patent Application Publication, Pub. No. US 2001/0045153 A1, Nov. 29, (2001).
- [ALPKOÇAK et al, 2006] ALPKOÇAK A., Gedik A. C., Classification of Turkish makams by using n grams, TAINN 2006, Fifteenth Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks, (2006).
- [AKKOÇ, 2002] AKKOÇ C., Non-deterministic scales used in traditional Turkish music, *Journal of New Music Research*, 31/4, 285-293, (2002).
- [AOYAGI, 2001] AOYAGI T., *Maqām rāst: Intervalllic ordering, pitch hierarchy, performance, and perception of a melodic mode in Arab music*, (Doktora Tezi), UCLA, (2001).
- [AOYAGI, 2004] AOYAGI T., Sayr of maqam rast: A performance rule of a melodic mode in arab music examined through a reconstruction task, Proc. of 8th Int. Conf. On Music Perception & Cognition (ICMPC8), Evanston, IL/USA, (2004).
- [AREL, 1993] AREL H. S., *Türk musikisi Nazariyatı Dersleri*, Hazırlayan: Onur Akdoğu, Kültür Bakanlığı Yayınları: 1347, Sanat-Müzik Dizisi:33-1, Ankara, (1993).
- [BELLO et al, 2000] BELLO, J. P., Monti, G., Sandler M., An Implementation of Automatic Transcription of Monophonic Music with a Blackboard System, Proceedings of the Irish Signals and Systems conference (ISSC 2000), Dublin, Ireland, (2000).
- [BELLO, 2003] BELLO J. P., *Towards the automated analysis of simple polyphonic music: A knowledge-based approach*, Ph.D. thesis, Univ. of London, 2003.
- [BELLO, 2005] BELLO J. P., Daudet L., Abdallah S., Duxbury C., Davies M., Sandler M. B., A tutorial on onset detection in music signals, *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, 13/5, 1035-1047, (2005).
- [BELLO et al, 2004] BELLO J.P., Duxbury C., Davies M., and Sandler M., On the use of phase and energy for musical onset detection in the complex domain, *IEEE Signal Processing Letters*, 11/6, 553–556, (2004).
- [BOLAT, 2005] BOLAT B., Küçük Ü., Yaylı enstrüman seslerinin olasılıksal sinir ağı ile tanınması, IEEE 13. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU 2005), Kayseri, (2005).
- [BOSER, 1992] BOSER B. E., Guyon I. M., Vapnik V. V., A training algorithm for optimal margin classifiers, 5th Annual Workshop on Computational Learning Theory, Pittsburgh, USA, (1992), Pp: 144-152.
- [BOZKURT, 2006] BOZKURT, B., *New spectral methods for analysis of source/filter characteristics of speech signals*, (Doktora Tezi), Faculté Polytechnique De Mons, Presses universitaires de Louvain, ISBN: 2-87463-013-6, (2006).
- [BOZKURT, 2008] BOZKURT B., An automatic pitch analysis method for Turkish maqam music, *Journal of New Music Research*, 37/1, 1-13, (2008).

- [BOZKURT et al, 2009] BOZKURT B., Yarman O., Karaosmanoğlu M.K., Akkoç C., Weighing Diverse Theoretical Models On Turkish Maqam Music Against Pitch Measurements: A Comparison Of Peaks Automatically Derived From Frequency Histograms With Proposed Scale Tones, *Journal of New Music Research*, 38/1, 45-70, (2009).
- [BOZKURT et al, 2008b] BOZKURT B., Gedik, A.C., Karaosmanoğlu, M.K., TMVB: Klasik Türk Müziği İcra Analiz Çalışmaları İçin Bir Veri Bankası, Proceedings from Türk Müziğinde Uygulama - Kuram Sorunları ve Çözümleri Çağrılı Kongre, Maçka, İstanbul, (2008).
- [BROWN, 1993] BROWN J. C., Determination of the meter of musical scores by autocorrelation, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 1953-1957, (1993).
- [BUDAK, 2006] BUDAK O. A., *Türk Müziğinin Kökeni-Gelişimi*, Phoenix Yayınevi, Ankara, (2006).
- [BURGES, 1998] BURGESS C. J. C., A tutorial on support vector machines for pattern recognition, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 121-167, (1998).
- [de CHEVEIGNE et al, 2002] de CHEVEIGNE, A., Kawahara, H., YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music, *Journal of the Acoustical Society of America*, 111/4, 1917-1930, (2002).
- [CEMİL, 1947] CEMİL M., *Tanburi Cemil'in Hayatı*, Sakarya Yayınevi, Ankara, (1947).
- [ÇELİK, 2004] ÇELİK A. E., Safiyüddin Abdülmümin Urmevi'nin ses sistemi teorisine matematiksel bir yaklaşım, *Müzik ve Bilim*, 2, (2004).
- [CEMGİL, 1997] CEMGİL A. T., Gürgen F., Classification of musical instrument sounds using neural networks, Proc. of SIU97, (1997).
- [CEMGİL et al, 2003] CEMGİL A. T., Kappen B., Monte Carlo methods for tempo tracking and rhythm quantization, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 18, 45-81, (2003).
- [ÇEVİKOĞLU, _] ÇEVİKOĞLU T., Türk Müsiki'sinde Notanın Tarihçesi, URL: <http://www.turkmusikisi.com/nota/tarihce/tarihce.htm>.
- [ÇEVİKOĞLU, 2007] ÇEVİKOĞLU T., Klasik Türk Müziğinin Bugünkü Sorunları, İcanas 38' Türk Müziği Paneli, (2007).
- [COLLINS, 2005] COLLINS N., Using a pitch detector for onset detection, Proceedings of ISMIR 2005, London, UK, (2005).
- [COOPER, 2006] COOPER D., Ethnomusicology in the Laboratory: From the Tonometer to the Digital Melograph, *Ethnomusicology Forum*, 15/2, 301 – 313, (2006).
- [CORTES, 1995] CORTES C., Vapnik V., Support vector networks, *Machine Learning*, 20, 273-297, (1995).
- [CRISTIANINI et al, 2000] CRISTIANINI N., Shawe-Taylor J., *An Introduction to Support Vector Machines*, Cambridge University Press, (2000).
- [DOAN, 1994] DOAN T. T., Understanding MIDI. The key to creating and conducting the music to your own MTV video, *IEEE Potentials*, 13/1, 10-11, (1994).
- [DIXON, 2001] DIXON S., Automatic extraction of tempo and beat from expressive performances, *Journal of New Music Research*, 30/1, 39-58, (2001).
- [DIXON, 2006] DIXON S., Onset detection revisited, Proc. of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx'06), Montreal, Canada, September 18-20, (2006).
- [EEROLA et al, 2004] EEROLA, T., Toiviainen, P., MIDI Toolbox: MATLAB Tools for Music Research. University of Jyväskylä: Kopijyvä, Jyväskylä, Finland, (2004). Available at <http://www.jyu.fi/hum/laitokset/musiikki/en/research/coe/materials/miditoolbox/>.
- [ERGUNER, 2007] ERGUNER S. , *Ney, 'metod'*, İstanbul, (2007).

- [ESSID, 2006] ESSID S., Richard G., David B., Instrument recognition in polyphonic music based on automatic taxonomies, *IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, 14/1, 245-248, (2006).
- [EZGİ, 1933] EZGİ, S.Z., *Nazarî ve Amelî Türk Mûsikîsi*, Milli Mecmua Matbaası, İstanbul, (1933). Pp: 8-29.
- [FOOTE et al, 2001] FOOTE, J., Uchihashi, S. The Beat Spectrum: A New Approach to Rhythm Analysis, Proc. International Conference on Multimedia and Expo, (2001).
- [GEDİK et al, 2008] GEDİK A.C., Bozkurt B., Automatic Classification of Turkish Traditional Art Music Recordings by Arel Theory, Conference on Interdisciplinary Musicology, 2-6 July, Thessaloniki/Greece, (2008).
- [GEDİK et al, 2009] GEDİK A. C., Bozkurt B., Evaluation of the Makam Scale Theory of Arel for Music Information Retrieval on Traditional Turkish Art Music, *Journal of New Music Research*, 38/2, 103-116, (2009).
- [GEDİK et al, 2009] GEDİK A. C., Bozkurt B., Çırak C., A Study of Fret Positions of Tanbur Based on Automatic Estimates From Audio Recordings, Proc. CIM09 (Conference on Interdisciplinary Musicology), 26-29 Oct., Paris, (2009).
- [GEDİK et al, 2010] GEDİK A. C., Bozkurt B., Pitch Frequency Histogram Based Music Information Retrieval for Turkish Music, *Signal Processing*, 10, 1049-1063, (2010). (doi:10.106/j.sigpro.2009.06.017)
- [GODFREY et al, 1997] GODFREY J. J., Zampolli A. , Language resources: overview, *Survey of the state of the art in human language technology*, Cambridge University Press, New York, (1997). Pp: 381 – 384.
- [GOTO et al, 1997] GOTO M., Muraoka Y., Real-time rhythm tracking for drumless audio signals, chord change detection for musical decisions, Proc. of IJCAI-97 Workshop on Computational Auditory Scene Analysis, (1997). Pp: 135-144
- [GOUYON et al, 2002] GOUYON F., Herrera P., Cano P., Pulse-dependent analyses of percussive music, Proc. of AES 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio, Espoo, Finland, June, (2002).
- [GÜNDÜZ et al, 2005] GÜNDÜZ G., Gündüz U., The mathematical analysis of the structure of some songs, *Physica A*, 357, 565-592, (2005).
- [HAINSWORTH, 2003] HAINSWORTH S. W., *Techniques for the automated analysis of musical audio*, (Doktora Tezi), Cambridge Univ., (2003).
- [HERRERA-BOYER, 2003] HERRERA-BOYER P., Peeters G., Dubnov S., Automatic classification of musical instrument sounds", *Journal of New Music Research*, 32/1, 3-21, (2003).
- [HESS, 1983] HESS W., *Pitch Determination of Speech Signals: Algorithms and Devices*, ISBN: 0387119337, Springer, (1983).
- [HOLZAPFEL et al, 2010] HOLZAPFEL A., Stylianou Y., Gedik A.C., Bozkurt B., "Three Dimensions Of Pitched Instrument Onset Detection", Accepted for publication in *IEEE Trans. on Audio, Speech and Language Processing*.
- [HOPKIN, 1996] HOPKIN B., *Musical Instrument Design: Practical Information for Instrument Design*. See Sharp Press, (1996).
- [İLERİCİ, 1970] İLERİCİ, K., *Bestecilik Bakımından Türk Müziği ve Armonisi*, Millî Eğitim Bakanlığı Yayınları, İstanbul, (1970).
- [KAÇAR, 2002] KAÇAR G. Y., Yorgo Bacanos'un Ud İcrasındaki Aralıklar ve Arel Ezgi-Uzdilek Ses Sistemi'ne Göre Bir Karşılaştırma, *G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22/2 155-161,(2002).

- [KARADENİZ, 1965] KARADENİZ, M.E. (1965). *Türk Musikisinin Nazariye ve Esasları*, İş Bankası Yayınları, İstanbul, basım yılı (1983).
- [KARAOŞMANOĞLU, 2003] KARAOŞMANOĞLU M.K., İcra Analizi programı. URL: www.musiki.org/icra_analizi.htm
- [KARAOŞMANOĞLU et al, 2003] KARAOŞMANOĞLU M. K., Akkoç C., Türk musikisinde icra - teori birliğini sağlama yolunda bir girişim, 10. Müz dak Sempozyumu, İstanbul, (2003).
- [KARAOŞMANOĞLU, 2004] KARAOŞMANOĞLU M. K., Türk musikisi perdelerini ölçüm, analiz ve test teknikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Müzik Konferansı, İstanbul, 6 Mayıs, (2004).
- [KLAPURI, 2004a] KLAPURI, A.P., *Signal Processing Methods for the Automatic Transcription of Music*, (Doktora Tezi), Tampere University of Technology, Finland, (2004).
- [KLAPURI, 2004b] KLAPURI, A.P., Automatic Music Transcription as We Know it Today, *Journal of New Music Research*, 33/3, 269–282, (2004).
- [KLAPURI, 2006] KLAPURI, A., Introduction to Music Transcription, In *Signal Processing Methods for Music Transcription*, ed: Klapuri, A. and Davy, M., Springer-Verlag, New York, (2006).
- [KNOPOFF, 1965] KNOPOFF L., Some Technological Advances in Musical Analysis, *Studia Musicologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, T.7, 1/4, 301-307, (1965). Akadémiai Kiadó, URL: <http://www.jstor.org/stable/901437> Accessed: 01/07/2010 04:18.
- [LAROCHE, 2001] LAROCHE J., Estimating tempo, swing and beat locations in audio recordings, Proc. of Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz, New York, Oct., (2001).
- [MARQUES et al, 1999] MARQUES J. and Moreno P. J., *A study of musical instrument classification using gaussian mixture models and support vector machines*, Compaq Corporation, Cambridge Research Laboratory, Technical Report Series CRL 99/4, (1999).
- [MARTIN, 1996] MARTIN K. D., *Automatic Transcription of Simple Polyphonic Music : Robust Front End Processing*, Massachusetts Institute of Technology Media Laboratory Perceptual Computing Section, Tech. Rep. 399, (1996).
- [MASAHIRO, 2002] MASAHIRO K., *Transcription method and transcription system*, Japanese Patent Application Publication, JP2002278544. Sept. 27, (2002).
- [MOELANTS et al, 1997] MOELANTS D., Rampazzo C., A computer system for the automatic detection of perceptual onsets in a musical signal, in *KANSEI, The Technology of Emotion*, ed: Camurri A., 140-146. (1997).
- [MONTI et al, 2002] MONTI G., Sandler M., Automatic polyphonic piano note extraction using fuzzy logic in a blackboard system, Proc. of the 5th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02), Hamburg, Germany, September 26-28, (2002).
- [ORNOY, 2006] ORNOY E., Between theory and practice: comparative study of early music performances, *Early Music*, 34/2, 233-248, (2006). doi:10.1093/em/cah008.
- [ÖZBEK et al, 2006] ÖZBEK M. E., Özkurt N., Savacı F. A., Dalgacık tepeleri ve destek vektör makineleri ile müzik çalgısı sınıflandırma, ELECO'2006 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, c.2, Bursa, 6-10 Aralık (2006).Pp: 236-240.
- [ÖZKAN, 1998] ÖZKAN İ.H., *Türk Musikisi Kuramsalı ve Usûlleri - Kudüm Velveleleri*, Ötüken Neşriyat, İstanbul, (1998).
- [ÖZTUNA, 2006] ÖZTUNA Y., *Türk Musikisi: Akademik Klasik Türk Sanat Musikisinin Ansiklopedik Sözlüğü*. II. Cilt, Makam maddesi, Orient, Ankara, (2006).

- [PAIVA et al, 2008] PAIVA, R. P., Mendes, Y., Cardoso, A., From Pitches to Notes: Creation and Segmentation of Pitch Tracks for Melody Detection in Polyphonic Audio, *Journal of New Music Research*, 37/3, 185–205, (2008).
- [RAPHAEL, 2001] RAPHAEL C., Automated rhythm transcription, Proc. of International Symposium on Music Information Retrieval, Indiana, Oct. (2001). Pp: 99-107.
- [ROUSSEEUW, 1987] ROUSSEEUW P.J., Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53-65, (1987).
- [RYYNANEN, 2006] RYYNANEN, M., Singing Transcription, In *Signal Processing Methods for Music Transcription*, ed: Klapuri, A., Davy, M., Springer-Verlag, New York, (2006).
- [SETHARES et al, 2001] SETHARES W. A., Staley T. W., Meter and periodicity in musical performance, *Journal of New Music Research*, 22/5, 149-158, (2001).
- [SCHEIRER, 1998] SCHEIRER E. D., Tempo and beat analysis of acoustic musical signals, *J. Acoust. Soc. Am.*, 103/1, 588-601, (1998).
- [SHIGEAKI, 1993] SHIGEAKI K., *Automatic transcription device*, Japanese Patent Application Publication, JP5127668, 25 March (1993).
- [SHAWE-TAYLOR et al, 2004] SHAWE-TAYLOR J., Cristianini N., *Kernel Methods for Pattern Analysis*, Cambridge University Press, (2004).
- [SIGNELL, 1986] SIGNELL K. L., *Makam: Modal Practice in Turkish Art Music*, ISBN: 030676248X, Perseus Boks, (1986).
- [SNYDER, 2000] SNYDER B., *Music and Memory: An Introduction*, MIT Press, London, (2000).
- [TANRIKORUR, 2004] TANRIKORUR C., *Türk Müziği Kimliği*, Dergah Yayınları, İstanbul, 2004.
- [THEODORIDIS et al, 1999]. THEODORIDIS S., Koutroumbas K., *Pattern Recognition*, Academic Press, (1999).
- [TOUMA, 1971] TOUMA, H.H., The Maqam Phenomenon: An Improvisation Technique in the Music of the Middle East, *Ethnomusicology*, 15/1, 38-48, (1971).
- [TULGAN, 2007] TULGAN Ö., Makam musikisi perdelerinin sırrı-dedüktif bir deneme, *Müzik ve Bilim*, Mart, (2007).
- [TURA, 1988] TURA Y., *Türk Musikisinin Meseleleri*, Pan Yayıncılık, İstanbul, (1988).
- [VAPNIK, 1995] VAPNIK V. N., *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag, (1995).
- [VAPNIK, 1998] VAPNIK V. N., *Statistical Learning Theory*, John Wiley and Sons, (1998).
- [WESTON et al, 1998] WESTON J., Watkins C., *Multi-class support vector machines*, Department of Computer Science, Royal Holloway, University of London, Tech. Rep. CSD-TR-98-04, (1998).
- [YARMAN, 2007] YARMAN, O., A comparative evaluation of pitch notations in Turkish makam music, *Journal of Interdisciplinary Music Studies*, 1/2, 43–61, (2007).
- [YARMAN, 2008] YARMAN, O., *79-tone Tuning & Theory for Turkish Maqam Music*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, (2008).
- [YARMAN, 2008b] YARMAN, O., Arel-Ezgi-Uzdilek Sistemine Alternatif, 24-Sesli, Islah Edilmiş Ortaton Temperamanı Temelli Ve Basit Oranlı Bir Düzen, *Müzik ve Bilim Dergisi*, (2008). (<http://www.ozanyarman.com/files/yarman24.pdf>)

[YAVUZOĞLU, 2008] YAVUZOĞLU, N., *21. Yüzyılda Türk Müziği Teorisi*, Pan Yayıncılık, İstanbul, (2008).

[YEKTA, 1922] YEKTA R., *Türk Musikisi*, Transl. O. Nasuhioğlu. Pan Yayıncılık, İstanbul, tekrar basım:1986, (1922). Pp:6-16.

[ZEREN, 1998] ZEREN A., *Müzikte Ses Sistemleri*, Pan Yayıncılık, İstanbul, (1998).

[ZEREN, 2003] ZEREN A., *Müzik sorunlarımız üzerine araştırmalar*, Pan Yayıncılık, İstanbul, (2003).

[ZAKIS et al, 2007] ZAKIS J.A., McDermott H.J., Vandali A.E., A fundamental frequency estimator for the real-time processing of musical sounds for cochlear implants, *Speech Communication*, 49/2, 113-122, (2007).

TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 107E024
Proje Başlığı: Klasik Türk müziği kayıtlarının otomatik olarak notaya dökülmesi ve otomatik makam tanıma
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yard. Doç. Dr. Barış Bozkurt, Prof. Dr. F. Acar SAVACI, Mustafa Kemal Karaosmanoğlu
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Müh. Böl. , Gülbahçe Köyü, Urla, İzmir
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/08/2007 – 01/08/2010
Öz (en çok 70 kelime) Bu projede Klasik Türk müziği kayıtlarının otomatik olarak notaya dökülmesi ve makamların otomatik olarak tanınması için literatürde ilk defa kullanılan yöntem ve teknikler önerilmiş, yazılımlar gerçekenmiştir. Temel titreşim frekans(f_0) analizi, otomatik karar tespiti, kuram - icra uyum düzeyi ölçümü ve otomatik makam tanınması yapan özgün araçlar tasarlanmıştır. Literatürde ilk defa kuram - icra uyum düzeyi birçok kayıt üzerinden detaylı olarak incelenmiştir. Otomatik notaya dökme uygulaması, başlangıç noktası tespit algoritması, f_0 nicemleme yöntemi ve MIDI'ye dönüştürme araçları geliştirilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Müzik bilgi erişimi, Türk müziği, frekans analizi, makam tanıma, otomatik notaya dökme, başlangıç noktası tespiti, MIDI dönüşümü
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/>
Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.

Projeden Yapılan Yayınlar:**SCI-Expanded kapsamındaki dergi yayınları:**

- 1) C. Gedik, B.Bozkurt, 2010, "Pitch Frequency Histogram Based Music Information Retrieval for Turkish Music ", Signal Processing, vol.10, pp.1049-1063. (doi:10.106/j.sigpro.2009.06.017)
- 2) Holzapfel, Y. Stylianou, A.C. Gedik, B. Bozkurt, "Three Dimensions Of Pitched Instrument Onset Detection", Accepted for publication in IEEE Trans. on Audio, Speech and Language Processing.
- 3) Gedik, B.Bozkurt, 2009,"Evaluation of the Makam Scale Theory of Arel for Music Information Retrieval on Traditional Turkish Art Music", Journal of New Music Research, 38:2,pp. 103-116.
- 4) Bozkurt, O. Yarman, M.K.Karaosmanoglu, C. Akkoc, 2009, "Weighing Diverse Theoretical Models On Turkish Maqam Music Against Pitch Measurements: A Comparison Of Peaks Automatically Derived From Frequency Histograms With Proposed Scale Tones", Journal of New Music Research, 38:1,pp. 45-70.
- 5) Bozkurt, 2008, "An automatic pitch analysis method for Turkish maqam music", Journal of New Music Research, Volume 37, Issue 1, pages 1-13.

Uluslararası konferanslarda sunulan bildiriler:

- 1) A. C. Gedik, B.Bozkurt, C. Cirak, 2009, "A Study of Fret Positions of Tanbur Based on Automatic Estimates From Audio Recordings", Proc. CIM09 (Conference on Interdisciplinary Musicology), 26-29 Oct., Paris.
- 2) A. C. Gedik, B.Bozkurt, 2008, " Automatic Classification of Taksim Recordings in Turkish Makam Music", Conference on Interdisciplinary Musicology, 2-6 July 2008, Thessaloniki/Greece.

Ulusal konferanslarda sunulan bildiriler:

- 1) B. Bozkurt, A. C. Gedik, M.K.Karaosmanoglu, 2009, "Türk Müziği için Müzik Bilgi Erişimi: problemler, çözüm önerileri ve araçlar", Proc. SIU, Sinyal İşleme Uygulamaları, Antalya.
- 2) M. E. Özbek, F. A. Savacı, 2009, "Türk Müziği Enstrümanlarının Sınıflandırılması", IEEE 17. Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı (IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference), SIU 2009, 9-11 Nisan, Antalya.
- 3) B. Bozkurt, A. C. Gedik, M. K. Karaosmanoğlu, "TMVB: Klasik türk müziği icra analizi için bir veri bankası", Türk Müziğinde Uygulama ile Kuramdaki Sorunlar ve Çözümleri, İTÜ Türk Musikisi Devlet Konservatuvarı, 3- Mart 2008.