

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI**

**MELODİK İSLİK SESLERİNDEKİ NOTALARIN OTOMATİK BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gülay KARPUZ**

**TEMMUZ 2011  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI**

**MELODİK ISLIK SESLERİNDEKİ NOTALARIN OTOMATİK BELİRLENMESİ**

**Gülay KARPUZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“YÜKSEK LİSANS (İSTATİSTİK)”**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.06.2011**  
**Tezin Savunma Tarihi : 18.07.2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN**

**Trabzon 2011**



## ÖNSÖZ

Günümüzde müzikle uğraşan pek çok kişi bulunmaktadır. Bu kişilerden birçoğu nota ve çalgı aleti bilgisine sahip değildir. Beste yapmak istediklerinde ise bu bilgilere sahip başka kişilerden yardım almaktadırlar. Bunun içinde ayrıca zaman, emek ve para harcamaktadırlar. Buradan yola çıkarak bilgisayar yardımıyla ıslık melodilerinden notaların otomatik tanınması ile ilgili bir çalışma yaptık. Islığı kullanmamızın nedeni ise evrensel oluşu, her zaman her yerde ulaşılabilir olması ve birçok kişinin ıslığı rahatlıkla çalabilmesidir.

Beni bu günlere getiren, her türlü fedakârlığı yaparak benim yetişmemi sağlayan, yüksek lisans yapmam konusunda teşvik eden ve sonuna kadar destekleyen aileme özellikle de babam Hasan Hüseyin KARAKAYA'ya, bana olan desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, verdiği güven ve moralden, gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı eşim Mehmet KARPUZ'a, bu çalışmayı yaparken gece gündüz demeden yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN'e çok teşekkür ederim.

Gülay KARPUZ

Trabzon 2011

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Melodik ıslık seslerindeki notaların otomatik belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/06/2011

Gülay KARPUZ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Ses ve Sesin Yayılması.....	1
1.2. Sesin Özellikleri .....	2
1.2.1. Genlik .....	2
1.2.2. Dönem (Period) .....	3
1.2.3. Dalga Boyu .....	3
1.2.4. Frekans.....	4
1.2.5. Dalga Sayısı .....	5
1.2.6. Hız .....	5
1.2.7. Şiddet .....	5
1.2.8. Ton.....	7
1.2.9. Sesin Konumsal Gürlüğü .....	7
1.2.10. Temel Frekans, Harmonik Sesler ve Sesil.....	7
1.2.11. Tını .....	10
1.3. Müzik Bilgisi.....	10
1.3.1. Müzik, Ses ve Nota Bilgisi .....	10
1.3.2. Müziğin Tarihçesi ve Önemi.....	13
1.3.3. İşitsel Psikoloji (İnsan İşitsel Sistemi).....	15
1.3.4. Müzik Algılama ve Müzik Belleği.....	18

1.3.5. Müziksel Ölçek .....	20
1.3.6. Sayısal Notaların Biçimi (MIDI Ölçüsü) .....	20
1.4. Sinyal İşleme .....	21
1.4.1. Fourier Dönüşümü .....	21
1.4.2. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (STFT) .....	25
1.4.3. Spektrogram .....	29
1.5. İnsan Islığı .....	30
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	32
2.1. Melodilerin Otomatik Tanınması .....	32
2.2. Otomatik Melodi Tanıma Düzenegi .....	32
2.3. Ön İşlemler .....	33
2.3.1. Ortalama Kayması (DC) Düzeltmesi .....	33
2.3.2. Ortalama Silme Yöntemi .....	34
2.3.3. Normalleştirme .....	34
2.4. Ritim Ayırıştırma .....	34
2.4.1. Enerji Eşikleme Yöntemi .....	36
2.4.2. Otsu Kümeleme Algoritması .....	37
2.5. $F_0$ -Kestirim Yöntemleri .....	39
2.5.1. Zaman Ortamlı Özilişki Fonksiyonu .....	40
2.5.2. Fark Fonksiyonun Ortalama Büyüklüğü .....	41
2.5.3. Frekans Ortamlı Özilişki Fonksiyonu .....	42
2.5.4. Harmonik Çarpım Spektrumu .....	43
2.5.5. $F_0$ Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması .....	44
2.6. Nota Bölütleme .....	46
2.7. Örnek Uygulama 1 .....	47
2.8. Örnek Uygulama 2 .....	56
3. BULGULAR VE SONUÇLAR .....	62
4. ÖNERİLER .....	63
5. KAYNAKLAR .....	64

ÖZGEÇMİŞ

**ÖZET**

**ISLIK MELODİLERİNDEN NOTALARIN OTOMATİK BELİRLENMESİ**

Gülay KARPUZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN  
2011, 66 Sayfa

Bilgisayar son yüzyılın en önemli buluşlarından biridir ve neredeyse tüm bilimsel alanlarda kullanılmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi de müziktir. Müziğin üretilmesi ve diğer insanlarla paylaşılması için öncelikle iyi bir çalgı aleti ve nota bilgisi gerekmektedir. Oysa birçok insan bu bilgilere sahip olmamasına rağmen hemen hemen bütün müzikleri ıslık ile çalabilmektedir. Böylece yeni melodiler geliştirmek için ıslık yeterli bir araç olabilmektedir.

Bu çalışmada, insan yapımı melodik ıslık seslerinden nota tanıma işlemi bilgisayar yardımıyla otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Mikrofon aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılan ses sinyalleri belli aralıktaki sayı değerlerinden oluşan bir zaman dizisi haline gelmektedir. Bu dizi üzerinde de birçok matematiksel işlem yapılabilmektedir. Bu dizideki verilerin stokastik bir karakter taşıması istatistiksel yöntemlerin kullanımını ön plana çıkarmaktadır.

Öncelikle ses sinyaline ön işlemler uygulanarak ses üzerinde düzenlemeler yapılır. Sinyaldeki ıslık ve sessizlik bölgeleri belirlenir. Sonra da bu ıslık bölgelerinin süreleri bulunur. Otsu algoritması ile ıslık ve sessizlik bölgeleri bulunur. Spektral analiz ile ıslık parçalarının temel frekansları belirlenir. Bu temel frekanslar sınıflandırılır ve ses sinyalinin notaları bulunmuş olur.

**Anahtar Kelimeler:** ıslık ses sinyali, nota tanıma, sesil belirleme, temel frekans



Master Thesis

## SUMMARY

### AUTOMATIC DETERMINATION NOTES OF MELODIC WHISTLING SOUNDS

Gülay KARPUZ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Statistics and Computer Science Graduate Program  
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Orhan KESEMEN  
2011, 66 Pages

The computer is one of the most important discoveries of the last century, and is used almost all scientific fields. One of these fields is the music. Primarily for the production and sharing music with other people, a good musical knowledge and musical notes knowledge are required. Although there is not a lot of people that have this information, however, everyone can play almost all the music with a whistle. So, the whistle can be enough tool to develop new melodies.

In this study, we describe an automatic system for transforming man-made melodic whistles into notes. Sound signals transferred to a computer via the microphone become a time series consisting of certain range values. Many mathematical operations can be performed on this series. Due to have a stochastic character, in this series the data brings to the fore the use of statistical methods. Firstly, we apply DC shifting to our audio signal. So the mean of signal is zero. Then we suppress the noise using various filters. We determine whistles and silence regions. Then we find the duration of this whistles regions. Otsu algorithm is used for finding whistling and silence regions. We determine the fundamental frequencies of whistling parts with spectral analysis. Eventually, these fundamental frequencies are grouped and so the notes of audio signal are found.

**Key Words:** Whistling audio signal, note recognition, pitch detection, fundamental frequency

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Genlik karşılaştırması, (a) düşük genlikli ses sinyali; (b) yüksek genlikli ses sinyali .....	2
Şekil 2. Bir ses sinyali üzerinde dönemsel gösterim .....	3
Şekil 3. Bir ses sinyali üzerinde dalga boyu gösterimi .....	4
Şekil 4. Frekans karşılaştırması, (a) Düşük frekanslı ses sinyali; (b) Yüksek frekanslı ses sinyali .....	5
Şekil 5. Temel frekans ve harmonikler, (a) 0. harmonik (temel frekans, $T_0 = 1$ ); (b) 1. harmonik ( $T_1 = 1/2$ ); (c) 2. Harmonik ( $T_2 = 1/3$ ); (d) 3. Harmonik ( $T_3 = 1/4$ ); (e) 4. Harmonik ( $T_4 = 1/5$ ); (f) Tüm harmoniklerin toplamı. ....	9
Şekil 6. Batı müziğinde yer alan notaların gösterimi .....	11
Şekil 7. Müzik notalarını vuruş değerlerinin gösterimi .....	12
Şekil 8. İşitme sistemi anatomisi .....	16
Şekil 9. Salyangozun işitme sınırı boyunca frekanslarının logaritmik dağılımı .....	16
Şekil 10. Duyma olayının adımları.....	17
Şekil 11. Dörtgen pencere ve frekans cevabı .....	27
Şekil 12. Üçgen pencere ve frekans cevabı.....	27
Şekil 13. Hanning pencere ve frekans cevabı .....	27
Şekil 14. Hamming pencere ve frekans cevabı .....	28
Şekil 15. Blackman pencere ve frekans cevabı .....	28
Şekil 16. Spektrogram gösterimi, (a) yapay ses sinyali; (b) spektrogram gösterimi.....	29
Şekil 17. Spektrogram gösterimi, (a) frekans zamanla artan yapay ses sinyali; (b) spektrogram gösterimi.....	30
Şekil 18. Melodik ışıkları notalara dönüştürme düzeneği .....	32
Şekil 19. Melodik ışıkları notalara dönüştürme algoritması .....	33
Şekil 20. Tipik bir müzik nota sinyalinin zarfının bölümleri.....	35
Şekil 21. Enerji hesaplaması, (a) yapay ısıklık sinyali, (b) yapay ısıklık sinyalinin enerjisi....	37
Şekil 22. Otsu kümeleme uygulaması, (a) sınıflandırılmış enerji fonksiyonu (histogram) (b) kümeler arası varyans fonksiyonu ve optimal eşik değerinin belirlenmesi ...	39
Şekil 23. Peryodik bir sinyal ve özilişki fonsiyonu, (a) $f = \{20, 40, 60, 80, 100, 120 \text{ Hz}\}$ harmonik frekanslarına sahip bir yapay sinyal; (b) (a)'da verilen yapay sinyalin zaman ortamlı özilişki fonsiyonu. ....	40
Şekil 24. Şekil 23(a) verilen yapay sinyalin fark fonksiyonunun ortalama büyüklüğü .....	41

Şekil 25. fACF gösterimi, (a) yapay sinyalin yarım genlik spektrumu; (b) (a)'da verilen genlik spektrumunun özilişki fonksiyonu .....	43
Şekil 26. HPS algoritmasının gösterimi, (a) 1200 Hz'lik 4 harmonikten oluşan sinyalin frekans cevabı; (b) örnekleme aralığı 2 katına çıkarılmış veri; (c) örnekleme aralığı 3 katına çıkarılmış veri; (d) örnekleme aralığı 4 katına çıkarılmış veri; (e) yeniden örneklenmiş veri kümelerinin birebir çarpılmasıyla elde edilmiş HPS görünümü .....	45
Şekil 27. (a) Ayrı ayrı etiketlenmiş örnek ıslık frekansları ve kaynak frekansı $fr = 1500$ Hz olan nota dizilimleri; (b) $1300 \leq fr \leq 1900$ Hz arasında toplam kare hatalarından minimum hataya sahip frekansın bulunması. ....	46
Şekil 28. Ham ses sinyali .....	48
Şekil 29. DC düzeltmesi uygulanmış ses sinyali.....	48
Şekil 30. Normalleştirme işlemi uygulanmış ses sinyali .....	49
Şekil 31. Ortalama silme işlemi uygulanmış ses sinyali.....	49
Şekil 32. Otsu kümeleme algoritması ile eşik değerinin belirlenmesi.....	50
Şekil 33. Sinyalin enerji grafiği ve eşik değeri .....	50
Şekil 34. Sinyal içindeki notaların başlangıç ve bitiş noktaları .....	51
Şekil 35. Sinyalin spektrogramı .....	51
Şekil 36. Temel frekansların kümelenmesi ile notaların kestirimi.....	52
Şekil 37. Postacı şarkısının ilk dizesinin notaları.....	52
Şekil 38. Ham ses sinyali .....	53
Şekil 39. DC düzeltmesi uygulanmış ses sinyali.....	53
Şekil 40. Normalleştirme işlemi uygulanmış ses sinyali .....	53
Şekil 41. Ortalama silme işlemi uygulanmış ses sinyali.....	54
Şekil 42. Otsu kümeleme algoritması ile eşik değerinin belirlenmesi.....	54
Şekil 43. Sinyalin enerji grafiği ve eşik değeri .....	55
Şekil 44. Sinyal içindeki notaların başlangıç ve bitiş noktaları .....	55
Şekil 45. Sinyalin spektrogramı .....	55
Şekil 46. Temel frekansların kümelenmesi ile notaların kestirimi.....	56
Şekil 47. Postacı şarkısının ikinci dizesinin notaları .....	56
Şekil 48. Ham ses sinyali .....	57
Şekil 49. DC düzeltmesi uygulanmış ses sinyali.....	57
Şekil 50. Normalleştirme işlemi uygulanmış ses sinyali .....	58
Şekil 51. Ortalama silme işlemi uygulanmış ses sinyali.....	58
Şekil 52. Otsu kümeleme algoritması ile eşik değerinin belirlenmesi.....	59
Şekil 53. Sinyalin enerji grafiği ve eşik değeri .....	59
Şekil 54. Sinyal içindeki notaların başlangıç ve bitiş noktaları .....	60

Şekil 55. Sinyalin spektrogramı .....	60
Şekil 56. Temel frekansların kümelenmesi ile notaların kestirimi.....	61
Şekil 57. Okulumuz şarkısının ilk dizesinin notaları.....	61

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Nota frekans değerlerinin Hz olarak gösterimi [10] .....	13
Tablo 2. Önerilen F0 kestirim yöntemlerinin göreceli karşılaştırma sonuçları.....	44
Tablo 3. Solfej notları ve Sol notasına göre göreceli yarım perde konumları ve fr göre frekansları .....	47

## SEMBOLLER DİZİNİ

$\lambda$	: Ses sinyalinin dalga boyu
Hz	: Ses sinyalinin frekans birimi
dB	: Ses şiddet birimi
bel	: İki farklı büyüklüğün oranının logaritması
T	: Dönem(Periyot)
$T_0$	: Temel Dönem
$F_0$	: Temel Frekans
$F_n$	: n. notanın frekans değeri
$F_{ref}$	: Referans seçilen notanın frekans değeri
C	: Do notası
C#	: Do diyez notası
D	: Re notası
Eb	: Mi bemol notası
E	: Mi notası
F	: Fa notası
F#	: Fa diyez notası
G	: Sol notası
G#	: Sol diyez notası
A	: La notası
Bb	: Si bemol notası
B	: Si notası
FFT	: Hızlı fourier dönüşümü
DFT	: Ayrık fourier dönüşümü
$\Delta t$	: Örnekleme zaman aralığı
$f_s$	: Örnekleme frekansı
$f_{Nyquist}$	: Nyquist frekansı
$\Delta f$	: Frekans ortamında örnekleme aralığı
STFT	: Kısa süreli fourier dönüşümü
W	: Pencere fonksiyonu
K	: Pencerenin sıçrama uzaklığı

spec	: Spektrogram
DC	: Ortalama kayması
y	: Çıkış sinyali
E	: Enerji sinyali
$p_i$	: Olasılık değeri
$C_1$	: Sıklık göstergesi üzerindeki birinci küme
$C_2$	: Sıklık göstergesi üzerindeki ikinci küme
$w_1$	: Birinci kümeye ait birikimli olasılık
$w_2$	: İkinci kümeye ait birikimli olasılık
$\mu_1$	: Birinci küme için sınıflandırılmış ortalama değer
$\mu_2$	: İkinci küme için sınıflandırılmış ortalama değer
$\mu_T$	: Tüm verinin ortalama değeri
$\sigma_B^2$	: Kümeler arası varyans
$t^*$	: Kümeler arası varyans değerlerini en büyük yapan sınıf dizini
AMDF	: Fark fonksiyonunun ortalama büyüklüğü
tACF	: Zaman ortamlı özilişki fonksiyonu
fACF	: Frekans ortamlı özilişki fonksiyonu
HPS	: Harmonik çarpım spektrumu
$r_{xx}$	: Özilişki fonksiyonu
IFFT	: Ters fourier dönüşümü
Y	: Harmoniklerin maksimum çakışmaları
D	: Hesaplamalarda kullanılan harmoniklerin sayısı
$f_r$	: Kaynak frekans
arg	: Hesaplanan değer in indisini verir
$V_{i=0}^n$	: Bir dizi içindeki en büyük değeri verir

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Ses ve Sesin Yayılması

Dalgalar genel olarak, mekanik ve elektromanyetik dalgalar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Elektromanyetik dalgalar, yayılmak için bir ortama ihtiyaç duymazlar ve boşlukta da yayılabilirler. Mekanik dalgalar ise, enerjilerini aktarabilmek için ortam taneciklerine ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden boşlukta (örneğin uzayda) yayılamazlar. Ses dalgaları da mekanik dalgalar olduklarından yayılmak için maddesel bir ortama ihtiyaç duyarlar [1].

Ses, bir enerji türüdür ve dalgalar halinde yayılır. Ses mekanik dalga olduğundan yayılması için bir ortama ve bu ortamda taneciklere ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle ses dalgaları katı, sıvı ve gaz gibi maddelerde yani maddesel ortamlarda yayılabilirler. Boşlukta, maddesel ortam yani tanecikler olmadığı için ses kaynağının titreşim sonucu yaydığı titreşim enerjisi taşınmaz ve ses boşlukta yayılamaz. Ses dalgaları su dalgalarına benzer fakat su dalgaları gibi görünen dairesel dalgalar şeklinde değil, görünmeyen küresel dalgalar şeklinde yayılır. Ortamdaki taneciklerin kendilerinin değil, taneciklerin titreşim enerjilerinin taşınması sonucu oluşur. Ses kaynağından çıkan ses dalgaları, yayıldığı ortamdaki maddenin taneciklerini titreştirir. Titreşen tanecik etrafındaki diğer tanecikleri titreştirir ve bu nedenle ses bir tanecikten diğerine yayılır. Cisimlerin titreşmesi ile meydana gelen sesin kulağımıza kadar gelebilmesi için ses kaynağı ile kulağımız arasında katı, sıvı, gaz gibi esnek bir ortamın bulunması gerekir [2].

Ses, nesnelerin titreşiminden meydana gelen ve uygun bir ortam içerisinde (hava, su vb.) bir yerden başka bir yere, sıkışma (compressions) ve genleşmeler (rarefactions) şeklinde ilerleyen bir dalgadır. Dolayısıyla ses, bir basınç dalgasıdır. Yani ses atmosferde kulağımız tarafından algılanabilen dönemsel basınç değişimleridir. Fizikte “ses” deyince, aklımıza atmosferde yol alan titreşimler gelir. Atmosferde titreşen bir nesne, çevresindeki hava moleküllerini hareket ettirir. Hava moleküllerinin küresel hareketi, kulakların hissedebileceği basınç değişimi dalgaları yaratır. Bu dalgalar ortamlarda sıkışma ve genleşme şeklinde boyuna ilerleyen dalgalardır [3].

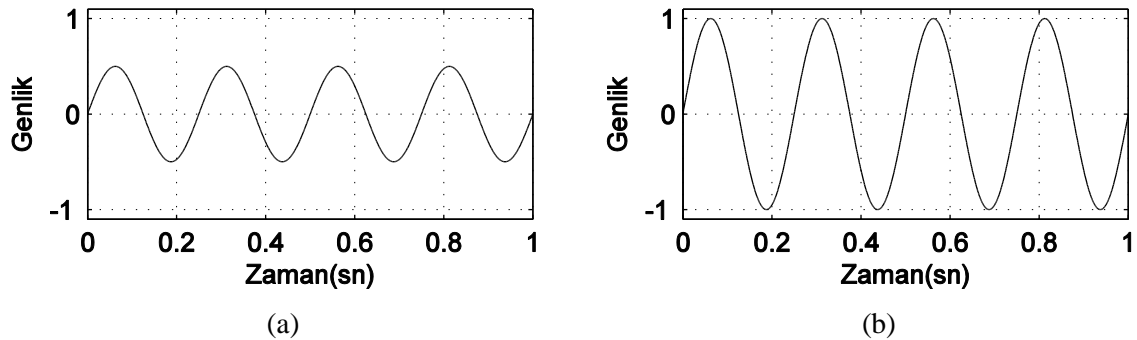


## 1.2. Sesin Özellikleri

Ses en temel anlamda, katı, sıvı veya gaz elementleri arasında enerji aktarımı ile gerçekleşen bir basınç değişimidir. Bu değişim sabit bir noktada zamanla değişen bir basınç değeri olduğu gibi, sabit bir zamanda yayılım alanında konuma bağlı basınç değişimleri olarak da gözlenmektedir. Basınç değerinin gerek zamandaki değişimi ve gerekse konuma bağlı değişimini karakterize eden parametreler sesin özellikleri olarak nitelendirilmektedir.

### 1.2.1. Genlik

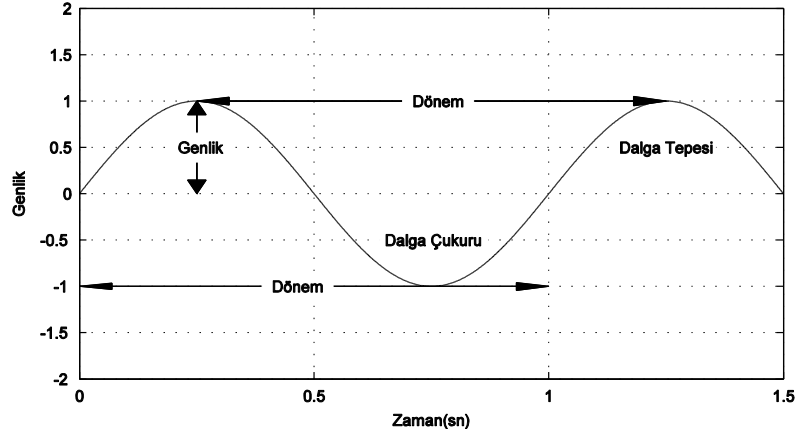
Genlik, ses dalgalarının düşey büyüklüğünün bir ölçüsüdür. Ses dalgalarını oluşturan sıkışma ve genleşmeler arasındaki fark, dalgaların genliğini belirler. Ses dalgaları havada veya başka bir ortamda titreşen nesnelere tarafından üretilir. Örneğin titreştirilen bir gitar teli, yaptığı dönemsal salınım hareketi ile hava moleküllerinin belli bir frekansta sıkışmasını ve genleşmesini sağlar. Bu şekilde teldeki enerji havaya iletilmiş olur. Enerjinin miktarı, teldeki titreşim genliğine bağlıdır. Eğer tele fazla enerji yüklenirse, tel daha büyük bir genlikle titreşir. Teldeki titreşim genliği ne kadar fazla ise ortam tanecikleri (örneğin hava molekülleri) tarafından taşınan enerji de o kadar fazladır. Enerji ne kadar fazla ise sesin şiddeti de o kadar büyük olacaktır. Bu ifadeler, titreşen tüm cisimler için geçerlidir. Şekil 1 (a)'da düşük genlikli bir sinüs sinyali ile Şekil 1(b)'de daha yüksek genlikli bir sinüs sinyali görülmektedir. Aynı döneme ve süreye sahip olmalarına rağmen taşıdıkları enerjileri farklı olmaktadır [4].



Şekil 1. Genlik karşılaştırması, (a) düşük genlikli ses sinyali; (b) yüksek genlikli ses sinyali

### 1.2.2. Dönem (Period)

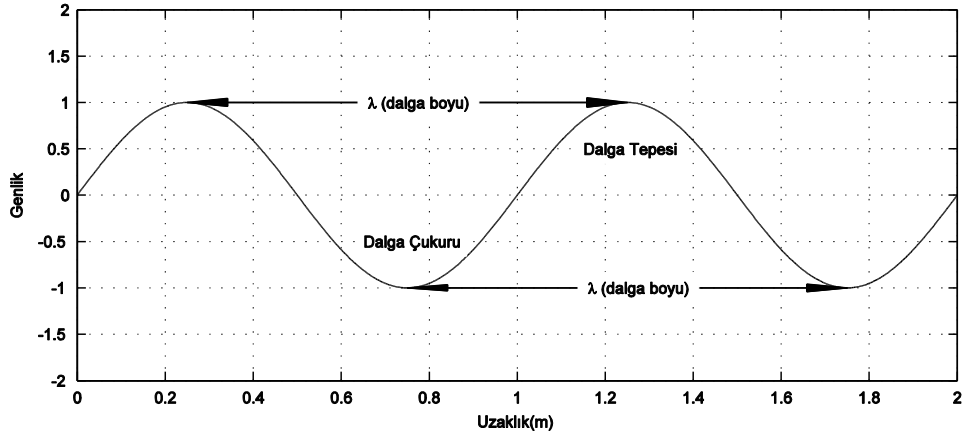
Bir dalga ardışık olarak genliğin azalması ve artması ile ilerlemektedir. Bu ise ses dalgasının yayıldığı ortamdaki maddenin sıkışıp genişmesiyle oluşmaktadır. Sıkışma ve genişleme olayı bir tam dalgayı oluşturmaktadır. Bir tam dalganın üretilmesi için geçen süreye dönem denir. Yani, sabit bir konumda ardışık iki tepe veya iki çukuru oluşması için geçen süredir.



Şekil 2. Bir ses sinyali üzerinde dönemseller gösterim

### 1.2.3. Dalga Boyu

Bir dalganın herhangi bir anında, ardışık iki tepe veya iki çukur noktası arasındaki uzaklık dalga boyu olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle bir dönemsellik süre içinde ses dalgasının kat ettiği yoldur ve  $\lambda$  ile gösterilir. Dalga sayısı ile ters orantılıdır. Sesin yayılma hızının dalga sayısına bölünmesi ile bulunur.



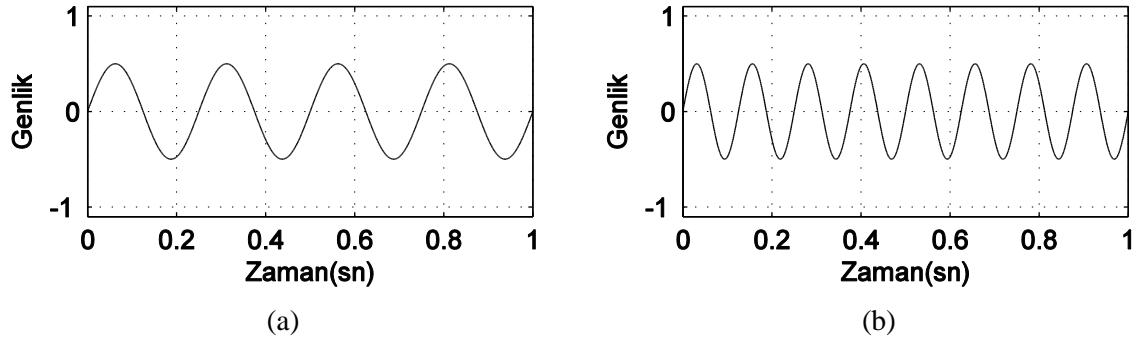
Şekil 3. Bir ses sinyali üzerinde dalga boyu gösterimi

#### 1.2.4. Frekans

Farklı titreşimler yayan nesnelere farklı sesler duymamızın nedeni, ses dalgalarının frekansındaki farklılıklardır. Frekans, ileri geri titreşimlerin zamana bağlı olarak ölçülmesi ile hesaplanır. Ses dalgalarının bir saniyedeki titreşim sayısına frekans denir. Birimi “Hertz (Hz)”dir. Yüksek frekans değerleri için Hertz’in bin katı olan ‘kilohertz’ (kHz) birimi kullanılır. Frekans arttıkça ses tizleşir (incelir). Düşük frekanslı sesler ise baz (kalın) sesleri oluşturur.

Sağlıklı bir insan, 20 – 20.000 Hertz arasındaki sesleri işitebilir. En duyarlı olduğu sesler ise, 500 – 8000 Hertz aralığındakilerdir. Bu aralık, insanların konuşma seslerine karşılık gelir. Frekanslarına göre, ses dalgaları, üç gruba ayrılır. Bunlar ses altı, ses üstü ve işitilebilir seslerdir. 20Hz'nin altındaki frekanslar insan kulağının işitemeyeceği kadar zayıftır ve bunlara *ses altı*(subsonik) frekanslar denir. 20.000 Hz'nin (insan kulağı için üst sınır) üzerindeki frekanslar ise *ses üstü*(ultrasonik) frekanslar olarak tanımlanır. *Ses altı* ve *ses üstü* frekansları birlikte *ses ötesi* frekanslarını oluşturur.

İnce ve kalın ses, ses kaynağının frekansıyla alakalıdır. İnce sesin frekansı fazla, kalın sesin frekansı azdır. Aynı sürede daha fazla dalga üreten ses kaynağının frekansı daha fazladır. İki ses dalgası aynı süre içinde farklı oranda dalga üretir. Daha fazla ses dalgası üreten kaynağın frekansı daha büyüktür [4].



Şekil 4. Frekans karşılaştırması, (a) Düşük frekanslı ses sinyali; (b) Yüksek frekanslı ses sinyali

Farklı frekanslar kulak salyangozunun oval pencere zarının çeşitli bölgelerinde(kritik bantlar) ayırt edilirler. Birçok frekans birlikte çalındığında, kaynağın sesil (pitch)'ine karar vermek için bütün kritik bantlardan gelen bilgiler birleştirilir. Kaynağın parçaları arasındaki harmonik ilişkiyle algılama oluşur.

### 1.2.5. Dalga Sayısı

Dalga sayısı, çoğu zaman frekans olarak adlandırılmasına rağmen aralarında birimsel farklılıklar vardır. Frekansın zaman ile ilişkisi, dalga sayısının uzaklıkla ilişkisinin aynısıdır. Uzaklıkla değişen bir parametre, Fourier dönüşümüyle dalga sayısına dönüşebilmektedir.

### 1.2.6. Hız

Ses, tanecikten taneciğe yayılır. Tanecikler ne kadar sık ise ses de o kadar hızlı yayılır. Sesin yayılma hızında sırasıyla katıdan sıvıya, sıvıdan gaza geçişlerde yansımalarından dolayı genliklerde azalmalar gerçekleşir. Ortamı oluşturan maddenin yoğunluğu, iç basıncı, özgül ısı(özellikle gazlar için), esnekliği(katı ve sıvılar için), sıcaklığı gibi dış etmenler de, ses dalgalarının hızı üzerinde bir dizi etkiler yaratır. Ses dalgaları katılarda ortalama 5000 m/s, suda 1453 m/s ve havada 340 m/s hızla yol alır. Ses hızı frekansa bağlı olarak değişmez. Her frekansta ses aynı hızda gider.

### 1.2.7. Şiddet

Sesin kulak tarafından duyulan yüksekliğine sesin şiddeti denir. Duyulabilen ses dalgalarının ilerlediği doğrultuya dik durumdaki birim alandan birim zamanda geçen enerji miktarıdır. Şiddet, ses dalgalarının taşıdıkları enerjiye bağlı olarak birim alana

uyguladıkları kuvvettir. Şiddet birimi desibel(dB) 'dir.1 desibel insan kulağının işitebildiği en küçük ses şiddetidir.

Sesin şiddeti, titreşimin genliğinin logaritmasıyla doğru, ses kaynağının dinleyene uzaklığının karesinin logaritmasıyla ters orantılı olarak değişir. Bu yüzden kaynağa olan uzaklık 2 katına çıktığında sesin enerjisi  $\frac{1}{4}$  'üne düşer. Benzer şekilde kaynağa olan uzaklık  $\frac{1}{4}$  'üne düştüğünde enerji 16 katına çıkar.

Ses dalgaları enerjilerini üç boyutlu ortamda taşıırken, kaynaktan uzaklaştıkça ses dalgalarının şiddeti azalır. Artan uzaklıkla birlikte ses dalgalarının şiddetinin azalması ses dalgalarındaki enerjinin daha geniş alanlara yayılmasından kaynaklanır. Ses dalgaları üç boyutlu bir ortamda küresel olarak yayılır. Enerji korunduğu için enerjinin yayıldığı alan arttıkça güç azalmaktadır. Ses şiddeti güç/zaman birimiyle ölçülür. Ses şiddeti nesnel bir niceliktir; uygun ölçme aygıtlarıyla ve gözlemcinin işitme duyumundan bağımsız olarak ölçülebilir. Bir sesin şiddeti ile aynı frekanstaki bir başka sesin şiddeti, bunların şiddetlerinin bir birine bölünüp elde edilen oranın logaritması alınarak karşılaştırılır.

Ses şiddet birimi olan desibel, atmosferik basınç (ses yokken) ile toplam basınç (ses varken) arasındaki oranın ölçüsüdür. Sesin genliği için pek çok ölçü tipi bulunsa da, ses basıncı temel ölçüdür. Ses basıncı salınımlarının birimi desibeldir(dB). Desibel ölçeği logaritmiktir, çünkü ses şiddeti aralığı öyle geniştir ki ölçülmesi ya da gözlenmesi gereken tüm sesleri doğrusal bir ölçeğe sığdırmak imkânsızdır. Öte yandan, insan kulağı çok düşük ve çok yüksek şiddette sesleri duyabilme yeteneğine sahiptir. İnsan kulağının algılayabileceği en düşük ses şiddeti, 'eşik şiddet' olarak bilinir. Kulağa zarar vermeden işitilebilen en yüksek sesin şiddeti ise, eşik şiddetinin yaklaşık 1 milyon katı kadardır. İnsan kulağının şiddet algı aralığı bu kadar geniş olduğundan, şiddet ölçümü için kullanılan ölçek de 10'un katları, yani logaritmik olarak düzenlenmiştir. Buna 'desibel ölçeği' adı verilmektedir. Sıfır desibel mutlak sessizliği değil; işitilemeyecek kadar düşük ses şiddetini gösterir. Üst sınırdaki, yani acı sınırındaki bir ses, duyulabilen en kısık sesin tam on milyon katı büyüklüğündedir.

Desibel, bir oranı veya göreceli bir değeri gösterir ve 'bel' biriminin 10 katıdır. Alexander Graham Bell' in anısına 'bel' adı verilen birim, iki farklı büyüklüğün oranının logaritması olarak tanımlanmaktadır. Yani '1 bel', birbirlerine oranları 10 olan iki büyüklüğü göstermektedir (örneğin 200/20). Bu oranın çok büyük olmasından dolayı "Desibel" adı verilen ve oranların logaritmasının 10 katı olarak tanımlanan birim daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayılardan biri bilinen bir sayı olarak alındığından, söz

konusu bir büyüklüğün ( $P_n$ ) referans büyüklüğe ( $P_o$ ) oranının logaritmasının 10 katı 1 desibel değerini vermektedir. (1) eşitliğinde 1dB'in değeri verilmektedir,

$$1 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_n}{P_o} \right). \quad (1)$$

### 1.2.8. Ton

Titreşimleri basit sinüs eğrisi karakteri taşıyan seslere duru sesler denilir. Bir ses çatalının(diyapazonun) çıkardığı ses bunun en yalın örneğidir. Ton kavramı da müzikte belli bir frekansta ve sesilde üretilen duru ses anlamında kullanılır. Örneğin bir ses çatalı titreştirildiğinde ortaya çıkan 440 Hz frekansındaki 'Do (C)' notası, duru bir tondur. Duru tonlar doğal ortamda fazla karşılaşılmayan ve genellikle müzik aletleri veya ses üreteçleri aracılığıyla üretilen seslerdir. Oysa doğadaki sesler her zaman karmaşık yapıya sahiptirler.

### 1.2.9. Sesin Konumsal Gürlüğü

Bu kavram sesin yönlü şiddetini tanımlar. İnsan kulağı en az 30 mikro-saniyelik zaman gecikmesiyle gelen aynı iki sesi birbirinden ayırt edebilme yetisine sahiptir. Bir başka deyişle, sıradan bir kulağa sahip olan bir insan, iki kulağına gelen seslerin zaman farkını yüz binde üç saniye kadar bir değer içinde fark edebilmekte ve bu sayede de, kendisine ulaşan sesin kaynağının uzaklığını kabaca da olsa belirleyebilmektedir.

### 1.2.10. Temel Frekans, Harmonik Sesler ve Sesil

Temel frekans, dönemsel bir dalganın en düşük frekansı olarak tanımlanır. Kendini zaman içinde tekrar eden dalgalara da dönemsel dalga denir. Dönemsel bir dalgayı bazı  $T$  dönemlerini bularak aşağıdaki gibi gösterebiliriz,

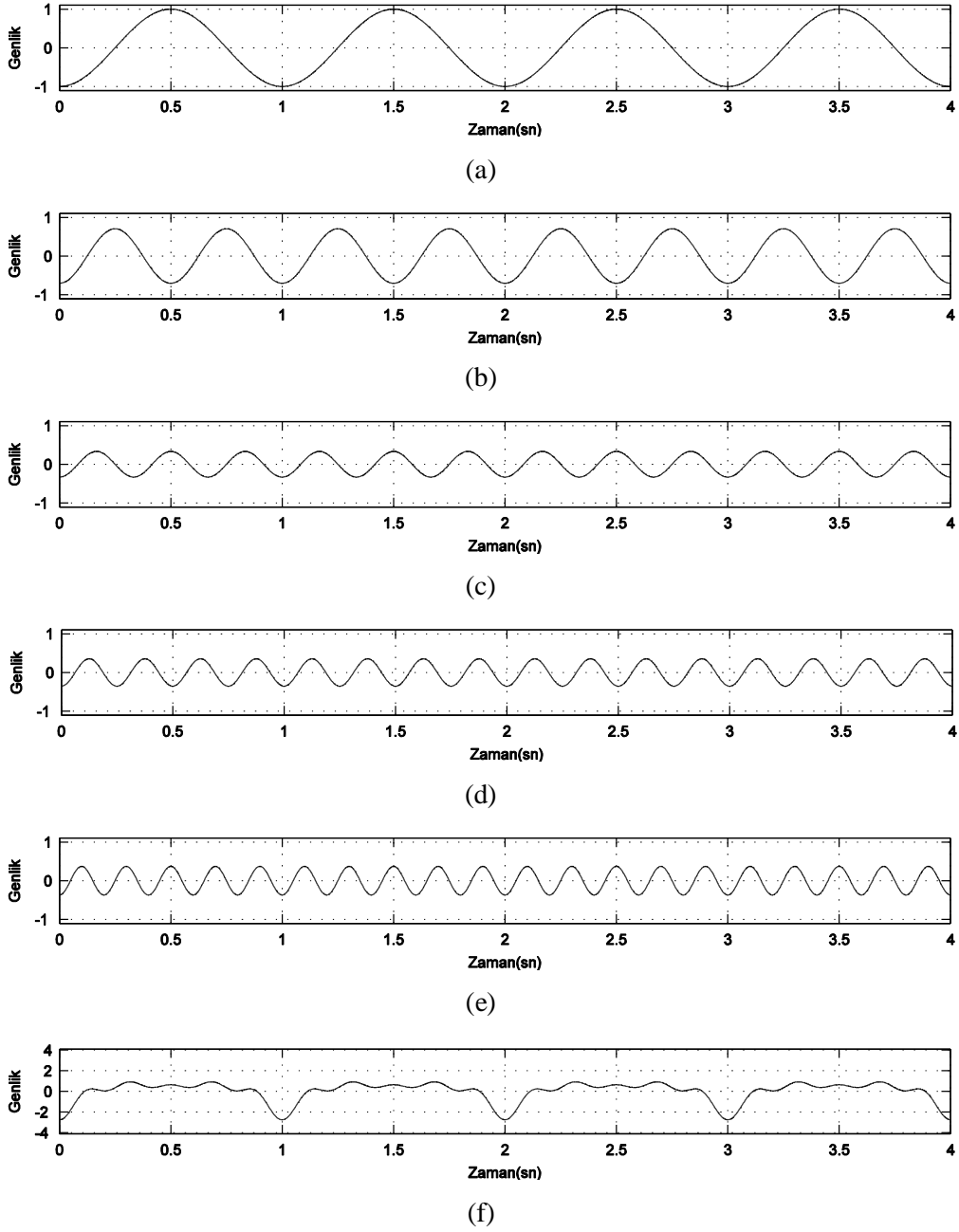
$$x(t) = x(t + nT), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

Burada  $x(t)$  bir dalga işlevidir. Bu işlev  $T$  zaman sonra aynı değere sahip olduğu gibi  $T$ 'nin tam sayılı katlarında da her zaman aynı değere sahip olmaktadır.  $T$ 'nin en düşük değeri temel dönem ( $T_0$ ) olarak adlandırılmaktadır. Temel dönemin tersi olan temel frekansa aynı zamanda sıfıncı harmonik de denilir. Temel frekans, sadece dönemsel ya da nerdeyse dönemsel sesler için tanımlanan fiziksel bir özelliktir ve dönemin tersine karşılık gelir. Dolayısıyla temel frekans( $F_0$ ) aşağıdaki eşitlik ile bulunur,

$$F_0 = \frac{1}{T_0}. \quad (3)$$

Bir sesteki temel dönem değeri zaman içinde değişikliğe uğrar. Değişime uğrayan temel dönemin herhangi bir zaman dilimindeki değeri sesil olarak adlandırılır ve o zaman dilimindeki melodinin tonunu belirler. Aynı öbek içerisindeki ardışık iki sesil arasındaki değişim oldukça düşüktür. Zamanla değişen sesil değeri farklı tonların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu tonların farklılığı, insanlarda iki farklı melodiyi algılamadaki duyarlılık aralığı olduğu bilinmektedir [5].

Her müzik aleti herhangi bir notayı seslendirirken belli bir dönemle titreşim yapar. Üretilen bu ses genlik spektrumunda incelendiğinde müzik aletinin sadece bir frekansta değil, pek çok frekansta ses ürettiği görülür. Bu frekanslardan en küçüğünün aynı zamanda en yüksek genliğe sahip olduğu görülmüştür. Baskın olan bu frekans aynı zamanda çalınan notayı da belirler. İşte bu frekansa temel frekans (fundamental frequency) denilir. Diğer sesler ise daha düşük genlikli, fakat daha yüksek frekanslıdır. Diğer frekanslar genellikle temel frekansın tam sayı katları biçiminde dizilirler. Bu küçük genlikli, yüksek frekanslı seslere temel frekansın harmonikleri denir. İşte kulağın farklı müzik aletlerini birbirinden ayırmasını sağlayan bu harmoniklerdir. Temel frekanslı bir sinyal ile harmoniklerinin toplamı müziğin ritmini ve tınısı değiştirmesine rağmen, temel dönemi (sesil) etkilememektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Temel frekans ve harmonikler, (a) 0. harmonik (temel frekans,  $T_0 = 1$ ); (b) 1. harmonik ( $T_1 = 1/2$ ); (c) 2. Harmonik ( $T_2 = 1/3$ ); (d) 3. Harmonik ( $T_3 = 1/4$ ); (e) 4. Harmonik ( $T_4 = 1/5$ ); (f) Tüm harmoniklerin toplamı.

Bir enstrümandan çıkan her ses harmonik veya harmonik olmayan şeklinde sınıflandırılabilir. Harmonik sesler baskın frekans aralıkları eşit olan spektral bir yapıya sahiptir.

Harmonik, temel frekansın integral çarpanlarından elde edilen frekans aralığına sahip olan karmaşık bir tonun bileşenidir. İlk harmonik temel tondur ve ikinci harmonik(birinci üst ton)  $F_0$ 'ın iki katlı frekansıdır ve bir oktav yukarıdadır. Üçüncü harmonik(ikinci üst



ton), temel frekansın üç katıdır ve bu böylece devam ederek tüm harmonik birleşenler tanımlanabilir [6].

Bir ses dalgası farklı frekansların duru tonlarının belli bir sayıda bir araya gelmesiyle oluşur. Dönemsel bir ses dalgası farklı frekans ve genliklerinin sinüzoidal bileşenlerine ayrılabilir (Fourier Çözümleme).

### **1.2.11. Tını**

Tını, aynı şiddet ve sesildeki seslerin birbirinden ayırt edilmesini sağlayan, yani ses kaynağının cinsini belirlemeye yarayan özelliktir. Müzikte en önemli kavramlardan birisidir ve sesin 'rengini' ifade eder. Aynı oktavda, aynı notayı (tonu), aynı yoğunlukta ve aynı uzunlukta çalan bir kemanla bir flüt arasındaki temel fark, 'tını farkı'dır. Enstrümanları oluşturan bileşenlerin doğal frekanslarındaki (harmoniklerindeki) farklılıklar, sonuçta oluşan sesin farklı bir tında olmasını sağlar. Bu sayede, farklı müzik aletlerinden çıkan özdeş notaları kolaylıkla ayırt edebiliriz. Keman ve flüt tarafından verilen aynı nota seslerinin hangisinin kemana hangisinin flüte ait olduğunu anlamamızın nedeni, ses tınılarının farklı olmasıdır. Tını, sesin harmonik yapısına bağlı olarak değişir. Özet olarak, tını sesi ayırt edilebilir yapan bir özelliktir ve ne sesile ne de seslilik kavramına dâhil değildir.

## **1.3. Müzik Bilgisi**

### **1.3.1. Müzik, Ses ve Nota Bilgisi**

Frekans yükseldikçe ses perdesi de yükselir. Besteciler müzik bestelerken belirli bir perdenin seslerini kullanırlar. Her müzik aletinin ses perdesi değişiktir. Pikolo, flüt ya da keman gibi bazı müzik aletleri yüksek perdeden, kontrbas ya da tuba gibi müzik aletleri ise alçak perdeden ses çıkarır.

Birbirinden kopuk ve düzensiz frekanslardan oluşan seslerin belirli bir perdesi yoktur. Eğer sesi oluşturan frekanslar düzenli ve birbiriyle uyumluysa, oluşan sesin belirli bir perdesi var demektir. Frekanslardan biri genellikle ötekilerden daha güçlüdür ve tek başına ses perdesini belirler. İşte bu frekans "nota" adını verdiğimiz sesi oluşturur.

Kemanla çalman bir nota, obua ya da klarnetle çalındığında kulağımıza değişik gelir. Bunun nedeni kısmi sesleri oluşturan öteki frekansların her müzik aletinde değişik olmasıdır. Bu frekanslara doğal harmonikler denir. Her müzik aletinin kendi doğal

harmonikleri ve buna bağılı olarak kendine özgü bir ses rengi yani tınısı vardır. Besteciler müzik aletlerinin kendine özgü ses renginden yararlanarak özel etkiler elde ederler.

Bir resme ya da bir heykele ne zaman istersek bakabilir, karşısında dilediğimiz kadar durup inceleyebiliriz. Oysa bir müzik parçası bir kez dinlenmekle son bulur. Bu nedenle müzik parçalarının kalıcı olmasını sağlamak için özel işaret ve simgelerden oluşan bir sistem geliştirilmiştir. Besteci yapıtını bu simgeleri kullanarak kâğıda geçirir. Bu yazım sistemine "nota yazısı" adı verilir. Seslerin yüksekliklerini, sürelerini ve öteki özelliklerini gösteren grafik simgelere nota, notaların üzerine yazıldığı birbirine paralel, beş yatay çizgiden oluşan nota satırlarına porte denir. Notalar tam anlamlarına sese dönüştürüldükleri anda kavuşurlar [7].

Bir müzik yapıtını genellikle bestecinin kendisi seslendirmez. Bununla birlikte pop ya da halk müziğinde besteyi sunan genellikle bestecinin kendisidir. Bir müzik parçasını seslendirmek ayrı bir sanattır. Besteyi seslendiren sanatçı kendine özgü tekniği ve yorumuyla besteye ayrı bir renk katar. Müzik parçaları konser ve resitallerde doğrudan ve bir kere dinlenebilir. Oysa günümüzün teknik olanaklarıyla yapılan ses kaydı, müziğin kalıcı olmasını sağlamıştır.

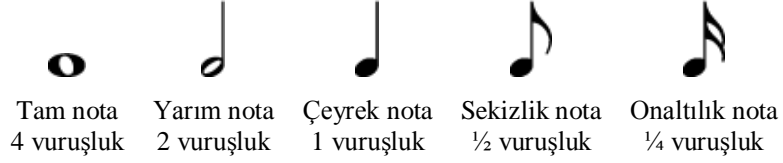
Müzik, özel bazı frekans ve genlik değerlerine sahip ses dalgaları kullanılarak yapılır. İşte bu özel frekans ve genlik değerlerindeki ses dalgalarına nota denir. Aşağıdaki şekilde batı müziğinde kullanılan notalar gösterilmiştir.



Şekil 6. Batı müziğinde yer alan notaların gösterimi

Şu an kullandığımız müzik sisteminin temeli bundan yaklaşık dört asır önceye kadar uzanmaktadır. Bu gösterim sayesinde bir müzik parçası içerisindeki her nota(tone) için, sesil(pitch), süre(duration) ve zaman içerisindeki yeri belirtilmektedir [8].

Bir müzisyen, çaldığı bir parçada her notasının süresini esnek tutmaktadır. Her müzisyenin bu süresi kendine göre göreceli bir değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla bu süreler saniye yerine vuruş olarak ölçülmektedir [9]. Notaların vuruş gösterimleri genel olarak Şekil 7'deki gibi gösterilmektedirler:



Şekil 7. Müzik notalarını vuruş değerlerinin gösterimi

Aslında insan beyninin sesi müzikal anlamda algılama ve değerlendirme olayının büyük bir kısmı sonradan öğrenilmiş ve psikolojik bir olaydır. Müzikal algının insanın yaşadığı ortama ve yaşadığı kültürel yapısına bağlı olmasının, belli müzik çeşitlerin belli coğrafyalarda ortaya çıkmasının asıl sebebi de budur. Nota kavramının tamamen bağıl bir kavram olduğunu belirtmek gerekir. Aslında nota kavramı yapılan müziğin belli bir kaynak çerçevesine oturtulması, mekanik olarak oluşturulan sesin kâğıt üzerine aktarılabilmesi ve bu sayede bir müzik parçasının daha önce dinlenilmese bile bu yazılı kayıtlara bakılarak yeniden çalınabilmesi, yeni kuşaklara aktarılabilmesi gibi ihtiyaçları karşılamak üzere geliştirilmiştir. Dünyanın başka bölgelerinde, o bölgede yaşayan toplumlarca geliştirilmiş başka nota sistemleri de mevcuttur.

Bir nota, belli frekans değerlerinde, tanımlanır. Bu esas alınarak, Batı müziğinde nota frekansları, aşağıdaki formülle hesaplanabilir[9],

$$F_n = F_{ref} 2^{\frac{n}{12}} \quad (4)$$

Referans bir nota frekansı başlangıç seçilerek diğer tüm notaların frekansları (4) bu bağıntıyla hesaplanabilir. Burada n, başlangıç notasından uzaklığı gösterir. Artı veya eksi işaretli (sırasıyla ileri ve geri yönlerde) olabilir. Mesela D(146,84 Hz) notasından başlanırsa F(174,62) notasının frekansı şöyle hesaplanabilir,

$$Frekans = F_{nota} \times 2^{\frac{n}{12}} = 146,84 \times 2^{\frac{3}{12}} = 174,62 \text{ Hz} \quad (5)$$

Her hangi bir notanın frekans değerinin tam katları, o notanın oktavları olarak adlandırılır. 440 Hz deki La(4. oktavda A notası) notasının, 1 oktav yukarısında bulunan notanın frekansı 880 Hz olup bu notaya da La (5. oktavda A notası) notası denir.

Tablo 1. Nota frekans değerlerinin Hz olarak gösterimi [10]

Oktav no.	DO		RE		Mİ	FA		SOL		LA		Sİ
	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb	B
0	16.35	17.32	18.35	19.45	20.60	21.83	23.12	24.50	25.96	27.50	29.14	30.87
1	32.70	34.65	36.71	38.89	41.20	43.65	46.25	49.00	51.91	55.00	58.27	61.74
2	65.41	69.30	73.42	77.78	82.41	87.31	92.50	98.00	103.8	110.0	116.5	123.5
3	130.8	138.6	146.8	155.6	164.8	174.6	185.0	196.0	207.7	220.0	233.1	246.9
4	261.6	277.2	293.7	311.1	329.6	349.2	370.0	392.0	415.3	<b>440.0</b>	466.2	493.9
5	523.3	554.4	587.3	622.3	659.3	698.5	740.0	784.0	830.6	880.0	932.3	987.8
6	1047	1109	1175	1245	1319	1397	1480	1568	1661	1760	1865	1976
7	2093	2217	2349	2489	2637	2794	2960	3136	3322	3520	3729	3951
8	4186	4435	4699	4978	5274	5588	5920	6272	6645	7040	7459	7902

Frekans düzleminde incelendiğinde, her nota, harmoniği olmayan tek bir sinüzoidal işaret olsaydı bütün çalgı aletleri aynı sesi çıkarırdı. O halde notaların her birini saf frekans değerleri olarak kabul etmek hatalı olacaktır. Çalgı aletleri aynı notaya akort edilseler bile aynı notaya ait sesi çıkartırken kendilerine has ve genlikleri seslendirdikleri notanın genliğinden düşük olan yan sesleri de oluştururlar. Yani çalgı aletlerinin çıkardığı sesteki frekans bileşenleri dikkate alınırsa notayı belirleyen frekans bileşeni, genliği en yüksek olan frekans bileşenidir. Bu frekans bileşeni, bu ses işareti Fourier serisine açılacak olursa elde edilecek olan birinci harmoniğin frekans değeridir.

### 1.3.2. Müziğin Tarihçesi ve Önemi

İnsanoğlu dünyaya gözlerimizi açtığı ilk günlerde annelerinin ninnileriyle, bilincine varmadan müzikle tanışmış olur. Daha sonra duyduğu şarkıları, sözlerinin anlamını kavramadan tekrarlar, melodisini yakalamaya çalışır. Bir tencere ya da masaya vurarak ilk kez kendi kendine müzik yapmanın tadına varır. İlkokul çağında flüt gibi gerçek bir müzik aleti çalmaya başlamak insanoğluna başlı başına bir mutluluk verir. Müzikle tanışıklık arttıkça, müziğin coşku, sevinç, korku ve keder gibi duyguların anlatımındaki gücü keşfedilir. Aynı zamanda flüt, piyano ve keman gibi müzik aletlerini çalabilmenin, yeteneğin yanı sıra sıkı ve düzenli bir çalışma gerektirdiği de öğrenilir [11].

Müzik, insanların kelimeler ile anlatamadığı duygu, düşünce ve hislerini melodik seslerle anlatma sanatıdır ve en eski sanat dallarından biridir. Tarih öncesi devirlerde kuşların ötüşünden, suların şırıltısından, yağmurun sesinden, rüzgârın ve kıyıya vuran dalgaların uğultusundan esinlenen ilk insanlar, içi boş bir kütüğe deri geçirip vurarak,

hayvan bağırsaklarından yapılan ipleri çekerek, boynuz, kemik ya da odundan boruları üfleyerek doğadaki sesleri taklit etmeye başladılar. Başlangıçta işaret vermek amacıyla kullandıkları bu sesleri sonraları hoşlarına gidecek biçimde düzenleyerek kendi ilkel müziklerini yarattılar.

Eski zamanlardan beri müziğin, dinsel törenlerde de önemli bir yeri oldu. Müzikle ilgili ilk kuramları geliştiren Eski Yunanlılar'dı. Eski Yunan'da müzik ve dans insanların yaşamında önemli bir yer tutardı. Müzik sözcüğü Eski Yunan'da sanatın esin tanrıçaları olduğuna inanılan Musalar'ın adından türetilmiştir. Bununla birlikte o dönemde mousike sözcüğü, Musalar'ın koruması altındaki her sanat ya da bilim dalı için kullanılan genel bir terimdi.

Akustiğin temelini kuran Pisagor (Pythagoras) ise müziği matematiksel yoldan çözümlenerek, bir sesin frekansı ile telin uzunluğu arasındaki ilişkiyi saptadı. Belirli uzunlukta ki bir telde çalınan notanın frekansının, iki kat uzunluktaki bir telde çalınan notanın frekansının tam iki katı olduğunu buldu.

Çinliler de Eski Yunanlılar gibi müziğin sevinç ve keder gibi duygular uyandırmaktaki gücünün bilincindeydiler. Müziğin tanrısal bir gücün yankısı olduğuna inanıyorlardı. Bu inanç daha sonraları da sürdü ve Hristiyanlık'ın ilk yıllarından başlayarak, müzik etkili bir dinsel anlatım aracı oldu. Müzik sözün taşıyıcısı olarak kullanıldı.

Müziğin kuramsal gelişimi tarih boyunca çeşitli evrelerden geçti. Tonalite ve oktav (birinci sestene sekizinci sese kadar olan aralık) 17. yüzyılda geliştirildi. 15.-17. yüzyıl başları arasındaki dönem, uzmanlarca müziğin Rönesans'ı olarak nitelendirilir. O dönemde müzik alanında bir dizi hızlı gelişme sağlandı. Bu dönemde çoksesli müziğin ilk örnekleri verildi.

Müzikte 17. yüzyıl ile 18. yüzyılın ilk yarısı arasındaki dönem barok dönem olarak bilinir. Dinsel ve dindışı müziğin kesin olarak birbirinden ayrıldığı bu dönemdeki en önemli gelişmelerden biri de çalgı eşliğinde söylenen dindışı solo şarkılardı. Bu şarkılar sonradan gelişecek olan operanın ilk örnekleri sayılır. Barok dönem bugün bildiğimiz anlamda orkestraların ilk örneklerinin kurulduğu, çalgıların bugünkü biçimini almaya başladığı bir dönemdi. 18. yüzyılın sonlarına doğru, müzikte klasik dönem başladı.

Müzikte duyguların yanı sıra düşünceye de yer veren ilk besteci, çalışmalarıyla kendisinden sonra gelen birçok sanatçıyı derinden etkileyen Beethoven'di. Beethoven müziğe düşünce yüklü yeni bir içerik kazandırmıştı. 20. yüzyıl müzikte yeni arayışlar

dönemi oldu. Yapıtlarda alışılmışın dışında bir armoni ve tonalite kullanılarak resimde boya ile gerçekleştirilen etkiyi müzikte yaratmakla İzlenimcilik Akımı'nı başlattılar. I. Dünya Savaşından kısa bir süre sonra gelişen radyo yayınları müziksever dinleyicilerin sayısını önemli ölçüde artırdı. 20. yüzyıldaki büyük bestecilerin çoğu hiç bir akıma bağlanmadan özgün müzik yazan bestecilerdi. Belirsizlik ilkesine dayanarak rastlantısal müzik türünü geliştiren öncü besteci ABD'li John Cage'e göre, sessizlik bile tek başına müzik olabilir [12].

### 1.3.3. İşitsel Psikoloji (İnsan İşitsel Sistemi)

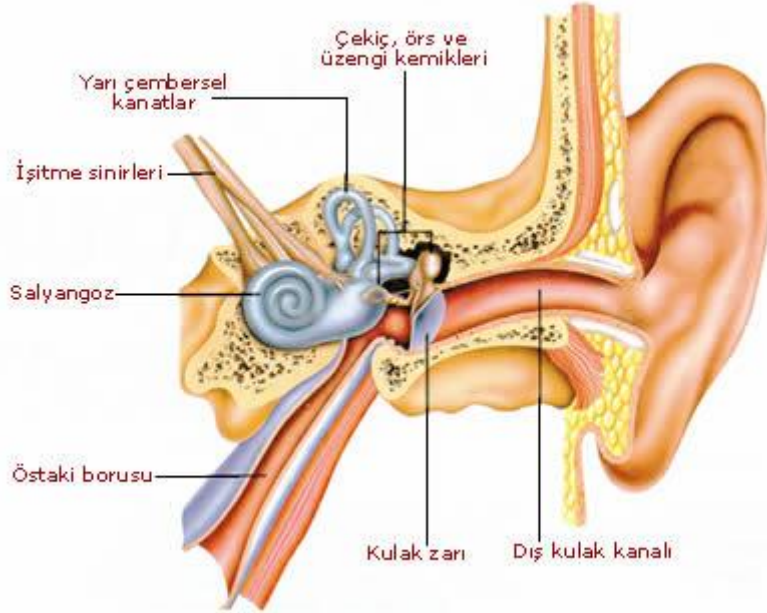
İnsan kulağı son derece doğru analiz yapabilen, işitmeden ve dengeden sorumlu bir organdır. Sesin frekansındaki ve şiddetindeki küçük değişimleri ayırt etme yeteneğine sahiptir. Kulak farklı fonksiyonları yerine getiren yapılardan oluşur. Bunlar dış kulak, orta kulak ve iç kulaktır.

Dış kulak, kulak kepçesi (görünen kısım), dış kulak yolu (işitme kanalı) ve kulak zarından oluşur. Kulak kepçesi kıkırdak bir yapıdan oluşur ve havada yayılan titreşimleri toplayarak dış kulak kanalına iletir. Kulak kepçesinin özellikle yüksek frekanslardaki sesleri süzme özelliği vardır ve uzamsal algılamada da önemli bir rol oynar [13]. Kulağımıza giren ses dalgaları, dış kulak yolundan geçerek kulak zarına kadar gelir ve kulak zarını titreştirir. Böylece ses orta kulağa iletilmiş olur.

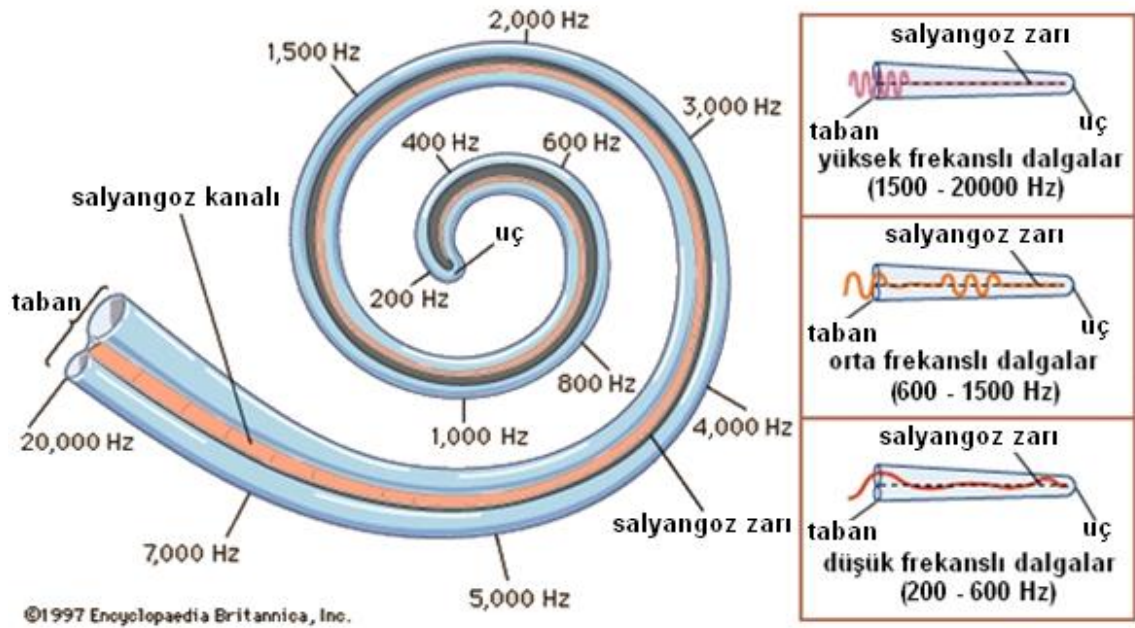
Orta kulak, kulak zarının arkasındadır. Titreşimleri üç küçük kemik parçası ile iletir. Bunlar çekiç, örs ve üzengidir. Zardaki titreşim orta kulaktaki kemikçiklerin de (çekiç, örs, üzengi) titreşmesine neden olur. Bu kemik parçaları sesi arttırır ve ses çözümlemesi için iç kulakta bulunan salyangoza (koklea) iletir. Orta kulağın görevi dış kulak ile havadan aldığı ses dalgalarını sıvı ile dolu iç kulağa iletmektir.

İç kulak, oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Temel olarak iki sistemden oluşur. Vestibüler sistem, denge olayı ile ilgili sistemdir. Koklear sistem ise ses titreşimlerinin sinir uyarılarına dönüştüğü yerdir. Orta kulaktaki son kemikçik (üzengi) oval pencere adlı zarı titreştirir ve bu titreşimle salyangoz içindeki koyu kıvamlı sıvı harekete geçerek sinir uçlarını uyarır. Kulağın en hassas kısmı olan ve binlerce tüylü hücreden oluşan bu bölgenin (basilar membrane) farklı yerleri farklı frekanslardaki seslere karşı duyarlıdır. Basilar membrane otomatik frekans tanıma aracı gibi çalışır. Farklı bölgeler farklı frekanslara tepki verir. Kokleadaki sinir uçlarının uyarılmasıyla ses beyne iletilir.

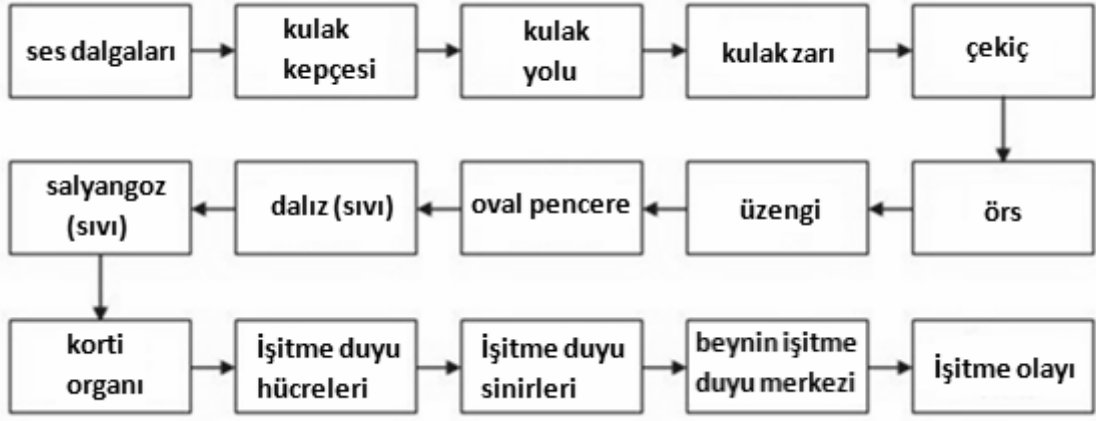
Şekil 8, kulağın yapısını göstermektedir. Şekil 9’da ise işitsel sistemin logaritmik çözünürlüğünün gözlemlenmesine olanak sağlayan cochlea’nın yakınlaştırılmış halini göstermektedir (cochlea’nın her bölgesi frekansların farklı logaritmik aralıklarına duyarlıdır). Şekil 10, ses dalgalarının havadan alınıp beyne iletilip işitme olayının gerçekleşmesine kadar geçen bölümleri göstermektedir [14].



Şekil 8. İşitme sistemi anatomisi



Şekil 9. Salyangozun işitme siniri boyunca frekanslarının logaritmik dağılımı



Şekil 10. Duyma olayının adımları

Müzik, kişilik gelişiminde yaşamın her aşamasında önemli bir etkidir. Yapılan birçok araştırma, müziğin psikolojik ve fizyolojik gelişimi etkilediğini ortaya koymaktadır. Müzik, bireyin toplumsallaşmasında, doğuştan getirdiği yaratıcılık özelliğinin gelişmesinde, kendini ifade etmesinde, anadilini öğrenmesinde, zekâ gelişiminde önemli katkılar sağlamaktadır.

Eski çağlarda hastalıkların iyi edilebilmesi için çeşitli tedavi yollarını denemiş olan insanoğlu, bilgilerinin ve inançlarının ışığında, müziğin de hastalıkların tedavisinde etkili olabileceğini düşünmüş ve kullanmıştır. Çünkü insanlar müziğin rahatlatıcı, yaşama renk katan ve insanın ruh sağlığında tartışılmış bir işlevi olduğuna inanmışlardır. Müzik insana, insanlığın gereksinimi olan birçok olguyu sağlar. Müziğin insanlar üzerindeki güçlü etkisi, doğrudan doğruya insanın duyum ve bilinçle ilgili davranışlarının merkezi olan beyni etkilemesindedir. Çünkü insan beyni, çevreyle ilişkiyi sağlayan tek organdır. Yüzyıllar içinde filozoflar, hekimler ve müzisyenler, müziğin tepkisini oluşturan unsurları açıklamaya çalışmışlardır. Burada iki teori söz konusu olmuştur. Bunlardan biri, müziğin duygulara yapmış olduğu etki, ikincisi ise müziğin fizyolojik etkileri nedeniyle beraberinde oluşturduğu psikolojik etkidir. Müziğin kendine özgü dili, yapısı ve anlatım öğeleriyle insanın duyu ve düşüncelerine seslendiği söylenebilir. İnsan tüm yaşamı boyunca doğadaki ses veren nesnelere ilgilenmiş, nesnelere görünüşlerinin yanı sıra, çıkardıkları seslere göre o nesnelere üzerinde bir yargıya varmıştır. Böylece, sesleri tanıyıp anlamaya ve o sesleri kullanarak iletişim kurmaya çalışmıştır. İnsan müzikle yalnızca iletişim kurmakla kalmamış, müziği psikolojik sorunlarını gidermek için de bir yardımcı araç olarak kullanmıştır. Böylece, müzikle tedavi ortaya çıkmıştır. Müzik karşısında verilen bazı



fiziksel karşılıkların kendiliğinden istem dışı tepkilerden oluştuğu bilinmektedir. Örneğin; müzik dinlediğimizde aniden hızlanan bir parça sırasında nefes almamızın hızlandığını kaydedebiliriz. Bunlar istem dışı tepkilerdir. Yüksek veya alçak ses yüksekliği bir sinirsel gerilim veya gevşeme şeklinde etkili olmaktadır ve bu etki daima müziğin genel karakterine bağlı olmaksızın gerçekleşmektedir. Aşırı hız veya ses yoğunluğu sinirlerin aşırı uyarılmasına neden olabilmekte ve fiziksel ağrılı bir durum da oluşturabilmektedir. Yaklaşık, 70-80 desibel üzerine çıkan titreşimler çeşitli rahatsızlıklara örneğin; kulak ağrısı, sinir hücreleri rahatsızlıkları ve psikolojik rahatsızlıklara neden olmaktadır. Müziğin duygusal etkileri hafif de olsa, belirli fizyolojik cevapları oluşturmaktadır. Örneğin, kan dolaşımında veya nefes alma sürecindeki değişiklikler burada söylenebilir. Müziğin ritmi yalnızca kas etkinliklerini değil aynı zamanda tüm bedensel öğelerin hareketlerini uyarmaktadır. Yunan filozof Sokrates'in öğrencisi Eflatun'da M.Ö. 400'lü yıllarda, müziğin ahenk ve ritim ile ruhun derinliklerine etki ederek, kişiye bir hoşgörü ve rahatlık verdiğini belirtmiştir. Ayrıca Eflatun, şarkıyı iyileştirici özelliği olan bir çare olarak kabul etmekle birlikte, şarkı olmaksızın hastaya uygulanan reçetelerin etkisiz olacağını da ekler. M.Ö. 585-500 yılları arasında yaşayan büyük Yunan filozofu ve matematikçisi Pisagor (Pythagoras), umutsuzluğa düşen veya çabuk öfkelenen hastaları, belirli melodilerle tedavi edebilme olanaklarını araştırmış ve müzikle tedavi yöntemini ilk kullananlardan biridir. Tıbbın babası sayılan Hipokrat (Hippocrates) da 2400 yıl önce, bazı hastalıkları tedavi için, hastaları ilahilerle tapınağa götürürdü. Eflatun'un öğrencisi ve Büyük İskender'in hocası Aristoteles (M.Ö. 384-322) de müziğin insan ruhu üzerindeki etkilerini araştırmış ve bunu yazılarında belirtmiştir [15].

#### **1.3.4. Müzik Algılama ve Müzik Belleği**

Müziğin tarihçesine bakmak istediğimizde çok geniş bilgilere ulaşabiliriz, ancak müziğin ilk şekli hakkında kesin bir şey söylemek mümkün değildir. Büyük olasılıkla ilkel insanlar ritmi doğadan ve vücut hareketlerinden, melodiyi ise kendi seslerindeki perde değişimlerinden bulmuşlardır. Müzik algılama hakkındaki herhangi bir çalışmayı tanımlamadan önce melodi terimini aydınlatmak gerekir. Melodi, müziğin algısal bir özelliğidir ve bazen bir insanın algıladığı melodi ile diğerinin algıladığı aynı olmayabilir. Melodi, bir müzik parçasının diğerinden farklı olduğunu anlamamıza olanak sağlar. Bu da insanların ıslık çalabilmelerini, mırıldanabilmelerini veya şarkı söyleyebilmelerini sağlar

ve bu da müziği unutulmaz yapar. Çünkü bir şarkının sözlerini uzun bir zaman sonra unutsak bile melodisini hatırlayabiliriz.

Araştırmalar, müziğin hayatımızda doğduğumuz andan itibaren önemli bir yeri olduğunu gösteriyor. Hatta bir bebek anne karnında iken 27. haftadan itibaren sesleri algılayabilir. Yapılan deneyler yeni doğanların farklı ses perdelerini doğuştan algılayabildiklerini, bunun deneyimle öğrenilen bir şey olmadığını hatta bebeklerin müziğin temposuna bile duyarlı olduklarını gösteriyor. Müzikal motifleri tespit etme yeteneği doğuştan var olsa da müzik algısı hayat boyu gelişmeye devam ediyor. Bununla birlikte müzik algısı müzikal eğitimden çok deneyimden etkileniyor. Belirli bir müzik türünü sıkça dinlemenin dinleyicileri müzik eğitimi almaksızın o müzik tarzında uzmanlaştırdığı söyleniyor. Yapılan çalışmalara göre iyi eğitilmiş müzisyenler, amatör müzikçiler ve çok az müzik yeteneği olanların müzik algılama sonuçları arasında önemli farklılıklar vardır. Müzik belleğinin görevleri genellikle tecrübeli kişiler tarafından tecrübesiz kişilere göre daha üstün gerçekleştirilir.

İnsanların beyinlerinde özellikle müziğin hatırlanan kısmının yerini saptamaya çalıştıklarında melodiyi nasıl çağırdıkları ve aynı melodiyi nasıl ısıklıkla çaldıkları melodi elde etme sistemleri geliştirilirken araştırılan en önemli konulardandır. İnsanların müzik dinlerken oluşturdukları zihinsel yapılar ve müziği nasıl hatırladıkları geniş bir araştırma alanıdır. Melodilerin istisnalar tarafından hatırlanması, hem uzun hem de kısa vadeli belleğin etkili olduğu bilinmektedir. Deutsch [16] bir melodideki notaların oktavlarının değiştirilmesinin onun tanımlanmasını zorlaştırdığını göstermiştir.

Müziğin insan psikolojisi üzerindeki etkileri de günümüzde araştırılmaktadır. Bağışıklık sistemini de olumlu yönde etkilediği artık bilimciler tarafından kabul edilmiştir. Müziğin insan beyinde birçok bölgeyi harekete geçirdiği biliniyor. Ancak bu etki, müzikle ilgili etkinliğin türüne (dans etmek, bilinen ya da bilinmeyen bir müzik parçasını dinlemek, sevilen ya da sevilmeyen türden müzik dinlemek, müziği icra etmek, şarkı söylemek, vb) göre de büyük farklılıklar gösteriyor. Örneğin, uzman bir müzisyenin, müziği 'beyninde' çözümlenmesi, matematiksel, dilsel ve çözümsel becerilerle ilgili beyin sol yarımküresini etkinleştirirken, çok sevilen bir parçanın dinlenmesi de duygulanmayla ilgili beyin bölgelerini harekete geçirebilir. Doğal olarak, bu bölgelerin etkinleşmesiyle, vücutta ilgili mekanizmalar da harekete geçer [17].

### 1.3.5. Müziksel Ölçek

Müziksel sesileri göstermek için müziksel ölçeklerin nasıl tanımlandığı ele alınmalıdır. Müzisyenler bir müzik çalmadan önce çalgı aletini akort ederler. Geleneksel batı müziği geleneğinde, bunun anlamı hangi sesilin “la”ya, hangi sesilin “si”ye uyduğunu ve bu şekilde her notanın sesilinin uygunluğunu denetlerler. Diğer kültürlerde sadece farklı nota isimleri ve farklı ölçekler yoktur. Farklı bir akort sistemine dayalı farklı notalar (farklı sesiller) bulunmaktadır.

Birçok batı çalgısında, bir nota  $F_0$  temel frekansında çalındığında  $F_0$ 'in tamsayı çarpanları da duyulur ( $2F_0, 3F_0, \dots$ ). Bu frekanslar harmoniklerdir ve insanların müziği algılama şekillerini etkilerler. Birçok insan harmoniklere karşı duyarlıyken bazı insanlar yalnızca temel frekansa duyarlıdır. Bu yüzden oktav, müziksel ölçeğin temelidir. Oktav denklik aksiyomu ile  $f_0$  frekansında bir ton üretilir ve  $2f_0$  frekasındaki diğer ton seste çok benzerdir. Bir notayı bir oktav yukarı taşımak frekansı iki katına çıkarmak demektir. Örneğin orta  $A(A4)$  440 Hz iken bir oktav yukarıdaki  $A(A5)$  880 Hz ve bir oktav aşağıdaki  $A(A3)$  220 Hz'dir. Çünkü insan işitme sistemi, akordu müziksel ölçeğin logaritmik şekliyle algılar.

Bütün akort sistemleri müziğin fiziğine dayalıdır. Ama bu geleneklerde kullanılan çalgıların ayarlama özelliklerinin yanı sıra müzik geleneğinin tarihinden de etkilenirler.

İki sesil arasındaki fark aralık olarak isimlendirilir ve melodi algılamada esas rolü üstlenir. Müzikte her aralığın özel bir ataması vardır. Ton özelliği kavramı müzikte temeldir ve ölçeklerin görünümünden sorumludur.

### 1.3.6. Sayısal Notaların Biçimi (MIDI Ölçüsü)

Bilgisayar alanındaki uygulamaların ve internetin gelişmesi ile birlikte bilgi alışverişi de hızlanmıştır. Müzik alanında da verilerin iletimi, bilgilerin paylaşılması, müzisyenler ve müzik severler için önemli bir konu olmuştur. Bazı müzik uygulamaları MIDI gibi dosya biçimleri kullanırken bazıları da kendine özgü dosya biçimleri oluşturmaktadır. Genelde farklı biçimler kullandıkları için aralarında veri iletişimini sağlamak, bilgi alışverişini yapmak oldukça zordur. MIDI dosya biçimi kısmen buna çözüm olabilirken müziğin nota gösteriminde ve bilgi aktarımında eksik kalmaktadır.

MIDI, bilgisayarda bir resim dosyası kadar bile yer tutmayan, kanal ve kanal bilgilerinin, nota ve notaların hızlarının, yani müziğin her türlü bilgisinin saklandığı dosya

türüdür. MIDI dosyaları ses değil sadece nota bilgisi içerirler. Midi sesler, mikrofonla kayıt edilmiş sesler değil de, nota bilgileri yardımıyla bilgisayarda yapay olarak oluşturulmuş ve mevcut teknolojiye kullanabilecek en temiz seslerdir.

Ritmik bileşenlerin eki, sesil bilgisi için, nota süresini ve başlangıç zamanını içeren temel nota gösterimini belirler.

Notaların farklı gösterimleri vardır. Bunlardan en çok kullanılanları,

- Solfej gösterimi: “do, re, mi, fa, sol, la, si”,
- Harfsel ya da bilimsel gösterimi: “C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#, B”,
- Ölçek dereceleri ile gösterimi: “I, II, III, IV, V, VI, VII”

şeklinde. Grafiksel gösterim beş nota çizgisini kullanır. Önceki bölümlerde söylendiği gibi bu beş nota çizgisine “porte” adı verilir. Porte üzerindeki notaların dikey yerleşimleriyle sesil’ler gösterilir. Süreler ise farklı nota şekilleriyle gösterilirler. Bu en yaygın kullanılan çağdaş batı müziği gösterimidir.

Bir nota dönüştürücüsü üç parametreyle tanımlanan nota olaylarını sıralı bir şekilde notaya geçirme işlemi yapmalıdır. Bu parametreler sesil (temel frekans), göreceli başlangıç zamanı ve nota süredir.

MIDI, aynı zamanda elektronik çalgıların denetlenmesi ve onlarla iletişim için de kullanılan bir standarttır. Her nota için bir tamsayı ölçek atanır.  $8.176 \text{ Hz}$  ile  $13344 \text{ Hz}$  aralığında, yarı perde aralıklarıyla birlikte toplam 128 nota vardır. Örneğin piyano için  $A0 \rightarrow 27.5 \text{ Hz}$  ile  $C8 \rightarrow 4186 \text{ Hz}$  aralığı kullanılmaktadır. Diğer çalgılar için daha dar bir frekans aralığı kullanılmaktadır [18].

## 1.4. Sinyal İşleme

Bir zaman dizisinin değişik matematiksel fonksiyonlar yardımıyla istenen değişikliklerin uygulanması işlemine sinyal işleme denir.

### 1.4.1. Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü, ses işlemede en yaygın kullanılan dönüşümlerden birisidir. Bir insanın Fourier dönüşümünü hesaplaması için dinlemesi yeterlidir. Kulak otomatik olarak dönüşümü hesaplar, ancak aklın bu hesaplamayı yapabilmesi için yıllar süren bir süreçten geçmesi gerekir. Kulak, sesi frekans tayfına (farklı frekanslardaki ses miktarları) çevirerek dönüşümü gerçekleştirir. Beyin bu bilgiyi algılanmış sese çevirir. Benzeri işlemler

matematiksel yöntemler kullanılarak ses dalgaları, ışık dalgaları, okyanustaki gelgit olayları ve güneş hareketi örneklerinde olduğu gibi herhangi bir değişim üzerinde gerçekleştirilebilir. Bu matematiksel gereçler kullanılarak değişimleri gösteren fonksiyonlar sinüzoidal dalgalar kümesine çevrilebilir. Fourier dönüşümü, her frekansa ait sinüs dalgası için genlik ve evre hesaplayan bir işlemdir[19].

Bu tekniği, bütün dünya, tekniği adını da veren bir matematikçiden, Jean Baptiste Joseph Fourier'den öğrendi. Fourier bu matematiksel tekniği ısı iletiminin pek çok durumunu açıklamak için kullandı. Meslektaşlarının Fourier'in çalışmalarına karşı takındığı olumsuz tavır, çalışmaların basımını 1815'e kadar geciktirdi. Fourier'in yaklaşımına gelen itirazlar şu noktada toplanıyordu: Süreksiz bir fonksiyon, sürekli sinüzoidal fonksiyonların toplamı şeklinde gösterilemez. Süreksiz fonksiyonlar kırık eğriler ve kırık çizgelere benzer. Örneğin birim basamak fonksiyonu yatay eksendeki sıfır noktasında sıçrama yaparak sıfır değerinden bir değerine yükselir. (Böyle bir fonksiyon anahtar açıldığında geçen akımı gösterebilir). Fourier'in çağdaşları süreksiz bir fonksiyonun sıradan sürekli fonksiyonlar, örneğin doğrusal, ikilenik (quadratic) ve üstel (exponential) fonksiyonların bileşimi şeklinde gösterilebileceğini göremediler. Eğer Fourier haklı olsaydı, sonsuz sayıdaki sinüslerin toplamının sıçramalar yapan süreksiz bir fonksiyona yakınsaması gerekiyordu. O zaman da bu düşünce tamamen anlamsız gözüküyordu[19].

Bu itirazlara karşın, bazı araştırmacılar, örneğin matematikçi Sophie Germain ve mühendis Claude Nauier, Fourier'in çalışmasını ısı analizinin dışındaki konulara da uygulamaya çalıştılar. Ancak matematikçiler için süreksiz bir fonksiyonun, sinüs fonksiyonlarının toplamı olarak eksiksiz bir şekilde gösterilebileceği düşüncesi tam bir sorun oluşturmaktaydı.

Fourier analizi uzaydaki veya zamandaki bir fonksiyonu frekansın, genlik ve evresi değişen sinüzoidal elemanlara indirger. Fourier dönüşümü her frekanstaki genlik ve evreyi gösteren bir fonksiyondur. Dönüşüm iki matematiksel yöntemle hesaplanır; birincisi fonksiyon sürekli ise ikincisi ise fonksiyon ayrık (discrete) uygulanır.

Eğer fonksiyon ayrık, yani fonksiyon ayrık zaman aralıklarına ait değerlerden oluşuyorsa, ayrık frekanslardaki sinüzoidal fonksiyonların serisi şeklinde gösterilebilir. Bu frekanslar temel frekansın iki, üç ve daha büyük katlarıdır. Bu şekildeki sinüslerin toplamına Fourier Serisi denir.

Eğer fonksiyon süreklirse, yani her gerçek sayı için tanımlı bir değeri varsa bu fonksiyon tüm frekanslardaki sinüslerin Fourier integraline indirgenebilir. Fourier dönüşümü, ne seri ne de integral değildir. Ayrık fonksiyonlarda, Fourier serisini oluşturan evrelerin ayrık frekanslara bağlı listesidir, sürekli fonksiyonlarda ise Fourier integralinin alınmasından ortaya çıkan frekansa bağlı bir fonksiyondur.

Dönüşüm hangi yöntemle hesaplanırsa hesaplansın, her frekansta iki sayının hesaplanması gerekir. Bu iki sayı genlik ve evre olabilir veya aynı bilgiyi içeren farklı iki sayı da olabilir. Bu iki sayı, bir karmaşık (complex) sayı ile gösterilir. Bu gösterim çok kullanılır, çünkü karmaşık sayılar cebirsel işlemlere olanak sağlar. Karmaşık cebir kuramı ve Fourier dönüşümü, elektrik devresi tasarımında, mekanik titreşim analizi ve dalga yayılımı çalışmalarında yapılan sayısal hesaplamalarında ayrılmaz bir bütün oluştururlar. Özgün fonksiyonu karmaşık Fourier dönüşümüyle göstermek hesaplarda üstünlükler sağlar.

Bugün Fourier dönüşümü üzerine yapılan çalışmalar, fonksiyon ve dönüşümü arasında özgürce hareket edebilecek teknikleri elde etmeye yöneliktir. Fourier integralini almak için analitik yöntemler kullanılarak dönüşüm bulunabilir. Dönüşümle ilgili bazı kuramları öğrenmek ve uygulamak yoluyla karışık dalga şekilleri daha basit elemanlara indirgenebilir. Bilgisayarlar ve programlar geliştikçe Fourier analizi için yeni yöntemler ortaya çıktı ve hesaplar çok kolaylaştı. Yapılan bu çalışmalar "Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)" diye bilinen programın ortaya çıkmasını sağladı. Hızlı Fourier dönüşümü çarpmaların sayısını azaltarak zamandan kazanır. Çarpma sayısının önemi, çarpma işleminin diğer bilgisayar işlemlerine (toplama, saklama, vb.) göre daha fazla zaman almasındandır. Hızlı Fourier dönüşümü, eğri üzerinde eşit aralıklarla çok sayıda örnek alır. Örnek sayısı yarıya düşürülürse, eğrinin analizi için gereken çarpma sayısı da yarıya düşer.

Fourier dönüşümü değişik bilim dallarında kullanılan güçlü bir teknik durumuna gelmiştir. Bazı durumlarda Fourier dönüşümü elektrik, ısı ve ışıkla ilgili karışık eşitlikleri çözmekte kullanılır. Değişken bir işareti oluşturan sinüzoidal dalgalar, astronomi, tıp, elektrik, elektronik, yerbilimleri, fizik, kimya gibi birçok alanda kullanılmaktadır [19].

Fourier analizinin ses kodlamada, konuşma analizinde ve halen ele alınan müziksel tanıma uygulamaları gibi bilimin diğer alanlarında da uygulamaları bulunmaktadır.

Fourier dönüşümü, herhangi bir dalgayı, her frekans değerine karşılık, genlik ve evrede olan sinüs dalgalarının toplamı olarak gösterilebilir.

Fourier dönüşümü, dönüştürülecek fonksiyon sürekli ise,

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

biçiminde tanımlanır. Ters Fourier dönüşümü de,

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{+j\omega t} d\omega \quad (7)$$

biçiminde tanımlanır. Ancak ses sinyalleri bilgisayar ortamında sayısal olarak tutulup işlemlerde kullanıldığından Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) bu işlemler için daha uygun bir dönüşüm olmaktadır. Ayırık Fourier dönüşümü ise,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi\frac{kn}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

biçiminde gösterilir. Doğadaki sesler mikrofon aracılığıyla bilgisayarda kaydedilirken, sinyalin voltajı daha önce belirlenen örnekleme zaman aralığı ( $\Delta t$ ) ile belirlenip örneklendirilir, kaydedilir ve daha sonra ayırık olarak işlenebilir.

Kullanılan sinyal zaman ortamında  $N$  tane örnekten oluşmakta ve  $[0, (N-1) \cdot \Delta t]$  zaman aralığında olduğu kabul edilmektedir. Ses sinyallerinde örnekleme aralığı kavramı yerine örnekleme frekansı ( $f_s$ ) kavramı kullanılmaktadır. Örnekleme frekansı,

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (9)$$

eşitliğiyle verilmektedir. Örnekleme frekansı, bir saniyedeki örnek sayısı olarak tanımlanır. Örnekleme frekansının seçimi sinyal işlemlerinde önemli bir konudur. Sinyalde örnekleme frekansı, ilgilenilen en büyük frekansın ( $f_{Nyquist}$ ),

$$f_s \geq 2f_{Nyquist} \quad (10)$$

iki katından fazla olmalıdır. Aksi takdirde istenilen frekansların kayıpları söz konusu olabilir. Bilgi kaybı olmaksızın seçilecek örnekleme frekansının alt sınırına Nyquist frekansı denilmektedir. Nyquist frekansı,

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (11)$$

eşitliğiyle bulunabilir. Fourier dönüşümü sonucunda frekans ortamında elde edilen spektrumlarda Nyquist frekansının iki katı genişliğinde bir frekans bandı görülmektedir. Ancak bunun yarından ötesi ilk bandın simetrisidir. Dolayısıyla iki yarı eksi frekans bölgesine ters çevrilip yerleştirilerek eksi frekans içeriği olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda frekanslar  $[-f_{Nyquist}, f_{Nyquist})$  aralığında değişmektedir. Bu aralık dışında hesaplanacak tüm spektrumlar bu aralığın aynı boyutlu dönemselleri olacaktır. Verilen bu aralıkta (8) eşitliğine göre N tane örnek olması gerekir. Bu durumda frekans ortamında örnekleme aralığı,

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (12)$$

olmaktadır. Bu eşitliğe göre zaman ortamında örnek sayısı arttıkça frekans ortamında çözünürlük artacaktır. Zamansal örnekleme aralığı arttıkça frekans bandı daralacaktır. Zamansal örnekleme aralığı sıfıra yaklaştıkça frekans bandı sonsuza yaklaşacağından frekans ortamındaki dönemsellik anlamını yitirecektir.

#### 1.4.2. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (STFT)

Standart Fourier dönüşüm yöntemi sinyal işlemenin birçok alanında başarıyla kullanılmaktadır. Ancak sinyal sonlu süreli olduğunda iyi bir frekans çözünürlüğüne sahip değildir. Gabor'un geliştirdiği STFT olarak adlandırılan Fourier dönüşümünün iyileştirilmiş bir sürümü sonuçları daha iyi bir hale getirmiştir [20-21]. Bu yöntemde  $x[n]$  sinyali bir pencere fonksiyonu olan  $w[n]$  ile evriştirilmiştir. Böylece Fourier dönüşümü birçok üstünlüğe sahip ortalanmış zaman bölgesi evriştirilmiş sinyalin üzerinden alınabilmektedir. STFT ile bir boyutlu zamana bağlı sinyal iki boyutlu zaman-frekans uzayına taşınmıştır. STFT'de istenilen zaman ve frekans için en önemli kural pencere seçimidir.

Bir sinyalin standart Fourier dönüşümü gösterimi, zamandaki ve frekanstaki içeriği ile ilişkilidir. Fourier dönüşümü ile sinyal bileşenlerine ayrılır ve her bileşenin gücü belirlenir. Ancak bu işlev tüm frekans karakteristiğini içerir. Standart Fourier dönüşümünde frekans ortamında yerel bir noktadan bahsederken bu zaman ortamında tüm



zaman aralığına karşı gelmektedir. Bu nedenle durağan olmayan sinyaller için standart Fourier dönüşümü kullanışlı değildir. Çünkü durağan olmayan sinyaller, değişken bir döneme sahip oldukları gibi ani değişimler de içerebilir [22].

(13) eşitliğinde gösterilen, veri üzerinde  $w[n]$  penceresini uygulayan (tüm dalga uzunluğunun küçük bir bölümü) STFT, zaman içinde değişen frekans ve genlik sapması gösteren müzik sinyalleri için geliştirilen bir gösterimdir.

$$X(k) = \sum_{m=0}^{M-1} (w[m] \cdot x[m]) e^{-j2\pi \frac{km}{M}} \quad (13)$$

burada  $w$  penceresi  $[0, M)$  aralığı dışında sıfır değerini aldığından hesaplanmasına gerek yoktur. Çünkü dönüşüm belli bir zaman dilimi için geçerlidir. Pencere uzunluğu bekleme süresinden yeteri kadar kısa olacak şekilde seçilmelidir.

STFT hesaplanmasında bir sıçramanın tanımlanması ve  $K$  sıçrama uzaklığının katlarında dönüşümün hesaplanması, (14) ifadesinde verilmektedir. Bu şekilde, STFT sadece zamanın belirli aralıklarında uygulanır, pencere zamanda  $K$  örnek kadar kaydırılır.  $K$ ,  $M$ 'den küçük (örtüşme) ya da  $M$ 'ye eşit olmalıdır.

$$X[k, l] = \sum_{m=0}^{M-1} w[m]. x[m + l.K] e^{-j2\pi \frac{km}{M}}, k = 0, 1, \dots, M-1, l = 0, 1, \dots, N/K \quad (14)$$

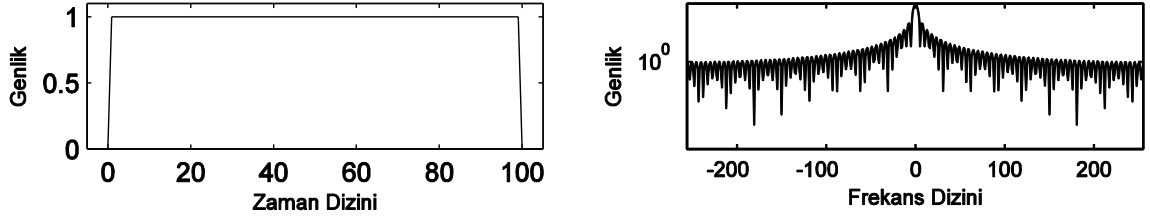
Bu şekilde tek boyutlu bir zaman sinyali iki boyutlu zaman-frekans sinyaline dönüşmektedir.

Uygulamada en çok kullanılan pencere çeşitleri Dörtgen, Üçgen, Hamming, Blackman ve Hanning gibi pencere fonksiyonlarıdır.

Verilen aralıkta tüm değerleri 1 olan dörtgen pencerede (15) hata payı yüksek olduğundan (Şekil 11) pek tercih edilmez. Matematiksel gösterimi,

$$w[m] = 1, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (15)$$

biçiminde verilmektedir [23].

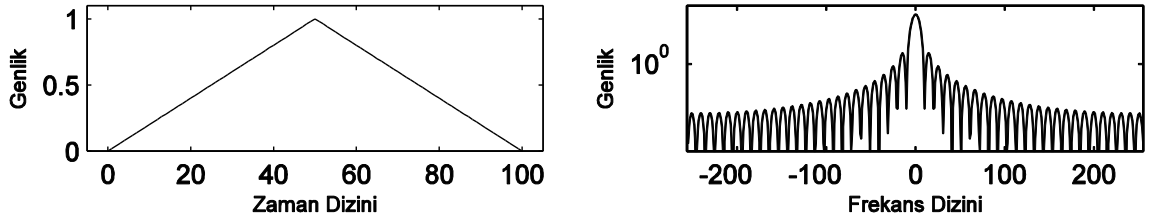


Şekil 11. Dörtgen pencere ve frekans cevabı

Üçgen pencere verilen aralıkta birisi monoton artan diğeri monoton azalan olmak üzere iki doğrusal fonksiyondan oluşmaktadır (Şekil 12). Matematiksel gösterimi,

$$w[m] = 1 - \left| \frac{m}{M} - \frac{1}{2} \right|, \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (16)$$

biçiminde verilmektedir [23].

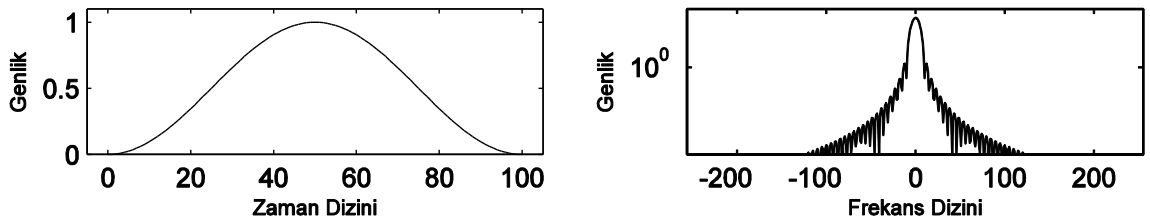


Şekil 12. Üçgen pencere ve frekans cevabı

Hanning penceresi (17) genel amaçlı bir penceredir ve birçok durumda kullanılabilir. Çünkü en iyi karakteristikleri (genellikle, sinyalin frekans spektrumunda sinyalin kuyruklarını azaltır) bünyesinde barındırır (Şekil 13). Matematiksel gösterimi,

$$w[m] = 0.5 - 0.5 \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right), \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (17)$$

biçiminde verilmektedir [23].

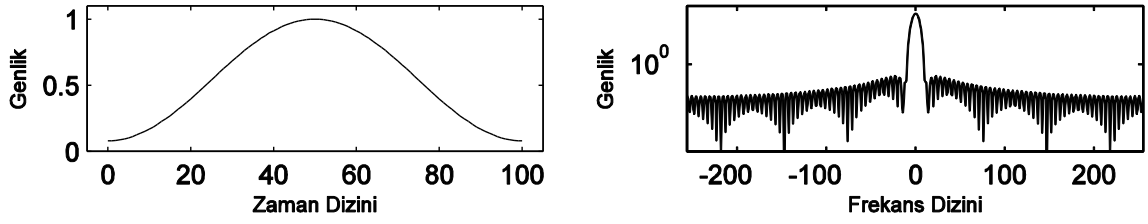


Şekil 13. Hanning pencere ve frekans cevabı

Hamming penceresi, Hanning penceresinin frekans ortamındaki en büyük tepe noktasının komşu tepeliklerin bastırılmış halini vermektedir (Şekil 14). Matematiksel gösterimi,

$$w[m] = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right), \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (18)$$

biçiminde verilmektedir [23].

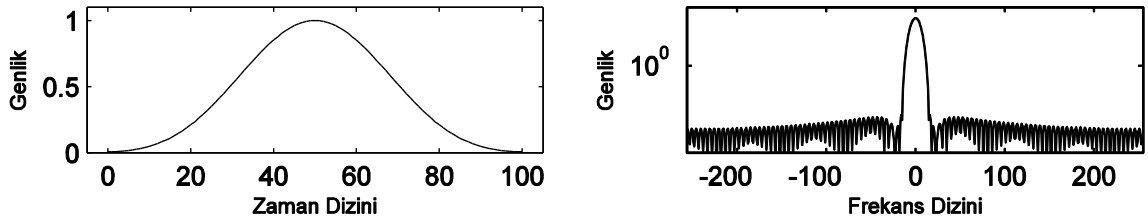


Şekil 14. Hamming pencere ve frekans cevabı

Blackman penceresi, zaman ortamında bir Fourier dönüşümü analizi içindeki sızmaları azaltmak için uygulanan bir ağırlıklandırma olarak tanımlanır (Şekil 15). Matematiksel gösterimi,

$$w[m] = \frac{7938}{18608} - \frac{9240}{18608} \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right) + \frac{1430}{18608} \cos\left(4\pi \frac{m}{M}\right), \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (19)$$

biçiminde verilmektedir [23].



Şekil 15. Blackman pencere ve frekans cevabı

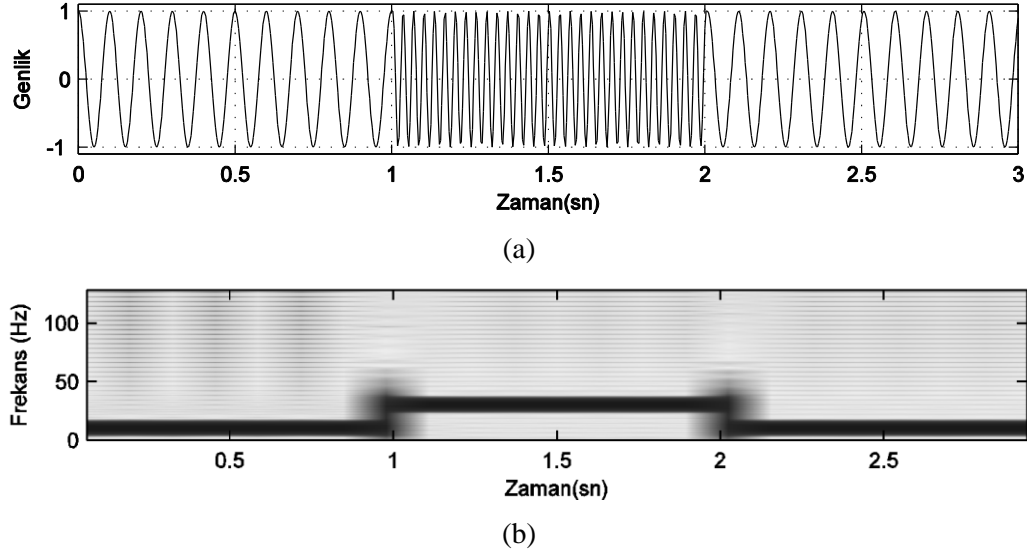
Bu çalışmada, diğer pencereleme yöntemlerine göre ana kısmı daha belirgin bir yapı gösteren Blackman penceresi kullanılmıştır [23].

### 1.4.3. Spektrogram

Spektrogram (gerçek zamanlı frekans analizcisi), bir sinyalin spektral içeriğinin zamana göre değişimini gösteren, frekans ve zamana bağlı iki boyutlu bir spektrum fonksiyonudur. STFT kullanarak elde edilen iki boyutlu zaman-frekans fonksiyonundan,

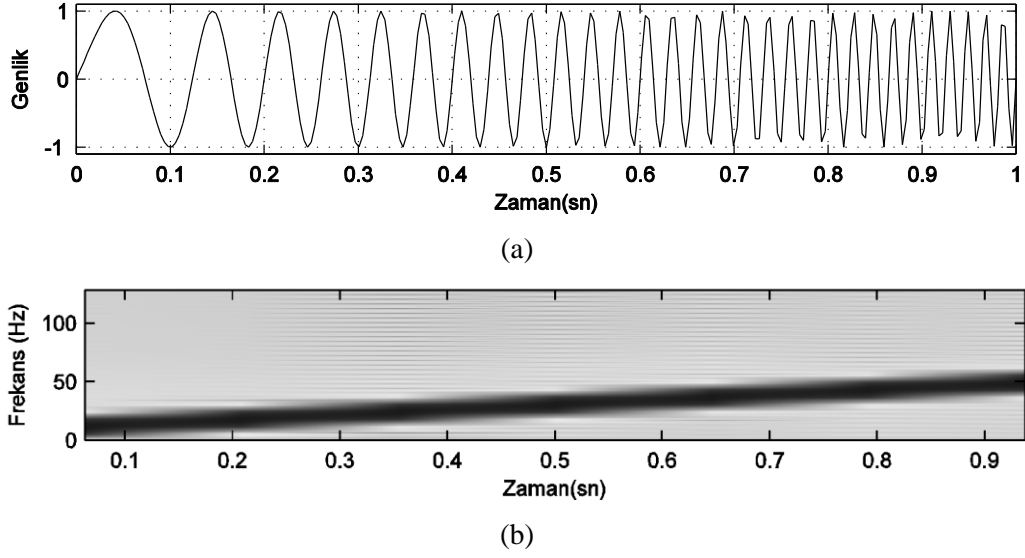
$$spec[k, l] = |X[k, l]|^2 \quad (20)$$

biçiminde hesaplanır. Spektrogram, ses ölçer, ses izi gibi adlar da almaktadır. Genelde insan sesinin tanımlanmasında kullanılan bu yöntem müzik, sonar/radar, konuşma, sismoloji gibi birçok alanda kullanılmaktadır [24]. Spektrogram daha iyi anlaşılması için Şekil 16 (a)'da her biri 1 saniyelik bir süreye sahip sırasıyla 10, 30 ve 10 Hz'lik sinus sinyalleri verilmektedir. Bu sinyalin spektrogramı Şekil 16(b)'de verilmektedir. Bu şekilde, bağlantı noktalarındaki ani frekans değişimi spektrogramda o bölgede saçılmaların oluşmasına neden olmaktadır (1 ve sn'lerde).



Şekil 16. Spektrogram gösterimi, (a) yapay ses sinyali; (b) spektrogram gösterimi

Aynı biçimde Şekil 17(a)'da zamanla artan frekansa (5-50 Hz) sahip 1 saniyelik yapay bir ses sinyali verilmektedir. Bu sinyalin spektrogramı da Şekil 17(b)'de verilmektedir. Frekansta ani bir değişimin olmaması spektrogramda düzgün bir geçişin olduğu görülmektedir. Yüksek frekanslara saçılmalar oluşmamaktadır.



Şekil 17. Spektrogram gösterimi, (a) frekansı zamanla artan yapay ses sinyali; (b) spektrogram gösterimi

### 1.5. İnsan ıslığı

Islık, dudakları daraltarak nefesin kuvvetli şekilde ağızdan dışarı atılmasıyla oluşur. Dil, diş ve parmaklarda ıslık çalmada kullanılabilir.

Islık çalma, iyi bir tınısının olmayışı, kendisine yakın enstrümanlardan (blok flüt, okarina, pikolo vb) iyi olmayışı gibi nedenlerden dolayı profesyoneller tarafından hep yok sayılmıştır. Islık, aralığı bakımından soprano enstrümandır. Tipik sınır aralığı C5 ile C8'dir. Kişiden kişiye de değişebilir. İnsan ıslığı, modern orkestralarda, ses sahası da dikkate alındığında, pikoloya denk düşer. 1990'lardan önce ıslık çalanların kontrol edebildikleri ses sahasının 2,5 oktav olduğu ifade edilirken şimdi bu değer 3 oktav olarak kabul görmüştür. İnsan ıslığının ses spektrumu incelendiğinde, ihmal edilebilir küçük pürüzler dışında, tam bir sinüs dalgası olduğu gözlemlenmiştir. Bu da insan ıslığının okarina ve blok flütün daha tiz bir çeşidine denk düştüğünü (tabi ses gücü ve derinliği daha az) gösterir.

İnsan ıslık sesinin bazı üstünlükleri de bulunmaktadır. ıslığın geniş bir ses sahası vardır. Bazı kişiler 4 oktava kadar geniş bir ıslık çalma yeteneğine sahip olabilmektedir. Aynı anda birden fazla notayı duyurabilme özelliği de vardır. Nefesli çalgılarda uzun süreli duraksız icralarda gerekli nefes çevirme işlemi ıslık çalmada nefesi dışarı ya da içeri yönlendirme gibi basit bir işlemle gerçekleştirilebilir. Çok önemli bir üstünlüğü de evrensel ve her zaman her yerde ulaşılabilir bir enstrüman oluşudur [25].

Isıkta en düşük nota çalanın pratikliğinin yanında ses yolunun uzunluğuna da bağlıdır. Bu yüzden doğal sınırlar çocuklarda en yüksek ve genç erkeklerde en düşüktür. Aralığın en yüksek sonu diğer yandan üst ön dişlerin uzunluğuyla da ölçülür. Isığın en yaygın tipinin spektrumu ihmal edilebilir derecede parçalar içerir ve zayıf üst tonlarda duru sinüs dalgasına benzerdir. Isıktaki zengin harmoniklerin tını eksikliği birçok insanı rahatsız etmesine veya müzikte büyük öneme sahip olmamasına neden olur. Isık tanımlanırken ses enstrümanı olarak ele alınmaz. Çünkü ses yolunu titretmemektedir[26].

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Melodilerin Otomatik Tanınması

Melodiler, farklı notaların belli bir düzen içerisinde diziliminin sese dönüştürülmüş halidir. Melodilerin tanınması ise tek sesli ses sinyallerinin içerisinde bulunan müzik notalarının bulunması işlemidir. Bu işlem giriş olarak melodik bir ses sinyali alır, çıkış olarak bir nota dizisi verir (Şekil 18). Her bir nota sesil, başlangıç zamanı, süre ve hız yardımıyla tanımlanabilir.



Şekil 18. Melodik ıslıkları notalara dönüştürme düzeneği

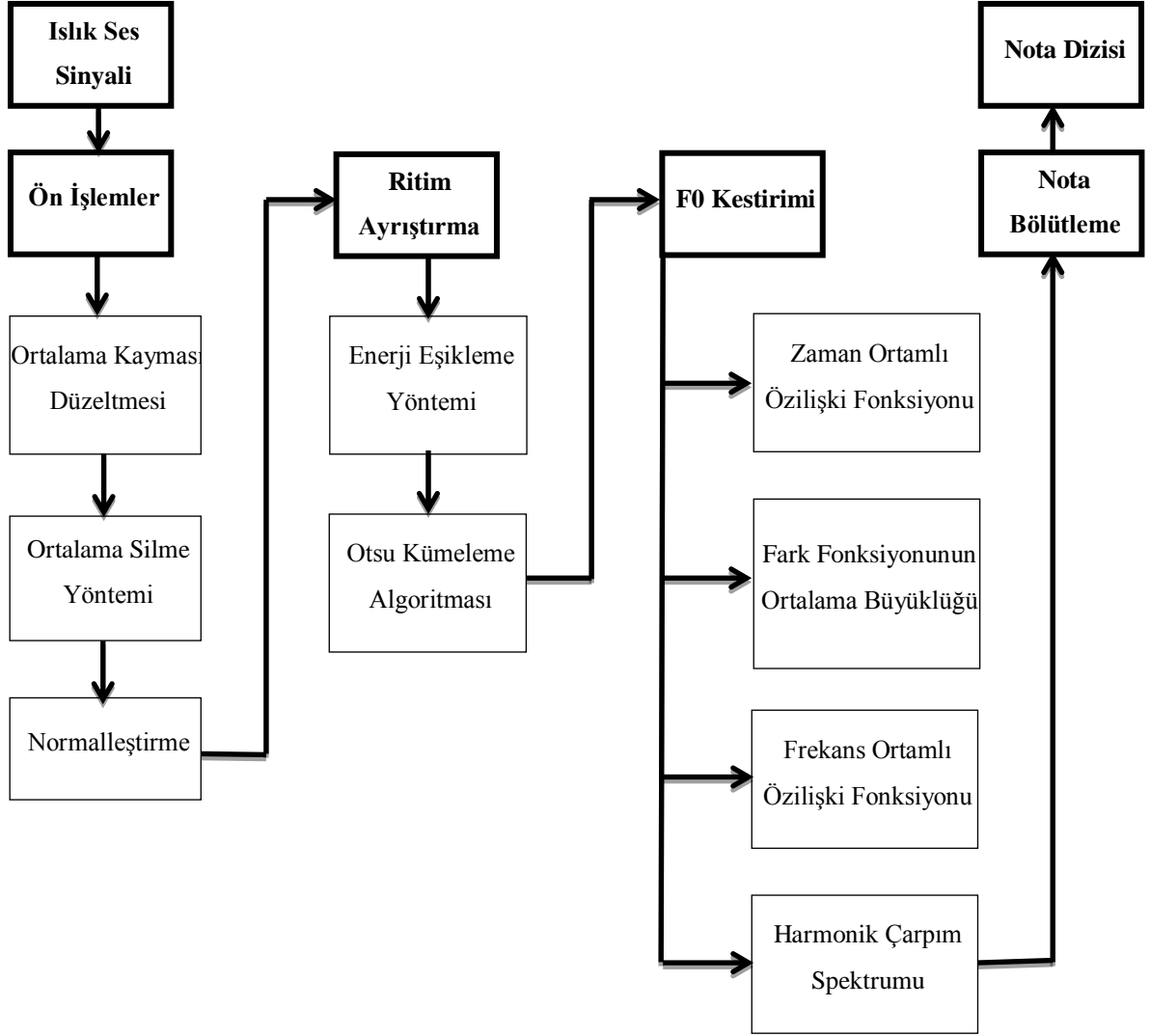
Bu çalışmada temel amaç bir otomatik melodi tanıma sistemi tasarlamaktır. Ses sinyali için melodik bir ıslık sesi tercih edilmiştir. Bunun nedeni melodiyi çıkarmak için kullanılacak herhangi bir çalgı aleti, hem nota bilgisine hem de çalma becerisine ihtiyaç duymaktadır. Şayet notalar önceden biliniyorsa, bu çalışmanın amacı da ortadan kalkmış olur. Oysa herhangi bir nota bilgisine veya çalma becerisine gerek duyulmadan da melodiler seslendirilebilir. Bunun için en ucuz ve en kolay yöntem ıslık çalmaktır. Yetişkinler arasında hemen hemen herkes ıslık çalma becerisine sahiptir.

### 2.2. Otomatik Melodi Tanıma Düzeneği

Otomatik melodi tanıma düzeneği, dört aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla,

- Ön işlemler,
- Ritim ayrıştırma,
- F0 kestirimi,
- Nota bölütleme,

biçiminde verilir. Bu akış şeması sembolik olarak Şekil 19'da verilmektedir. Şekil 19'a göre ıslık sesi düzeneğe bir sayısal sinyal olarak girer ve düzeneden vuruşları ve türleri belirlenmiş notalar olarak çıkar.



Şekil 199. Melodik ıslıkları notalara dönüştürme algoritması

### 2.3. Ön İşlemler

Işık sesleri, sinyal işleme sürecinden geçmeden önce bazı ön işlemlerin uygulanması gerekir. Bu ön işlemler yapılmazsa sinyal işleme sırasında istenmeyen durumlarla karşılaşılabilir. Birçok sinyal işleme uygulaması sinyalin içeriğindeki bazı istenmeyen olayların varlığından dolayı büyük hatalara neden olabilmektedir. Bu istenmeyen olaylar ve bunların yok edilmesi konularına aşağıda değinilmiştir.

#### 2.3.1. Ortalama Kayması (DC) Düzeltmesi

Işık sesleri ilk kayıt edildiklerinde, sinyalin genel ortalaması tam sıfır olmamaktadır. Kayıt düzeneğinin kalitesiyle ilişkili olan bu durum ileri sinyal işleme uygulamalarında



sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için tüm sinyalin ortalaması alınır ve her veriden çıkarılır. Bu işlemin matematiksel gösterimi,

$$y[n] = x[n] - \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x[m], \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (21)$$

biçiminde verilir.

### 2.3.2. Ortalama Silme Yöntemi

Bir sinyalde genel ortalama kaymasının yanı sıra yerel ortalama kaymaları da olabilmektedir. Bu kaymaları ortadan kaldırmak için ortalama silme yöntemi kullanılır. Bu yöntem aynı zamanda çevre etkenlerden kaynaklanan düşük frekanslı sinyallerin yok edilmesinde de etkili bir yöntemdir. Bu yöntem ortalama kayması düzeltmesinin de işlevini yerine getirmektedir. Bu yöntemin matematiksel gösterimi,

$$y[n] = x[n] - \frac{1}{M} \sum_{m=n-\frac{M}{2}}^{n+\frac{M}{2}} x[m], \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (22)$$

biçiminde verilir.

### 2.3.3. Normalleştirme

Islık sesleri mikrofona değişik uzaklıkta veya değişik biçimlerde kayıt edildiklerinde, ses düzeyleri (enerjileri) eşit olmayabilir. Tüm ses sinyallerine aynı işlemi uygulamak için sinyaller  $[-1, 1]$  aralığına ölçeklendirilir. Bunun için,

$$y[n] = \frac{x[n]}{\max(|x(n)|)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (23)$$

eşitliği kullanılır.

## 2.4. Ritim Ayırıştırma

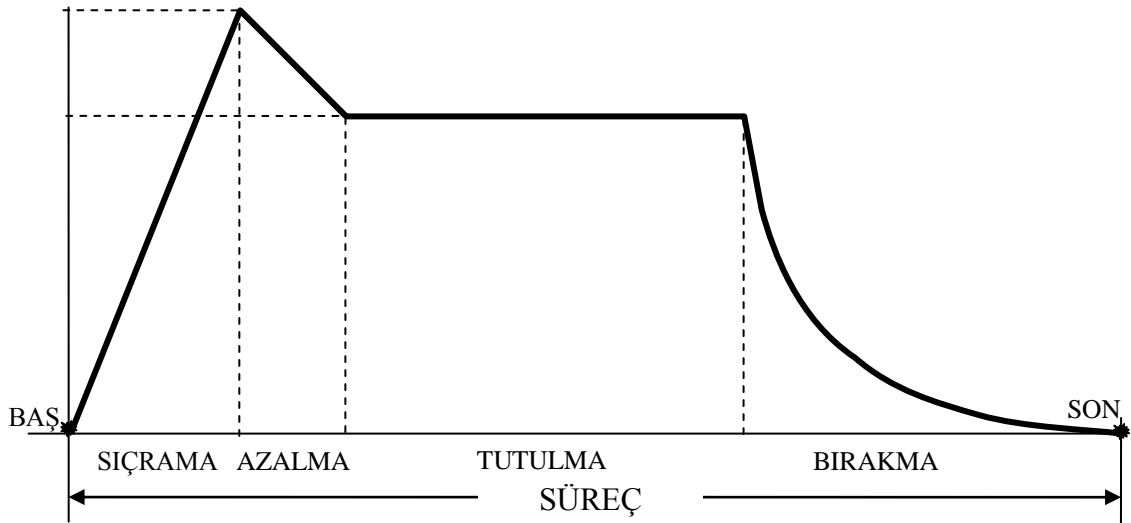
Daha önceki konularda sesil bulma yöntemleri üzerinde duruldu. Bir notanın karakteristiğini tamamen belirlemek için sesil bilgisine ek olarak başlangıç ve bitiş zamanları olarak adlandırılan sınırların da bilinmesi gerekmektedir. Bir sesil kestirim

yöntemini basitçe kullanarak bu bilgi elde edilebilir. Bulunan olayların başlangıcını ve bitişini elde etmek için bir başlangıç bulma fonksiyonu kullanılması gerekmektedir.

Bazı başlangıç noktası belirleme tekniklerini saymadan önce bir notanın sahip olduğu özelliklerle ilgili kavramların açıklanması gerekir. Bunlar,

- Sıçrama (Attack), genlik zarfındaki artışın zaman dilimidir (piyano tuşuna ilk basıldığı anda ani genlik artımını temsil eder).
- Azalma (Decay), ani sıçramaya tepki olarak belli geri dönüş (azalma) gerçekleşmesidir.
- Tutulma (Sustain), sesin sabit bir genlikle ana kısmının devam etmesidir (piyanoda tuşun basılı kaldığı süre).
- Bırakma (Release), genliğin ani bir inişle değil de üstel bir genlik azalımıyla sıfırlanmasıdır (basılı duran piyano tuşunun bırakılmasında oluşan genlik azalımı).
- Baş (Onset), çoğu durumda sürecin başladığı yerdir (piyano tuşuna basıldığı ilk andır).
- Son (Offset), sesin tamamen işitme seviyesinin altına düştüğü sessizlik anıdır.

Yukarıda sözü edilen tüm kavramların içinde barındıran sürecin genel biçimi Şekil 20’de görülmektedir [27].



Şekil 20. Tipik bir müzik nota sinyalinin zarfının bölümleri

Bir başlangıç bulma fonksiyonunun görevi bir notanın başlangıç konumunu verebilecek noktanın olabirliğini araştırmaktır. Şimdiye kadar birçok başlangıç bulma yöntemi önerildi. Bunlardan bazıları,

- Sinyalin ani enerji değişimi,
- Sinyalin kısa süreli spektrumundaki değişimi,
- Sinyalin istatistiksel uygunluk değişimidir.

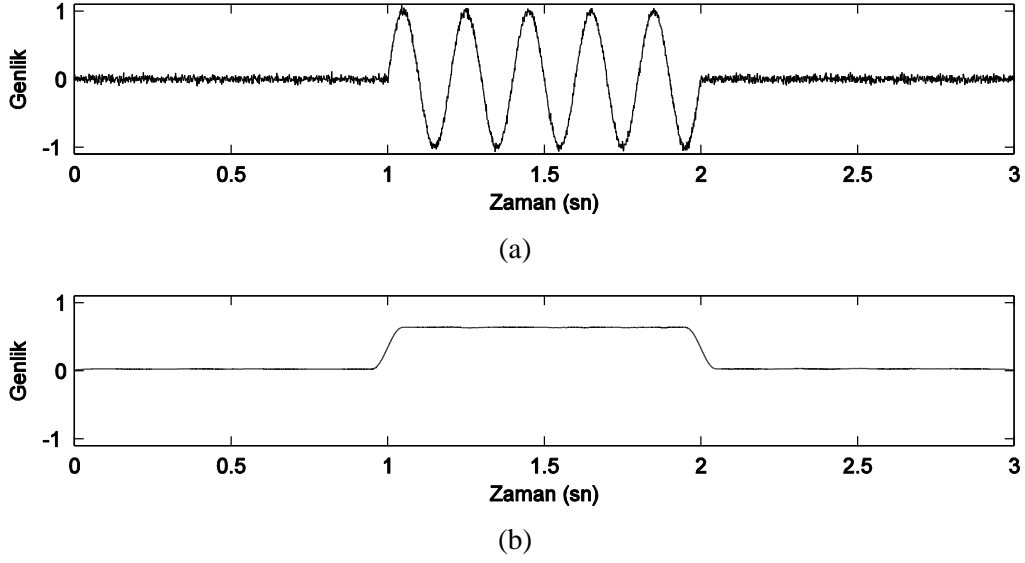
Bu yöntemlerin hepsi sinyaldeki geçiş bölgelerinin konumlarını bulmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada yukarıda sözü edilen yöntemlerden farklı olarak sinyalin başlangıç ve bitiş noktalarının her ikisini de bulacak bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem enerji eşikleme yöntemidir.

#### 2.4.1. Enerji Eşikleme Yöntemi

Isık sinyalleri birbirini takip eden sinüzoidal ses bölgeleri ile sessizlik (nefes alma, duraksama) bölgelerinden oluşmaktadır. Çevresel etkilerden dolayı, her iki veri kümesine de sıfır ortalamalı normal dağılımlı beyaz gürültü eklenir. Bu bölgeleri birbirinden ayıran en önemli özellik genlik değişimidir. İyi bir ses kaydında ısıık bölgeleri yüksek genliğe sahipken sessizlik bölgeleri düşük genliğe sahiptir. Görsel olarak görülen bu özellik matematiksel açıdan karşılaştırılırken ortaya çıkan zorluklar eksi ve artı değerlerin varlığıdır. Tüm değerlerin mutlak değeri veya karesi alınırsa tüm genlikler artı değerli olur. Ancak karşılaştırma yapmak için bu değerler yeterli olmaz. Bunun için kayan ortalama işlemi uygulanarak daha düzgün bir sinyal elde edilir. Bu sinyal enerji sinyali olarak adlandırılır. Enerji sinyalinin matematiksel gösterimi,

$$E[n] = \frac{1}{M} \sum_{m=n-\frac{M}{2}}^{n+\frac{M}{2}} |x[m]|, \quad n = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (24)$$

Burada M değeri kayan pencerenin uzunluğudur. Eşitlikte  $m < 0$  ve  $m > N$  durumlarda  $x[m]$  değeri hesaba katılmaz ve aynı şekilde M değeri de veri sayısı kadar azalır. M değerinin seçimi verinin toplam uzunluğuna ve istenen sinyalin frekans içeriğine göre ayarlanır. Şekil 21 (a)'de bir sinüzoidal bölge ve iki gürültülü sessizlik bölgesinden oluşan bir yapyap sinyal görülmektedir. Bu sinyalin enerji değişimi, Şekil 21(b)'de verilmektedir.



Şekil 21. Enerji hesaplaması, (a) yapay ışık sinyali, (b) yapay ışık sinyalinin enerjisi

#### 2.4.2. Otsu Kümeleme Algoritması

Şekil 21(b)'ye benzer verilen enerji fonksiyonun düşük ve yüksek genlik bölgelerine ayrılması için bir eşik değerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada eşik değeri ( $t^*$ ), otsu kümeleme algoritması kullanılarak enerji fonksiyonundan elde edilmiştir. Otsu algoritması [28] genelde sınıflandırılmış (normalize edilmiş histogram) değerlere uygulanmaktadır.

Öncelikle enerji verileri  $L$  tane sınıfa ayrılır (Şekil 22(a)).  $i$ . sınıfa düşen enerji değerleri sayısı  $f_i$  ile gösterilmektedir. Toplam veri sayısı  $N = f_1 + f_2 + \dots + f_L$  biçiminde bulunabilir. Her bir sınıfa düşen olasılık değerleri,

$$p_i = \frac{f_i}{N}, \quad p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1 \quad (25)$$

biçiminde hesaplanır ve verilen koşulları sağlar. Tüm veri  $C_1$  ve  $C_2$  adlı iki kümeye ayrılacaksa,  $C_1$  kümesi 1'den  $t$ 'ye kadar olan sınıfları,  $C_2$  ise  $t + 1$ 'den  $L$ 'ye kadar olan sınıfları içerir. Bu kümelerin birikimli olasılıkları sırasıyla,

$$w_1 = \sum_{i=1}^t p_i \quad (26)$$

ve

$$w_2 = \sum_{i=t+1}^L p_i \quad (27)$$

olur. Bu birikimli olasılıklar kullanılarak her küme için sınıflandırılmış ortalama değerleri,

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^t \frac{i \cdot p_i}{w_1} \quad (28)$$

ve

$$\mu_2 = \sum_{i=t+1}^L \frac{i \cdot p_i}{w_2} \quad (29)$$

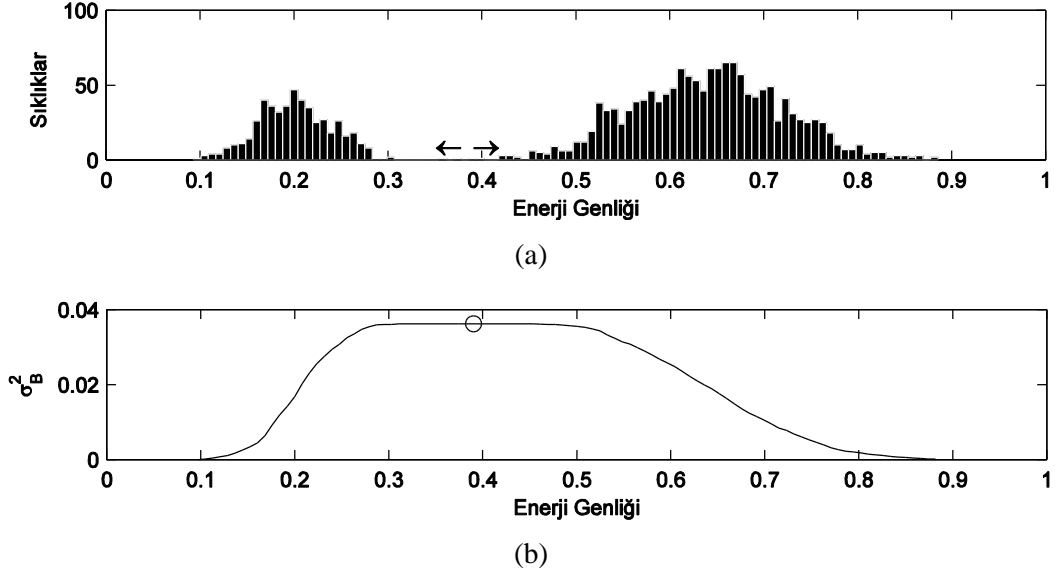
biçiminde hesaplanır. Tüm verinin ortalama değeri ise,

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L i \cdot p_i \quad (30)$$

biçiminde hesaplanır. Optimal eşik değeri, kümeler arası varyans ( $\sigma_B^2$ ) değerlerini en büyük yapan sınıf dizini (Şekil 25(b)),

$$t^* = \arg \max_{0 < t < L} \{\sigma_B^2(t) \mid \sigma_B^2 = w_1(\mu_1 - \mu_T)^2 + w_2(\mu_2 - \mu_T)^2\} \quad (31)$$

biçiminde hesaplanır [28].



Şekil 22. Otsu kümeleme uygulaması, (a) sınıflandırılmış enerji fonksiyonu (histogram) (b) kümeler arası varyans fonksiyonu ve optimal eşik değerinin belirlenmesi

Otsu kümeleme algoritmasıyla belirlenen eşik değeri enerji fonksiyonunu iki parçaya ayırır. Eşik değerinin altındakiler 0'a üstündekiler ise 1'e eşitlenir (etiketleme). Bu şekilde elde edilen N adet 1 ve 0'lar dizisi sırasıyla ışığın olduğu ve olmadığı zamanları gösterir. Bu yöntem çoğu zaman başarı ile çalışmasına rağmen, bazen ıslık bölgenin (1'ler) içinde sıfırlara denk gelinebilir. Tam tersi de sıfırların içinde birler görülebilir. Bu durumda istenen bölgeyi mutlak bir biçimde elde etmek için dizi ortanca (median) süzgecine tutulur.

Eşiklenmiş etiketler dizisi sayısal türev alındığında, ıslık bölgesinin başında +1, sonunda ise -1 etiketi bulunur. +1'ler ıslık başlangıcını, -1'ler ıslık bitişini göstermektedir. +1 ile -1 arası ıslık bölgesini, -1 ile +1 ise sessizlik bölgesini göstermektedir.

## 2.5. $F_0$ -Kestirim Yöntemleri

Bir sesin sesil'i, algılamadan etkilenen öznel bir kavramdır. Oysa harmonik bir seste bu kavram  $F_0$  ( $T_0$  ses sinyalinin döneminin tersi) temel frekansıyla tamamen ilişkilidir. Bu yüzden bir nota belirleme düzeneği oluşturmak için öncelikle ses sinyalindeki  $F_0$ 'ın kestirilmesini sağlayan bir algoritmanın tasarlanması gerekir.

Bu analizin zorluklarından biri genel seslerin durağan olmamasıyla ilişkilidir. Yakın araştırma alanı olmamasına rağmen ses alanı araştırmasında çok büyük çaba harcanması sonucu birçok teknik geliştirilmiştir.

Bu bölümde, sesil bulma yöntemlerinden zaman ve frekans ortamlı tekniklerini içeren dört tanesi üzerinde durulmuştur. Bunlar,

- Fark fonksiyonun ortalama büyüklüğü (AMDF),
- Zaman ortamlı özilişki fonksiyonu (tACF),
- Frekans ortamlı özilişki fonksiyonu (fACF),
- Harmonik Çarpım Spektrumu (HPS),

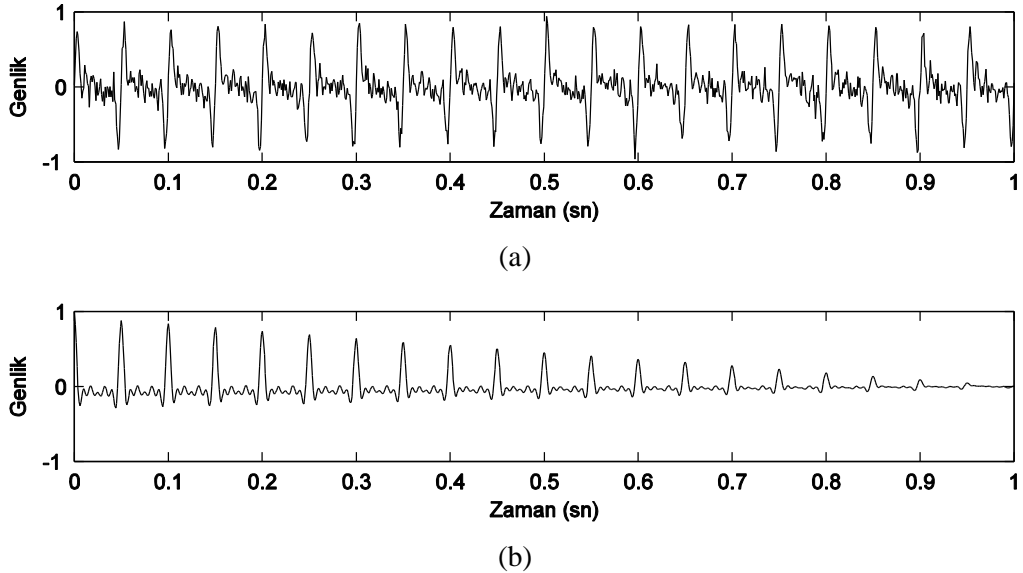
yöntemleridir. Bu yöntemler aşağıda ayrıntılı biçimde açıklanmıştır[29].

### 2.5.1. Zaman Ortamlı Özilişki Fonksiyonu

Zaman ortamlı özilişki fonksiyonuna dayalı algoritmalar en çok kullanılan  $F_0$  kestiricileridir [30]. Bu teknik özilişki fonksiyonunda ortaya çıkmış tepe noktalarının belirlenmesi prensibine dayanmaktadır. Özilişki fonksiyonu,

$$r_{xx}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-n-1} x[k] \cdot x[k+n], \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (32)$$

biçiminde verilmektedir. Bu eşitlik  $N$  uzunluklu  $x[n]$  zaman sinyalinin kaydırılmış zaman dilimleri arasındaki benzerliklerini ölçer. Çünkü dönemsel bir sinyal bir dönem kadar geciktiğinde kendisiyle güçlü ilişki kurar (Şekil 23) ve bu ilişki o noktada yüksek genlikli bir tepe oluşmasını sağlar.



Şekil 23. Peryodik bir sinyal ve özilişki foksiyonu, (a)  $f = \{20, 40, 60, 80, 100, 120 \text{ Hz}\}$  harmonik frekanslarına sahip bir yapay sinyal; (b) (a)'da verilen yapay sinyalin zaman ortamlı özilişki fonksiyonu.

Veri sayısının çok olduğu uygulamalarda, FFT yoluyla benzer ve daha hızlı bir işlem ile özilişki fonksiyonu bulunabilir [29]. FFT yoluyla zaman ortamlı özilişki fonksiyonu,

$$r_{xx}[n] = IFFT\{|FFT\{x[n]\}|^2\} \quad (33)$$

biçiminde bulunabilir.

Bu yöntemin diğer bir üstünlüğü saklı dönemsellerin tanımlanmasında etkin olmasıdır. Örneğin, temel frekansının genliği düşük olan bir sinyalin yüksek genlikli gürültüye sahip olması durumunda bile temel dönemsel, kendisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Düşük dereceli FFT ve düşük pencere boyuyla bile istenen logaritmik çözünürlük gösterimi iyi sonuçlar vermektedir.

Bir sinyal dönemsel ise, özilişki fonksiyonu da dönemsel olur. Sinyal harmonik ise, özilişki fonksiyonun temel dönem katlarında tepe noktalarına sahip olacaktır. Bu nedenle bazı durumlarda yöntemin  $F_0$ 'ın yarıya inme eğiliminde olduğu görülebilir.

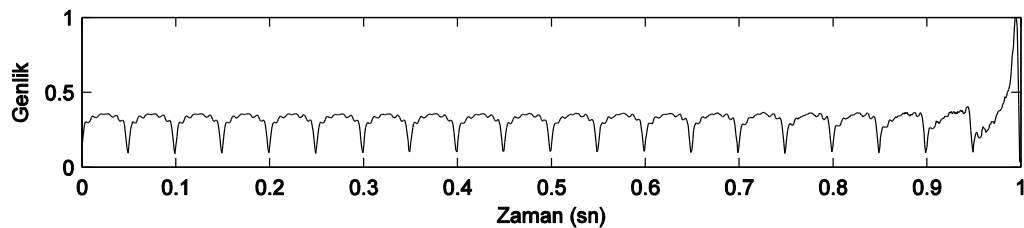
### 2.5.2. Fark Fonksiyonun Ortalama Büyüklüğü

Diğer bir zaman ortamlı algoritma ve ACF'ye alternatif yöntem AMDF'dir. AMDF işlemi belli bir zaman aralığıyla sinyalin farklarının ortalaması,

$$\psi[m] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n] - x[n+m]| \quad (34)$$

eşitliğiyle verilmektedir. Bu eşitlikte her  $m$  değeri için sinyalin tüm fark değerleri hesaplanır ve bunların ortalaması alınır.

tACF'ye karşın, AMDF'te tepe noktalarının yerine en büyük benzerlikte dalgalar arasında çukurlar oluşacaktır (Şekil 24). Sıfır anı dolayındaki ilk benzerlik hariç, en küçük değer (çukur) temel dönem ( $T_0$ ) olarak alınmaktadır. tACF'teki gibi,  $T_0$  için  $T_0$ 'ın yerini tutabilecek tamsayı katları atılır.



Şekil 24. Şekil 23(a) verilen yapay sinyalin fark fonksiyonun ortalama büyüklüğü



Gürültünün yüksek olduğu sinyallerde daha güçlü bir  $F_0$  kestirimi sağlamak için Kobayashi ve diğ. tarafından ACF ve AMDF bir araya getirilmiştir [31]. Bu karma eşitlik,

$$g(\tau) = \frac{r(\tau)}{\psi(\tau) + 1} \quad (35)$$

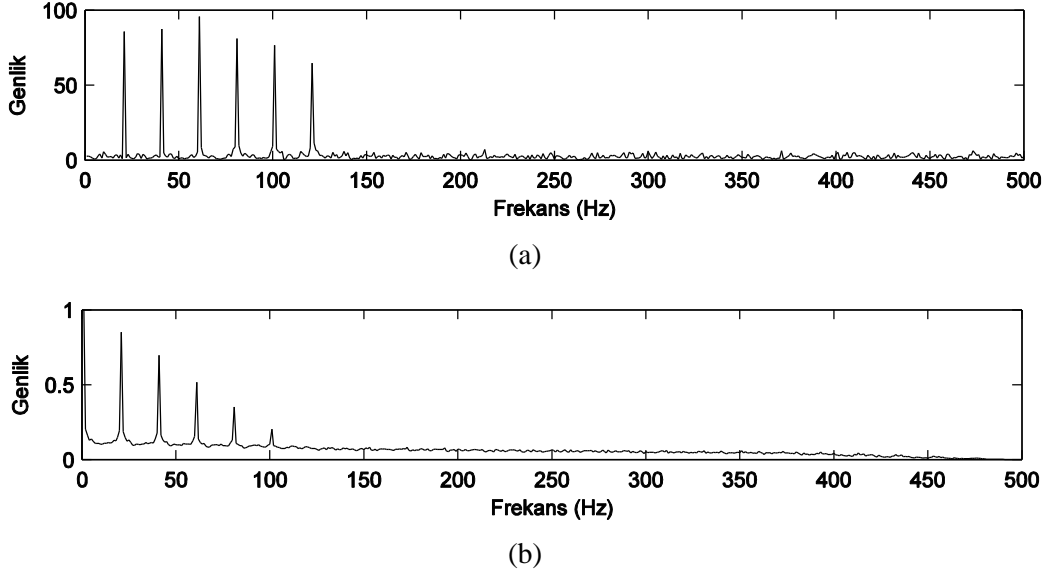
biçiminde verilmektedir.

### 2.5.3. Frekans Ortamlı Özilişki Fonksiyonu

Frekans ortamlı özilişki fonksiyonu, zaman ortamlı özilişki fonksiyonu gibi  $F_0$  kestiricisi olarak yıllardır başarıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemin temel prensibi dönemsel genlik spektrumuna sahip olan harmonik seslerin araştırılmasına dayalıdır. Bu yüzden FFT derecesinin ( $mf_s/M$ ) tersi ve örnekleme frekansı ile çarpılan  $m$  frekans dizini herhangi iki spektral bileşen  $F_0$  bulunabilmesi için (36) eşitliğinde kullanılmaktadır. Burada  $m$  frekans gecikmesini göstermektedir.

$$\hat{r}[m] = \frac{2}{M} \sum_{k=0}^{\frac{M}{2}-m-1} |X(k)| \cdot |X(k+m)| \quad (36)$$

Burada özen gösterilmesi gereken nokta, özilişki fonksiyonu sonucunda  $m = 0$ 'da en büyük genlik değeri çıkar (sinyalin enerjisinin yerini tutar). Bu bölge hariç tutularak, bundan sonra gelen en büyük genlik değerinin bulunduğu frekans sinyalin temel frekansı olarak alınır (Şekil 25).



Şekil 25. fACF gösterimi, (a) yapay sinyalin yarı genlik spektrumu; (b) (a)'da verilen genlik spektrumunun özilişki fonksiyonu

Diğer yerel en büyük genlik frekansları  $F_0$ 'ın tamsayı katları olarak görünür. Hesaplamalarda bir başka kör nokta ise sabit frekans çözünürlüğünden kaynaklanır. Bu problem, çözünürlüğün yeterli olmadığı düşük frekanslarda temel frekansın en büyük değerinin bulunamamasına neden olur. Bu yüzden daha büyük FFT derecelerinin frekans aralığını düşürmesiyle düşük frekanslarda temel frekansın bulunması sağlanabilir.

#### 2.5.4. Harmonik Çarpım Spektrumu

Harmonik çarpım spektrumu(HPS) sesli bulma algoritması [32], her  $X(\omega)$  spektral çerçeve için harmoniklerin maksimum çakışmalarını ölçer.

$$Y[k] = \prod_{d=1}^D \bigvee_{r=0}^k |X[d \cdot k + r]|, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (37)$$

Burada  $d \cdot k + r$  dizin değeri  $N/2$  değerini geçerse  $|X[d \cdot k + r]|$  değeri yerine tüm genliğin ortalama değeri kullanılabilir.  $D$  hesaplamalarda kullanılan tahmini harmoniklerin sayısıdır.  $\vee$  işleci, atlamalı dizin değerleri hesaplanırken en büyük değerin kaçırılmasını önlemek için kullanılır. Bu şekilde her atlanan dizilerin en büyük değeri seçilerek işleme katılır. HPS algoritmasının grafiksel gösterimi Şekil 26'de görülmektedir. Bu çalışma için, öncelikle 200, 400, 600 ve 800 Hz'lik farklı genliklerde sinüslerin toplamıyla yapay bir sinyal oluşturuldu. Bu sinyale S/N oranı 30 olan bir gauss gürültüsü eklendi. Bu sinyalin

FFT uygulanmış genlik spektrumu Şekil 26(a)'da verilmektedir. Bu spektrum 1/2 oranında (Şekil 26(b)), 1/3 oranında (Şekil 26(c)), 1/4 oranında (Şekil 26(d)) yeniden örneklenir. Bu örneklemeler istenildiği oranda artırılabilir. En iyi örnekleme sayısı, tahmini harmonik sayısı olarak alınabilir. Yeniden örneklenen bu spektrumlar aynı veri uzunluğuna sahip olması için her spektrumun sonuna o spektrumun ortalama değeri eklenir. Elde edilen bu dört spektrum alt alta çarpılarak HPS sonucu elde edilir (Şekil 26(e)). Şekil 26(e)'de sesil değeri açık bir şekilde görülmektedir. Buradaki en yüksek genliğe sahip frekans değeri sesil olarak alınmaktadır. Bu yöntemin hesaplanması kolaydır, sonuçları güvenilir ve farklı sinyaller için uyarlanabilir. Diğer yandan bazı eksiklikleri de bulunmaktadır. Çözünürlük, spektrumun hesaplanmasında kullanılan FFT'nin uzunluğu kadar iyidir. Kısa süreli ve hızlı fourier uygulandığında, ayrık frekansların sayısında bir sınır oluşur. Böylece fACF'de olduğu gibi sonuçta yüksek çözünürlük elde etmek için geniş FFT derecesine gerek duyulmaktadır.

### 2.5.5. $F_0$ Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

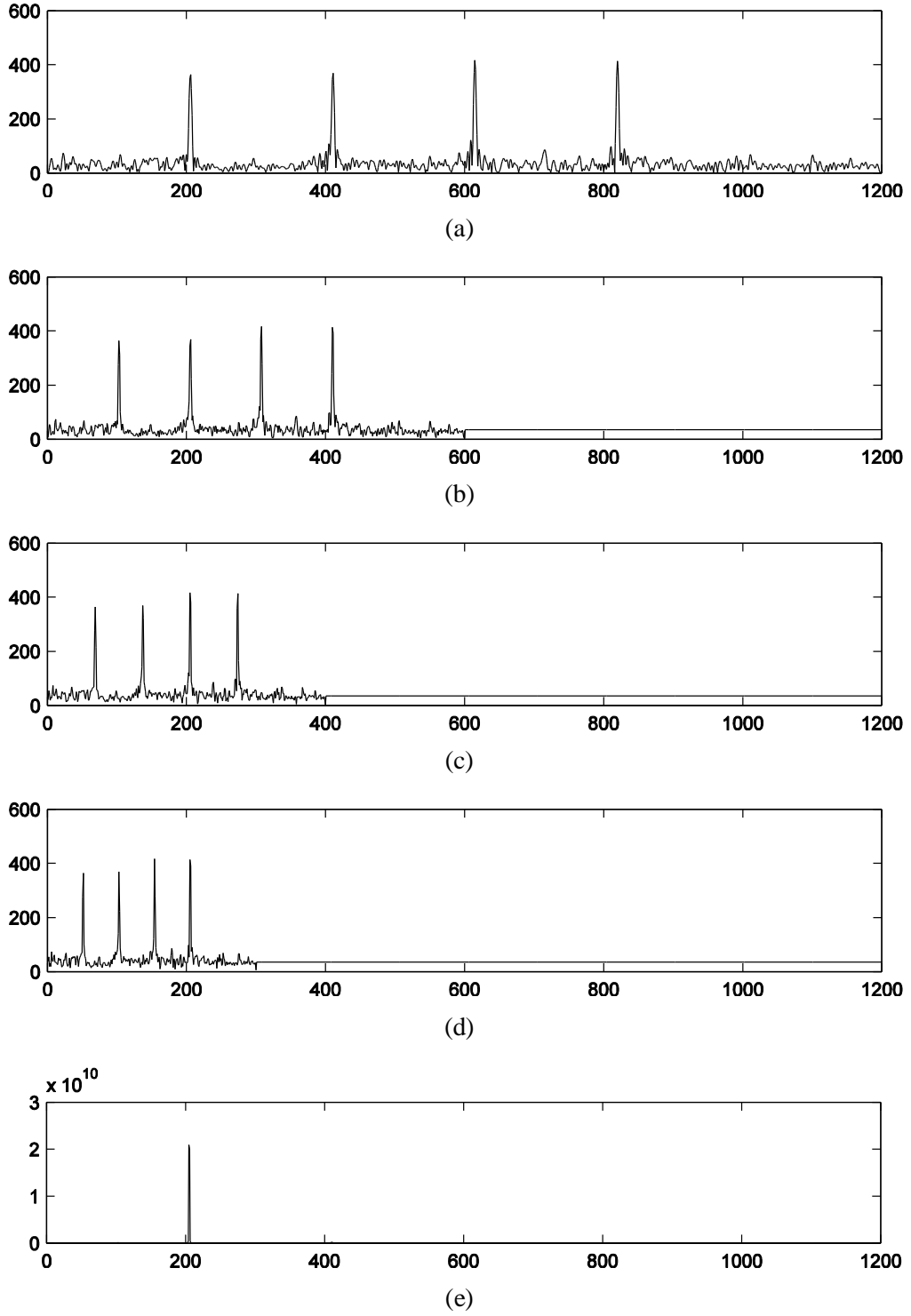
$F_0$  kestirimi için önerilen yukarıdaki dört ayrı yöntemde, çıkış verilerinin başarısını ölçmek için aşağıdaki yollar izlenmiştir:

- Fark fonksiyonun ortalama büyüklüğü (AMDF) yönteminde tüm verilerin ortalamasının en düşük değere oranı,
- Zaman ortamlı özilişki fonksiyonu (tACF) yönteminde en büyük değerlerin verilerin ortalama değerine oranı,
- Frekans ortamlı özilişki fonksiyonu (fACF) yönteminde en büyük değerlerin verilerin ortalama değerine oranı,
- Harmonik Çarpım Spektrumu (HPS) yönteminde en büyük değerlerin verilen ortalama değerine oranı,

biçiminde verilmektedir. Bu ölçütlere göre yöntemlerin sayısal karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Önerilen  $F_0$  kestirim yöntemlerinin göreceli karşılaştırma sonuçları

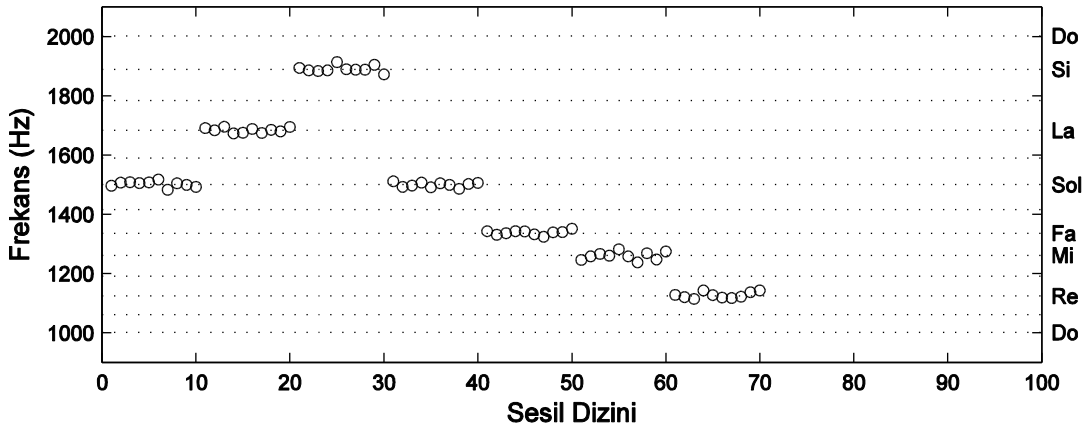
	AMDF Başarısı	tACF Başarısı	fACF Başarısı	HPS Başarısı
Ölçüte göre Başarı	0.2903	2.0000	15.7804	579.4130
Yüzdeler Başarı	0.0486	0.3347	2.6411	<b>96.9755</b>



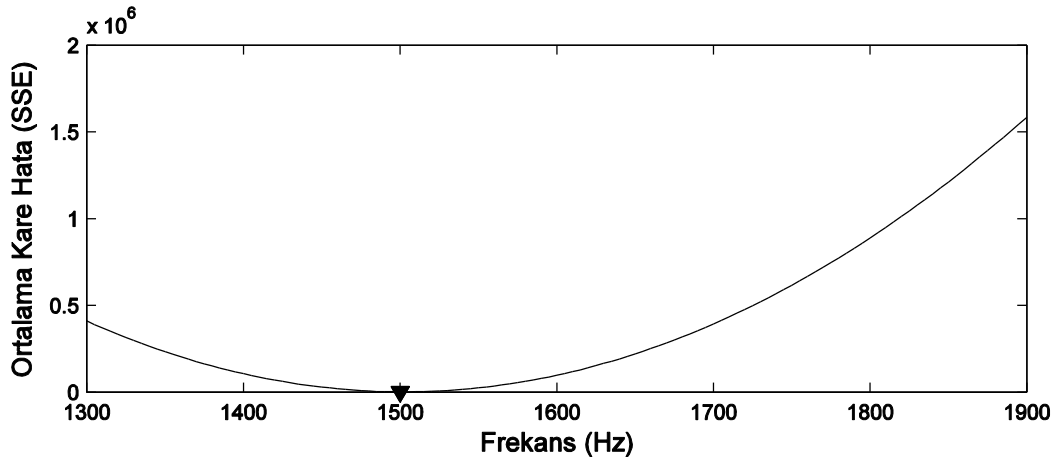
Şekil 26. HPS algoritmasının gösterimi, (a) 1200 Hz'lik 4 harmonikten oluşan sinyalin frekans cevabı; (b) örnekleme aralığı 2 katına çıkarılmış veri; (c) örnekleme aralığı 3 katına çıkarılmış veri; (d) örnekleme aralığı 4 katına çıkarılmış veri; (e) yeniden örneklenmiş veri kümelerinin birebir çarpılmasıyla elde edilmiş HPS görünümü.

## 2.6. Nota Bölütleme

Nota bölütleme işlemi hangi frekans kümesinin hangi notaya karşılık geldiğinin belirlenmesi işlemidir. Bu işlemi gerçekleştirmek için ses sinyalindeki ıslık bölgelerinin başlangıç ve bitiş zamanlarının yanı sıra temel frekanslarının (sesil) da belirlenmesi gerekir. Ardışık başlangıç ve bitiş zamanları arasına düşen her frekans kümesinin hangi nota bölütüne düştüğünün belirlenmesi gerçekleştirilir. Ancak nota bölütlerinin aralıkları ıslığı çalan kişiye göre değişiklik gösterdiğinden denek olarak kullanılacak kişinin ıslık frekansları (Şekil 27(a)) bilinen bir parçada denenerek kaynak frekansı ( $f_r$ ) belirlenir (Şekil 27(b)).



(a)



(b)

Şekil 27. (a) Ayrı ayrı etiketlenmiş örnek ıslık frekansları ve kaynak frekansı  $f_r = 1500$  Hz olan nota dizilimleri; (b)  $1300 \leq f_r \leq 1900$  Hz arasında toplam kare hatalarından minimum hataya sahip frekansın bulunması.

Şekil 27 (a)'da verilen notalar ve bunların sol notasına göre yarım perde göreceli konumları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3. Solfej notları ve Sol notasına göre göreceli yarım perde konumları ve  $f_r$  göre frekansları

Nota İsimleri	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
Sol notasına göre yarım perde konumları (n)	-7	-5	-3	-2	0	2	4	5
$f_r$ 'ye göre nota frekanslarının hesaplanması	$2^{-7/12} f_r$	$2^{-5/12} f_r$	$2^{-3/12} f_r$	$2^{-2/12} f_r$	$f_r$	$2^{2/12} f_r$	$2^{4/12} f_r$	$2^{5/12} f_r$

Bu çalışmada kaynak frekans ( $f_r$ ) belirlenirken sol notası temel alınmıştır. Yani ıslığı çalan kişinin ıslık sesindeki sol notasının sahip olduğu optimal frekans değeri bulunur. Bu bulma işleminde sol notasının frekans değeri belli bir aralıkta (örneğin  $1300 \leq f_r \leq 1900$ ) kaydırılır. Bu sol nota frekansından yararlanarak Tablo 2'de verilen nota frekans hesabına göre diğer nota frekansları bulunur. Her sesil frekansı kedisine karşılık gelen nota frekansıyla arasındaki toplam kare hatalarının minimum yapan frekans kaynak frekansı olarak alınır. Optimal kaynak frekansı,

$$f_r = \arg \min_{1300 \leq f_r \leq 1900} \left\{ SSE = \sum_{k=1}^K (f_{sesil}[k] - \hat{f}_{nota}[k])^2 \right\} \quad (38)$$

biçiminde bulunur. Burada,

$$\hat{f}_{nota}[k] = \hat{f}_r \cdot 2^{\frac{n[k]}{12}} \quad (39)$$

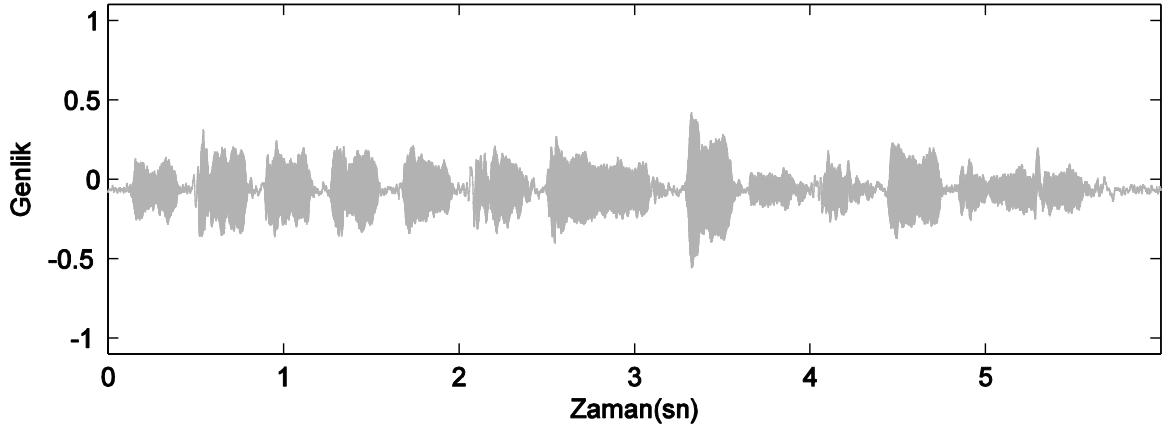
olarak tanımlanır.  $n[k]$ , k. sesilin, verilen yarım nota perdesine karşılık göreceli değeridir. Bulunan kaynak frekans denegin ıslık sesinin sol notası olarak alınıp diğer notaların frekansları bu notaya göre hesaplanır. İncelenmek istenen her hangi bir melodik ıslık öncelikle işlemlerden geçirilir. Daha sonra elde edilen sesil kümeleri en yakın notaya göre etiketlenir. Böylelikle notalar bulunur.

## 2.7. Örnek Uygulama 1

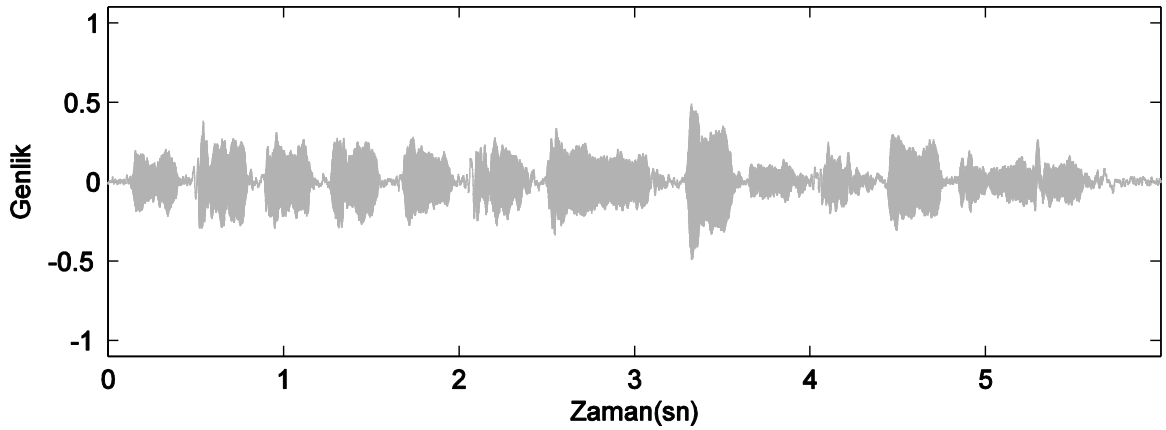
Örnek uygulama olarak birçok kişi tarafından bilinen “postacı” şarkısı ele alınmıştır. Bu şarkı birinci denek tarafından Matlab programında 22050 Hz'lik örnekleme frekansı ile

ıslık çalınarak kaydedilmiş ve 12 saniyelik bir ses kaydı elde edilmiştir. Bu ses kaydının işlenmesi adımlarının görsel olarak daha açık gözükmesi için ses kaydının 0-6 saniyelik bölümü Şekil 28-37 arasında, 6-12 saniyelik bölümü ise Şekil 38-47 arasında verilmiştir. Birinci deneğin kaynak frekansı 1492 Hz olarak bulunmuştur.

Şekil 28’de görüldüğü gibi ham ses sinyalinin ortalaması sıfır değildir. Bu durum sinyal üzerinde yapılacak olan ileriki işlemlerin hatalı sonuçlar vermesine sebep olabilecektir. Dolayısıyla sinyalin ortalamasının sıfıra getirilmesi gerekmektedir. Bunun için daha önce açıklanan DC işlemi uygulanır ve Şekil 29 elde edilir.



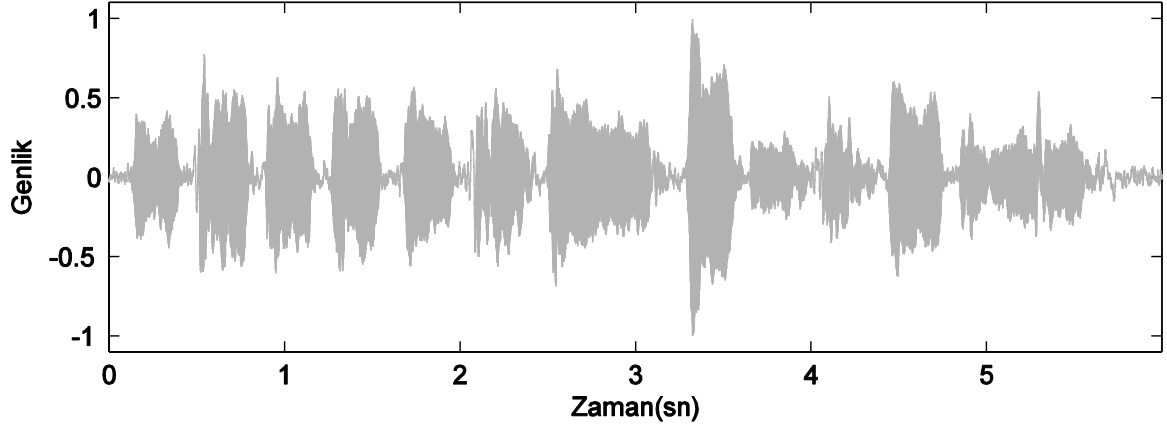
Şekil 28. Ham ses sinyali



Şekil 29. DC düzeltmesi uygulanmış ses sinyali

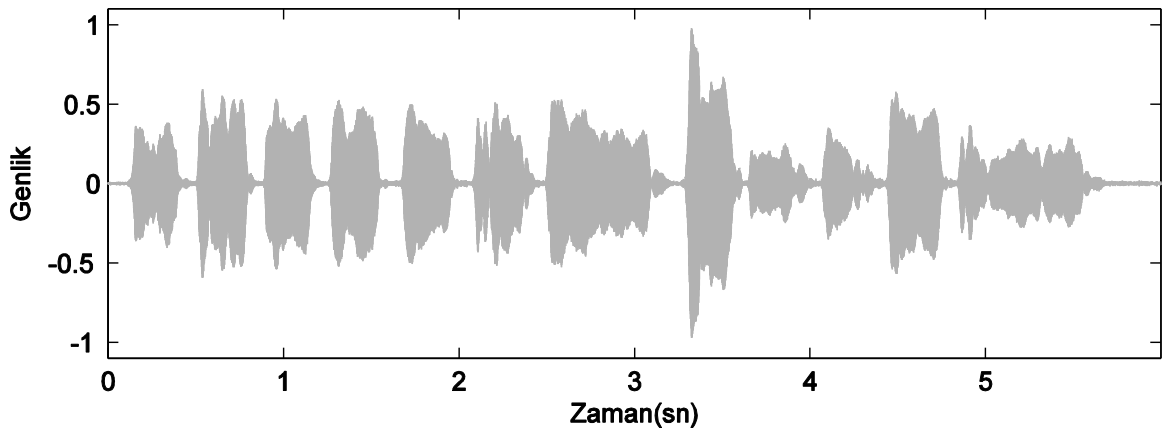
Ses kaydedilirken kişinin mikrofona yakınlığı ve uzaklığı sinyalin genliğini ve doğal olarak da enerjisini etkilemektedir. Bu etkiyi ortadan kaldırmak ve kaydedilen tüm sinyalleri birbirleriyle karşılaştırırken sorun yaşamamak için normalize edilmesi gerekir. Şekil 29’da görüldüğü gibi sinyal sıfır ortalamalı bir dizi olmasına rağmen genliği -0.5 ile 0.5 aralığına sıkışmıştır. Bu verilerin olabildiğince  $[-1,1)$  aralığına çekilmesi, verilerin

sayısal olarak karşılaştırılmasında kolaylık sağlayacaktır. Tüm veri sinyal içindeki mutlak değerce en büyük değere bölünerek sinyal üzerinde normalleştirme işlemi uygulanır ve Şekil 30 elde edilir.



Şekil 30. Normalleştirme işlemi uygulanmış ses sinyali

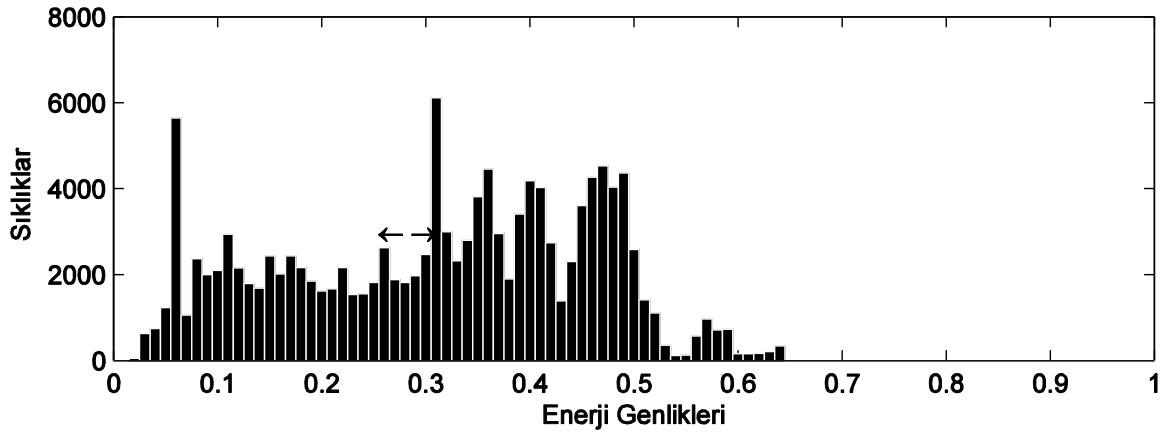
Şekil 30'da görüldüğü gibi sinyal içinde çevre etkenlerden kaynaklanan yavaş değişen (düşük frekanslı) veri bölgeleri olduğu gibi ani değişen yüksek frekanslı olaylarda gözükmemektedir. Yavaş değişen bölgeler yerel DC kaymasına neden olur. Bu bölgeleri ortadan kaldırmak için hareketli (parçalı) ortalama değerlerinin veriden çıkarılması yeterli olmaktadır. Yani ortalama silme yöntemi uygulanır. Böylece ortalama durağanlaştırılır. Ayrıca sinyal içerisindeki gürültüleri bastırmak için de 9 dereceli ve  $550 \text{ Hz} - 3300 \text{ Hz}$  aralığında bir butterworth süzgeci uygulanabilir. Böylece gürültülerden arındırılmış ses sinyali(Şekil 31) elde edilir.



Şekil 31. Ortalama silme işlemi uygulanmış ses sinyali

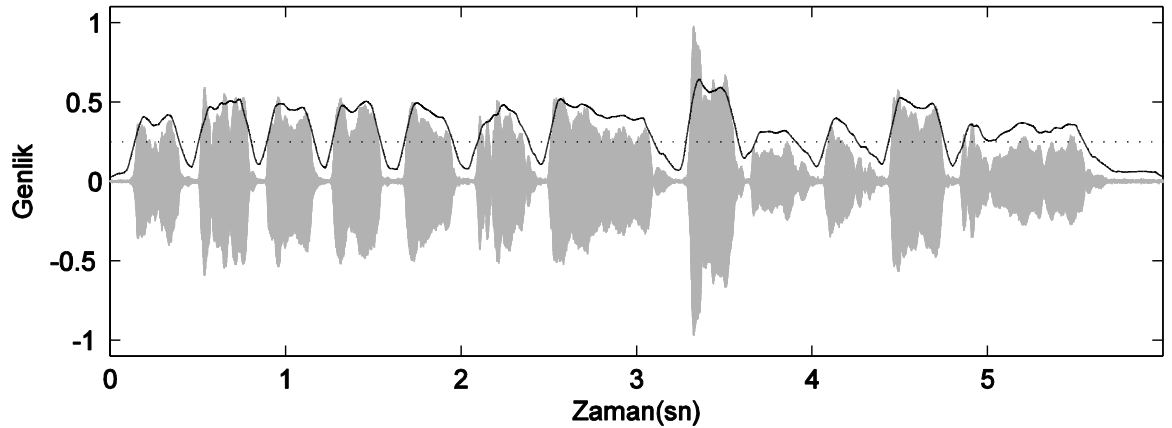


Isık zaman dizisi, ıslık ve sessizlik bölgesi biçiminde zaman sürecinde arka arkaya dizilerek yer almaktadır. Öncelikle ıslık bölgeleri ile sessizlik bölgelerini birbirinden ayırmak gerekir. Bunun için ön işlemlerden geçirilen ses sinyali üzerinde enerji fonksiyonu hesaplanır. Enerji fonksiyonu için  $M = 2000$  uzunlukta bir kayan pencere kullanılmıştır (Şekil 33). Enerji fonksiyonunun düşük ve yüksek genlik bölgelerine ayrılması için bir eşik değerin belirlenmesi gerekir. Bunun için otsu kümeleme algoritması kullanılarak enerji fonksiyonu için bir eşik değeri belirlenir. Şekil 32’de eşik değerin bulunması sıklık göstergesi üzerinde gösterilmektedir.



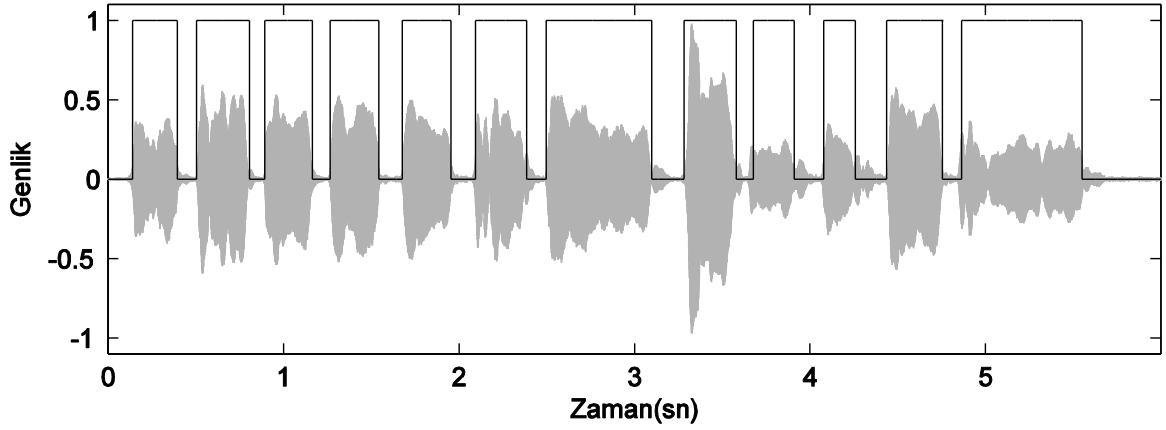
Şekil 32. Otsu kümeleme algoritması ile eşik değerin belirlenmesi

Şekil 32’de enerji fonksiyonundan elde edilen sıklık üzerinde oklarla gösterilen nokta eşik değeri olarak belirlenir. Bu örnek için eşik değeri yaklaşık 0,28’dir. Şekil 33’de ise eşik değeri enerji grafiği üzerinde noktalarla gösterilmektedir.



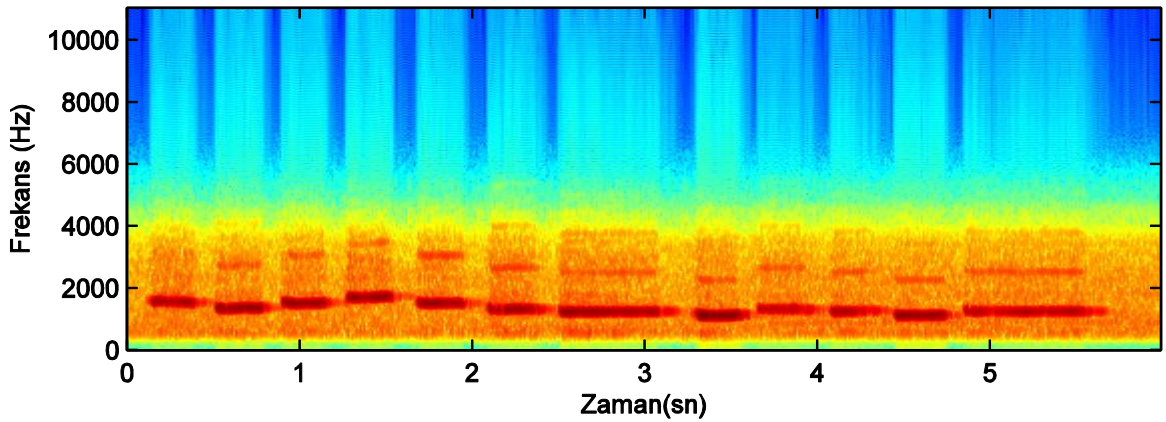
Şekil 33. Sinyalin enerji grafiği ve eşik değeri

Elde edilen eşik değeri sayesinde enerji fonksiyonu yüksek genlikli ve düşük genlikli olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Böylece düşük genlikli bölgeler sinyalin olmadığı, yüksek genlikli bölgeler ise sinyalin olduğu bölgeleri göstermektedir. Bu bölgeler aynı zamanda her bir notanın bulunduğu bölgelerdir. O yüzden notaların olduğu bölgeler 1'e, olmadığı bölgeler de 0'a çekilerek notaların olduğu bölgeler, her bir notanın başlangıç ve bitiş noktaları rahatlıkla görülmektedir (Şekil 34). Bu sinyalin üzerinde ileri yönlü sayısal türev yöntemi uygulanırsa +1 olan noktalar notaların başlangıçlarını, -1 olan noktalar ise bitişlerini gösterir.



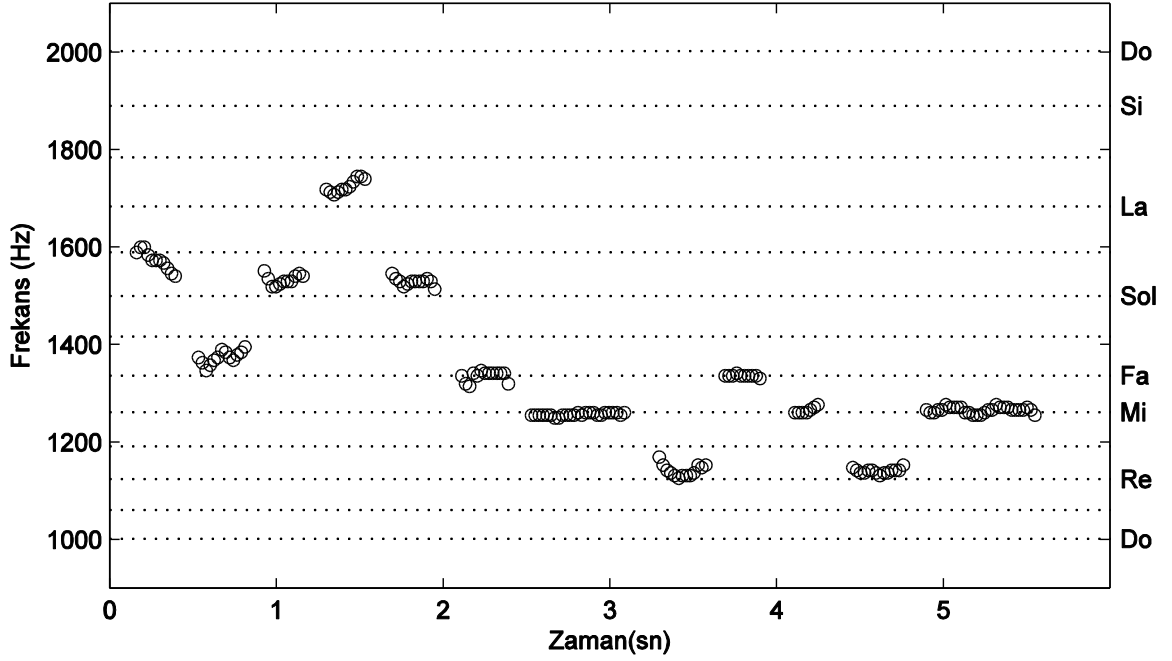
Şekil 34. Sinyal içindeki notaların başlangıç ve bitiş noktaları

İşık sinyalinin spektrogramı incelenecek olursa aslında her bir notanın frekansı rahatlıkla görülmektedir (Şekil 35). Bu işık sesinde temel frekansların yüksek ardıl harmoniklerin ise oldukça düşük genlikli olduğu görülmektedir.



Şekil 35. Sinyalin spektrogramı

Her bir sesile ait frekans içeriği Şekil 36'daki grafikte daha ayrıntılı görülmektedir. Ayrıca her bir frekansın hangi notaya ait olduğu da gösterilmektedir. Şekil 36'da görüldüğü gibi her bir nota aralığı alttan üste doğru artmaktadır. Bir oktavda toplam 12 farklı perde vardır. Tüm perdeler kesikli yatay çizgilerle gösterilmektedir. Ancak sağ ekseninde notalar gösterilirken “diyez” ve “bemol” notalar gösterilmemiştir.



Şekil 36. Temel frekansların kümelenmesi ile notaların kestirimi

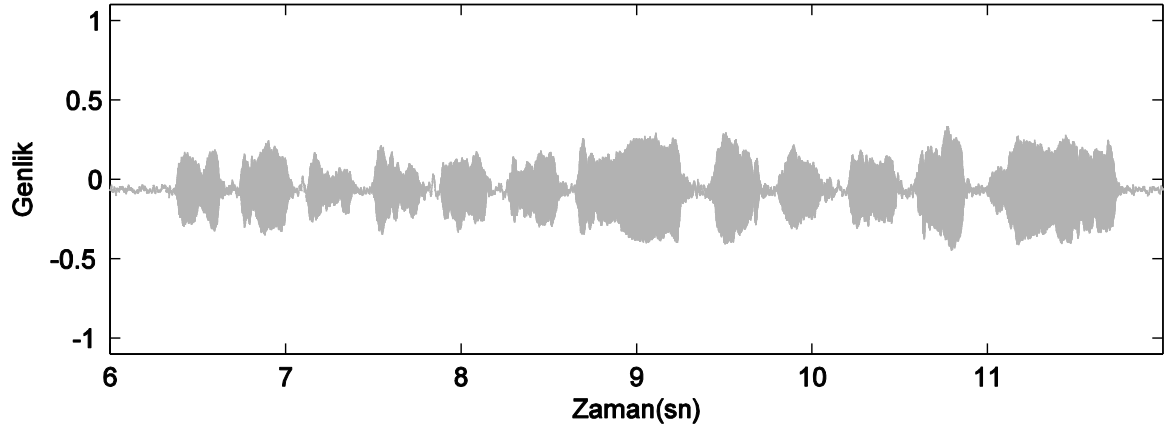
Şekil 36'da görüldüğü gibi “postacı” şarkısının ilk bölümünün notaları porte üzerinde aşağıdaki gibi belirlenmiştir.



Bak pos ta cı ge li yor se lam ve ri yor

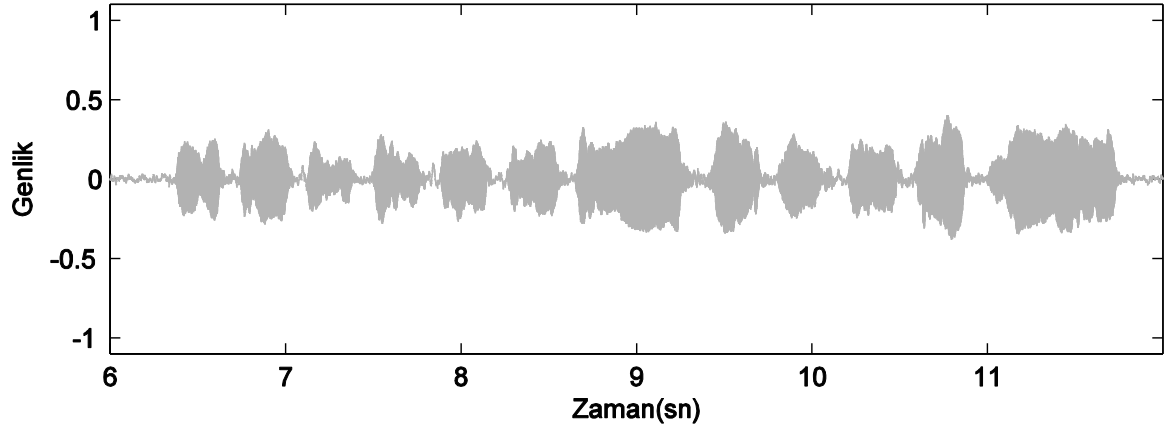
Şekil 37. Postacı şarkısının ilk dizesinin notaları

Postacı şarkısının ilk 6 saniyelik ilk kısmı incelendi. İkinci kısım yani 6-12 saniye aralığındaki sinyal şekil 38'de gösterilmektedir.



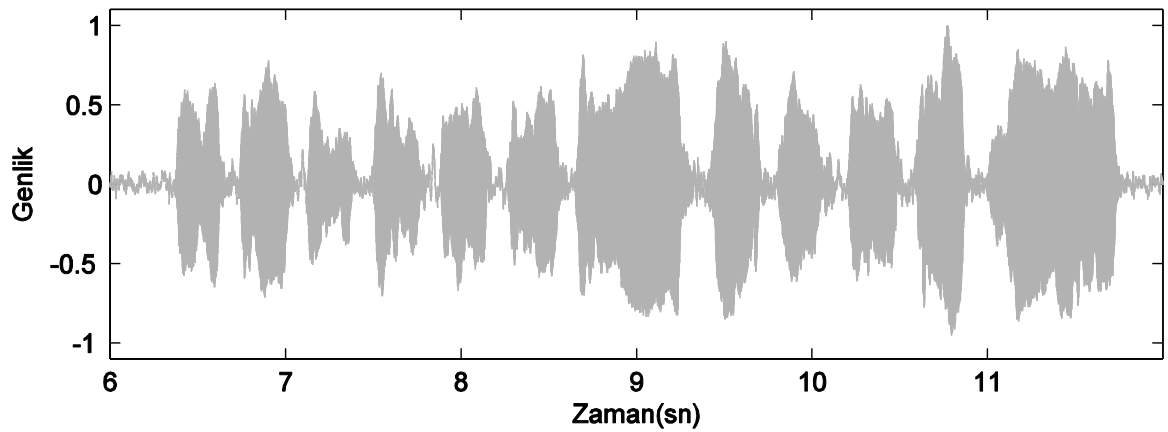
Şekil 38. Ham ses sinyali

Şarkının ilk kısmı üzerinde yapılan işlemler ikinci kısım üzerinde de yapılır. İlk önce DC işlemi uygulanır ve ortalama sıfıra çekilir(Şekil 39).



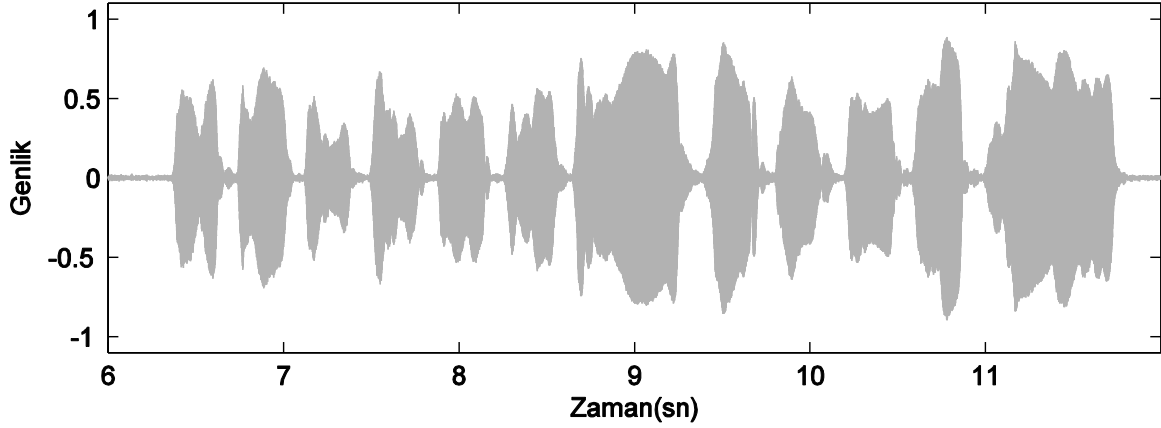
Şekil 39. DC düzeltmesi uygulanmış ses sinyali

DC işlemi uygulandıktan sonra sinyalin ortalaması sıfır olur. Ancak genlik  $-0,5$  ile  $0,5$  aralığındadır. Normalleştirme işlemiyle genlik  $[-1, 1)$  aralığına getirilir(Şekil 40).



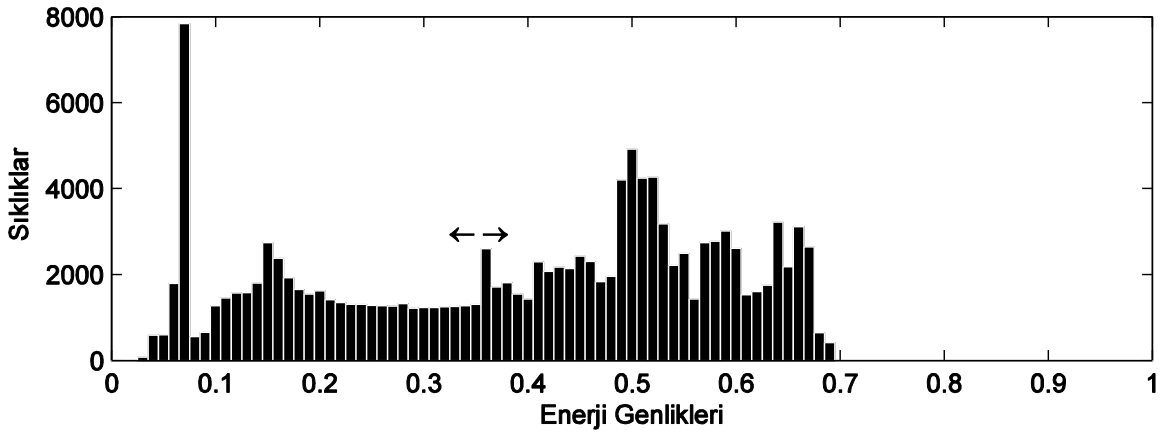
Şekil 40. Normalleştirme işlemi uygulanmış ses sinyali

Sinyalin içindeki yavaş değişimlerin(düşük frekansların) yok edilmesi için ortalama silme işlemi uygulanır(Şekil 41).



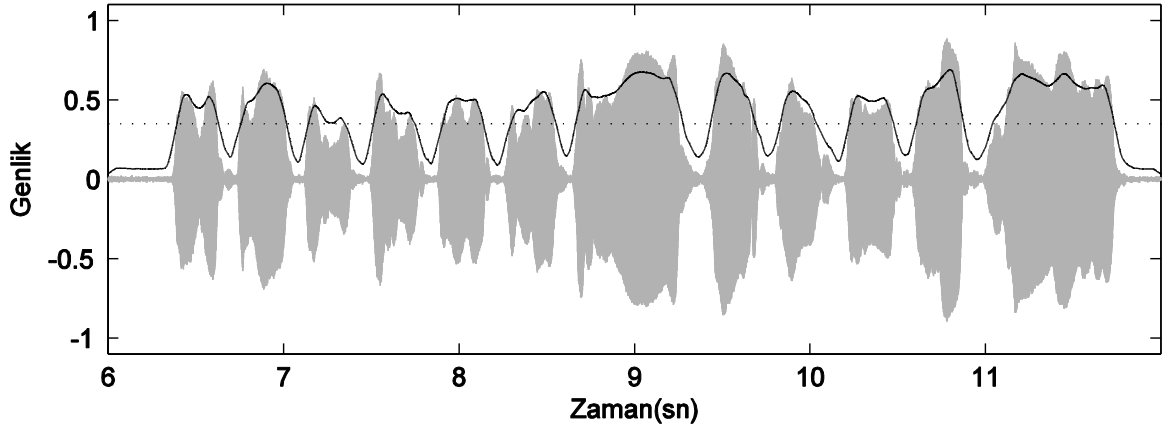
Şekil 41. Ortalama silme işlemi uygulanmış ses sinyali

Buraya kadar sinyal ön işlemlerden geçirildi. Enerji grafiği için bir eşik değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için sinyalin sıklık göstergesi üzerinde otsu yöntemi uygulanır ve bir eşik değeri belirlenir(Şekil 42).



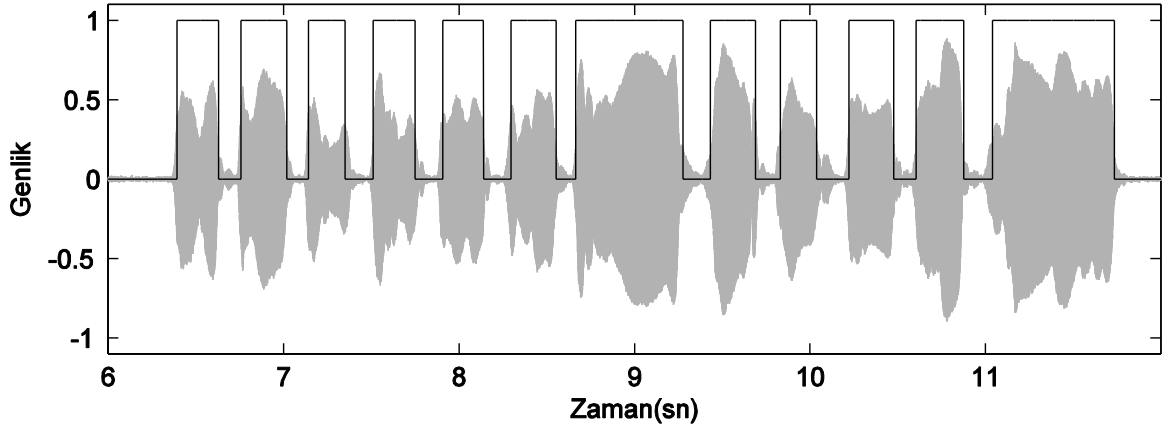
Şekil 42. Otsu kümeleme algoritması ile eşik değerinin belirlenmesi

Otsu yöntemiyle belirlenen eşik değeri enerji grafiği üzerinde Şekil 43'de gösterilmektedir.



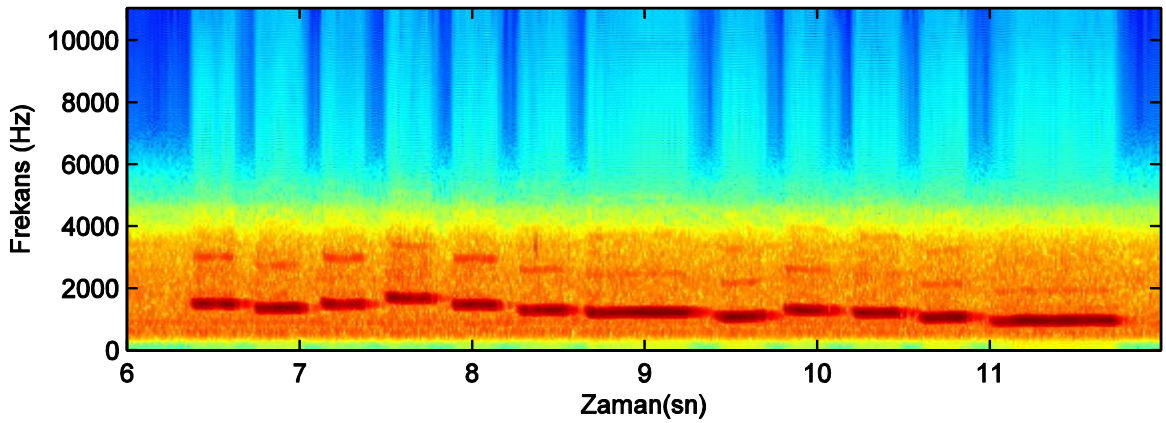
Şekil 43. Sinyalin enerji grafiği ve eşik değeri

Enerji fonksiyonu eşik değeri yardımıyla iki sınıfa ayrılır. Böylece sinyalin genliğinin yüksek olduğu bölgeler 1, düşük olduğu bölgelere 0 ile gösterilir. Genliğin 1 olduğu bölgeler notaların olduğu bölgelerdir(Şekil 44).



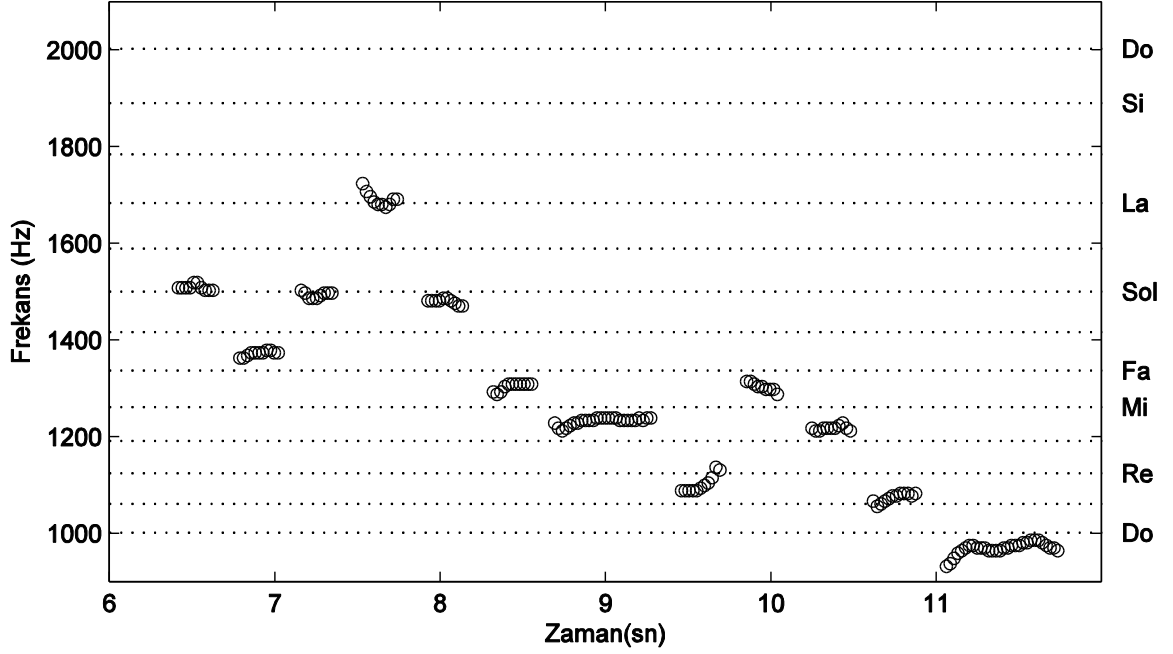
Şekil 44. Sinyal içindeki notaların başlangıç ve bitiş noktaları

Şekil 45'de sinyalin spektrogramı görülmektedir.



Şekil 45. Sinyalin spektrogramı

Sinyalin frekans içeriği Şekil 46’da daha ayrıntılı gösterilmiştir.



Şekil 46. Temel frekansların kümelenmesi ile notaların kestirimi

Şekil 46’da postacı şarkısının ikinci dizesinin nota karşılıkları görülmektedir. Bu notalar Şekil 47’de porte üzerinde gösterilmektedir.



Her kes o na ba kı yor me rak e di yor

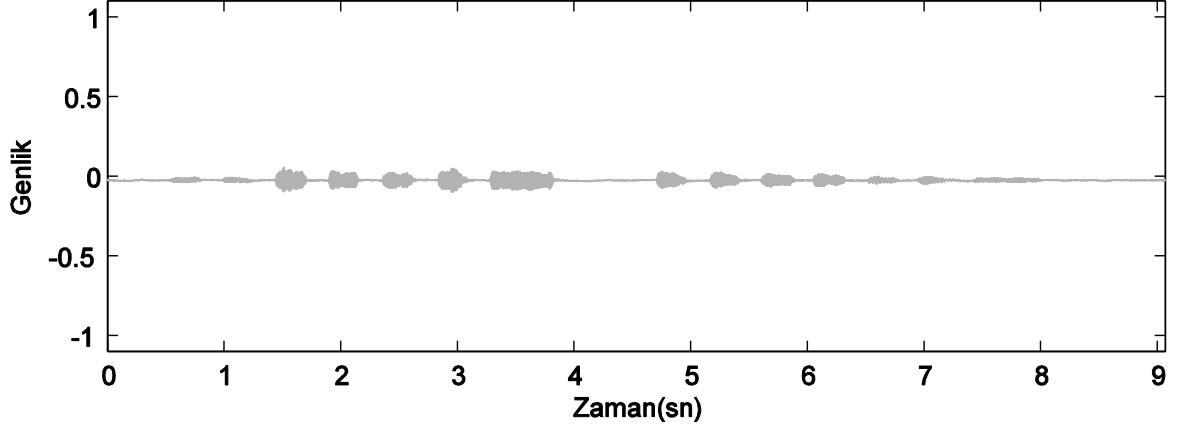
Şekil 47. Postacı şarkısının ikinci dizesinin notaları

## 2.8. Örnek Uygulama 2

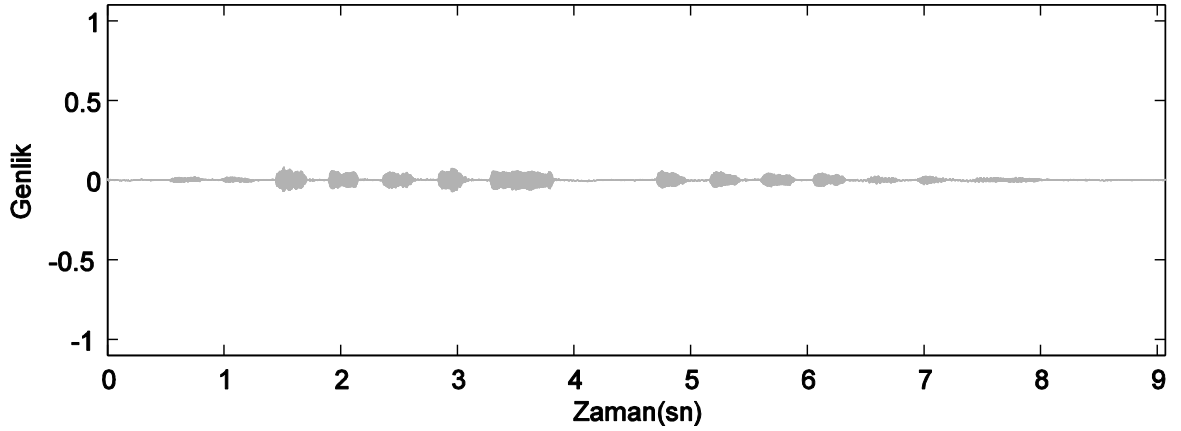
İkinci bir örnek uygulama olarak yine birçok kişi tarafından bilinen “okulumuz” şarkısının ilk bölümü ele alınmıştır. Bu şarkı farklı bir denek tarafından ıslık ile çalınmış ve Matlab programında 22050 Hz’lik örnekleme frekansı ile kaydedilmiştir. Yaklaşık 9

saniyelik bir ses kaydı elde edilmiştir. İkinci deneğin kaynak frekansı ise 1581 Hz olarak bulunmuştur.

Şekil 48’de görüldüğü gibi ham ses sinyalinin ortalaması sıfır değildir. İleriki aşamalarda sorunlarla karşılaşmamak için DC işlemi uygulanır ve ortalama sıfıra getirilir. Böylece Şekil 49 elde edilir.



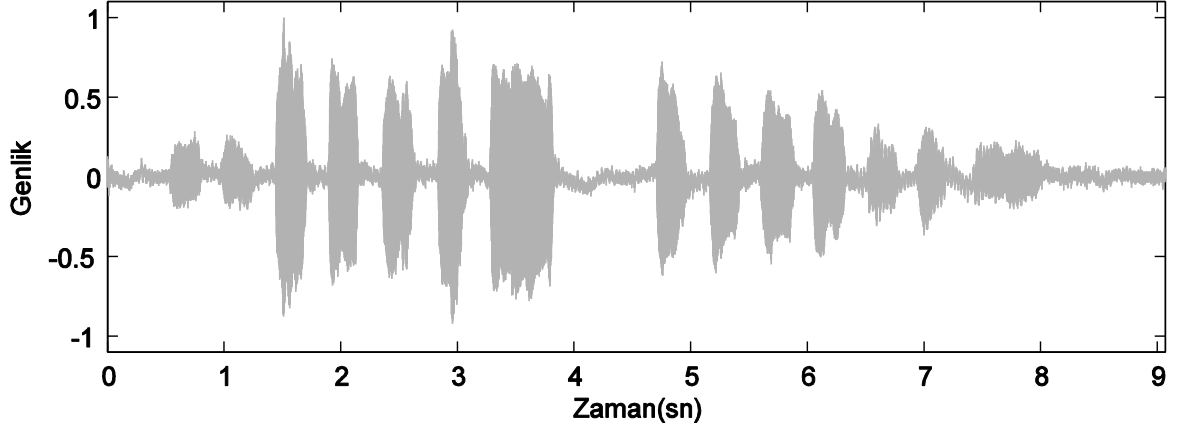
Şekil 48. Ham ses sinyali



Şekil 49. DC düzeltmesi uygulanmış ses sinyali

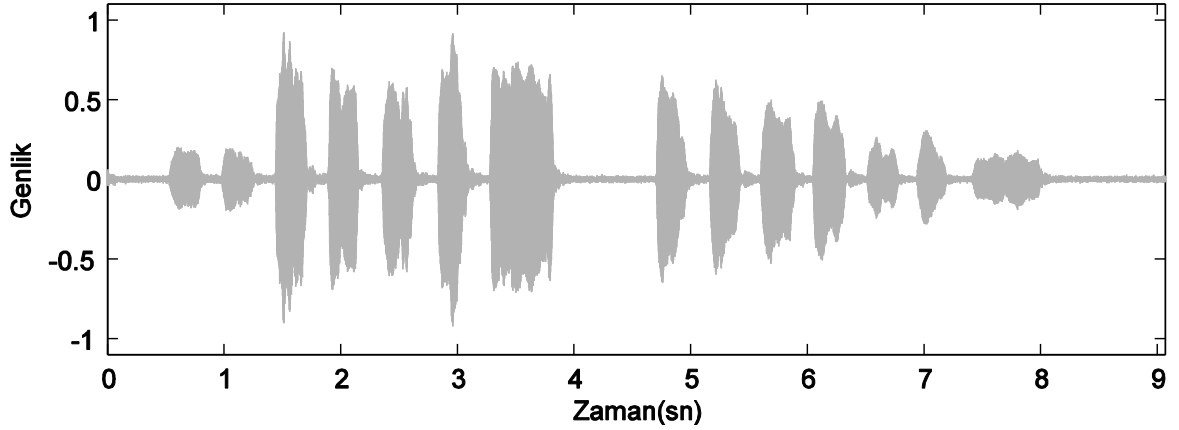
Şekillerden de görüldüğü gibi ses sinyalinin genliği oldukça düşüktür. Hem sinyalin enerjisinin olumsuz etkilenmesini önlemek hem de kaydedilen tüm sinyalleri birbirleriyle sorunsuz karşılaştırmak için sinyalin normalize edilmesi yani  $[-1,1)$  aralığına çekilmesi gerekir. Böylece Şekil 50 elde edilir.





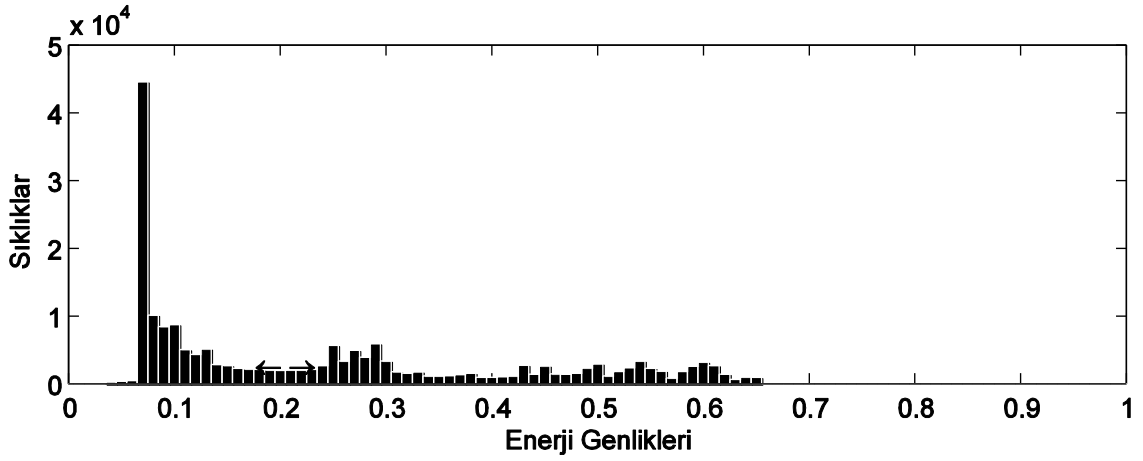
Şekil 50. Normalleştirme işlemi uygulanmış ses sinyali

Şekil 50’de görüldüğü gibi sinyal içinde yavaş değişen (düşük frekanslı) ve ani değişen yüksek frekanslı olaylar mevcuttur. Yavaş değişen bölgelerin neden olduğu yerel DC kaymalarını ortadan kaldırmak için ortalama silme yöntemi uygulanır. Böylece ortalama durağanlaştırılır ve Şekil 51 elde edilir.



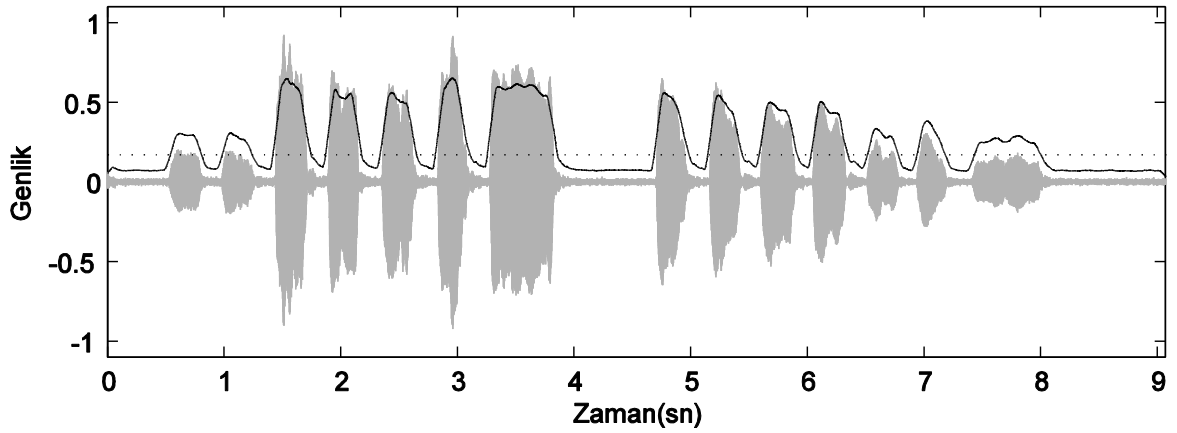
Şekil 51. Ortalama silme işlemi uygulanmış ses sinyali

Islık zaman dizisi içinde, ıslık ve sessizlik bölgelerini birbirinden ayırmak için ses sinyali üzerinde enerji fonksiyonu hesaplanır ve otsu kümeleme algoritması kullanılarak bir eşik değeri belirlenir. Şekil 52’de eşik değerinin bulunması sıklık göstergesi üzerinde gösterilmektedir.



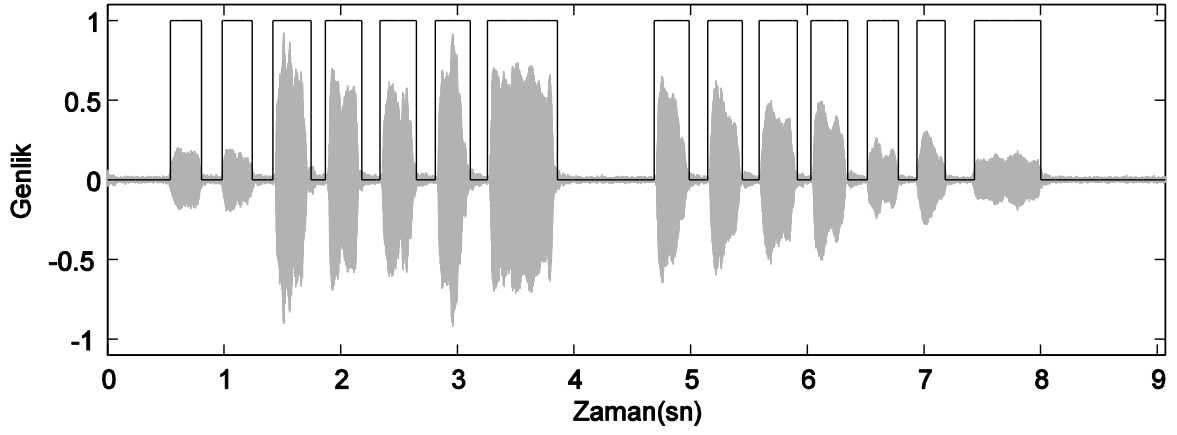
Şekil 52. Otsu kümeleme algoritması ile eşik değerinin belirlenmesi

Şekil 52’de enerji fonksiyonundan elde edilen sıklık üzerinde oklarla gösterilen nokta(yaklaşık 0.21) eşik değeri olarak belirlenir. Şekil 53’de eşik değeri noktalarla gösterilmektedir.



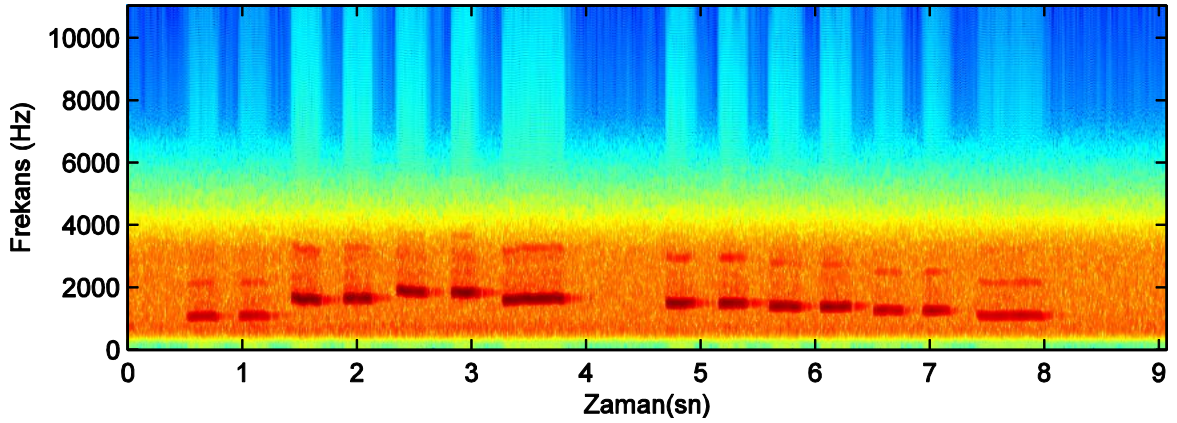
Şekil 53. Sinyalin enerji grafiği ve eşik değeri

Elde edilen eşik değeri sayesinde enerji fonksiyonu üzerinde notaların olduğu ve olmadığı bölgeler rahatlıkla görülebilmektedir. Şekil 54’de 1 olan bölgeler notaların olduğu, 0 olan bölgeler notaların olmadığı bölgelerdir.



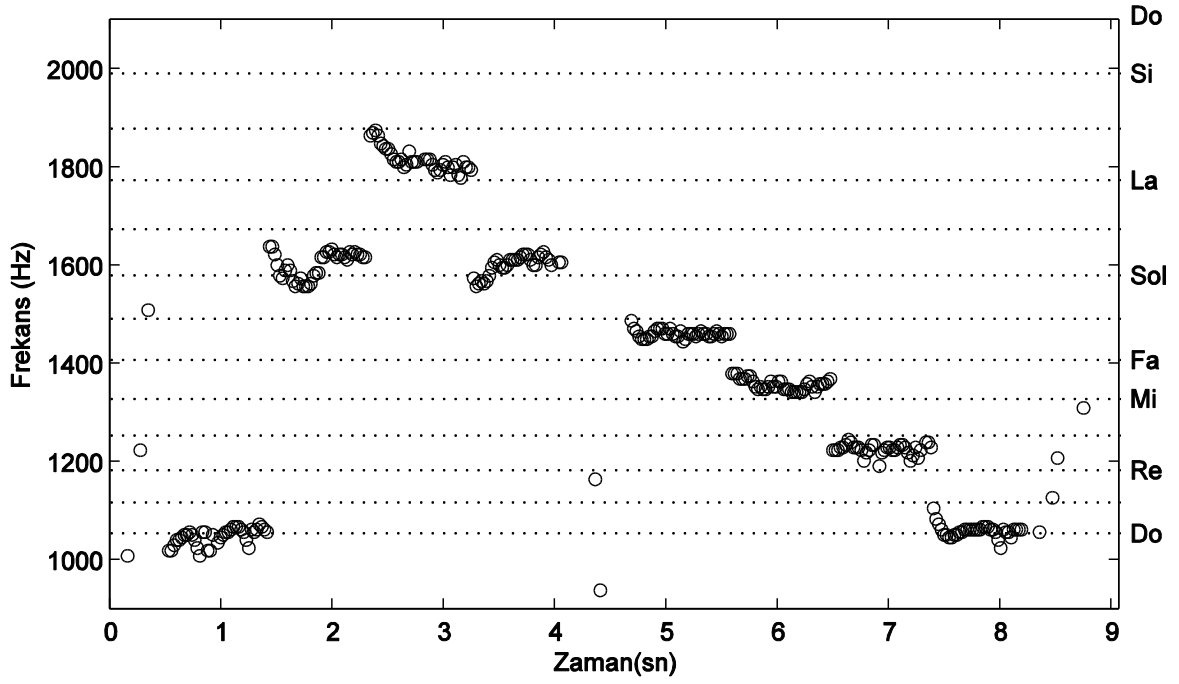
Şekil 54. Sinyal içindeki notaların başlangıç ve bitiş noktaları

Şekil 55’de ıslık sinyalinin spektrogramı görülmektedir. Spektrogram incelenecek olursa aslında her bir notanın frekansı rahatlıkla görülmektedir.



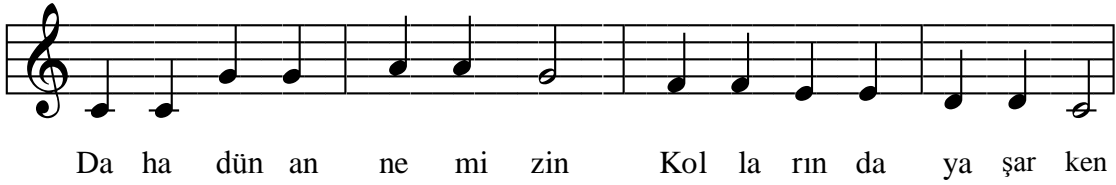
Şekil 55. Sinyalin spektrogramı

Şekil 56’da her bir sesile ait frekans içeriği daha ayrıntılı ve her bir frekansın hangi notaya ait olduğu gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi her bir nota aralığı alttan üste doğru artmaktadır. Ancak burada “diyez” ve “bemol” notalar gösterilmemiştir. Sadece bir oktavdaki 12 farklı perde gösterilmiştir.



Şekil 56. Temel frekansların kümelenmesi ile notaların kestirimi

Şekil 56'da görüldüğü gibi "okulumuz" şarkısının ilk bölümünün notaları porte üzerinde aşağıdaki gibi belirlenmiştir.



Şekil 57. Okulumuz şarkısının ilk dizesinin notaları

### 3. BULGULAR VE SONUÇLAR

Islık verileri az gürültülü bir ortamda kayıt edildiklerinde temel frekanslarının belirlenmesi oldukça kolay olabilmektedir. Gürültünün fazla olması durumunda genlik bölgelerinin birbirinden ayrılması güçleşmektedir. Frekans veya sıralı (ortanca, ...) süzgeçler kullanılarak bunlar yok edilebilmektedir. Burada en büyük kolaylık ıslık sinyallerinin sinüzoidal yapıya sahip olmalarıdır. Böylece birçok yöntem yardımıyla gürültü kolaylıkla bastırılabilir.

Vuruş süreleri ve temel frekansları belirlenen melodilerin hangi oktavdaki notalara karşılık geldikleri ıslığı seslendiren kişinin anatomik yapısına bağlı olduğu gözlenmiştir. Farklı kişilerde farklı sonuçlar alınması kurulan düzeneğin her kişi için ayrı ayrı öğretilmesi gerekir. Bu sorunu çözmek için seslendirme yapacak kişinin, önceden bilinen bir melodiyi seslendirdikten sonra kişiye özgü kaynak frekansın seçilerek diğer notalar bu kaynak frekansa göre hesaplanmıştır. Bu durumda notaların frekanslarının her zaman aynı olmadığı, kişilere göre göreceli olduğu söylenir. Aynı durum çalgı aletlerinde de söz konusu olmaktadır. Bu sorunu çözmek için akort işlemi uygulandığı bilinmektedir. Akort yardımıyla bir çalgı aleti diğer çalgı aletleriyle aynı oktava getirilir. Ancak insan ıslığı için akort gibi bir durum söz konusu olmadığı için böyle bir göreceli sistem kullanılmıştır.

Bilinen bir parçanın ıslık ile seslendirilme denemesi yapıldığında, ıslığı çalan kişiyi iyi bir müzik kulağına sahip olması gerekir. Aksi takdirde yanlış çalınacak bir parça kaynak frekansın yanlış çıkmasına ve tüm örneklerin hatalı bulunmasına neden olur.

Islık çalabilen herkesin oluşturduğu melodileri, bu yöntemler yardımıyla notalara çevrilerek beste yapılabilmesi mümkün olabilmektedir.

#### 4. ÖNERİLER

Birçok kişi rahat bir şekilde ıslık çalabilmektedir. Ancak yine de çalamayanlar mutlaka vardır. Dolayısıyla aynı sistem “la la laaaa” şeklinde söylenen melodiler içinde geliştirilebilir. Çünkü sesli harflerin de dönemsel yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca hecelerin yapısal biçimleri ile notalar arasında ilişki kurularak yapay bir ıslık dili ortaya konabilir.

Anadolu'nun birçok yerinde saz çalan âşıklar bulunur. Bu âşıklar herhangi bir nota bilgisine sahip olmaksızın doğaçlama saz çalarlar. Bunların çaldığı müzik parçaları daha sonraları işlenerek otomatikman müzik notlarına çevrilebilir.

Bu çalışmada bemol ve diyez notalar değerlendirilmemiştir. Daha iyi sonuç elde etmek için bu notalarda hesaplanabilir.

Notalarla aynı frekansa sahip ve yüksek genlikli gürültülerin varlığı ıslık bölgelerinin belirlenmesini güçleştirebilir. Bu durumda ıslıkların çevre gürültülerinden soyutlanmış bir alanda kayıt edilmesi gerekir. Bu mümkün değilse ıslık sinyallerindeki harmonikleri güçlendiren aralarda beyaz gürültüleri bastıran bir süzgecin tasarlanması gerekir. Bu durumda ıslık bölgeleri daha kolay bir şekilde belirlenebilir.

Bu çalışma birçok çalgı aleti için geliştirilip eğitimde ölçme değerlendirme çalışmaları için kullanılabilir.

Hayvanların ıslık melodilerine gösterdikleri şartlanmış davranışları ile ıslık melodileri arasındaki ilişki incelenerek hayvan yönetimi ve eğitimi çalışmaları desteklenebilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. <http://www.rehberim.net/forum/ortaokul-ve-liseler-590/858534-ses-nasil-yayilir-konu-anlatimi.html> Ses nasıl yayılır. 16 Nisan 2010.
2. Üstündağ, M., Ses nasıl yayılır.  
<http://www.fenokulu.net/portal/Sayfa.php?Git=KonuKategorileri&Sayfa=KonuBaslikListesi&baslikid=149&KonuID=868>. 16 Nisan 2010.
3. Şapçı, İ., Ses dalgalarının fiziksel özellikleri. <http://blog.sgproductions.com/?p=61>. 2 Nisan 2010
4. <http://www.karmabilgi.net/sesin-genligi-ve-frekansi/> Sesin genliği ve frekansı. 21 Nisan 2010.
5. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental\\_frequency](http://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_frequency) Fundamental frequency. 22 Haziran 2011.
6. <http://www.physicsclassroom.com/class/sound/u114d.cfm> Sound Waves and Music. 22 Haziran 2011
7. <http://www.muzikdersanesi.com/muzik-ders-nedir.html> Müzik nedir. 10 Mayıs 2011.
8. Özdemir, A.E., Sesin Temel Özellikleri ve Nota Tanıma, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2004.
9. Kammler, D.A., A First Course in Fourier Analysis, Cambridge University Press, 2007.
10. <http://www.seventhstring.com/resources/notefrequencies.html> Note frequencies. 5 Nisan 2010.
11. <http://www.muziktarihcesi.com/muzigin-baslangici.html> Müzik tarihçesi. 12 Mayıs 2010.
12. Aksakoğlu, P., Müzik olmazsa insan olmaz mı?  
<http://www.derki.com/muzik/item/1732-insan-olmazsa-muzik-olmaz-mi> 17 Ağustos 2010.
13. Hainsworth S., Analysis of musical audio for polyphonic transcription. 1st year report, Department of Engineering, University of Cambridge, 2001.
14. Bulut, A., Kulak ve yapısı. <http://alierbulut.blogcu.com/kulak-ve-yapisi/2869951>. 15 Aralık 2010.
15. Altınölçek, H., Tedavide müzik ve antik dönem'de uygulanması.  
<http://www.toplumdusmani.net/modules/wfsection/article.php?articleid=1206> 11 Şubat 2011.

16. Deutsch D., Octave generalization and tune recognition. *Perception and Psychophysics*, 11, 6 (1978) 341–354.
17. Oppenheim A.V., Willsky A.S. and Young I.T., *Signals and Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1983.
18. Dias, B.F.S, Automatic Transcription of Musical Whistling, Master in Electrical and Computer Engineering, Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
19. Brandwood D., *Fourier transforms in radar and signal processing*, London, 2003.
20. Köktürk, G., Kısa Süreli Fourier Dönüşümü İçin Başarım Karşılaştırma, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 3 (2006).
21. Allen, J.B. ve Rabiner, L. R., A Unified Approach to Short-Time Fourier Analysis and Synthesis, Proceedings of the IEEE, 65, 11 (1977).
22. Allen, J.B. ve Rabiner L. R., Short-Time Fourier Analysis Techniques for FIR System Identification and Power Spectrum Estimation, IEEE Transactions On Acoustics, Speech, and Signal Processing, 27, 2 (1979).
23. [http://en.wikipedia.org/wiki/Window\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function) Wikipedia, Window function. 26 Nisan 2011.
24. <http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrogram> Wikipedia, Spectrogram. 27 Nisan 2011.
25. Schlitz, J.M., Artwhistling <http://www.synthonia.org/artwhistling/index.html>. 26 Şubat 2011.
26. Klapuri, A., *Signal Processing Methods for the Automatic Transcription of Music*, thesis for the degree of doctor, Tampere University of Technology, Tampere, 2004.
27. [http://en.wikipedia.org/wiki/ADSR\\_envelope#ADSR\\_envelope](http://en.wikipedia.org/wiki/ADSR_envelope#ADSR_envelope) Wikipedia, Synthesizer. 5 Haziran 2011.
28. Otsu, N., A threshold selection method from gray-level histogram, IEEE Trans. Systems Man Cybern., 9, 1 (1979) 62–66.
29. Klapuri A., Automatic music transcription as we know today. Journal of New Music Research, 33, 3 (2004) 269–282.
30. L. Cohen. The generalization of the wiener-khinchin theorem. IEEE T-ASSP, 3 (1998) 1577–1580.
31. Kobayashi H. and Shimamura T., A weighted autocorrelation method for pitch extraction of noisy speech, Proceedings of the Acoustical Society of Japan, (1995) 343–344.



32. Noll M., Pitch Determination of Human Speech by the Harmonic Product Spectrum, the Harmonic Sum Spectrum, and a Maximum Likelihood Estimate. In Proceedings of the Symposium on Computer Processing Communications, (1969) 779–797.

## ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Aydın'ın Nazilli ilçesinde doğdu. İlk ve ortaokulu Kuyucak'ın Pamukören kasabasında okudu ve 2000 yılında Pamukören İlköğretim okulunu bitirdi. Adnan Menderes Anadolu Lisesini kazandı ancak yakın olmasından dolayı Nazilli Anadolu Lisesine kayıt yaptırdı. 2004'de liseyi bitirdi. Aynı sene kazandığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri bölümünü 2008 yılında bitirdi. 2008-2009 eğitim-öğretim yılının bahar döneminde İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri bölümünde yüksek lisansa başlamış olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.