

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKÇE'DEKİ ÜNLÜ HARFLERİN FORMANT FREKANS DEĞERLERİNE DAYALI
ADLİ AKSAN ANALİZİ GERÇEKLEŞTİRİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus KORKMAZ

(161129101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 7 Ağustos 2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 7 Eylül 2018

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Ü. Aytuğ BOYACI (Fırat Üni.)

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Galip AYDIN (Fırat Üni.)

Dr. Öğr. Ü. Muhammed TALO (Munzur Üni.)

AĞUSTOS-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans programı için hazırlanmıştır.

Akademik çalışmalarım boyunca benden hiçbir yardımını ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Dr. Öğr. Ü. Aytuğ BOYACI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca desteklerini benden esirgemeyen aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Yunus KORKMAZ

ELAZIĞ – 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Tezin Yapısı.....	2
2. KONUŞMA/İŞİTME FİZYOLOJİSİ VE SES BİLİMİ.....	4
2.1. Ses ve Konuşma.....	4
2.2. Ses ve Konuşma Fizyolojisi.....	4
2.2.1 Ses Üretim Organları.....	5
2.2.2 Ses Oluşumu.....	6
2.3. Ses Bilimi (Fonetik).....	7
2.3.1. Türkiye Türkçesinde Sesler.....	8
2.3.1.1. Parçalı Fonemler	8
2.3.1.2. Parçalarüstü Fonemler (Bürünler).....	12
2.4. İşitme.....	13
2.4.1 Kulak Yapısı ve Görevi.....	13
2.4.1.1. Dış Kulak.....	14
2.4.1.2. Orta Kulak	14
2.4.1.3. İç Kulak	15
2.4.1.4. Mekanik'ten Sinirsel Yola Geçiş	15
3. SES İNCELEMELERİNDE KULLANILAN TEKNİKLER.....	16
3.1. Ön İşlemler.....	16
3.1.1. Çerçeveleme	16
3.1.2. Pencereleme	16
3.1.3. Sıfır Geçiş Oranı (Zero Crossing Rate).....	16
3.1.4. Enerji	17
3.1.5. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform).....	17

3.1.6. Öznitelik Çıkarma Yöntemleri	18
3.2. Konuşma/Konuşmacı Tanıma.....	18
3.2.1. Dinamik Zaman Eşleştirme (Dynamic Time Warping)	19
3.2.2. Örüntü Eşleştirme (Pattern/Template Matching)	19
3.2.3. Vektör Niceleme Kaynak Modeli (Vector Quantization Source Model).....	19
3.2.4. En Yakın Komşular (Nearest Neighbours)	20
3.2.5. Saklı Markov Modeli (Hidden Markov Model).....	20
3.2.6. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)	21
3.3. Ses İyileştirme.....	23
3.3.1. Spektral Çıkarma Algoritmaları	23
3.3.2. Wiener Filtreleme.....	24
3.3.3. İstatistiksel Model Tabanlı Yöntemler	24
3.3.4. Altuzay Algoritmaları	25
3.3.5. Gürültü Tahmin Algoritmaları	26
3.4. Konuşma Sentezleme.....	26
3.4.1. Formant Sentezleme.....	26
3.4.2. İfadesel Sentezleme.....	28
3.4.3. Bitiştirerek Sentezleme	28
3.4.4. Sinüsodiyal Sentezleme.....	29
3.4.5. Saklı Markov Modeli Tabanlı Sentezleme.....	30
3.4.6. Birim Seçme Sentezleme	31
4. SES İNCELEMELERİNİN ADLİ AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	33
4.1. Adli Ses İnceleme Çalışmaları.....	33
4.1.1. Konuşma Çözümleme (Transkripsiyon)	33
4.1.2. Kayıt Bütünlüğünün Doğrulanması	33
4.1.3. Otomatik Ses İzi Eşleştirme	34
4.1.4. Spektrum Analizi.....	34
4.1.5. Otomatik Formant Frekansları Tespiti	34
4.1.6. Kayıt İyileştirme (Filtreleme).....	35
4.1.7. Konuşmacı Profili Belirleme.....	35
4.1.8. Birden Çok Konuşmacıyı Ayırt Etme	35
4.1.9. Maskelenmiş Ses Analizi	36
4.1.10. Gerçek Zamanlı Ses Analizi.....	36
4.1.11. GSM Gürültüsü Yok Etme.....	36

4.1.12. Dil/Aksan Tanıma	37
4.2. Adli Ses İncelemelerinde Zorluklar	37
4.3. Adli Ses İncelemelerinde Kullanılan Yazılımlar ve Yazılımların Karşılaştırılması. 37	
4.3.1. Adli Ses İnceleme Yazılımları	38
4.3.1.1. DC/Live Forensics.....	38
4.3.1.2. SIS II	39
4.3.1.3. SESTEK – Ses İnceleme Sistemi	39
4.3.1.4. Acu-Expert Audio Forensic	40
4.3.1.5. CEDAR Audio Forensic.....	40
4.3.1.6. Audacity	41
4.3.1.7. PhonEdit.....	41
4.3.1.8. SFS/WASP (Windows Tool for Speech Analysis)	42
4.3.1.9. Agnitio SIFT	43
4.3.1.10. SIL Speech Analyzer.....	43
4.3.1.11. Praat.....	44
4.3.1.12. University College London (UCL) Enhance.....	44
4.3.1.13. CoolEdit	45
4.3.1.14. Acoustica 7	46
4.3.1.15. WaveSurfer.....	46
4.3.1.16. Adobe Audition	47
4.3.1.17. IKAR Lab.....	48
4.3.1.18. LingWaves	48
4.3.1.19. WinPitch 10.....	49
4.3.1.20. TrueRTA	49
4.3.1.21. GoldWave.....	50
4.3.1.22. WavePad.....	51
4.3.1.23. Raven.....	51
4.3.1.24. Sound Forge Pro 11	52
4.3.1.25. SoundRuler.....	53
4.3.1.26. SpectraPLUS	54
4.3.1.27. QuickEnhance Plug-in.....	54
4.3.1.28. Foenics	55
5. AKSAN ANALİZİ İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	58
6. TÜRKÇE’DEKİ ÜNLÜLERİN FORMANT FREKANS DEĞERLERİNE DAYALI ADLİ AKSAN ANALİZİNİN GERÇEKLEŞTİRİMİ	63

6.1. Giriş.....	63
6.2. Hece (seslem) Seçimi.....	63
6.3. Konuşmacı Profili ve Ses Kayıtlarının Elde Edilmesi.....	64
6.2. Tasarlanan Aksan Analiz Mimarisinin Genel Yapısı	65
6.3. Mimarideki Modüllerin Yapısı	66
6.3.1. Modül 1: Ses Sinyallerinin Bölütlenmesi.....	66
6.3.2. Modül 2: Ses Sinyalinde Ünlü Harf İçeren Bölgenin Elle/Görsel Çıkarımı	67
6.3.3. Modül 3: Ünlü Harflerin Formant Frekans Değerlerinin Elde Edilmesi	68
6.3.4. Modül 4: Formant Frekans Değerlerinin Analizi	69
7. UYGULAMALAR.....	71
7.1. Formant Frekans Değerlerinin İstatistiksel Analizi Uygulaması.....	71
7.1.1. 2 Bölge (Batı, Doğu) Bazında Adli Aksan Analizi.....	71
7.1.1.1. Erkek Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları	73
7.1.1.2. Kız Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları	74
7.1.2. 3 Bölge (Batı, Doğu, Kuzey) Bazında Adli Aksan Analizi	75
7.1.2.1. Erkek Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları	77
7.1.2.2. Kız Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları	78
7.1.3. 7 Bölge (Coğrafik Bölgeler) Bazında Adli Aksan Analizi	80
7.1.3.1. Erkek Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları	82
7.1.3.2. Kız Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları	85
7.2. Formant Frekans Değerlerinin Sınıflandırılması Uygulaması	88
7.2.1. 2 Bölge (Batı, Doğu) Bazında Sınıflandırma.....	89
7.1.2.1. Erkek Konuşmacılar ile Sınıflandırma.....	89
7.1.2.2. Kız Konuşmacılar ile Sınıflandırma	90
7.2.2. 3 Bölge (Batı, Doğu, Kuzey) Bazında Sınıflandırma	90
7.1.2.1. Erkek Konuşmacılar ile Sınıflandırma.....	90
7.1.2.2. Kız Konuşmacılar ile Sınıflandırma	91
7.2.3. 7 Bölge (Coğrafik Bölgeler) Bazında Sınıflandırma	91
7.1.2.1. Erkek Konuşmacılar ile Sınıflandırma.....	92
7.1.2.2. Kız Konuşmacılar ile Sınıflandırma	92
7.2.4. Bölgeler Arası Karşılaştırmalı Sınıflandırma	93
7.2.4.1. Akdeniz - Karadeniz Bölgeleri Arasında Sınıflandırma	93
7.2.4.2. Akdeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Arasında Sınıflandırma.....	94
7.2.4.3. Karadeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Arasında Sınıflandırma	94

7.2.4.4. Akdeniz - Karadeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Arasında Sınıflandırma	95
8. SONUÇ	96
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ	106



ÖZET

Geçmişte fiziksel araçlar ve yollarla işlenen suçlar dijitalleşmenin artmasıyla giderek yerini elektronik araçlarla işlenen suçlara bırakmaktadır. Elektronik araçlarla işlenen bu suçlar arkasında, bilgisayarlar, taşınabilir cihazlar, ağ cihazları ve depolama aygıtları gibi elektronik deliller bırakmaktadır. Ses delillerinin incelenmesi ya da ses adli bilişimi (audio forensic), elektronik delilleri ve içlerinde bulunan verileri kullanarak suçların aydınlatılmasına katkıda bulunan Adli Bilişim disiplininin bir alt dalı olarak bilinmektedir. Ses adli bilişimi için halihazırda kullanılabilecek birçok ses analiz yazılımı mevcuttur. Sayısal ses işleme teknikleri tabanlı yöntemleri kullanan bu yazılımların, ses kayıtlarında kurgu/montaj tespiti (kayıt bütünlüğünün doğrulanması), spektrum analizi, bozuk kayıtların anlaşılabilirliğinin artırılması (kayıt iyileştirme), konuşmacı profili (yaş, cinsiyet vs.) belirleme, ortam gürültüleriyle maskelenmiş ses analizi, adli takiplerde gerçek zamanlı ses analizi ve konuşmacının etnik yapısı ile ilgili olan dil ve aksan öğelerini belirleme gibi ses adli bilişimi işlemlerini otomatik olarak gerçekleştirebilmesi beklenmektedir. Bu tez çalışmasında, konuşma üretimi ve ses bilimi, ses incelemede kullanılan temel konuşma işleme teknikleri, adli açıdan ses incelemeleri ve bu incelemelerde kullanılan yazılımların teknik ve performans kriterleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılması yapılmış ve bu yazılımların eksik yönlerinden biri olan aksan tanıma konusu üzerinde literatür çalışması gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışma sonucunda Türkçe dili için aksan analizinin şimdiye kadar gerçekleştirilmediği görülmüştür. Bu doğrultuda ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı analizlerin bir dilde bulunan aksanları belirlemede önemli bir faktör olduğu literatüre dayanarak görülmüştür. Dolayısıyla bu tez çalışması ile Türkçe'deki ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizi gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz sonuçları yoluyla bölgesel formant frekans değerleri farklılıklarının ortaya konmasının yanı sıra sınıflandırma analizleri yoluyla da %90'a varan sınıflandırma başarımları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, gelecekte özellikle daha fazla sayıda konuşmacı ile eğitilmiş sınıflandırma algoritmaları kullanılarak, Türkçe dili için ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı bir eş zamanlı otomatik aksan analiz sisteminin tasarlanmasının önünü açacaktır.

Anahtar Kelimeler: Adli Bilişim, Ses İnceleme, Konuşma İşleme, Aksan Tespiti

SUMMARY

Accent Analysis Based on Formant Frequencies of Vowels in Turkish Language

Day by day, the crimes committed by physical means in the past give way to the crimes committed by electronic means with the increase of digitization. These crimes committed by electronic devices leave electronic evidences such as computers, mobil devices, network tools, storage devices behind. Examining audio evidences, mostly called as “audio forensic”, is a sub-branch of digital forensic which contributes clarification of crimes by using electronic devices and data included in these devices. There are already plenty of audio analysis tools that can be used for audio forensic. These tools, which basically use DSP-based methods, are expected to automatically implement audio forensic tasks such as verification of audio integrity (editing and montage detection), spectrum analysis, speech enhancement (increasing the intelligibility of distorted records), speaker profile (age, sex, etc.) identification, analysis of audio masked by ambient noise, real-time audio analysis in judicial tracking and identification of ethnic items like language and accent. In this work, speech production and phonetics, fundamental digital speech processing methods used for audio analysis, audio examinations in terms of digital forensics and technical and performance comparisons of audio analysis tools are covered in detail and a literature study has been done on accent identification which is one of the missing parts in these tools. After a literature search, it has been seen that no study has been performed for Turkish language on accent analysis until now. Accordingly, it is deduced that analysis based on vowel's formant frequencies is an important factor to classify accents in a language. Thus, in this thesis, we have performed a forensic accent analysis based on formant frequencies of vowels in Turkish language. In addition to detecting regional differences in formant frequencies via statistical analysis results, classification performance rates of up to 90% have also been obtained via classification analysis results. These findings, especially with trained classification algorithms using more number of speakers, will lead to the design of a simultaneous automatic accent analysis system based on the formant frequency values of vowels for the Turkish language in the future.

Key Words: Digital Forensics, Audio Analysis, Digital Speech Processing, Accent Identification

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Ses üretim mekanizması.....	5
Şekil 2.2. Türkçe’de ünlü dörtgeni	10
Şekil 2.3. Kulağın yapısı	14
Şekil 3.1. Ayırık zamanlı bir sinyaldeki sıfır geçişleri.....	17
Şekil 3.2. 5 durumlu soldan sağa saklı markov modeli örneği.....	21
Şekil 3.3. Yapay sinir ağı genel modeli.....	22
Şekil 3.4. SÇA’nın genel yapısı	23
Şekil 3.5. Basamak halinde formant sentezlemenin genel yapısı.....	27
Şekil 3.6. Paralel formant sentezlemenin genel yapısı.....	27
Şekil 3.7. Sinüsodiyal konuşma sentezleme/analiz sistemi.....	30
Şekil 3.8. SMM tabanlı konuşma sentezleme sistemi örneği.....	31
Şekil 3.9. Birim seçme sentezleme sistemi	32
Şekil 4.1. DC/Live Forensic 10 programı adli ses inceleme ve filtreler menüsü.....	38
Şekil 4.2. SIS II yazılımının arayüzü	39
Şekil 4.3. Acu-Expert Audio Forensic yazılımı konuşmacı karşılaştırma modülü.....	40
Şekil 4.4. Audacity programı arayüzü.....	41
Şekil 4.5. PhonEdit programı arayüzü.....	42
Şekil 4.6. SFS/WASP programı spektogram ve temel frekans görüntüleri	42
Şekil 4.7. Speech Analyzer dalga ve spektogram görüntüleri.....	43
Şekil 4.8. Praat yazılımı otomatik formant frekans takibi ekranı.....	44
Şekil 4.9. UCL Enhance yazılımı spektogram analizi.....	45
Şekil 4.10. Syntrillium CoolEdit programı frekans ve faz analizi	45
Şekil 4.11. Acoustica 7 kayıt düzenleme genel ekranı.....	46
Şekil 4.12. Wavesurfer programı ses kaydına ait spektogram görüntüsü	47
Şekil 4.13. Adobe Audition programı arayüzü.....	47
Şekil 4.14. Adobe Audition programı arayüzü.....	48
Şekil 4.15. WinPitch yazılımı spektogram ve perde analizi ekranı.....	49
Şekil 4.16. TrueRTA yazılımı osiloskop ekranı.....	50
Şekil 4.17. GoldWave yazılımı ses inceleme ekranı	50
Şekil 4.18. WavePad yazılımı ses inceleme ekranı	51
Şekil 4.19. Raven yazılımı dalga formu görüntüleme.....	52

Şekil 4.20. Sound Forge Pro 11 yazılımı arayüzü	53
Şekil 4.21. SoundRuler yazılımı arayüzü	53
Şekil 4.22. SpectraPLUS dalga formu gösterim ekranı	54
Şekil 4.23. Acoustica yazılımı üzerine kurulan QuickEnhance Plug-in görüntüsü	55
Şekil 4.24. Foenics içerisinde bulunan SonaView aracıyla spektogram analizi	55
Şekil 6.1. Aksan analizi mimarisinin genel yapısı	66
Şekil 6.2. Ses bölütleme işlemi akış diyagramı	67
Şekil 6.3. “Zıt” içerisindeki “ı” ünlüsünün dalgaformu ve spektogram ile çıkarımı	68
Şekil 6.4. Ünlü harf içeren bölgenin formant frekanslarının hesaplanması diyagramı	69
Şekil 7.1 2 bölge bazında adli aksan analizine göre Türkiye aksan haritası	72
Şekil 7.2. 3 bölge bazında adli aksan analizine göre Türkiye aksan haritası	76
Şekil 7.3. 7 bölge bazında adli aksan analizine göre Türkiye aksan haritası	81

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Türkçe'deki ünlü fonemlerinin sınıflandırılması.....	9
Tablo 2.2. Çene açıklığı bazında yalın çiftler	10
Tablo 2.3. Dudakların biçimi bazında yalın çiftler	10
Tablo 2.4. Dil konumu bazında yalın çiftler	10
Tablo 2.5. Ünsüz fonemlerin sınıflandırılması	11
Tablo 4.1. Ses incelemelerinde kullanılan yazılımların adli açıdan karşılaştırılması.....	56
Tablo 6.1. Okuma listesinde bulunan seslemler	64
Tablo 7.1 Konuşmacıların cinsiyete ve 2 bölge bazında bölgelere göre dağılımı	72
Tablo 7.2 Erkek konuşmacıların 2 bölge bazında Batı bölgesi sonuçları.....	73
Tablo 7.3 Erkek konuşmacıların 2 bölge bazında Doğu bölgesi sonuçları.....	73
Tablo 7.4 Kız konuşmacıların 2 bölge bazında Batı bölgesi sonuçları.....	74
Tablo 7.5 Kız konuşmacıların 2 bölge bazında Doğu bölgesi sonuçları	74
Tablo 7.6 Konuşmacıların cinsiyete ve 3 bölge bazında bölgelere göre dağılımı	76
Tablo 7.7 Erkek konuşmacıların 3 bölge bazında Batı bölgesi sonuçları.....	77
Tablo 7.8 Erkek konuşmacıların 3 bölge bazında Doğu bölgesi sonuçları.....	77
Tablo 7.9 Erkek konuşmacıların 3 bölge bazında Kuzey bölgesi sonuçları	78
Tablo 7.10 Kız konuşmacıların 3 bölge bazında Batı bölgesi sonuçları.....	79
Tablo 7.11 Kız konuşmacıların 3 bölge bazında Doğu bölgesi sonuçları	79
Tablo 7.12 Kız konuşmacıların 3 bölge bazında Kuzey bölgesi sonuçları.....	79
Tablo 7.13 Konuşmacıların cinsiyete ve 7 bölge bazında bölgelere göre dağılımı	82
Tablo 7.14 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Marmara bölgesi sonuçları.....	82
Tablo 7.15 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Ege bölgesi sonuçları	83
Tablo 7.16 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında İç Anadolu bölgesi sonuçları.....	83
Tablo 7.17 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Karadeniz bölgesi sonuçları	83
Tablo 7.18 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Akdeniz bölgesi sonuçları.....	84
Tablo 7.19 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Doğu Anadolu bölgesi sonuçları.....	84
Tablo 7.20 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında G.Anadolu bölgesi sonuçları.....	84
Tablo 7.21 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Marmara bölgesi analiz sonuçları.....	85
Tablo 7.22 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Ege bölgesi analiz sonuçları	86
Tablo 7.23 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında İç Anadolu bölgesi analiz sonuçları.....	86
Tablo 7.24 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Karadeniz bölgesi analiz sonuçları	86

Tablo 7.25 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Akdeniz bölgesi analiz sonuçları	87
Tablo 7.26 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Doğu Anadolu bölgesi sonuçları.....	87
Tablo 7.27 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında G.Anadolu bölgesi sonuçları.....	87
Tablo 7.28 Erkek konuşmacı aksan analizi başarı oranları (2 bölge)	89
Tablo 7.29 Kız konuşmacı aksan analizi başarı oranları (2 bölge).....	90
Tablo 7.30. Erkek konuşmacı aksan analizi başarı oranları (3 bölge)	90
Tablo 7.31. Kız konuşmacı aksan analizi başarı oranları (3 bölge).....	91
Tablo 7.32. Erkek konuşmacı aksan analizi başarı oranları (7 bölge)	92
Tablo 7.33. Kız konuşmacı aksan analizi başarı oranları (7 bölge).....	92
Tablo 7.34 Erkek karşılaştırmalı başarı oranları (Akdeniz - Karadeniz).....	93
Tablo 7.35 Erkek karşılaştırmalı başarı oranları (Akdeniz - Doğu Anadolu).....	94
Tablo 7.36 Erkek karşılaştırmalı başarı oranları (Karadeniz - Doğu Anadolu).....	94
Tablo 7.37 Erkek karşılaştırmalı başarı oranları (Akdeniz- Karadeniz - Doğu Anadolu)..	95

KISALTMALAR LİSTESİ

RAM	: Random Access Memory
DSP	: Digital Signal Processing
ZCR	: Zero Crossing Rate
FFT	: Fast Fourier Transform
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
MFCC	: Mel-Frequency Cepstral Coefficient
LPC	: Linear Predictive Coding
PLP	: Perceptual Linear Predictive
DCT	: Discrete Cosine Transform
DTW	: Dynamic Time Warping
VQ	: Vector Quantization
EYK	: En Yakın Komşular
HMM	: Hidden Markov Model
SMM	: Saklı Markov Modeli
YSA	: Yapay Sinir Ağları
ANN	: Artificial Neural Network
SÇA	: Spektral Çıkarma Algoritması
DFT	: Discrete Fourier Transform
WF	: Wiener Filter
MAP	: Maximum a Posteriori
SNR	: Signal to Noise Ratio
GSM	: Global System for Mobile Communication
NIST	: National Institute of Standards and Technology
LR	: Likelihood Ratio
JRE	: Java Runtime Environment
PCM	: Pulse Code Modulation
SVM	: Support Vector Machine
KNN	: K Nearest Neighbors

1. GİRİŞ

Dijital çağ olarak adlandırılan günümüzde yaşamı kolaylaştıran teknolojilerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Hızla gelişen teknoloji sayesinde her yeni gün hayatımıza farklı cihazlar entegre olmaktadır. Geçmişte fiziksel temas yoluyla işlenen suçlar günümüzde teknolojinin bu denli hızlı gelişimi sayesinde üretilen cihazlar yoluyla dijital olarak işlenmeye başlanmıştır. Dijital yollarla işlenen suçlarda kullanılan cihazlar ve bu cihazlar içerisinde bulunan verilere “dijital delil” adı verilmektedir. Adli bilişim (digital forensics), teknoloji ile hayatımıza giren dijital cihazlarla işlenen suçların dijital deliller kullanılarak aydınlatılması disiplini.

Adli bilişim, incelenen cihazın türüne göre kendi içerisinde bilgisayar, mobil cihaz, ağ (network), veritabanı, RAM (Random Access Memory), görüntü ve ses adli bilişimi gibi farklı alanlara ayrılmaktadır [71]. Bu alanlardan ses adli bilişimi (audio forensics) adli vakalarda ses delillerinin incelenip anlamlı sonuçlar elde edilmesi açısından önem arz etmektedir.

Ses adli bilişiminde;

- Konuşma çözümüleme (transkripsiyon)
- Ses kayıtlarında kurgu/montaj tespiti için kayıt bütünlüğünün doğrulanması
- Ses kaydındaki konuşmacının tespiti için otomatik ses izi eşleştirme
- Spektrum analizi
- Ünsüz harfler bazında formant frekansları tespiti
- Bozuk kayıtların anlaşılabilirliğinin artırılması (kayıt iyileştirme)
- Konuşmacı profili (yaş, cinsiyet vs.) belirleme
- Birden çok konuşmacının bulunduğu kayıtlarda konuşmacıları ayırt etme
- Ortam gürültüleriyle maskelenmiş ses analizi
- Adli takiplerde gerçek zamanlı ses analizi
- Kayıt cihazına yakın yerde bulunan radyo ve televizyon gibi cihazlardan kaynaklanan GSM gürültülerini yok etme
- Konuşmacının etnik yapısı ile ilgili olan dil ve aksan öğelerini belirleme

gibi ses inceleme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Günümüzde, ses kayıtlarının adli vakalarda delil olarak kullanılmasının yanısıra bilişim alanında çalışan firmaların sayısındaki artış, ses adli bilişimi konusunda analizler yapabilen

açık kaynak kodlu veya lisanslı bir çok sistemin (yazılım/donanım) geliştirilmesine olanak sağlamıştır. DC/Live Forensics, SIS II, Sestek ses inceleme sistemi, Acu-Expert Audio Forensics, Cedar Audio Forensics, Audacity ve Praat ses inceleme alanında geliştirilen yazılımlardan sadece birkaçını oluşturmaktadır.

Ses incelemede geliştirilen bu yazılımlar temelde dijital sinyal işleme (digital signal processing, DSP) tekniklerinden faydalananarak konuşma işleme gerçekleştirmektedir. Konuşma işleme genel olarak öznitelik çıkarma, konuşma tanıma, konuşmacı tanıma, ses iyileştirme ve ses sentezleme gibi alt başlıklara ayrılmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada konuşma üretimi ve ses bilimi, ses incelemede kullanılan temel konuşma işleme teknikleri, adli açıdan ses incelemeleri ve bu incelemelerde kullanılan yazılımların teknik ve performans kriterleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, bu yazılımlardan hiçbirinin adli ses incelemelerinde önemli bir role sahip olan dil/aksan tanımayı içermediği görülmüştür. Adli ses incelemelerinde bir ses kaydındaki konuşmacının aksanının tanınması konuşmacının etnik yapısı ile ilgili önemli ipuçlarını ortaya koymaktadır. Mevcut sistemlerde konuşmacı aksanının belirlenmesinde başarı, dinleme işini yapan görevlinin işitsel (kulak yoluyla) kabiliyetine ve aksan bilgisine dayanmaktadır. Bu eksiklikten yola çıkarak özellikle adli takip ve istihbarat alanında ihtiyaç haline gelen aksan tanıma ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Bu tez çalışması ile literatür çalışmalarında da sıklıkla kullanılan formant frekansı tabanlı analizler ile Türkçe dili için ünlü harfler kullanılarak aksan analizi gerçekleştirilmiştir. Genel olarak bu tezin amacı ses verisinden kişinin adli aksan analizini yapıp Türkiye’de hangi bölgeden (3 bölge ve 7 bölge bazında) olduğunu tespit etmektir.

1.2. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması 8 bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde konuşma/işitme fizyolojisi ve ses biliminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ses incelemede kullanılan ve ses inceleme yazılımlarının temelinde yer alan dijital sinyal işleme tabanlı teknikler incelenmiştir. Dördüncü bölümde adli açıdan ses inceleme konuları ortaya konulmuş ve

günümüzde kullanılan ses inceleme yazılımları teknik ve performans kriterleri açısından karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde incelenen yazılımların eksik yönü ve dolayısıyla bu tez çalışmasının motivasyonu olan aksan analizi ile ilgili daha önce yapılan çalışmalara (literatür özeti) yer verilmiştir. Tez'in altıncı kısmında Türkçe'deki ünlülerin formant frekans değerlerine dayalı aksan analizi mimarisi modüller şeklinde açıklanmıştır. Yedinci kısımda gerçekleştirilen sistemle ilgili uygulama ve test sonuçları verilmiş, sekizinci yani son bölümde sonuçlar yorumlanarak çalışma sonlandırılmaktadır.



2. KONUŞMA/İŞİTME FİZYOLOJİSİ VE SES BİLİMİ

2.1. Ses ve Konuşma

Ses, belirli frekans değeriyle titreyen bir cisim tarafından oluşturulan ve işitme hissi uyandıran basınç dalgası olarak tanımlanmaktadır. Ses dalgalarının yayılabilmesi için bulunduğu ortamın iletici bir özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bulunduğu ortamın (katı, sıvı, gaz) özelliklerine göre farklı yayılma hızına sahiptirler. Ses, yayılma hızı, frekans, basınç, dalga boyu, desibel, genlik, şiddet, renk ve tını gibi fiziksel özelliklere sahip olabilmektedir [1].

İnsanlarda ses oluşturma sisteminin 3 ana bölümden oluşur [2]:

- Akciğer
- Gırtlak (ses telleri, ses kıvrımları)
- Ses Bölgesi (yutak,ağız)

Bu sistemde, akciğerler hava kaynağı, ses telleri titreşim elemanı ve ağız rezonatör bölge olarak görev yapmaktadır. Akciğerlerden gelen hava,ses tellerinden geçerek bu tellerinin titreşimini sağlayarak sesi oluşturmaktadır.

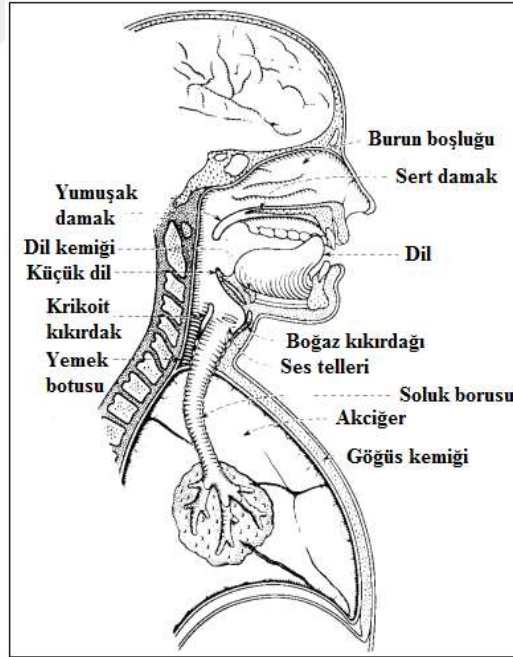
2.2. Ses ve Konuşma Fizyolojisi

Ses dalgası, insanlarda ses üretim mekanizması tarafından üretilen akustik bir hava basıncı dalgası olarak ortaya çıkmaktadır. Akciğerler, trake (soluk borusu), ses telleri, gırtlak, boğaz, ağız ve burun bu mekanizmanın başlıca organlarıdır. Akciğerler ve akciğerde bulunan kaslar ses üretim mekanizmasında hava kaynağı olarak görev yapmaktadırlar. Akciğerde bulunan kaslar, havayı bronşlar ve trake boyunca akciğer dışına çıkarırlar. Konuşma sesleri genel olarak sesli kısım (voiced) ve sessiz kısım olmak (unvoiced) üzere ikiye ayrılmaktadır. Sesli kısım akciğerlerden gelen havanın gerilmiş ses tellerini titrettiği zaman oluşmaktadır. Sessiz kısım ise üretilen havanın ağızda ani ve düzensiz patlaması sonucu oluşur. [3]

2.2.1 Ses Üretim Organları

İnsan sesinde ayırt edici özellikler fiziksel ve öğrenilmiş olmak üzere iki genel başlığa ayrılmaktadır. Ses telleri ve yukarısında kalan organlar olarak tanımlanan vokal yolu, yapı itibari ile insan sesini farklı kılan fiziksel özelliktir. Şekil 2.1’de görselleştirildiği gibi ses üretim organları şu şekilde sıralanabilir [4]:

- Alt yutak (laryngeal pharynx) (gırtlak kapağının altında)
- Orta yutak (oral pharynx) (dilin arkasında bulunan yumuşak damak ile gırtlak kapağı arası)
- Ağız boşluğu (oral cavity) (yumuşak damak ile başlayıp dil ve dudak ile sonlanan kısım)
- Üst yutak (nasal pharynx) (yumuşak damağın üstü, burun boşluğunun arka ucu)
- Burun boşluğu (nasal cavity) (sert damağın üstü ve yutaktan başlayıp burun deliklerinde sonlanan kısım)



Şekil 2.1. Ses üretim mekanizması

Yetişkin bir erkeğin vokal yolu yaklaşık 17 cm uzunluğundadır. Gırtlak, ses telleri, aritenoid kıkırdak, gırtlak kıkırdak ve adem elması olarak bilinen gırtlak çıkıntısından

oluşmaktadır. Ses telleri, gırtlak çıkıntısı ile aritenoid kıkırdak arasında gerilmiş halde bulunmaktadır. Ses telleri arasında bulunan alan ya da küçük dilin bulunduğu yer nefes borusunun ağzıdır. Akustik dalga vokal yolundan geçtiğinde frekans değeri vokal yolunun yankı ve çınlama gibi özelliklerinden dolayı değişime uğramaktadır. Vokal yolunun bu şekilde oluşturduğu rezonans etkisine “*formant*” (biçimlendirici) denmektedir. Vokal yolu yapısı, böylece ses sinyalinin spektral şeklinden (formantların konumu ve spektral eğim yardımıyla) belirlenebilmektedir.

2.2.2 Ses Oluşumu

Günümüzde ses doğrulama sistemleri sadece vokal yolundan çıkartılan özelliklerle gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.1’de de görüldüğü gibi insan ses üretme sisteminde uyarım kaynağı bulunmaktadır. Akciğerlerin uyarım kaynağı olarak ürettiği hava akışının nefes borusu (trake) yardımıyla ses tellerine geçmesiyle fiziki olarak ilk ses dalgası üretim işlemi başlamaktadır. Uyarımın fonasyon, fısıldama, friksiyon (sürtünme), basınçlandırma, titreşim ve ya bunların kombinasyonu şeklinde çeşitleri bulunmaktadır [5].

Fonasyon, akciğerlerden gelen havanın ses telleriyle şekillenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Ses telleri kapalı durumdayken alttan gelen basınç ile patlayıp ayrılırlar. Basınçlı hava sonlandığında ses telleri gerilimin ve sahip oldukları esnekliğin sayesinde tekrar eski hallerini alırlar. Bu durum hava akışının salınım yapan ses tellerinden başlayarak oluşan vuruşlar olarak şekillenmesini sağlar. Ses tellerindeki bu salınımın frekansı temel frekans (fundamental frequency) diye adlandırılmaktadır ve bu frekans ses tellerinin uzunluğuna, gerilimine ve ağırlığına bağlı değişmektedir. Böylece sesin fiziksel olarak ayırt edici karakteristik özelliklerinden birinin de temel frekans olduğu söylenebilmektedir.

Fısıldama, akciğerden gelen havanın, kapalı sayılabilecek açıklıkta olan ses tellerinin arka kısmında yer alan aritenoid kıkırdakları arasındaki üçgen küçük açıklıktan geçmesiyle oluşmaktadır. Bu işlem, akciğerden gelen havanın yüksek gürültü oranı ile türbülanslı hava akışına dönüşmesine neden olur.

Friksiyon (sürtünme), vokal yolundaki büzülmeler ve daralmalar sonucu oluşan sestir. Vokal yolundaki bu daralmanın yeri, şekli ve açısı oluşacak geniş bant gürültünün şeklini belirler. Friksiyon ile sürtünmeli sessiz (fricatives) ve ıslıklı sessiz (sibilants) sesleri oluşur.

Basınçlandırma, tamamen kapalı olan vokal yolunun basınca maruz kalıp açılmasıyla oluşan sestir. Bu durumda kısa bir sessizliğin ardından (vokal yolunda basınç birikir) ani ve kısa bir ses patlaması olur. Basınç ani bir şekilde sonlandırılması ile patlayıcı (plosive) bir ses çıkarken basıncın kademeli kaldırılması ile yarı kapalı sessiz (affricate) ses oluşur.

Titreşim, ses telleri yerine vokal yolundaki kapalılığa (özellikle dil şekilleriyle) maruz kalan havanın meydana getirdiği ses olarak tanımlanmaktadır (örneğin: “r” sesini çıkarma).

Fonasyon ile üretilen sese sesli (voiced), fonasyon ve friksiyon karışımı ile üretilen sese karışım (mixed) ve diğer şekiller ile üretilen sese sessiz (unvoiced) denilmektedir. Fonasyon ve fısıldama’nın aksine friksiyon, basınçlandırma ve titreşim’de sesin üretim yeri vokal yoludur. Göğüs bölgesi, vokal sistemin rezonans özellikleri açısından önemli rol oynar. Burada bulunan nefes borusu genelde 12 cm uzunluğunda, 2 cm çapında birbirlerine bağ dokusuyla bağlanmış kıkırdak halkaların iç içe geçmesiyle oluşan bir organdır. Ses telleri titreştiği anda altında ve üstünde yankılanmalar (sublottal resonance) oluşturur. Nefes borusunun yapısına göre değişebilen bu yankılanmalar konuşmacıya bağlı fiziksel bir özelliktir [6].

2.3. Ses Bilimi (Fonetik)

Bir dilin yapısını oluşturan seslerin fizyolojik olarak nerede ve nasıl çıkarıldıklarını, zamanla değişimlerini, konuşma organlarının işleyişini inceleyen, sesleri söyleyiş (üretim), akustik (iletim) ve dinleyiş (algılama) özelliklerine göre sınıflandıran bilim dalına ses bilimi (fonetik) denmektedir [7]. Ses bilimi genel olarak fonem (phoneme) adı verilen seslerin oluşumları ve bu oluşum sırasında artikulatorlerde meydana gelen değişimleri konu alır. Dil bilimindeki en basit ses anlamına da gelen fonemler soyut ifadelerdir ve bir konuşma işaretiyle doğrudan ifade edilemezler. Bir fonem, bulunduğu dilin özelliklerinden dolayı birlikte kullanıldığı fonemlere ya da kişiye göre değişen vokal yolun şekline göre farklı seslendirene göre farklı sesler verebilir. Ses bilimi tam olarak bu farklılıkları incelemektedir. Örneğin /s/ foneminin çıkarılışı sırasında dudakların, dilin, akciğerlerden gelen basınçlı havanın oral kavitedeki hareketi, bu basınçlı havanın zamanla dil ve gırtlak sayesinde nasıl kesildiğini araştırmaktadır [11].

2.3.1. Türkiye Türkçesinde Sesler

Konuşma organlarının bir arada uyumla ve düzenli çalışmasıyla anlam ihtiva eden sözcükler ve tümceler oluşturmak için ağızdan çıkarılan birimlere ses (phon) denmektedir [12]. Bir dilin sesli ifadelerinde birim eleman olarak ta bilinen seslerden yazıya geçişte her sese bir alfabetik simge verilmektedir. Ses sayısı çok olan dolayısıyla yazıya geçişi karışık dillerde seslerin kümelenmesiyle anlam ayırıcı özelliği bulunan fonemler meydana gelmektedir. Ses diller üstü bir kavram iken fonem anlam ayırıcı özelliği nedeniyle dillere özgüdür. IPA (*International Phonetic Association*), tüm diller için geçerli olan ve her sesin bir karakter ile temsil edilmesini amaçlayan *Internation Phonetic Alphabet* fonetik alfabesini tanımlamıştır. Türkçe dilinde, her foneme tek bir alfabetik simge (harf) atandığından, ifadeden yazıya ve yazıdan ifadeye geçişin oldukça yalın olduğu söylenebilmektedir. Türkçe’de diğer dillerde olduğu gibi fonemler parçalı (segmental) ve parçalarüstü (bürün) (suprasegmental) olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür [13].

2.3.1.1. Parçalı Fonemler

Türkçe’de parçalı fonemler

- Ünlü
- Ünsüz
- Kayan ünlü

olmak üzere 3 başlıkta incelenebilir.

Ünlüler ve özellikleri

Ünlü sesler akciğerlerden gelen havanın hiçbir sürtünme veya engele maruz kalmadan dilin üstünden geçerken çıkardığı seslerdir. Bu sesler çıkartılırken konuşma organlarında herhangi bir kapanma ya da daralma olmadığı için gürültüsüz ses olarak bilinmektedirler. Türkçe’de 8 adet ünlü harf bulunmaktadır. Her ünlünün bir açık bir de kapalı formu vardır. Fakat Türkçe’de ünlülerin açık ya da kapalı olması içinde yer aldığı sözcüğün anlamını değiştirmedığından tüm ünlüler 8 adet fonem ile temsil edilmektedir. Bu fonemler:

/a/, /e/, /o/, /ö/, /u/, /ü/, /ı/, /i/

şeklindedir. Ünlü sesler, dilin ağızdaki konumuna, dudakların biçimine, genizin açık/kapalı durumuna göre sınıflandırılmaktadır.

1. Çene açıklığı (dar, geniş)
2. Dil konumu (ön, arka)
3. Dudakların biçimi (yuvarlak, düz)
4. Geniz (açık, kapalı)

Türkçe’de geniz dışındaki durumlar önem arz etmektedir. Tablo 2.1’de ünlü fonemler çene açıklığı, dil konumu ve dudakların biçimine göre tablo şeklinde gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Türkçe’deki ünlü fonemlerinin dilin konumu, dudak biçimi ve çene açıklığına göre sınıflandırılması

	Dilin Konumu				Dudak Biçimi		Çene Açıklığı	
	<i>Düz Ön</i>	<i>Yuvarlak Ön</i>	<i>Orta</i>	<i>Arka</i>	<i>Yuvarlak</i>	<i>Düz</i>	<i>Dar</i>	<i>Geniş</i>
<i>a</i>				+		+		+
<i>e</i>	+					+		+
<i>o</i>				+	+			+
<i>ö</i>		+			+			+
<i>ı</i>			+			+	+	
<i>i</i>	+					+	+	
<i>u</i>				+	+		+	
<i>ü</i>		+			+		+	

Bir ünlü fonemin diğer bir ünlü fonem ile yer değiştirmesi sonucu anlam değişikliğinin meydana gelip gelmediğinin kontrol edildiği sözcük çiftlerine yalın sözcük çiftleri denmektedir. Türkçe’deki ünlü fonemleri dilin konumu, dudak biçimi ve çene açıklığı esas alınarak tespit etmede yararlanılan yalın sözcük çiftleri Tablo 2.2, Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.2. Çene açıklığı bazında yalın çiftler

Geniş / Dar	I	i	u	ü
a	kar/kır	kar/kir	kar/kur	sar/sür
e	kes/kıs	tez/tiz	bez/buz	ses/süs
o	koş/kış	sos/sis	koş/kuş	son/sün
ö	söz/sız	söz/siz	son/sun	söz/süz

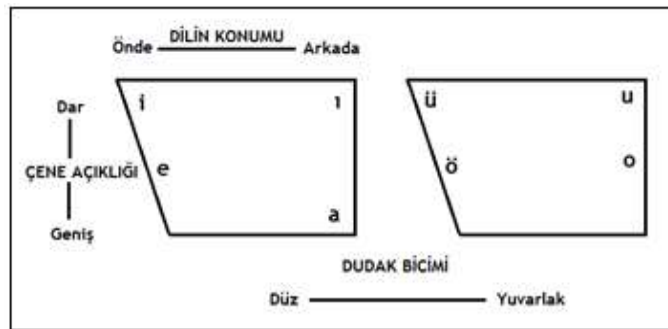
Tablo 2.3. Dudakların biçimi bazında yalın çiftler

Düz / Yuvarlak	o	ö	u	ü
a	kar/kor	kar/kör	kar/kur	sar/sür
e	kel/kol	gel/göl	ser/sur	kel/kül
I	kış/koş	sır/sör	tır/tur	tır/tür
i	kir/kor	kir/kör	kir/kur	kir/kür

Tablo 2.4. Dil konumu bazında yalın çiftler

Arka / Ön	e	ö	i	ü
a	kas/kes	kar/kör	kar/kir	sar/sür
o	kol/kel	kor/kör	kor/kir	kor/kür
u	sur/ser	sun/sön	kur/kir	kul/kül

Ünlü fonemlerini sınıflandırmada kullanılan bir başka yöntem ise Şekil 2.2’de gösterilen ünlü dörtgenidir (vowel diagrams). İki boyutlu olarak çizilen ünlü dörtgeni çene açıklığı ve dilin konumuna göre oluşturulmaktadır. Yatay ekseninde dilin arka ve ön konumda bulunması, dikey ekseninde çene açıklığının dar ya da geniş olması dikkate alınır. Dudak biçimi olan düz ve yuvarlak parametreleri için iki ayrı dörtgen belirtilmektedir [14].



Şekil 2.2. Türkçe’de ünlü dörtgeni

Türkçe’de bir sözcüğün ilk hecesindeki ünlü kendisinden sonra gelen ünlüleri etkiliyorsa ünlü uyumundan bahsedilir. İlk hecede bulunan ünlü söylenilirken dil konumu önde ise, yani başka bir deyişle /e/, /ö/, /i/, /ü/ fonemlerinden biri ise, kendisinden sonra gelen ünlü de öndil ünlüsü olmak zorundadır. Sözcüğün ilk hecesindeki ünlü arkadil ünlüsü ise, yani /a/, /o/, /u/ fonemlerinden biri ise, kendisinden sonra gelen ünlü ya ortadil ünlüsü /ı/, ya da arkadil ünlüsü olur. Ünlü uyumunda, ilk hecedeki ünlü düz dudak ünlüsü ise (/ı/, /i/, /a/, /e/) diğer hecelerdeki ünlülerde düz dudak ünlüsü olmak zorunda. Eğer ilk hecede yer alan ünlü yuvarlak dudak ünlüsü ise, devamında gelen ünlüler düz ya da yuvarlak dudak ünlüsü olabilmektedir. Ayrıca, geniş çene ünlüsü ile biten bir köke ünlü ile başlayan bir ek gelirse, araya geçiş sesi /y/ eklenerek, bu geniş çene ünlüsü dar çene ünlüsüne dönüştürülmektedir.

Ünsüzler ve özellikleri

Ünlü fonemlerin çıkışı sırasında akciğerden gelen hava akımının hiçbir engele rastlamaksızın özgür çıkışına karşın, ünsüz fonemlerin çıkışında akciğerden gelen hava konuşma organlarının herhangi bir yerinde engele rastlar. Bu engeller dudaklar, dişler, alt ve üst damak ve dil ile oluşmaktadır. Ünsüz fonemler çıkış biçimlerine, çıkış yerlerine ve ses tellerinin durumuna göre sınıflandırılırlar.

Tablo 2.5. Ünsüz fonemlerin sınıflandırılması

		b	c	ç	d	f	g	h	j	k	l	m	n	p	r	s	ş	t	v	y	z
Çıkış Biçimlerine Göre	Patlamalı	+			+		+			+				+				+			
	Genizden (Geniş)											+	+								
	Çarpmalı														+						
	Yan daralmalı										+										
	Sızmalı (Sürtünmeli)		+	+		+		+	+							+	+		+	+	+
Çıkış Yerlerine Göre	Çift dudak	+										+		+							
	Alt dudak – Üst diş					+													+		
	Dil ucu – Diş ardı				+													+			
	Dil ucu – Diş eti												+		+	+					+
	Dil ucu – Ön damak									+											
	Dil – Ön damak		+	+					+								+			+	
	Dil – Damak sonu						+			+											
	Ses telleri							+													
	Ötümlü	+	+		+		+		+		+	+	+		+				+	+	+
Ses Tellerinin Titreşimine Göre	Ötümsüz			+		+		+		+				+		+	+	+			

2.3.1.2. Parçalarüstü Fonemler (Bürünler)

Fonemlerin en önemli özelliği anlam ayırıcı olmalarıdır. Anlam ayırıcı olma süre, ton, kavşak, durak, vurgu ve ezgi ile sağlanabilmektedir. Bunlar, parçalarüstü sesbirimler veya bürünler olarak tanımlanmaktadır. Türkçe için genelde bürünlerin anlam ayırıcı özelliği bulunmadığı kabul edilmektedir. Fakat Japonca ve Çince gibi vurguya dayalı yapıda olan dillerdebu kavramlar anlam açısından oldukça önemlidir. Bürünler sesli ifade tanıma kapsamında, sesli ifade örüntüsünün yakalanmasına yardımcı olmaktan çok sesli ifadeden anlam çıkarma aşamasında önem taşımaktadır [13].

Süre

Süre, bir sesin söylenirken kısa ya da uzun zaman alması ile ilgilidir. Sesler her dilde farklı sürelerde kullanılmaktadır. Bir dilde uzun söylenen bir fonem başka bir dilde kısa söylenebilir. Türkçe’de süre anlamı değiştirecek bir öge değildir. Ancak yabancı dillerden Türkçe’ye geçen sözcüklerden söyleniş süresini uzatma anlam değişikliğine yol açabilmektedir. Ayrıca iç ve son seslerde kullanılan /ğ/ ve /h/ fonemlerinin yutulmasıyla uzayan sözcüklerde de anlam değişikliği söz konusudur. Örneğin “dügün” sözcüğü söylenirken süre kısa tutulursa “dün” sözcüğü ile anlam karışıklığı oluşturabilir. Türkçe’de süre seslenme ve buyurma biçimlerinde de ortaya çıkabilmektedir.

Ton (Perde değişimi)

Bir sesteki sıklığın yüksek ya da düşük olması ton olarak tanımlanmaktadır. Ses sıklığının düşük veya yüksekliğine göre tiz ve pes kavramları ortaya çıkmaktadır. Kişiden kişiye (aynı yaşta ve cinsiyette kişiler arasında bile) farklılık gösterir. Bir hecenin tiz ya da bas söylenmesi ile de alakalıdır. Çince ve Nijerya dilleri gibi bazı dillerde sözcük anlamını ayırmada kullanılan ton, Türkçe’de genellikle tek sözcüklü bildirilerde anlam ayırıcı özelliği bulunmaktadır. Örneğin; “aferin” sözcüğü ile ya beğeni ya da yanlış yapılan bir işe serzeniş dile getirme ton (perde değişimi) ile sağlanır.

Kavşak ve Durak

Ünsüz ile biten bir kök ünlü ile başlayan ek aldığıında hece düzenin değişmesi kavşak olarak tanımlanmaktadır. Örneğin “ki-lim”, “ki-li-min” sözcüklerinde olduğu gibi. Türkçe’de ünlüyle başlayan sözcüklerde de kavşak bulunur. Örneğin; ulak sözcüğü “ul-ak” yerine “u-lak” şeklinde okunur. Türkçe’de sözcük başında var olan bu durum, Arapça

sözcüklerde iç seste ve son seste bulunabilmektedir. Durak, bir tümcede anlamda farklılık oluşturabilecek şekilde duraklama yapılmasıdır. Örneğin “Kara, deniz, hava yolları” ve “Karadeniz havayolları” tümceleri arasındaki fark gibi.

Vurgu

Bir sözcükteki herhangi bir hecenin diğer hecelere göre daha baskılı bir şekilde söylenmesine vurgu denmektedir. Bazen cümle içinde sözcük vurgusu da söz konusu olmaktadır. Bazı dillerde vurgunun yeri her zaman aynıdır. Örneğin Fransızca’da sözcüklerin son, Fince’de sözcüğün sondan ikinci ve Çek dilinde sözcüğün ilk hecesinde vurgu gerçekleştirilmektedir. Ancak Türkçe, İspanyolca, İtalyanca ve Rusça gibi dillerde vurgunun sözcük içindeki yeri değişebilmektedir. Vurgunun anlam ayırt edici özelliği vardır. Örneğin “varmış” sözcüğü için yapılan vurgu “Epeyce parası varmış” ve “eve varmış” cümlelerinde farklı yerlerde bulunmakta olmasından anlam ayırt edici özellik sağlamaktadır.

Ezgi

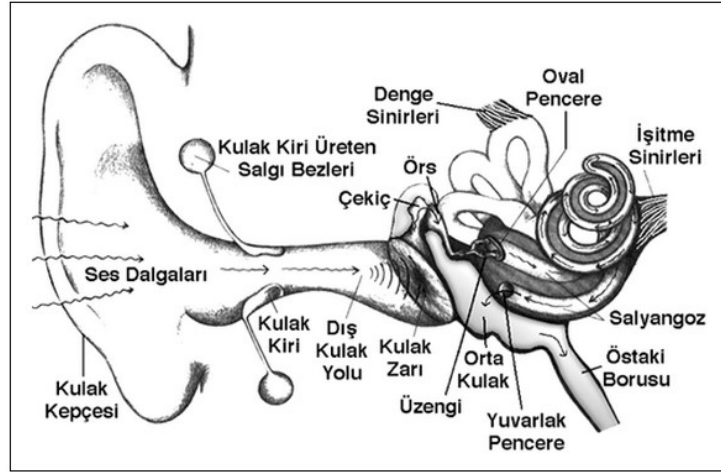
Sesli ifadedeki hece, durak ve vurguya bağlı ortaya çıkan ton değişimlerine ezgi denmektedir. Ezgi tamamen konuşmacıya bağlı olduğundan, kesin kurallar koymak zordur. Ezginin söz konusu parametreleri hece, durak ve vurgu değişimleridir. Ruhsal etkenlerle, tümce içinde kimi sözcüklerdeki ton yükselmesi ya da alçaltılması, anlatılmak istenende belirli anlam ayrımı sağlar.

2.4. İşitme

Canlılar arasında iletişim, konuşma ve işitme olarak iki yönlü gerçekleşmektedir. İletişimde önemli bir role sahip olan işitme sisteminde, kulak işitmenin ilk adımı olan organdır. Doğuştan gelişmiş olan insan kulağı en zayıf veya en yüksek sesleri algılayabilmektedir [8].

2.4.1 Kulak Yapısı ve Görevi

Kulak denildiğinde genel olarak kafanın yan taraflarında bulunan belirgin, kıvrımsal, kulak kanalının en başında gelen organ akla gelmektedir. Bu organ, Şekil 2.3’te gösterildiği gibi hem harici kulak kanalını koruma görevini üstlenir hem de duyulabilir yüksek frekanslarda çok yönlü ses alabilen yapısıyla gelen sesin konumunu belirler.



Şekil 2.3. Kulağın yapısı [74].

2.4.1.1. Dış Kulak

İnsanlarda dış kulak kanalı yaklaşık 2.7 cm uzunluğunda, 0.7 cm çapındadır ve ortalama 1 cm^3 hacmindedir. Bir ucu açık ve diğer ucu kapalı boru şeklinde olan dış kulak kanalı kulak kepçesiyle başlayıp kulak zarı ile sonlanır. Kulak zarı, yüzey alan 0.8 cm^2 olan, nispeten sert içeriye doğru yönelmiş yaklaşık 135 derecelik koni şeklindedir. Dış kulak kanalının bazı frekanslarda oluşan normal titreşim modları da vardır. Dış kulak kanalına giren bir ses, kulak zarına varıncaya kadar ses basınç şiddetini 5-10 dB arası arttırmaktadır.

2.4.1.2. Orta Kulak

Kulak zarının hemen sonrasında ortak kulağın başlangıcı olan ve içinde insan vücudunun en küçük kemikçikleri çekiç, örs ve üzengi'yi bulunduran orta kulak boşluğu yer almaktadır. Bu kemikçiklerin asıl işlevi hava ortamından kulak zarına gelen ses dalgalarını mekanik hale dönüştürüp iç kulağın sıvı ortamına iletmektir (empedans dönüşümü). Çekiç kemikçığının bir ucu kulak zarına yapışık halde dururken diğer ucu örs kemikçğine bağlanmaktadır. Örs kemikçığı, çekiç kemikçığı ve üzengi kemikçığı arasında bulunmaktadır. Üzengi kemiğinin iç kulakla birleştiği noktaya oval pencere denmektedir ve titreşimler bu noktadan iç kulağa iletilmektedir.

2.4.1.3. İç Kulak

İç kulak, salyangoz, denge elemanları ve işitsel sinir uçlarından oluşmaktadır. İç kulakta mekanik titreşimlerin sinirsel uyarılara dönüştüğü yer salyangozdur. Denge elemanları olarak bilinen yarım daire kanalları, kesecikler ve kabarcıklar mekansal algı hislerini kontrol eder ve normalde ses titreşimlerini algılamak için kullanılmazlar. Salyangoz çemberi içinde renksiz ve su akışkanlığının yarısı kadar viskozitesi olan bir sıvı bulunmaktadır. Salyangoz kanalının uzunluğu yaklaşık 35 mm'dir. Kanalın başında kesit alanı 4 mm² iken bu değer kanal sonunda 1 mm²'ye kadar düşmektedir. Orta kulakta oluşan titreşim anında, üzengi kemiği salyangoz sıvısına piston hareketi yapar ve bu sıvının titreşim ile yer değiştirmesini sağlar. Sesin sinirsel uyarılara dönüştüğü yer olan corti organında 30 bin sensör hücresi bulunmaktadır.

2.4.1.4. Mekanik'ten Sinirsel Yola Geçiş

Mekanik dalga'nın sinirsel aktiviteye dönüştüğü reseptörlere organa corti organı denmektedir. Reseptörler salyangoz zarının içerisinde yerleşik halde bulunup işitsel sinir hücrelerinin de aralarında bulunduğu bir kısım sinir hücresi (nöron) ile bağlantı halinde bulunmaktadır. Nöronlar genel olarak aktif ve pasif olmak üzere iki durumda bulunurlar. Bir nöron, belirli bir eşik değerinin üzerinde elektriksel girdi ile uyarıldığında, bir milisaniye süren elektrik sinyali (vuruşu) üretir. İşitsel sinir hücrelerinin oluşturduğu sinirsel akım salyangoz kanalının başından sonuna doğru ilerlerken yaklaşık 30 bin nöronu etkilemektedir. Böylece, bu işlem nöron sinyalleşmelerinin beyne taşınmasını sağlamaktadır [9].

3. SES İNCELEMELERİNDE KULLANILAN TEKNİKLER

3.1. Ön İşlemler

3.1.1. Çerçeveleme

Konuşma sinyalinin X adet konuşma örneği içeren parçalara ayrılması işlemi çerçeveleme olarak tanımlanmaktadır. Çerçeveleme yapılırken birinci çerçeve X adet konuşma örneği içeriyorsa ikinci çerçeve birinci çerçeveden Y adet örnek sonra başlatılır. Çerçeveleme yapılırken dikkat edilmesi gereken husus Y değerinin X değerinden daha küçük bir değer olarak seçilmesi gerektiğidir ($Y < X$). Bu şekilde her çerçeve kendisinden sonra gelen çerçevenin bir kısmını örtmüştür olur. Örtme işleminde amaç bir çerçeveden diğerine geçişteki keskinliği ortadan kaldırmaktır.

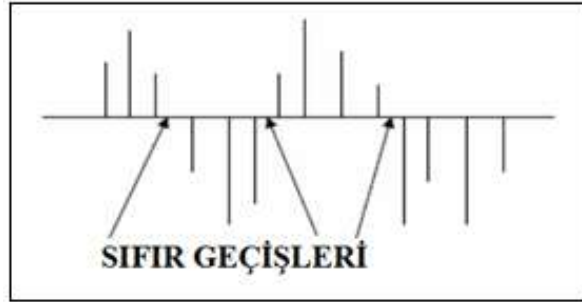
3.1.2. Pencereleme

Pencereleme, sinyalin N adet örneğinin (sample) pencere olarak tabir edilen matematiksel bir ifadeyle çarpılması işlemi olarak bilinmektedir. Pencereleme işlemi uygulanacak N adet örnek çerçeve (frame) adı verilen sinyal bölümünü oluşturur. Bir ses sinyalinden, o sinyale özgü özellikler çıkarılmak istendiğinde sinyal çerçevelere bölünüp bu çerçeveler üzerinden özellik çıkarılır. Bilinen pencereleme yöntemleri arasında Hamming, Hann (Hanning), Triangular, Gauss, Welch, Blackman ve Bartlett gibi yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemlerden bazıları sinyali sıfıra doğru azaltırken (ör: Hann) bazıları sinyali azaltmaz (ör: Hamming).

3.1.3. Sıfır Geçiş Oranı (Zero Crossing Rate)

Sıfır geçiş oranı ayrık zamanlı bir sinyalin ardışık örneklerinin farklı matematiksel işarete sahip olma oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıfır geçişlerinin gerçekleşme oranı sinyalin frekans içeriğinin basit bir ölçümünü yansıtmaktadır. Ses sinyallerinde sıfır geçiş oranı, belli bir zaman aralığında ya da bir çerçeve içerisinde, ses sinyalinin genlik (amplitude) değerinin sıfır değerini kaç defa geçtiği ile ölçülür. Ses sinyalleri geniş bantlı sinyaller olduğundan ortama sıfır geçiş oranının yorumlanması daha az kesinlik ile

sonuçlanabilmekte iken ses sinyalinin spektral özellikleri kısa zamanlı ortalama sıfır geçiş oranı (short-time average zero crossing rate) ile daha kolay hesaplanabilmektedir [15].



Şekil 3.1. Ayırık zamanlı bir sinyaldeki sıfır geçişleri

3.1.4. Enerji

Ses sinyalinin kısa zamanlı enerji değeri sinyal genliğindeki değışimleri yasıtmaktadır. Genel olarak ses sinyallerine ait özellikler zaman domeninde önemli ölçüde çeşitlilik göstermektedir. Ses sinyalinin enerji değeri sesli-sessiz bölge ayırımı yapmaktakta da kullanılmaktadır. Örneğın bir konuşma sinyalinde, sesli bölgelerde temel frekansın (fundamental frequency) ölçülebilir boyutta değıştiğı gözlemlenebilmektedir. Bu yüzden zaman domeninde yapılan işlemler sonucunda sinyalin yoğunluk, perde ve formant frekansı gibi vokal yol özellikleri elde edilebilmektedir.

3.1.5. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)

Ses sinyalleri ile çalışmada güç spektrumu kullanımı en yaygın tekniklerden biridir. Ses sinyalinde zamanla değışen frekans değeri güç spektrumu ile gösterilebilmektedir. Bir ses sinyalinin güç spektrumu hesaplanırken yapılacak ilk işlem Ayırık Fourier Dönüşümünün uygulanmasıdır. Hızlı Fourier Dönüşümü, Ayırık Fourier Dönüşümü hesaplamadaki zaman karışıklığı olan $O(n^2)$ 'yi azaltmak için kullanılan hızlı bir algoritma olarak bilinmektedir. Hızlı Fourier Dönüşümü, N adet konuşma örneğı içeren her çerçeveyi orjinal domeninden frekans domenine çevirmek için kullanılmaktadır. N örneklı bir sette Hızlı Fourier Dönüşümü Denklem 3.1'deki gibi tanımlanabilir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.1)$$

3.1.6. Öznitelik Çıkarma Yöntemleri

Konuşma sinyali konuşmacının aklında tasarladığı fikir hakkında bilgiler içermektedir. Konuşma sinyali içerisinde ortam sesleri, kullanılan donanımdan kaynaklanan gürültüler ve konuşmacıya ait akustik özellikler bulunmaktadır. MFCC, LPC ve PLP yöntemleri özellikle konuşmacı tanıma işlemlerinde konuşmacıya özgü akustik model çıkarmada kullanılan yöntemler arasında bulunmaktadır. Mel Frekansı Kepstrum Katsayıları (MFCC), insan kulağı referans alınarak oluşturulan Mel ölçeği kullanılarak frekans domeninde en yaygın kullanılan öznitelik çıkarma yöntemlerinden biridir. Frekans domeni özellikleri olarak ta bilinen MFCC, zaman domeninde işlem yapılmasından daha net sonuçlar üretmektedir [16]. MFCC, FFT sonucu üretilen pencerelenmiş kısa zamanlı sinyalin gerçek katsayılarını göstermektedir. Bir konuşma sinyaline MFCC uygulamak için sırasıyla aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır [17].

- Ses sinyali her çerçevede aynı sayıda örnek bulunacak şekilde çerçevelere ayrılır.
- Her çerçeveye pencereleme yöntemlerinden biri (ör: Hamming) uygulanır.
- Zaman domeninde bulunan ses sinyalinin frekans değerlerini çıkarmak için her çerçeveye FFT uygulanır.
- FFT uygulanmış her çerçeveye 1 kHz'e kadar doğrusal 1 kHz'den yüksek frekanslarda logaritmik olan mel ölçekli filtre bankası uygulanır.
- Filtre bankası uygulanan çerçevelere daha sonra Ayrık Kosinüs Dönüşümü (DCT) uygulanır.

Konuşma sinyali içindeki her çerçeve için MFCC aşamaları uygulanarak bu işlemler sonunda bir MFCC seti elde edilmektedir. Bu set, sesin fonetik olarak önemli karakteristiğini içeren akustik vektör seti olarak da tanımlanmaktadır.

3.2. Konuşma/Konuşmacı Tanıma

Konuşma/konuşmacı tanıma, konuşma sinyali üzerinde yapılabilecek işlemlerden biridir. Konuşma/konuşmacı tanımayı Bölüm 3.1'de bahsedilen ön işlemler ve Bölüm 3.2'de değinilecek olan tanıma aşaması olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır.

3.2.1. Dinamik Zaman Eşleştirme (Dynamic Time Warping)

Dinamik zaman eşleştirme, iki özellik vektörü dizisini zaman ekseninde tam bir örtüşme sağlanana kadar daraltıp genişleterek eşleştirmeye çalışan döngüsel bir algoritma olarak tanımlanmaktadır. Dinamik zaman eşleştirme algoritması genel olarak zamanla değişiklik gösteren iki dizi arasındaki uzaklığı hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu algoritma ayrıca gerçek zamanlı bir konuşma tanıma sisteminde konuşmacının farklı hızlarda ifade ettiği aynı kelimeyi tanımak için kullanılmaktadır. Başka bir deyişle dinamik zaman eşleştirme algoritması yaklaşık şablonu olan iki sinyal arasındaki benzerliği arayan en uygun algoritmadır [18].

3.2.2. Örüntü Eşleştirme (Pattern/Template Matching)

Konuşma tanıma sistemi için kullanılacak olan örüntü eşleştirme yönteminde tanınacak konuşmacının sistemi kullanmadan önce birden fazla konuşma örneğini sisteme kaydetmesi gerekmektedir. Örüntü eşleştirme yöntemi çoğunlukla konuşmacı tanımada kelime sayısının kısıtlı olduğu sistemlerde kullanılmaktadır. Bir konuşmacı tanıma sisteminin öğrenme aşamasında her tanınacak kelime için birden fazla referans örüntü tutulur. Örüntü karşılaştırma öklid uzaklığı, kare uzaklığı ve kepsral uzaklık gibi ölçüm yöntemleri ile bulunan uzaklıkların en küçüğünü seçerek gerçekleştirilmektedir [19].

3.2.3. Vektör Niceleme Kaynak Modeli (Vector Quantization Source Model)

Vektör niceleme yönteminde temel amaç aynı sınıfa dahil vektörlerin birbirlerine daha çok yaklaşmasını farklı sınıfa dahil vektörlerin ise birbirlerinden uzaklaşmasını sağlamaktır. Bu yöntem, temel olarak en yakın komşular (nearest neighbours) algoritmasını kullanmaktadır. Bölüm 3.1.6’da bahsedilen konuşmacıya ait öznitelik vektörü çıkarma işleminden sonra vektör M sayıda bölgeye bölünüp gruplandırılarak konuşmacı modeli oluşturulur. Her birine “kod” adı verilen bu bölgeler bir araya geldiğinde “kod kitabını (codebook)” oluşturup “merkez (centroid)” ile gösterilmektedir. Sistem eğitilirken her konuşmacıya özgü kod kitabı tüm konuşmacılara ait öznitelik vektörlerinin birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Kişiye özgü öznitelik vektörünü kod kitabındaki en yakın kod kelimesine uzak olması durumuna “vektör niceleme bozulması (VQ-distortion)” denmektedir. Konuşmacı tanınırken bilinmeyen konuşmacı ve arasında

minimum vektör niceleme bozulması olan kullanıcı eşleştirilir. Böylece tanıma gerçekleşmiş olmaktadır [20].

3.2.4. En Yakın Komşular (Nearest Neighbours)

En yakın komşular yöntemi dinamik zaman eşleştirme ve vektör niceleme yöntemlerinin özelliklerinin birleştiği yeni bir yöntem olarak bilinmektedir. En yakın komşular yöntemi vektör niceleme yönteminin aksine bir kod defteri üretmek için kaydedilen eğitim verilerini kümelemez. Bunun yerine bütün eğitim verilerini tutarak geçici olacak şekilde kullanır. En yakın komşu uzaklığı test verisi ile kaydedilmiş veriler arasındaki uzaklığın minimum olanı olarak ta ifade edilmektedir. Bütün test verilerinden (her birini çerçevelere bölerek) hesaplanan en yakın komşu değeri ile eşleşme skoru üretilmektedir. Sonuç olarak bu eşleşme skoru ile benzerlik oranı yaklaşımları saptanmaktadır. En yakın komşu algoritması hesaplama yoğunluğu ve dolayısıyla hafıza gerektiren konuşmacı tanıma algoritmalarından biri olmasına rağmen en güçlü algoritma olarak bilinmektedir.

3.2.5. Saklı Markov Modeli (Hidden Markov Model)

Saklı markov modeli, konuşma/konuşmacı tanıma alanında en çok kullanılan istatistiksel yöntemlerden biridir. X sayıda durum bulunan bir SMM’de önceki durum göz önünde bulundurularak oluşturulan geçiş olasılığına göre sonraki duruma geçilir [21]. Saklı markov modelinin sesli ifade tanımda çok kullanılan bir yöntem olması zengin bir matematiksel yapıya sahip olmasından ve uygun durumlarda kullanıldığında başarılı sonuçlar elde edebilmesinden kaynaklanmaktadır. SMM, konuşma/konuşmacı tanıma alanında art arda gelen kısa süreli sesli ifade kesimleri için model oluşturmak ve bu modele dayanarak uzun süreli sesli ifade kesimlerini tanıma amacıyla kullanılmaktadır [22]. Ayrık bir t zamanındaki X adet durumdan birine Markov işlemi yada zinciri denmektedir. Durum değişkenleri q_t ile belirtilmektedir. Sistemin anlık durumu bir önceki duruma bağlı ise birinci dereceden markov modelinden bahsedilebilir. Durum geçiş matrisi Denklem 3.2’deki gibidir.

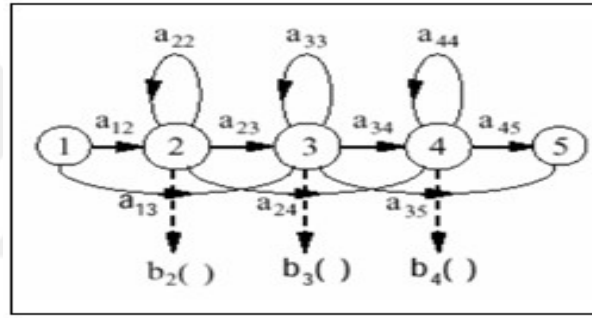
$$A = [a_{ij}] ,$$

$$a_{ij} = P(q = j / q_{t-1} = i) , \quad i, j = 1, \dots, X \quad (3.2)$$

Sistemin ilk durumu q_0 olarak tanımlanmaktadır. Bundan sonra gelecek herhangi bir durum dizisi $q = (q_0, q_1, \dots, q_T)$ 'nin bir markov işlemi ile üretilebilme olasılığı Denklem 3.3'te gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$P(q | A) = \pi_{q_0} a_{q_0 q_1} a_{q_1 q_2} \dots a_{q_{T-1} q_T} \quad (3.3)$$

Eğer durum dizisi q doğrudan gözlemlenemiyorsa markov işlemi gizli olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda durumların dolaylı olarak gözlemlenebilmesi söz konusudur. Bir gözlem ve bir durum arasında her ne kadar birebir bir gereklilik olmazsa bile her bir durumun Şekil 3.2'deki gibi belirli bir olasılıkla gözlenmesi gerekmektedir.

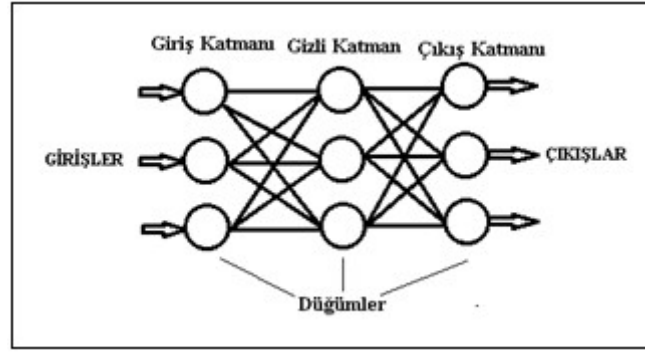


Şekil 3.2. 5 durumlu soldan sağa saklı markov modeli örneği

Bir konuşma tanıma sisteminde gözlemler özellik vektörleri, durumlar ise sesli ifade birimlerine denk gelmektedir. Bu durumda saklı olan durum dizisini gözlemleri kullanarak bulmak temel amaçtır. Eğer konuşma tanıma sistemi fonem tabanlı bir sistem ise, fonem dizisi durum dizisi olarak kabul edilmektedir. Her fonem için ayrı bir model tanımı yapıldığı düşünülürse art arda gelen fonem zincirlerini modellemek için her fonem modelinin yine art arda dizilmesi gerekmektedir.

3.2.6. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)

İnsan beyninin çalışma prensibi üzerine kurulmuş olan Yapay Sinir Ağları yöntemi giriş ve çıkış veri kümelerini kullanarak sistem davranışını öğrenebilen yapay sistemler olarak bilinmektedir [23]. Şekil 3.3'te YSA'nın genel modeli verilmiştir.



Şekil 3.3. Yapay sinir ağı genel modeli

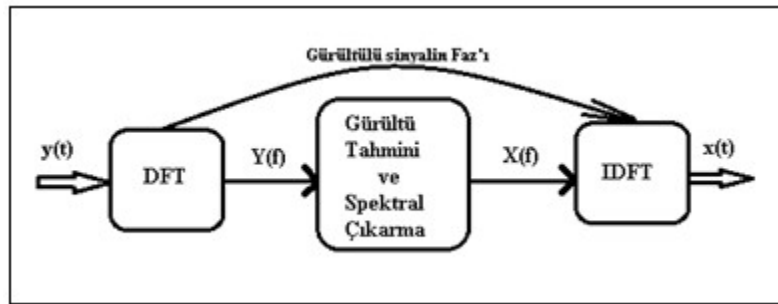
Konuşma tanıma sistemlerinde kesin sınırlar belirli olmadığından YSA yaklaşımına dayalı geriye yayılma algoritması (perceptron), çok katmanlı ağlar (multilayer networks) ve kendi kendini organize eden Kohonen haritaları (Kohonen self-organizing maps) gibi yöntemlerin bu alanda kullanılması uygun görülmektedir. Konuşma/konuşmacı tanıma alanında YSA yöntemini kullanmanın en büyük dezavantajı çok katmanlı ve çok nöron içeren sinir ağlarını ihtiyacın olmasıdır. Paralel işleme yardımıyla bu dezavantajın üstesinden gelinebilmektedir.

YSA yöntemi, eğitme ve kullanma olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında düğümlerin birbirlerine bağlantılarını ifade eden yüzdeler elde edilmektedir. Bu aşamada elde edilen yüzdeler kullanma aşamasında verilen girişlere çıkışlar hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu yüzden kullanma aşaması eğitme aşamasından daha hızlı çalışmaktadır. Bir konuşma tanıma sisteminde YSA'nın kullanımı şu şekilde olabilir. Örneğin; bir konuşma örneğinden özellik çıkarma yöntemleri sonunda elde edilen katsayılar YSA'nın giriş katmanının yüklenir. Daha sonra çıkış katmanına konuşma örneğindeki kelimeyi temsil ve edebilecek 0-1 veya -1-1 aralığında bulunan bir kod seti yüklenir (0,5'ten yüksek çıkışlar 1 diğerleri 0 kabul edilerek bu kodlama yapmak mümkündür). YSA'nın eğitme algoritması çalıştırılır. Eğitim aşaması yeterli görüne kadar her kelime için bu işlemler tekrar edilir. Kullanma aşamasında konuşma örneğinden elde edilen katsayılar YSA'ya giriş olarak verilip çıkış olarak hesaplanan değerlerle kelime eşleşmesi kontrol edilir [24].

3.3. Ses İyileştirme

3.3.1. Spektral Çıkarma Algoritmaları

Spektral çıkarma algoritması (SÇA) ses sinyallerinde gürültü azaltımı için önerilen en eski algoritmalarından biridir. SÇA algoritması basit bir yapı üzerine kurulmuştur. Gürültü içeren ses sinyalinden tahmini bir gürültü spektrumunun çıkarılmasıyla tahmini gürültüsüz bir sinyal elde edilmektedir. Ses sinyali içerisinde sesli ifadenin olmadığı yerlerde gürültü spektrumu tahmin edilip güncellenebilmektedir. İyileştirilmiş sinyal, gürültülü sinyalin fazı kullanılarak tahmin edilmiş sinyalin ters ayrik Fourier dönüşümü (inverse DFT) hesaplanmasıyla elde edilmektedir. SÇA algoritması Şekil 3.4'te gösterildiği üzere sadece düz ve ters ayrik Fourier dönüşümü kullandığı için oldukça basittir. Bir ses sinyaline SÇA uygulanırken dikkat edilmesi gereken noktalar da bulunmaktadır. Ses sinyalinin bozulmasından kaçınmak için çıkarma işleminin özenle yapılması gerekmektedir. Çıkarma işlemi fazla yapılırsa ses sinyalinden gerekli bilgiler yok olabileceği gibi az yapıldığında ses sinyalinde gürültü kalacaktır. SÇA işlemi sonucu ortaya çıkan ses sinyallerindeki bozuklukları azaltmak hatta gidermek için birçok yöntem önerilmiştir. SÇA'nın, doğrusal olmayan spektral çıkarma, çoklu bant spektral çıkarma, en küçük ortalama karesel hata tabanlı spektral çıkarma, genişletilmiş spektral çıkarma, uyarlanabilir ortalama kazanımı tabanlı spektral çıkarma, seçici spektral çıkarma ve algısal özellik tabanlı spektral çıkarma gibi algoritmaları bulunmaktadır [25].



Şekil 3.4. SÇA'nın genel yapısı

3.3.2. Wiener Filtreleme

Wiener Filtreleme (WF)'de, spektral çıkarma algoritmalarında olduğu gibi sezgisel tabanlı ilkeler bulunmamaktadır. SÇA algoritmaları gürültünün asıl ses sinyaline eklenmiş bir sinyal olduğu gerçeği üzerine yapılandırılmıştır. Bu algoritmalarla dolayısıyla gürültülü sinyalden gürültünün çıkarılması yolu kullanılarak tahmini gürültüsüz bir sinyal elde etme yöntemleri önerilmiştir. En düşük karesel hata filtresi teorisini ilk olarak zaman domeninde Andrei Kolmogorov ve frekans domeninde Norbert Wiener geliştirmiştir [26]. En düşük karesel hata filtrelerinin amacı filtre çıkışında elde edilen sinyal ile istenilen sinyalin arasındaki ortalama uzaklığın karesinin en düşük değere indirgenmesidir. Wiener filtresi katsayılarının hesaplanması için girişte kullanılacak sinyalin otokolerasyon fonksiyonunun ve çıkışta elde edilmek istenen sinyalin çapraz kolerasyon fonksiyonunun tahmin edilmesi gerekmektedir. Denklem 3.4'te Wiener filtresinin giriş-çıkış işlemi gösterilmiştir [27].

$$x(m) = \sum_{k=0}^{P-1} w_k y(m-k) \quad (3.4)$$

Bu denklemde;

m : zaman indeksini,

$y^T = [y(m), \dots, y(m-P-1)]$: giriş sinyalini,

$x(m)$: Wiener filtresi çıkışını,

$w^T = [w_0, w_1, \dots, w_{P-1}]$: Wiener filtresi katsayı vektörünü ifade etmektedir.

3.3.3. İstatistiksel Model Tabanlı Yöntemler

Ses iyileştirme yapılırken istatistiksel model tabanlı yöntemlerde Wiener filtrede olduğu gibi sinyalin karmaşık spektrum özelliklerinden yararlanılmamaktadır. Onun yerine sinyal büyüklüğünün (ayrık fourier dönüşümü katsayıları) doğrusal olmayan kestirimi kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan bu kestirimler, gürültüye ait olasılık yoğunluk fonksiyonunu ve konuşma sinyalinin ayrık fourier dönüşümü katsayılarını kullanarak işlem yapmaktadır.

En fazla benzerlik kestirimi, Bayesian kestirimi, en az ortalama karesel hata kestirimi, yönlendirilmiş karar yaklaşımı üzerinde iyileştirmeler, müzikal görüntüyü eleme yöntemleri, logaritma tabanlı en az ortalama karesel hata kestirimi, n'inci güç spektrumunun en az ortalama karesel hata kestirimi, Gaussian olmayan dağıtımlar tabanlı en az ortalama karesel hata kestirimi, MAP kestirimi, genel Bayesian kestirimi, algısal odaklı Bayesian kestirimi ve konuşma iyileştirmede konuşma bölgesi olmayan yerleri birleştirme gibi yöntemler istatistiksel model tabanlı yöntemler olarak bilinmektedir.

3.3.4. Altuzay Algoritmaları

Ses iyileştirmede kullanılan altuzay algoritmaları çoğunlukla lineer cebir tabanlıdır. Altuzay algoritmaları temiz sinyalin gürültülü öklid uzayının bir altuzayıyla sınırlanabileceği ilkesine dayanmaktadır. Bu algoritmalar ile gürültülü sinyalin vektör uzayının, çoğunlukla temiz sinyalden oluşan bir altuzay ve çoğunlukla gürültülü sinyalden oluşan bir altuzay olarak iki ana parçaya ayrıştırılması amaçlanmaktadır. Daha sonra gürültülü altuzayda bulunan gürültü vektörünün elemanlarına “null” (boş) değer atanarak temiz sinyal tahmin edilmektedir. Gürültülü sinyalin vektör uzayının “sinyal” ve “gürültü” altuzaylarına ayrıştırılması tekil değer ayrışımı (TDA) ve özvektör (eigenvector) - özdeğer (eigenvalue) çarpanlara ayırma teknikleri gibi lineer cebirdeki en iyi bilinen ortogonal (dikey) matris çarpanlara ayırma teknikleri ile gerçekleştirilmektedir. Bir matrisin TDA değerinin hesaplanmasıyla matrisin sütun uzayı, sol boşuzay (nullspace), satır uzayı ve boşuzay olmak üzere dört temel altuzay için orthonormal üsler elde edilmektedir. TDA veya özdeğer ayrıştırmalarından elde edilen ortogonal matrisler, sinyal içeren bir matrise veya bir ses vektörüne uygulanabilen sinyale bağlı dönüşümler olarak görülmektedir. Sinyal kovaryans matrisinin öz vektör matrisi Karhunen–Loève dönüşümü (KLD) olarak bilinmektedir.

Altuzay algoritmaları, TDA kullanarak gürültü azaltma, sinyal matrisi üzerinde en küçük kareler ve en az varyans kestirimleri, TDA tabanlı beyaz gürültü algoritması, TDA tabanlı renkli gürültü algoritması, özdeğer tabanlı beyaz gürültü ayrışımı (ÖTA), özdeğer tabanlı renkli gürültü ayrışımı, algısal odaklı altuzay algoritmaları, altuzay iz sürme algoritmaları (blok algoritmalar, özyinelemeli algoritmalar) gibi algoritmalarından oluşmaktadır.

3.3.5. Gürültü Tahmin Algoritmaları

Bir konuşma sinyali içerisinde gürültü tahmininin iyileştirilmiş sinyal üzerindeki etkisi büyüktür. Gürültü tahmininin çok düşük seviyede gerçekleştirilmesiyle, ses içerisinde gürültüden kalan rahatsız edici artıkların duyulabilmesi, yüksek seviyede gerçekleştirilmesiyle de konuşma verisinin bozulup anlaşılabilirliğin yok olması sinyal iyileştirmenin dikkate alınması gereken iki önemli noktasıdır. Bu bağlamda gürültü tahmini için en basit yaklaşımlarından biri ses hareketliliği tespiti (SHT) algoritması kullanarak, konuşmadaki her durma esnasında gürültü spektrumunu hesaplayıp güncellemektir. Bu yaklaşım sabit ortam gürültüsü (white noise) olan ses sinyallerinde başarılı olmasına rağmen, gürültünün sürekli değiştiği daha gerçekçi ortamdaki (ör. bir kıraathane'deki) seslerde tam verimli olmayacaktır. Bu anlamda gerçekçi ortamlarda bile başarılı analiz yapan gürültü tahmin algoritmaları bir süreklilik içerisinde (konuşma anında bile) gürültüyü tespit etmekle verimi arttırmaya çalışmaktadır.

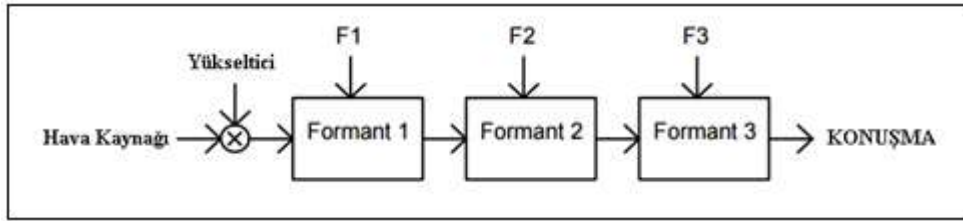
Gürültü tahmin algoritmalarını, minimal takip algoritmaları (minimum istatistik gürültü kestirimi, sürekli spektral minimum takibi), zaman özyinelemeli ortalama algoritmaları (SNR'ye bağlı özyinelemeli ortalama, ağırlıklandırılmış spektral ortalama, sinyal varlığının belirsizliği üzerine kurulmuş özyinelemeli ortalama algoritmaları) ve histogram tabanlı teknikler gibi temel başlıklara ayırmak mümkündür.

3.4. Konuşma Sentezleme

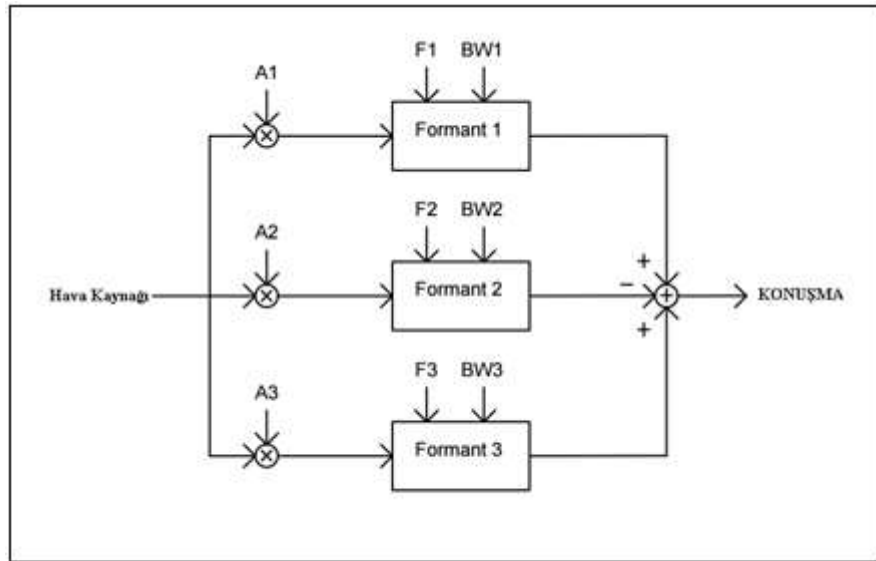
3.4.1. Formant Sentezleme

Konuşma sentezleme'de en eski yöntem olarak bilinmektedir. Periyodik ve aperi-yodik sinyaller üretilip bu sinyallerin vokal yolun modeli gibi olan bir filtre veya rezonatör devresiyle beslenildiği kaynak-filtre modeli olarak tasarlanmıştır. Formant sentezlemede esnek ve uygulanması oldukça kolay ilkeler yer almaktadır. Bu tür ses sentezleme yöntemi ile her türlü ses üretilebilmektedir. Kaynak sinyalin modellenmesinde ve vokal yolda yapılan sadeleştirmeler doğallıktan uzak ses sentezleme sonucu doğurmaktadır. Kabaca basitleştirilmiş bir uygulamada kaynak sinyali rasgele gürültü elemanları yüklenilmiş bir atış zinciri (impulse train) yada testere ucuna benzeyen şekilde bir sinyal olarak düşünebiliriz. Sinyal kalitesini arttırmak ve sinyalin daha iyi kontrolü için mümkün

oldukça doğru bir model kullanılması önerilmektedir. Formant sentezlemede, ayarlanabilir parametreler en azından temel frekans, sesli-sessiz kaynak sinyalleri ve seslendirme derecesi içermesi gerekmektedir. Vokal yol modeli her formant için bir çift filtre kutbu kullanmaktadır. Böylece formantın frekans ve bantgenişliği değerleri hesaplanabilmektedir. Daha anlaşılır bir konuşma sinyali üretmek için azami 3 adet en düşük formant dikkate alınması gerekmekte olup sinyal ne kadar fazla formant içerirse o kadar yüksek kalitede olmaktadır. Her fonemde, vokal yol filtresinin frekans tepkisini (frequency response) ve kaynak sinyali tutan parametreler güncellenmektedir. Vokal yol modellemesi yankılayıcının (resonators) Şekil 3.5'teki gibi basamak halinde (cascade) veya Şekil 3.6'daki gibi yatay olarak bağlanmasıyla gerçekleştirilmektedir [28]. Ses sentezleyici, formantları modelleyen yankılayıcıların yanı sıra gırtlığın yapısı ve dudak titreşimlerini modelleyen filtreleri ve burundan çıkan sesleri modellemek için anti-yankılayıcıları da (anti-resonators) barındırmaktadır.



Şekil 3.5. Basamak halinde formant sentezlemenin genel yapısı



Şekil 3.6. Paralel formant sentezlemenin genel yapısı

3.4.2. İfadesel Sentezleme

İfadesel sentezlemede asıl amaç insandaki konuşma üretim mekanizmasının mümkün oldukça benzerini üretmektir. Bu yöntem, uygulanması zor olduğundan henüz yaygınlık kazanmamıştır. Teoride yüksek kalitede sentetik konuşma üretildiği bilinsede, ifadesel sentezleme kullanılarak yapılan denemelerin diğer sistemlerde yapılan denemelerle karşılaştırıldığında başarı oranı düşük olduğu görülmektedir. İfadesel sentezlemeyi insanların üretemeyeceği bir sesi üretmek için kullanmak mümkün değildir. Diğer sentezleme sistemlerinde, istenmeyen yan etki olarak algılanan bu tür sesleri çıkarmak olanaklıdır. İfadesel sentezleme modelinde diğer sentezleme tekniklerinden daha kesin geçici sesler oluşturulabilmektedir. İfadesel sentezleme sistemi, hem insan vokal yolu hem de ses telleri için fiziksel model içermektedir. İfadesel sentezlemede gırtlaktan başlayıp dudakta sona eren vokal yolun kesit alanı değişimini modellemek için genelde bir dizi alan fonksiyonu kullanılmaktadır. İfadesel modelde dudak pozisyonunu, dil konumunu, akciğer hava basıncını ve ses telleri gerilimini detaylı bir şekilde ayarlamak için çok sayıda kontrol parametresi kullanılmaktadır. Modellemeye esas olarak kullanılan veriler ise doğal konuşmanın X-Ray analizi ile elde edilmektedir.

3.4.3. Bitiştirerek Sentezleme

“Kes ve yapıştır” sentezlemesi olarak ta bilinen bitiştirerek sentezlemede, daha önce veritabanında saklanmış ses kayıtlarından kısa bölümler kesilip yanyana eklenerek istenilen ses oluşturulmaktadır. Yapay sesin oluşturulması için gerçek ses verilerinin kullanılması teoride yüksek ses kalitesi sağladığı bilinsede pratikte başta böyle bir sistemin gerektireceği yüksek kapasitede hafıza olmak üzere birçok kısıtlama mevcuttur. Bitiştirerek sentezlemede kesilecek bir kayıt ne kadar uzunsa ortaya çıkacak yapay seste o kadar birleşim noktası hataları az olur. Çıkış sesinin, bu sesi oluşturmak için seçilen veritabanına bağlılığı ise birleştirerek sentezlemenin başka bir dezavantajı olarak görülmektedir. Bir konuşmanın duyguya ve kişiliğe bağlı ton değişimleri zor kontrol edilebilmektedir.

Bitiştirerek sentezlemede önemli sorulardan biride kesilecek/seçilecek ses parçasının uzunluğu ne olması gerektiğidir. Yeteri kadar esnekliği sağlamak ve hafıza gereksinimini karşılamak için en yaygın olarak fonemler ve difonlar seçilmektedir. Hece ve kelime gibi

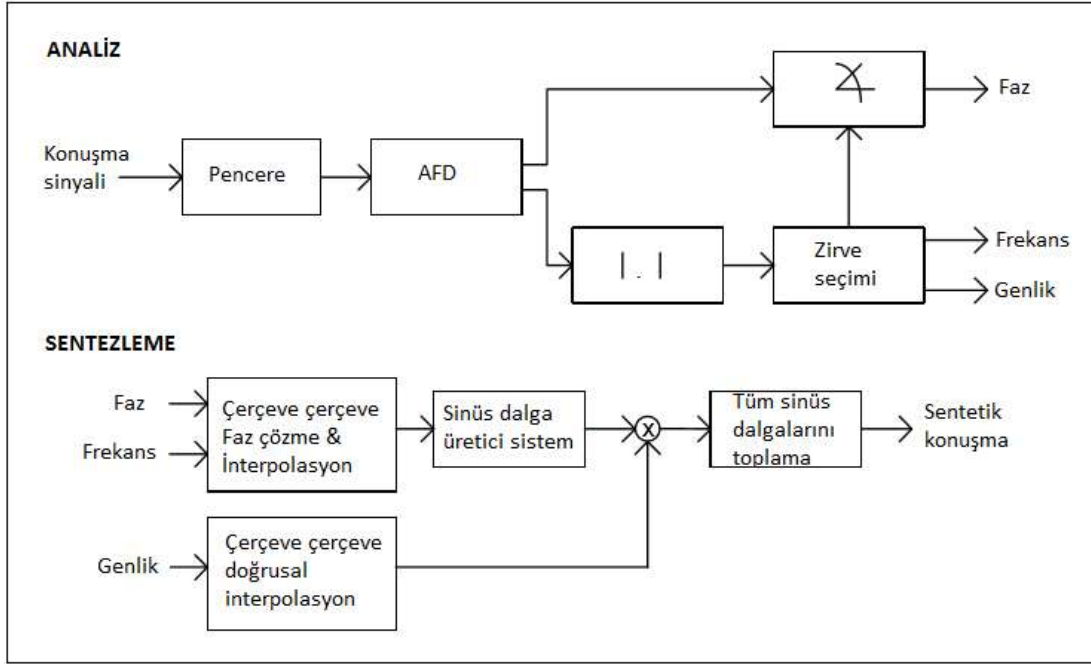
daha uzun ses kesilip birleştirilmesi kullanışsız olarak görülmektedir. Bitiştirmede difon kullanımı, difonların bir fonemden başka bir foneme geçiş, ilk fonemin ikinci yarısı ve son fonemin ilk yarısını içermesinden dolayı başarılı olmaktadır. Bitiştirme noktası her fonemin merkez noktasında yapılır. Bu nokta fonemin en istikrarlı/sabit noktası olduğundan birleşmenin sınırlarında meydana gelebilecek bozulmanın (distortion) en düşük olması beklenmektedir. Bir veritabanında farklı fonemler için yeter sayısı 40-50 arasında iken farklı difonlar için bu sayı 1500-2000 aralığındadır. Her iki şekilde (fonem ve difon) bitiştirmenin en büyük zorluğu birleşen parçalar arasındaki sürekliliği sağlamaktır. Art arda gelen birleşmiş kısımlar arasındaki duyulabilir bozukluklardan kaçınmak için bölümlerin yoğunluğu ve temel frekansı iyi kontrol etmek gerekmektedir. Yapay seste doğal ölçüyü yakalamak bugünkü teknikler ile imkansız olarak görülmekte olup ses parçacıkları arasındaki devamsız bölgeleri yok etmek için birçok teknik önerilmektedir [29].

3.4.4. Sinüsodiyal Sentezleme

Sinüsodiyal sentezleme, bir konuşma sinyalin zamana bağlı değişen farklı genlik ve frekanslardaki birden fazla sinüs dalgasının birleşimiyle oluştuğu varsayımına dayanmaktadır. Denklem 3.5'te gösterildiği gibi, sinüsodiyal sentezlemede $s(n)$ konuşma sinyali L adet sinüsoid'in toplamı olarak modellenmektedir.

$$s(n) = \sum_{i=1}^L A_i \cos(w_i n + f_i) \quad (3.5)$$

Bu denklem'de, A_i her bir sinüsodiyalin sinyalin genlik değerini, f_i faz değerini ve w_i frekans değerini göstermektedir. A_i ve f_i parametrelerini bulmak için pencerelenmiş sinyal çerçevelerinin ayrık fourier dönüşümü (AFD) değeri hesaplanıp Şekil 3.7'de gösterildiği gibi her çerçeveden spektral büyüklüğün zirve noktası seçilmektedir [30].



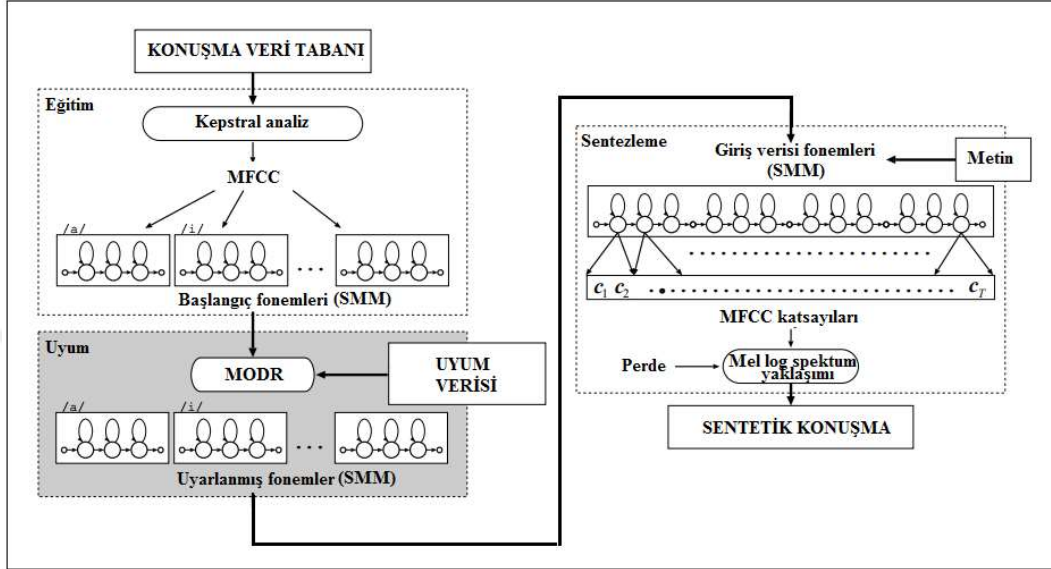
Şekil 3.7. Sinüsodiyal konuşma sentezleme/analiz sistemi

Sinüsodiyal sentezleme sesli ve sesli ünsüzler gibi periyodik sinyalleri göstermede uygun iken ünsüzler için problem teşkil etmektedir. Sinüsodiyal sentezleme şarkı sesleri üretmek için de kullanılabilir. Şarkı sesi sentezlemeyi konuşma sentezlemeden birçok açıdan farklı özellikleri bulunmaktadır. Şarkı sesinde fonemik mesajın anlaşılabilirliği tonlama ve müzikal kaliteye nazaran her zaman ikinci plandadır. Şarkı sesi konuşma sesiyle karşılaştırıldığında, sesli harflerin söyleniş şarkı sesinde daha uzun sürer dolayısıyla perde ve ses yüksekliği kontrolü şarttır. Gürcistan Teknoloji Üniversitesi tarafından üretilen LYRICOS en çok bilinen şarkı sesi sentezleme sistemidir.

3.4.5. Saklı Markov Modeli Tabanlı Sentezleme

Saklı markov modeli (SMM) gerçek hayattaki stokastik işlemleri modellemek için kullanılan istatistik tabanlı bir yaklaşımdır. Bölüm 3.2.3'te de bahsedildiği gibi birbirlerine geçişlerle bağlı olan durumlar topluluğu olarak tanımlanmaktadır. X sayıda durum bulunan bir SMM'de önceki durum göz önünde bulundurularak oluşturulan geçiş olasılığına göre sonraki duruma geçilmektedir. Saklı markov modeli tabanlı bir konuşma sentezleme sistemi Şekil 3.8'de gösterildiği gibi genel olarak eğitim, uyum ve sentezleme olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında konuşma veritabanından alınan örneklerin MFCC katsayılarıyla işlem yapılmaktadır. Uyum aşamasında verilen uyum bilgisine göre

özellik vektörü hesaplanmaktadır. Daha sonra konuşmacı uyum tekniği (maksimum olasılık doğrusal regresyonu gibi) kullanılarak başlangıç fonemleri amaçlanan konuşmacı fonemlerine dönüştürülmektedir. Sentez aşamasında ise sentezlenmesi istenen giriş verisi fonem dizisine dönüştürülmektedir [31].

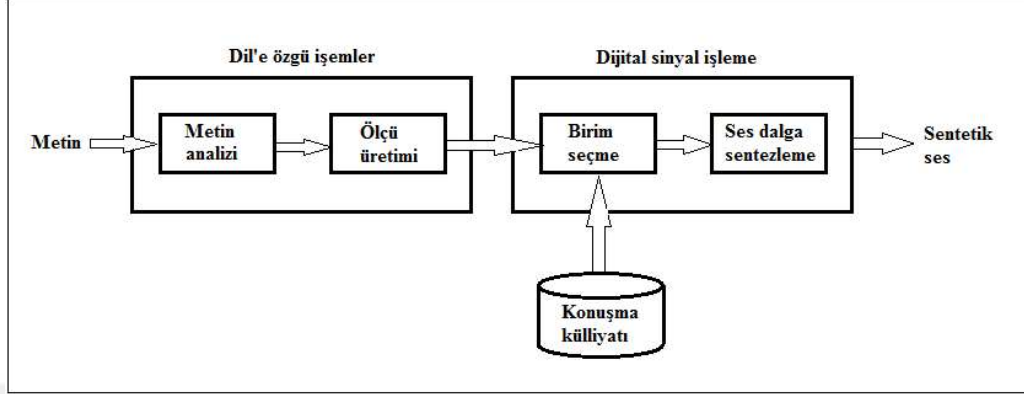


Şekil 3.8. SMM tabanlı konuşma sentezleme sistemi örneği

3.4.6. Birim Seçme Sentezleme

Külliyat tabanlı sentezleme olarak ta bilinen birim seçme sentezlemede geniş veritabanı kullanılmaktadır. Veritabanı oluşturulurken, kaydedilmiş her konuşma örneği fonlara, hecelere, kelimelere, ifadelere ve cümlelere bölünmektedir. Ses veri tabanındaki bu birimler temel sıklık, perde, süre, hecenin önceki ve sonraki fonemlere göre durumu gibi bölütleme ve akustik parametrelerine göre numaralandırılmaktadır. Genel yapısı Şekil 3.9’da gösterilen birim seçme sentezleme diğer metodlarla karşılaştırıldığında sentetik konuşmada daha çok doğallık sağladığı görülmektedir [32]. Birim seçme sentezleme, ses külliyatında bulunan sesleri hedef konuşmayı sentezlemek için bir araya getirdiğinden bitişirmeli sentezleme olarak ta bilinmektedir. Bu tür sentezleme de çok sayıda birimlerle uğraşmanın yanında, sentezleme sistemi perde ve F0 formant frekansı ile sentetik konuşmaya ölçü kazandırmaktadır. F0 formant frekansı ses telleri ve vokal kıvrımların ürettiği frekans değeri iken, perde bu frekansın dinleyici tarafından algılanmasıdır. Birim uzunluğunun seçimi ayrıca önemli bir konu olduğundan bununla ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Kısa birim uzunluğu seçimi daha az hafıza gerektirirken örnek toplayıp

etiketleme daha zor ve karmaşık hale gelmektedir. Uzun birim seçimi sonucu oluşan sentetik ses, bölünme noktaları çok olmadığı için daha doğal ve eklemesal etkilerden uzak iken daha fazla hafıza gerektirmektedir [33].



Şekil 3.9. Birim seçme sentezleme sistemi

4. SES İNCELEMELERİNİN ADLİ AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Adli Ses İnceleme Çalışmaları

Ses incelemelerinde kullanılabilecek yazılımlarda sayısal ses işleme teknikleri tabanlı yöntemler uygulanmaktadır. Kullanılan bu yöntemlerin adli ses inceleme yöntemi olarak sayılabilmesi için adli niteliğe sahip olması gerekmektedir. Örneğin bir metnin konuşmaya çevrilmesi (ses sentezleme) ve bir müzik kaydından vokal seslerin alınıp sadece müzik aletlerine ait seslerin ortaya çıkarılması gibi işlemler ses işleme yöntemi olarak görülebilir ancak adli niteliğe sahip değildir. Ses inceleme yazılımlarının adli açıdan değerlendirilebilmesi için bu yazılımların aşağıdaki özellikleri barındırması beklenmektedir.

4.1.1. Konuşma Çözümleme (Transkripsiyon)

Konuşma çözümleme incelenecek ses kaydı üzerinde kayıta geçen konuşmaların yazıya dökülmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu çözümleme, kullanıcının ses kaydını segmentlere ayırıp her bir segmente karşılık o dildeki ifadeleri (fonem, hece, harf, kelime vs.) segment ile birlikte kaydetme işlemidir. Konuşma kaydı çözümleme işleminden sonra kayıt içerisinde istenilen ifadenin aratılması, konuşma kaydının dökümünün alınması gibi işlemler mümkün hale gelmektedir.

4.1.2. Kayıt Bütünlüğünün Doğrulanması

Adli vakalarda delil olarak kullanılabilen ses kayıtları bütünlük açısından değerlendirildiğinde dikkate alınması gereken noktalar, o ses kaydının tek bir parça halinde olması ve üzerinde herhangi bir düzenleme yapılmamış olmasıdır. Günümüzde ses kayıtları ücretsiz birçok yazılım ile kolayca düzenlenebilmekte ve ortaya yeni bir ses kaydı çıkarılabilmektedir. Bir ses inceleme yazılımının adli ses inceleme yazılımı olarak kullanılabilmesi için adli vakalara konu olmuş ses kayıtları üzerinde kurgu/manipülasyon tespiti yapıp kayıt bütünlüğünü doğrulayabilmesi gerekmektedir.

4.1.3. Otomatik Ses İzi Eşleştirme

Otomatik ses izi eşleştirme, içerik olarak niteliği belirsiz olan ses kaydının bilinen bir ses kaydı ile eşleştirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Birçok problem adli açıdan otomatik ses izi eşleştirme analizi ile çözülmektedir. Örneğin incelenecek ses kaydında bulunan bir silah sesine ait ses izi üzerinden silahın marka/model tespiti yapılması veya ses kaydındaki konuşmacıların teşhis edilmesi mümkün hale gelebilmektedir.

4.1.4. Spektrum Analizi

Konuşma sinyalleri kendi içerisinde farklı frekanslarda bulunan birçok sinyal barındırdığı için karmaşık sinyaller olarak bilinmektedir. Konuşma sinyalleri açısından spektrum, konuşma sinyalindeki frekans değerlerinin zamanla değişimi anlamına gelmektedir. Spektrum analizi, zamana göre frekans yoğunluklarının renklendirilmiş grafiklerle gösterildiği ve sesin görselleştirilmiş hali olarak ta bilinen spektrogram üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bir ses kaydındaki konuşmada kulak yoluyla anlaşılmayan hece, harf, kelime vs. birimlerinden herhangi biri varsa bu birimlerin formant frekans değerleri göz önünde bulundurularak anlaşılmayan yerler belirlenebilmektedir.

4.1.5. Otomatik Formant Frekansları Tespiti

Formant, ses dalgası enerjisinin belli bir frekansta yoğunlaşması olarak tanımlanmaktadır. Formant frekansı ise bu yoğunlaşmanın gerçekleştiği frekans değerini belirtmektedir. Her insanın hatta ses dalgası yayan her nesnenin ses yolu farklı olduğu için ürettiği ses dalgası içerisindeki formant frekansları farklıdır. Sesli harflerin seslendirilmesi sırasında oluşan kişiye özgü formant frekanslarının tespiti, spektrogram üzerinden görsel olarak yapılabilir. Formant frekans değerlerinin otomatik olarak belirlenmesi, seslendirme yapılırken formant frekans değerlerinin sesli harflerden önce ve sonra gelen harflerden etkilenmemesi açısından önem taşımaktadır.

4.1.6. Kayıt İyileştirme (Filtreleme)

Adli ses inceleme yöntemlerinden biride ses kaydının kalitesini ve anlaşılabilirliğini arttırmak için yararlanılan kayıt iyileştirmedir. Kayıt iyileştirme ile ses kaydı yapılan cihazdan kaynaklanan gürültüler önemli ölçüde temizlenmektedir. Gürültü azaltma ve sesli kısımları vurgulama gibi kayıt iyileştirme işlemlerinden sonra konuşma çözümleme, konuşmacı teşhis ve tanıma, konuşmacı profili belirleme gibi işlemler daha başarılı sonuç vermektedir.

4.1.7. Konuşmacı Profili Belirleme

Konuşmacı profili belirleme işleminde kişinin yaş, cinsiyet ve sağlık gibi fiziksel özellikleri ortaya çıkarılmaktadır. Bu işlemde işitsel yol ile yapılan analizlerle birlikte adli ses inceleme yazılımının fiziksel özellikleri otomatik tespit edebilmesi sağlıklı sonuç elde etmede başarı sağlamaktadır. Dünyada birçok hukuk sisteminin önemle üzerinde durduğu sorunlardan olan çocuk istismarı, tehdit ve şantaj gibi vakalarda yararlanılacak herhangi bir ses delilinde yaş ve cinsiyet tespiti yapılması önem arz etmektedir.

4.1.8. Birden Çok Konuşmacıyı Ayırt Etme

Adli vakalarda dijital delil olarak kullanılan ses kayıtlarının incelenmesi sırasında, bu kayıtlarda geçen konuşmalarda işitsel olarak birbirlerine benzeyen birden fazla konuşmacının var olması bu konuşmacıların seslerinin yazılım yolu ile ayrıştırılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Birden çok konuşmacı varlığının söz konusu olduğu bir ses kaydı üzerinde belirli kişiye ait sesin mevcut olup olmadığının tespiti, mevcut ise bu kişinin seslendirdiği zaman aralığının belirlenmesi ve ses kaydındaki konuşmacıların seslendirdiği bölümlerin ayrı ayrı segmente edilmesi işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.

4.1.9. Maskelenmiş Ses Analizi

Ses maskeleme, bir ortamda kayıt altına alınan konuşmaların yüksek müzik veya televizyon sesleriyle fiziksel maskelemeye maruz kalması olarak bilinmektedir. Özellikle yasal dinlemelerde, dinlendiğinden şüphelenen kişi tarafından kaydın kalitesini bozacak maskeleme yapılıyorsa bu ses kaydına gerçek zamanlı veya sonradan maskelenmiş ses analizi uygulanıp ses kaydında sadece konuşmanın olduğu kısımlar vurgulanabilmektedir.

4.1.10. Gerçek Zamanlı Ses Analizi

Adli ses analizleri, analizin yapıldığı zaman açısından, sesin kayıt altına alındığı esnada ve ses kaydı alındıktan sonra analiz yapılması şeklinde temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Gerçek zamanlı ses analizi, ses kaydının olduğu esnada anlık analiz yapılması işlemidir. Bu tür analizde kayıt cihazı yazılıma bağlanıp yazılım ve donanımın eşzamanlı çalışması sağlanmaktadır. Kayıt iyileştirme, spektrum analizi, maskelenmiş ses analizi gibi işlemlerin gerçek zamanlı analiz yoluyla yapılması konuşmayı net anlaşılır hale getirmekte ve konuşmacı tanımayı kolaylaştırmaktadır.

4.1.11. GSM Gürültüsü Yok Etme

IS-95 (Code Division Multiple Access, CDMA) ile birlikte günümüzün en çok kullanılan hücresel iletişim teknolojilerinden biri olan GSM (Time Division Multiple Access, TDMA) [72], kendi sinyallerine yakın olan elektronik bir cihaz üzerinde parazit oluşturabilmektedir. Cep telefonları tarafından üretilen bu titreşim sesi, cep telefonu yakınındaki bir ses kayıt cihazı ile alınan sesi anlaşılabilir hale getirerek adli ses incelemeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle ses kayıtlarında bulunabilen GSM gürültülerinin temizlenmesi, bu kayıtların daha sağlıklı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

4.1.12. Dil/Aksan Tanıma

Küresel güvenlik açısından terörizmle mücadele ve istihbarat alanında dil ve aksan tanımanın önemi gittikçe artmaktadır [73]. Dil/Aksan tanıma analizi, incelemeye konu olan ses kaydındaki konuşmacıların hangi ülkeden ve daha da ötesi hangi yöreden olduğunu tespit etmeye yönelik çalışmaları içermektedir. İşitsel yol ile yapılan dil/aksan tanıma her ne kadar doğru sonuçlar üretebiliyor olsa da otomatik dil/aksan tanımanın gerçek zamanlı ses analizi ile bütünleştirilip yapılması adli ses analistlerine başta zaman yönetimi olmak üzere her açıdan fayda sağlamaktadır.

4.2. Adli Ses İncelemelerinde Zorluklar

Ses delillerinin incelenmesinde diğer delil türlerinde (disk, RAM vs.) olduğu gibi bir takım zorluklarla karşılaşlabilmektedir. Adli ses incelemelerinde:

- Mevcut ses inceleme yazılımlarının, otomatik ses analizlerinde eksiklikler barındırması nedeniyle adli ses incelemelerinin çoğunlukla incelemecinin işitsel kabiliyetine bağlı olarak gerçekleştirilmesi
- Dijital ses kayıtları üzerinde yazılımsal olarak yapılan manipülasyonların analog kayıtlar üzerinde yapılan fiziksel değişikliklere göre daha zor tespit edilmesi
- Ses benzerlikleri yoluyla ses sahteciliği
- Delil olarak kullanılabilecek bozuk (noised/distorted) ses kayıtlarının, iyileştirme çalışmaları sırasında delil niteliğinin (orjinalliğinin) bozulabilmesi riski
- Alışkanlık (sigara, alkol vs.), yaş, ve hastalık gibi etmenlerin ses üzerinde doğrudan değişiklik etkisinin bulunması

gibi zorluklarla karşılaşmaktadır.

4.3. Adli Ses İncelemelerinde Kullanılan Yazılımlar ve Bu Yazılımların Karşılaştırılması

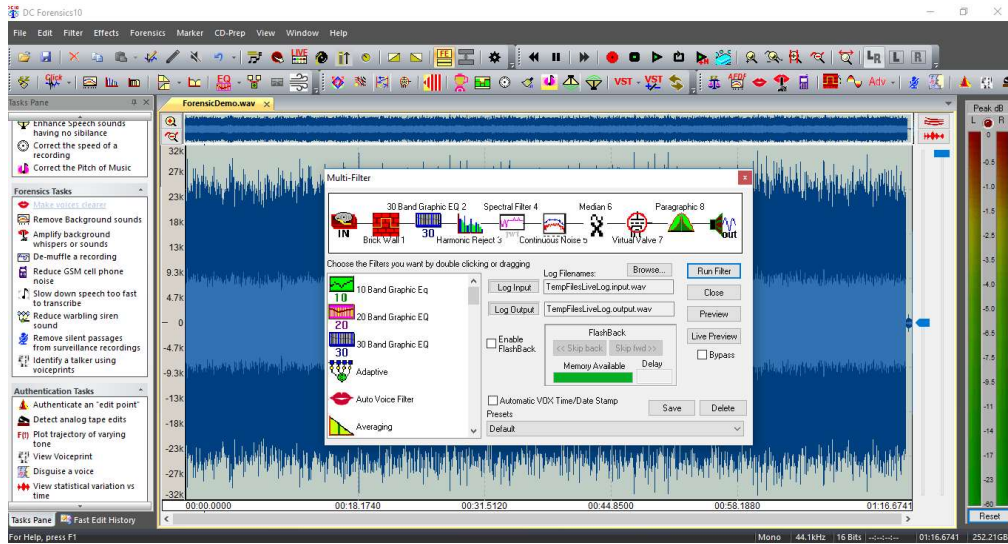
Ses incelemede kullanılabilecek sayısız açık kaynak veya ücretli yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımların adli açıdan ses incelemelerinde kullanılabilmesi için konuşma çözümleme, kayıt bütünlüğünün doğrulanması, spektrum analizi, otomatik formant frekansları tespiti,

kayıt iyileştirme, birden çok konuşmacıyı ayırt etme ve gerçek zamanlı ses analizi gibi bir takım adli ses analiz çalışmalarını gerçekleştirebilmesi gerekmektedir.

4.3.1. Adli Ses İnceleme Yazılımları

4.3.1.1. DC/Live Forensics

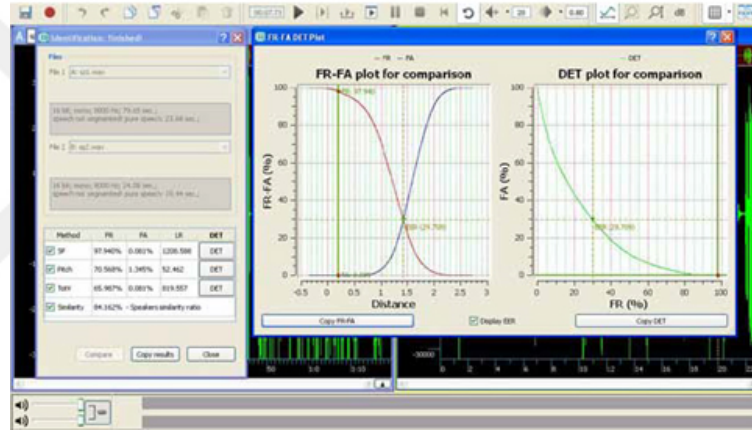
DC/Live Forensic, 1995 yılında A.B.D'nin Pensilvanya eyaletinde, Windows işletim sistemine sahip bilgisayarlar için ses analiz yazılımları üretmeye başlayan TracerTek firması tarafından, ilk sürümü 2000 yılında çıkarılan adli ses analizinde kullanılabilecek lisanslı bir yazılımdır. İçerisinde kayıt temizleme, arka plan gürültüsü azaltma, fısıldamaları vurgulama, GSM gürültülerini yok etme, tapeleştirme (transkripsiyon) için hızlı bir ses kaydını yavaşlatma, canlı analizde sessiz kısımları yok etme ve ses izi kullanarak konuşmacı kimliklendirme gibi adli ses incelemeye münhasır özellikleri barındırmaktadır. DC/Live Forensic ayrıca Şekil 4.1'deki gibi birçok filtreyi kullanıcının belirlediği sırayla uygulayabilmektedir [43].



Şekil 4.1. DC/Live Forensic 10 programı adli ses inceleme ve filtreler menüsü

4.3.1.2. SIS II

SIS II, merkezi Rusya’da bulunan ve ürünleri 75’ten fazla ülkede kullanılan STC firması tarafından “görünür ses” olarak tabir edilen ses sinyallerinin görseli üzerinden analizler gerçekleştirmek için üretilmiş bir yazılımdır. SIS II yazılımı ile konuşmacı teşhis ve tanıma yönelik ses sinyalinin karakteristiğinin otomatik tespiti, bir kayıttaki sesli kısımların sessiz kısımlardan ayırt edilebilmesi işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Otomatik konuşmacı kimliklendirme de elde ettiği güvenli sonuçların NIST tarafından doğrulandığı SIS II yazılımı, adli vakalar için önemli bir özellik olan rapor oluşturma işlevini de yapmaktadır [45].



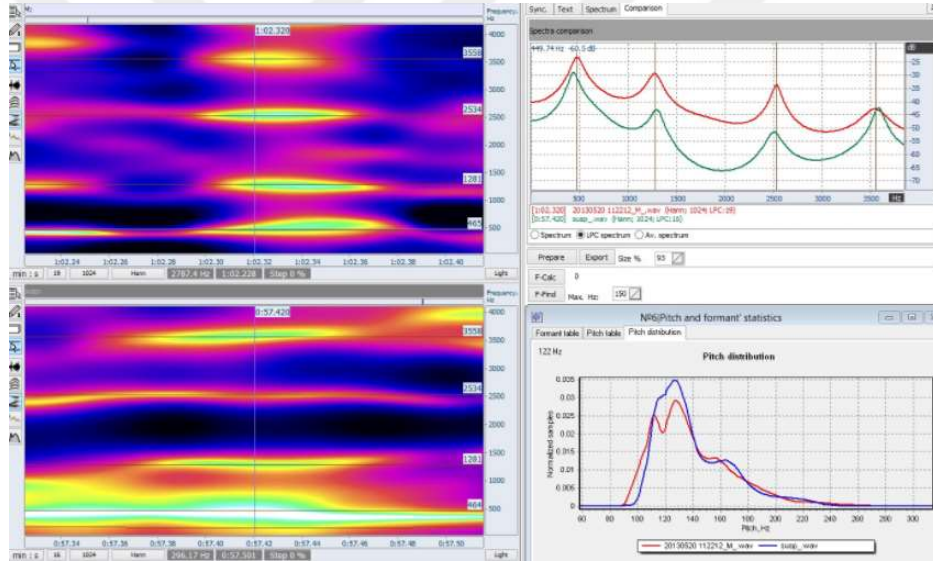
Şekil 4.2. SIS II yazılımının arayüzü

4.3.1.3. SESTEK – Ses İnceleme Sistemi

2000 yılında ses teknolojileri ve çağrı merkezi uygulamaları gibi alanlarda faaliyet göstermeye başlayan yerli SESTEK firması tarafından geliştirilen ses inceleme sistemi, adli bilimler alanına özgü ses biyometrisi çözümü olarak bilinmektedir. Bu sistem ile genel olarak konuşmacının sesinden yola çıkarak kimlik tespiti, adli rapor oluşturma, iki ses dosyasını karşılaştırılıp delil olarak kullanılabilme istatistiklerinin çıkartılması (LR hesaplama), formant doğrulama, konuşma ve sessiz bölge tespiti ve cinsiyet ayırma özelliklerini barındırmaktadır [46].

4.3.1.4. Acu-Expert Audio Forensic

Merkezi İrlanda’da bulunan ve çoğunlukla ses/görüntü yoluyla gizli takip, duvar ötesi tespit ve ses inceleme sistemleri üreten Acustek firması tarafından geliştirilen Acu-Expert Audio Forensic ses inceleme sistemi gürültü temizleme, konuşmacı kimliklendirme, kayıt bütünlüğünün doğrulanması, tapeleştirme, “kara kutu” olarak nitelendirilen cihazlardan alınan kayıtların incelenmesi, adli vakalar için rapor oluşturabilme gibi işlemleri gerçekleştirmektedir. Acu-Expert Audio Forensic yazılımı Şekil 4.3’te gösterildiği gibi LPC-spektrogram, enerji ve formant gibi özelliklerden faydalananak konuşmacı karşılaştırabilmektedir [47].



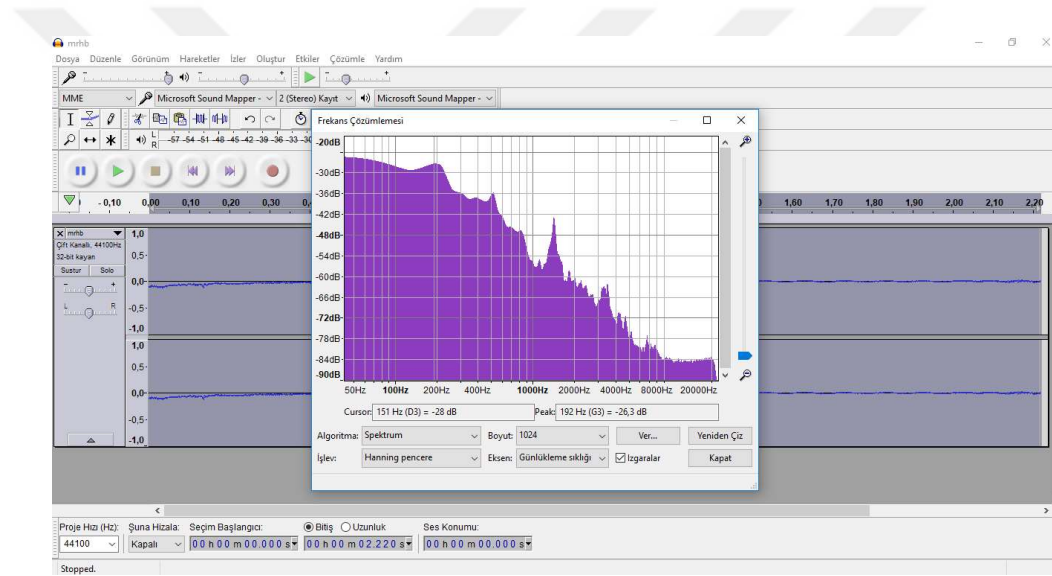
Şekil 4.3. Acu-Expert Audio Forensic yazılımı konuşmacı karşılaştırma modülü

4.3.1.5. CEDAR Audio Forensic

1988 yılında İngiltere’nin Cambridge Üniversitesine bağlı kurulan CEDAR firması tarafından üretilen CEDAR Audio Forensic sistemi askeri istihbarat, sınır kontrolü, terörizmle mücadele ve uyuşturucu ile mücadele gibi konularda konuşmaların canlı takibi ve analizi, kayıt iyileştirme, spektrum analizi ve adli makamlar için farklı formatlarda rapor oluşturma görevlerini gerçekleştirmektedir [48].

4.3.1.6. Audacity

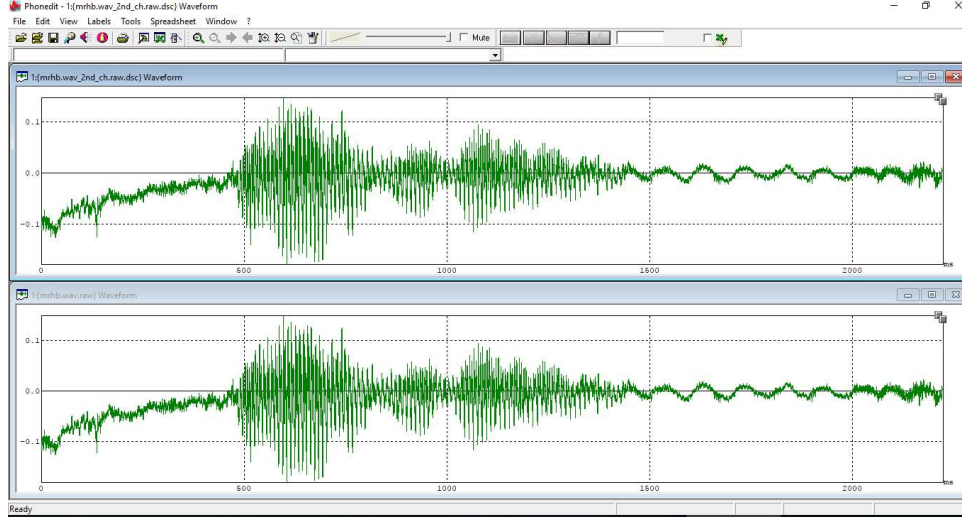
Audacity, dünya çapında farklı ülkelerden geliştiricilerin hem teknik hem de bağışsal destek sağladığı açık kaynak kodlu bir ses kayıt ve düzenleme programıdır. Tamamen adli ses inceleme yazılımı olarak nitelendirilemeyecek fakat adli bilişim alanında ses incelemeleri için yardımcı kaynak sayılabilecek olan Audacity programı ile ses kaydı gerçekleştirme, mevcut ses kaydı yükleyip düzenleyebilme, çok sayıda efekt ve filtre uygulama, gürültü ve eko azaltma ve spektogram analizi gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir [49].



Şekil 4.4. Audacity programı arayüzü

4.3.1.7. PhonEdit

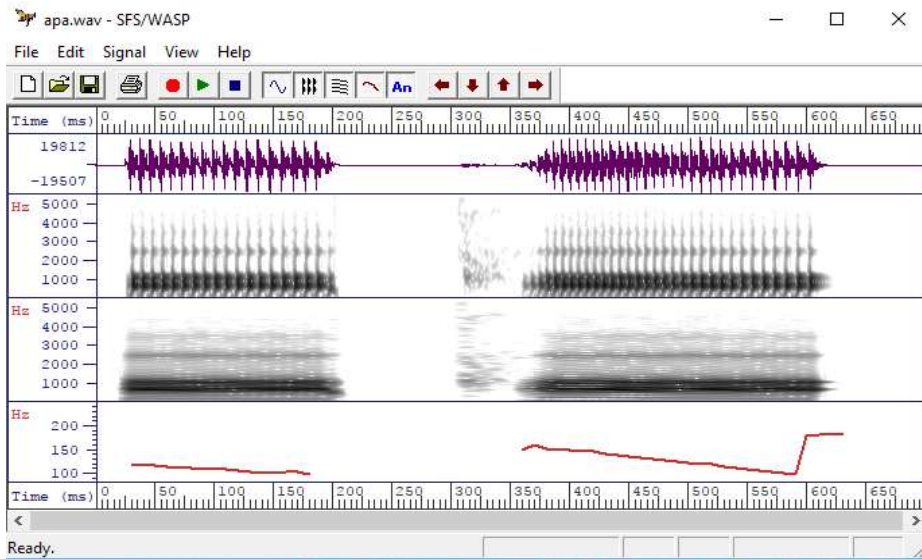
Fransa'nın Aux-en-Provence şehrindeki Laboratoire Parole & Langage laboratuvarlarında geliştirilen PhonEdit yazılımı ses, aerodinamik, artikulator ve elektro-fizyolojik sinyallerini analiz edebilmek için üretilmiştir. Ücretsiz bir ses analiz yazılımı olan PhonEdit spektogram, LPC, ZCR, Ön-Vurgu (pre-emphasis) analizleri gerçekleştirebilmektedir [50].



Şekil 4.5. PhonEdit programı arayüzü

4.3.1.8. SFS/WASP (Windows Tool for Speech Analysis)

SFS/WASP, Londra’da bulunan UCL üniversitesi tarafından geliştirilen ses kayıt, görüntüleme ve analiz programıdır. Ücretsiz bir yazılım olan SFS/WASP ile ses kaydı alınıp tekrardan oynatılabilmekte, bu ses kaydı diske kaydedilip diskten tekrar okunabilmektedir. Sadece Windows platformu için geliştirilmiş olan SFS/WASP ile ayrıca spektrogram ve temel frekans izleri görüntülenebilmektedir [51].



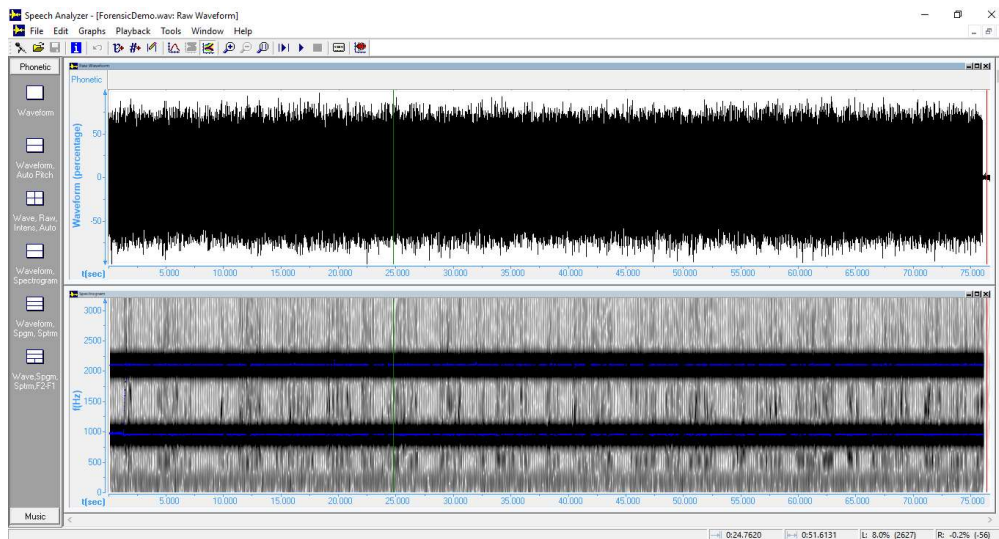
Şekil 4.6. SFS/WASP programı spektrogram ve temel frekans görüntüleri

4.3.1.9. Agnitio SIFT

2004 yılında İspanya, Madrid merkezli kurulan ve ses biyometrisi konusunda 40'tan fazla ülkeye destek sağlayan Agnitio firması tarafından üretilen SIFT, araştırmaları ile adli ve istihbarat makamlarına katkı sağlayan kuruluşlar için konuşmacı kimliklendirme üzerine yoğunlaşmış bir yazılımdır. SIFT içerisinde kayıt bütünlüğünün doğrulanması, gürültülü ve sessiz kısımları ayırtırmak için otomatik ses aktivite detektörü ve 1000 farklı konuşmacının ses biyometrisini kayıt altına alan veri tabanı barındırmaktadır. Birden fazla konuşmacının bulunduğu bir kayıttan her konuşmacının ayrı ayrı tespit edilmesi işini otomatik olarak gerçekleştirmesi SIFT yazılımının en önemli özelliğini teşkil etmektedir [52].

4.3.1.10. SIL Speech Analyzer

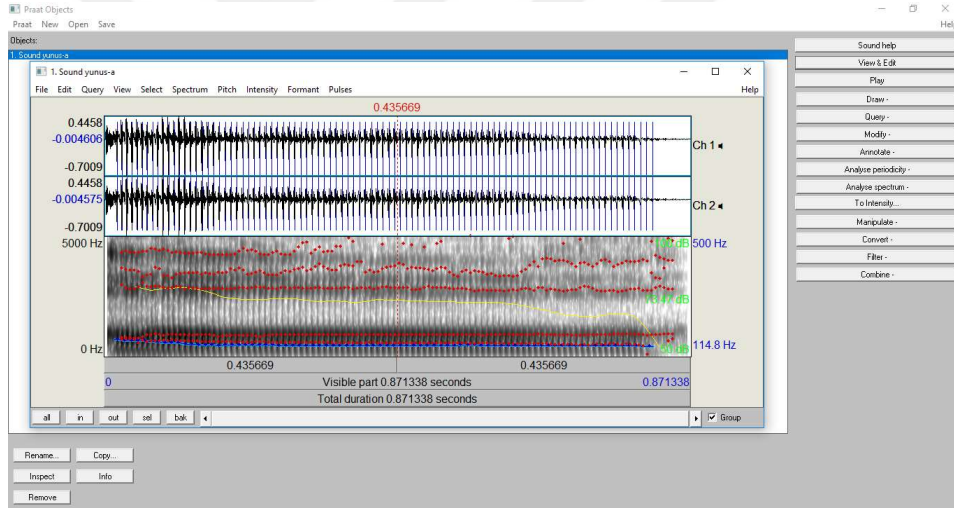
Speech Analyzer, kar amacı gütmeyip sadece bağışlar ile yönetilen ve merkezi A.B.D, Dallas'ta bulunan uluslararası SIL organizasyonu tarafından dil geliştirmelerine destek amaçlı geliştirilen bir yazılımdır. SIL genel olarak temel frekans belirleme, spektogram analizi, süre ölçümleri, müzik kayıtlarının etnik analizi ve dil öğrenimi için ses üretim simülasyonu gibi modüller içermektedir [53].



Şekil 4.7. Speech Analyzer dalga ve spektogram görüntüleri

4.3.1.11. Praat

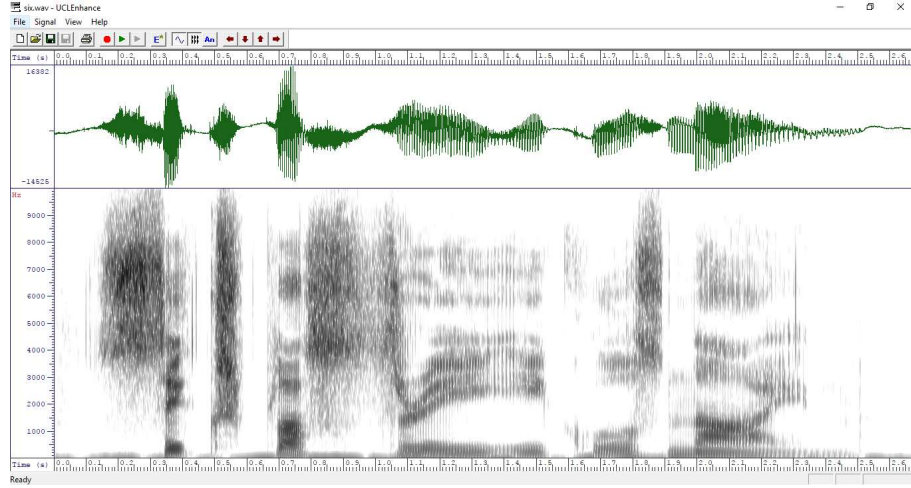
Hollanda’da bulunan Amsterdam Üniversitesi’nden Paul Boersma and David Weenink’in açık kaynak kodlu olarak geliştirdiği Praat konuşma/ses sinyalleri konusunda akademik çalışmalarda en çok kullanılan yazılımlardan biri olarak bilinmektedir. Konuşma analizi başlığı altında spektrogram, perde, formant, yoğunluk, titreme, parıltı ve ses kırılması analizleri gerçekleştiren Praat yazılımı konuşma sentezleme ve konuşma manipülasyon (filtreler) gibi işlemleride başarabilmektedir. Praat yazılımının, bir konuşma sinyalinde bulunan ünlü harflere ait formant frekanslarının otomatik olarak belirleyebilmesi, formant frekansları kullanılarak aksan tanıma ile ilgili yapılan akademik çalışmalarda bu yazılımın tercih edilebilirliğini arttırmaktadır [54].



Şekil 4.8. Praat yazılımı otomatik formant frekans takibi ekranı

4.3.1.12. University College London (UCL) Enhance

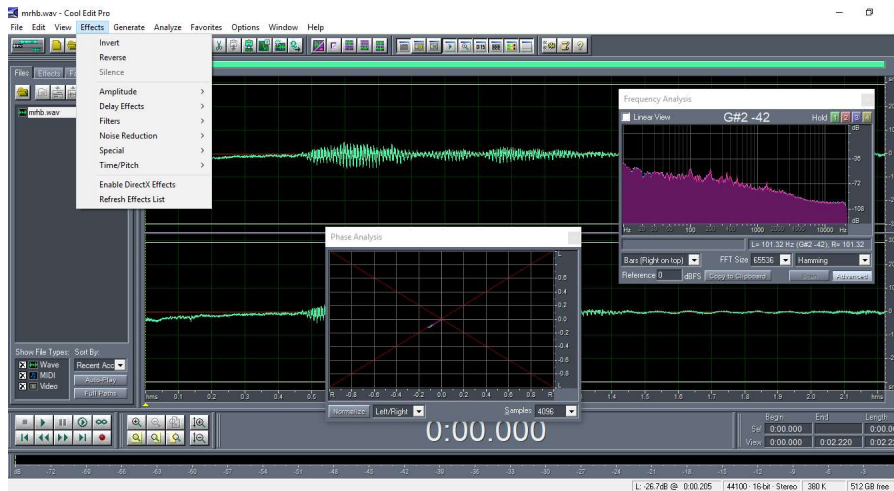
İngiltere’de bulunan UCL üniversitesinin Ses ve Dilbilimi bölümü tarafından konuşma kayıtlarının anlaşılabilirliğinin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilen UCL Enhance yazılımı ses sinyallerinin genliklerini değiştirmek ve kararlı halde bulunan gürültülerini yok etmek için bazı standard teknikler içermektedir. Ücretsiz olarak ve sadece Windows işletim sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olan yazılım ses sinyallerinin spektrum analizinde gerçekleştirmektedir [55].



Şekil 4.9. UCL Enhance yazılımı spektrogram analizi

4.3.1.13. CoolEdit

Merkezi A.B.D. Kaliforniya eyaletinde bulunan Adobe Systems firmasının, satın aldıktan sonra Adobe Audition'a çevirdiği CoolEdit yazılımı ses kayıtları üzerinde kesme, birleştirme, 45 farklı şekilde filtreleme, işlemlerini gerçekleştirmektedir. Adobe Systems'ten önce CoolEdit'i elinde bulunduran Syntrillium firması bu yazılımı sadece Windows işletim sistemleri için geliştirmiştir. CoolEdit'in spektrum analizi yapabilme ve filtreler ile kayıt iyileştirebilme kabiliyetleri, adli ses incelemeleri açısından iki önemli özelliğe sahip olduğunu göstermektedir [56].



Şekil 4.10. Syntrillium CoolEdit programı frekans ve faz analizi

4.3.1.14. Acoustica 7

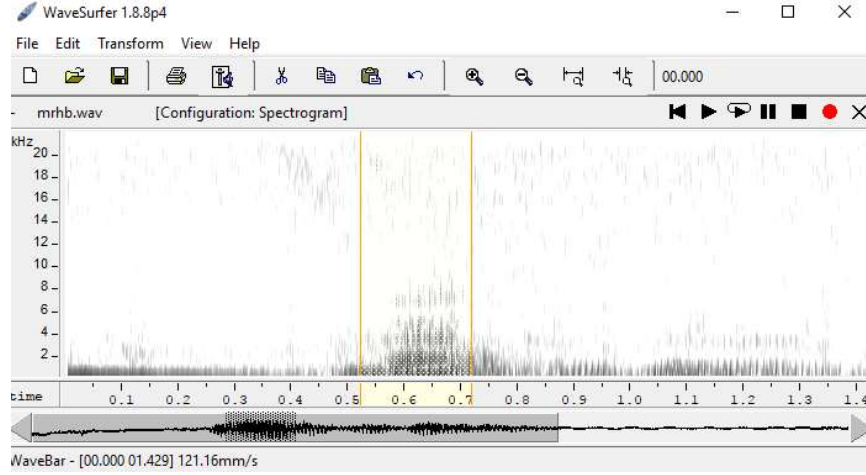
1987’de Norveç’te kurulan ve genel olarak dijital sinyal işleme ve ses kaydı düzenleme programları geliştiren Acon Digital firmasının bir ürünü olan Acoustica Mac ve PC (Windows işletim sistemi yüklü) sistemlerde kullanılmaktadır. Lisanslı kullanımı gerektiren Acoustica yazılımı kayıt restorasyonu, çoklu kayıt düzenleme, filtreler ile gürültü azaltma, spektogram ve dalgacık analizi gibi işlemler gerçekleştirebilmektedir [57].



Şekil 4.11. Acoustica 7 kayıt düzenleme genel ekranı

4.3.1.15. WaveSurfer

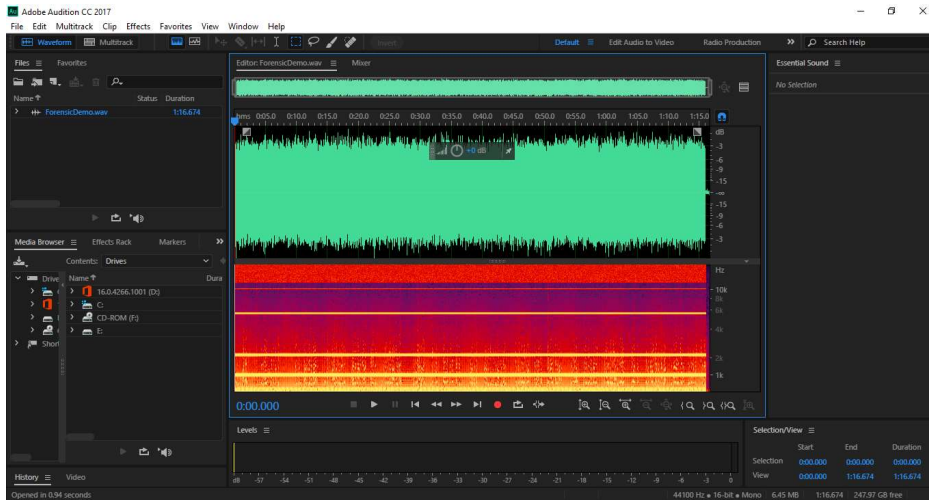
İsveç’te bulunan KTH üniversitesi tarafından açık kaynak kodlu olarak geliştirilen WaveSurfer yazılımı akustik çalışmaları için geniş çaplı kullanılan bir ses editörü olarak bilinmektedir. Basit arayüze sahip WaveSurfer yazılımı genel anlamda ses dalgalarını görüntüleme, spektogram analizi, bir kayda ait perde görüntüleme ve transkripsiyon gibi işlemleri gerçekleştirebilmektedir. WaveSurfer ayrıca kayıt üzerinden kesit alma, sıfır geçiş oranını ayarlama, ses bitiminde sesi azaltma, normalizasyon, yankı ekleme/çıkarma, sesli bir bölgeyi sessizlikle değiştirme gibi temel ses düzenleme işlemlerini gerçekleştirme olanağı sağlamaktadır. [58].



Şekil 4.12. Wavesurfer programı ses kaydına ait spektrogram görüntüsü

4.3.1.16. Adobe Audition

Merkezi A.B.D. Kaliforniya eyaletinde bulunan Adobe Systems firması tarafından daha önce hazır bulunan CoolEdit programı üzerine geliştirilen Adobe Audition yazılımı, içerisinde barındırdığı ses analiz ve düzenleme kabiliyetleri ile ses iş istasyonu olarak nitelendirilmektedir. Bulut depolama desteği ile Adobe Audition ile yapılmış çalışmalar buluta aktarılabilir. Adobe Audition ile videolara ses katmanları eklenebilir, ses kayıtlarına farklı çeşit filtreler uygulanabilir, kayıt iyileştirme ve spektrogram görüntüleme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir [59].



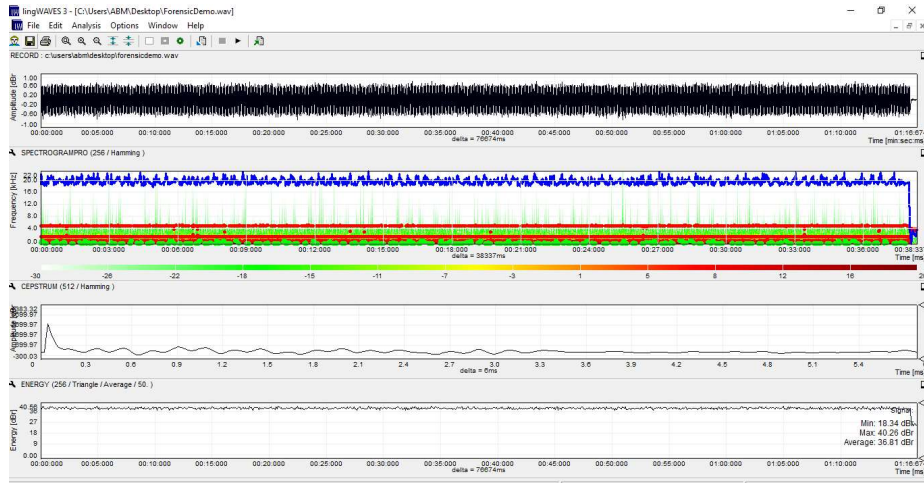
Şekil 4.13. Adobe Audition programı arayüzü

4.3.1.17. IKAR Lab

IKAR Lab, merkezi Rusya’da bulunan ve ürünleri 75’ten fazla ülkede kullanılan STC firması tarafından ses sinyal analizi için üretilmiş profesyonel yazılım ve donanımların bir araya gelmesiyle oluşan sistemdir. Ses işleme, ses analizi, ses iyileştirme ve ses karşılaştırma gibi çok sayıda işlevi gerçekleştirme olanağı sağlayan IKAR Lab, görselleştirme araçları ile ses ve konuşmanın derinlemesine analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. İçerisinde zamanla güvenilirliği test edilen gelişmiş algortimalar barındırmaktadır. Lisanslı bir ürün olan IKAR Lab dünya üzerinde 36’dan fazla ülkede ve 350’yi aşkın tesiste halihazırda kullanılmaktadır [44].

4.3.1.18. LingWaves

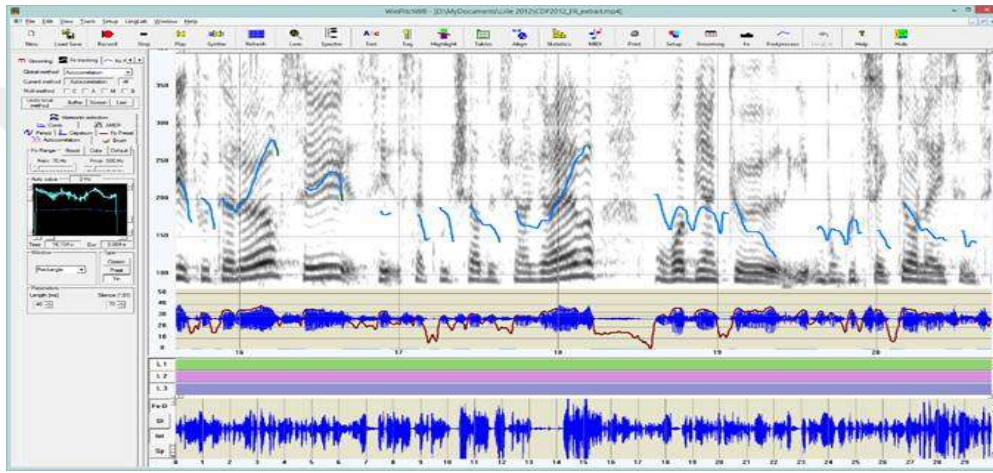
Konuşma ve ses değerlendirme araçları üreten Alman firması WEVOSYS tarafından medikal araştırmalar ve biyo-geribildirim için geliştirilen LingWaves yazılımı LPC, FFT, otomatik kolerasyon gibi kısa zamanlı ve enerji, temel frekans gibi uzun zamanlı ses analizleri gerçekleştirmektedir. LingWaves yazılımı ayrıca ses sinyallerine yüksek ve alçak geçirgen filtre ile band-stop ve bant-pass filtreleri uygulayabilmektedir [60].



Şekil 4.14. Adobe Audition programı arayüzü

4.3.1.19. WinPitch 10

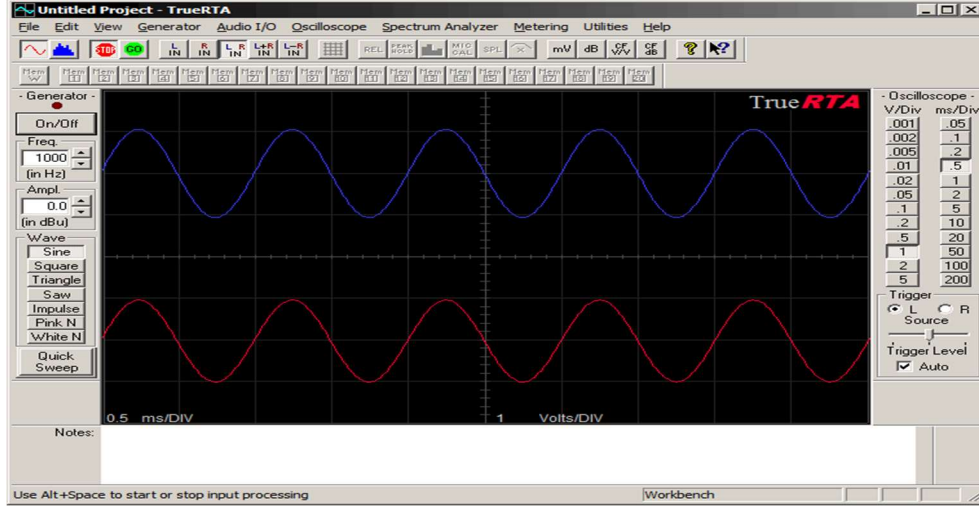
Kanada merkezli Pitch Instruments firması tarafından geliştirilen WinPitch yazılımı, prosodik araştırmalar, gerçek zamanlı spektogram analizi, temel frekans çoklu takibi, video ve ses analizi işlevlerini gerçekleştirebilmektedir. Windows ve uygun emülatör yüklenmiş Mac işletim sistemi yüklü bilgisayarlarda kullanılabilen WinPitch, 30 günlük deneme sürümünün ardından lisans gerektirmektedir [61].



şekil 4.15. WinPitch yazılımı spektogram ve perde analizi ekranı

4.3.1.20. TrueRTA

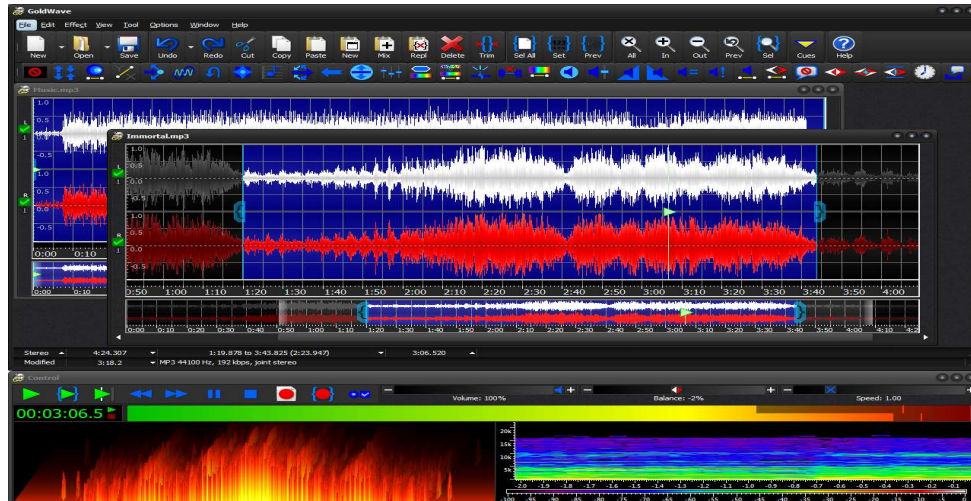
A.B.D'nin Tennessee eyaletinde bulunan True Audio firması tarafından geliştirilen TrueRTA, temel ses kapasitesine sahip Windows işletim sistemi yüklü bilgisayarlarda ses kayıtlarının gerçek zamanlı analizi, çok düşük bozuluk derecesiyle sinyal üretme ve osiloskop emülatörü özelliklerine sahip lisanslı bir uygulamadır. TrueRTA yazılımı ile genel olarak akustik ortamların gürültü karakteriştiğini analiz etme, farklı ses cihazlarının bozulma (distortion) zelliklerini tespit etme ve farklı cihazlardan alınan ses kayıtlarının frekans özelliklerini analiz etme gibi işlemleri gerçekleştirilebilmektedir [62].



Şekil 4.16. TrueRTA yazılımı osiloskop ekranı

4.3.1.21. GoldWave

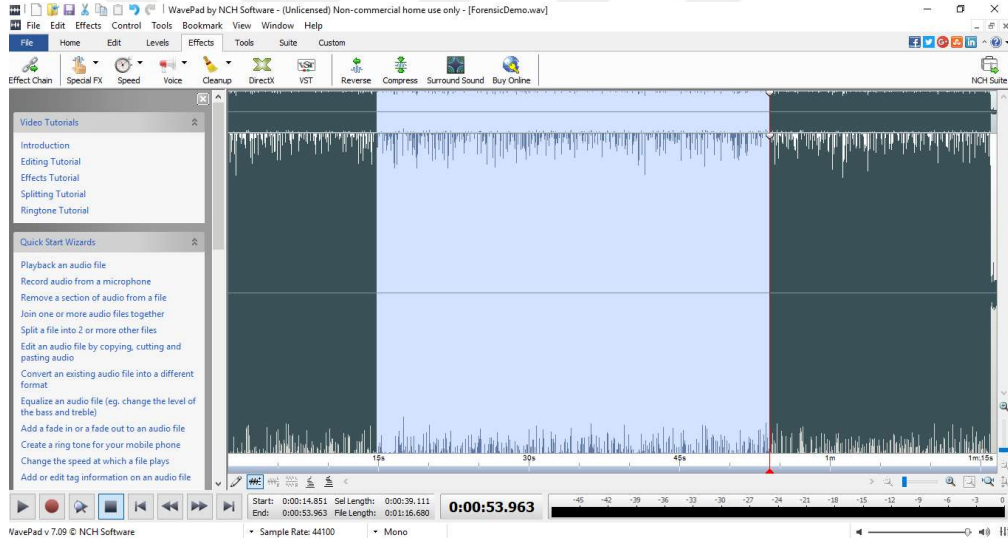
Merkezi Kanada’da bulunan GoldWave firmasının geliştirmiş olduğu GoldWave yazılımı temel olarak ses kaydetme, kayıt restorasyonu, gürültülü kayıt temizleme gibi özellikleri barındırmaktadır. GoldWave yazılımı ile ayrıca wav, mp3, ogg, aiff, au ve vox uzantılarına sahip ses dosyalarına format dönüşümü uygulanabilmektedir [63].



Şekil 4.17. GoldWave yazılımı ses inceleme ekranı

4.3.1.22. WavePad

A.B.D’de bulunan NCH Software firması tarafından geliştirilen WavePad Windows ve MAC işletim sistemine sahip bilgisayarlar için lisanslı bir ses ve müzik düzenleme yazılımıdır. WavePad yazılımı ile ses kayıtları üzerinde kısmı parçalar alınıp düzenleyebilme, gürültü azaltma, yankı ekleme/çıkarma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Genelde wav ve mp3 uzantılı dosyalarla daha iyi çalışan WavePad gsm, vox, wma, aif, au ve flac gibi farklı formatlarla çalışma imkanı da sunmaktadır. WavePad yazılımı ses kaydına telefon veya AM radyo efekti ekleme, kayıt hızlandırma/yavaşlatma, canlı ses değiştirme özellikleri göz önünde bulundurulduğunda anti-adli bilişim alanında kullanılabildiği görülmektedir [64].

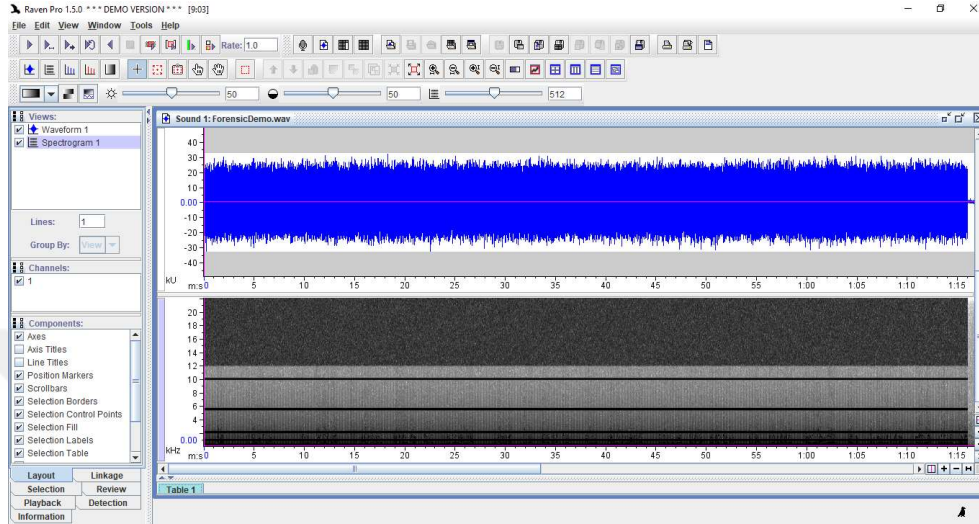


Şekil 4.18. WavePad yazılımı ses inceleme ekranı

4.3.1.23. Raven

A.B.D’nin New York eyaletinde bulunan Cornell Üniversitesine bağlı Cornell Ornitoloji Laboratuvarları’nda biyoakustik araştırma programı kapsamında geliştirilen Raven, seslerin kaydetmesi, ölçümlenmesi, görselleştirilmesi işlevlerini gerçekleştirebilen bir akustik sinyal analiz yazılımıdır. JRE kurulu Windows, Linux ve MAC işletim sistemine sahip bilgisayarda çalışabilen Raven yazılımı ile aif, aiff, wav ve flac dosya

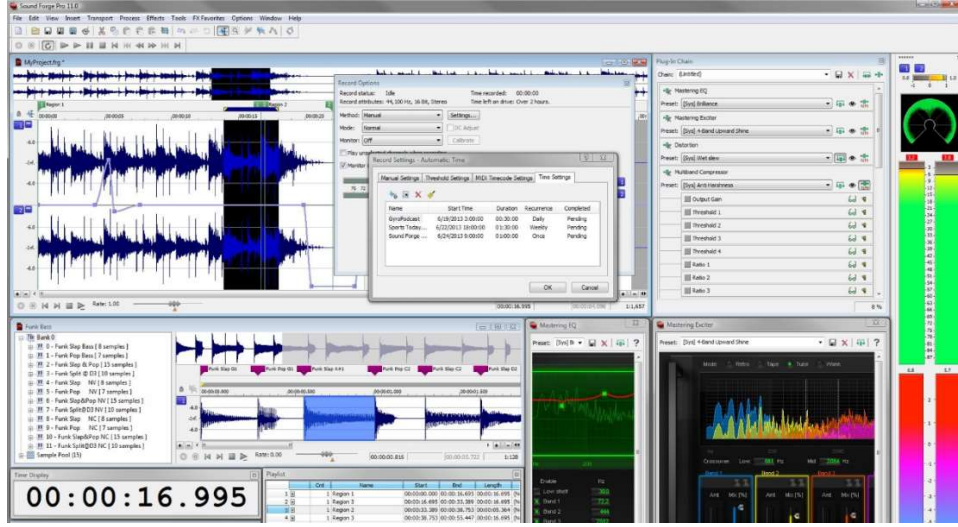
uzantılarında herhangi birine sahip ses kaydı içerisinde kullanıcı tarafından belirtilen ses örüntüsünü tespit etme, ses sinyallerini dalga formu ve spektrogram pencerelerinde görüntüleme, gerçek zamanlı ses analizi işlemlerini yapabilmektedir [65].



Şekil 4.19. Raven yazılımı dalga formu görüntüleme

4.3.1.24. Sound Forge Pro 11

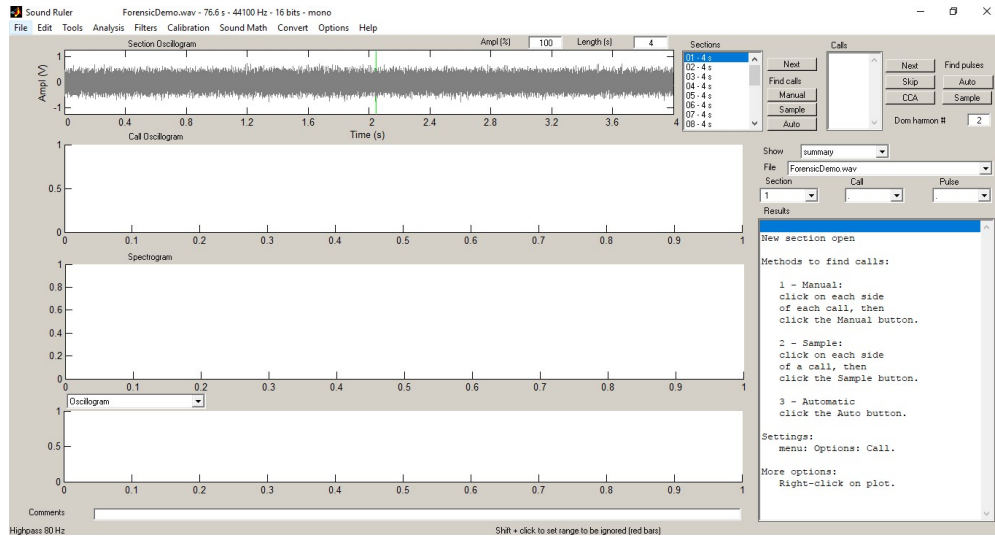
Almanya’da bulunan MAGIX Software firmasının geliştirmiş olduğu Sound Forge yazılımı ile kayıt iyileştirme, spektral gürültü çıkarma, donanımdan kaynaklanan cızırtı şeklindeki gürültüleri ve klima, amplifikatör vs. cihazlarının oluşturduğu istenmeyen ortam seslerini giderme, insan sesindeki “s”, “z”, “sh” gibi sessiz harflerin baskınlığını azaltma ve yankı, koro, bozulma, tutukluk vs. efekteri uygulama gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Sound Forge yazılımı Soft Cut özelliği ile kesilip birleştirilmiş ses kayıtları arasında yumuşak geçiş sağlayarak anti-adli bilişim alanında kullanımını mümkün kılmaktadır [66].



Şekil 4.20. Sound Forge Pro 11 yazılımı arayüzü

4.3.1.25. SoundRuler

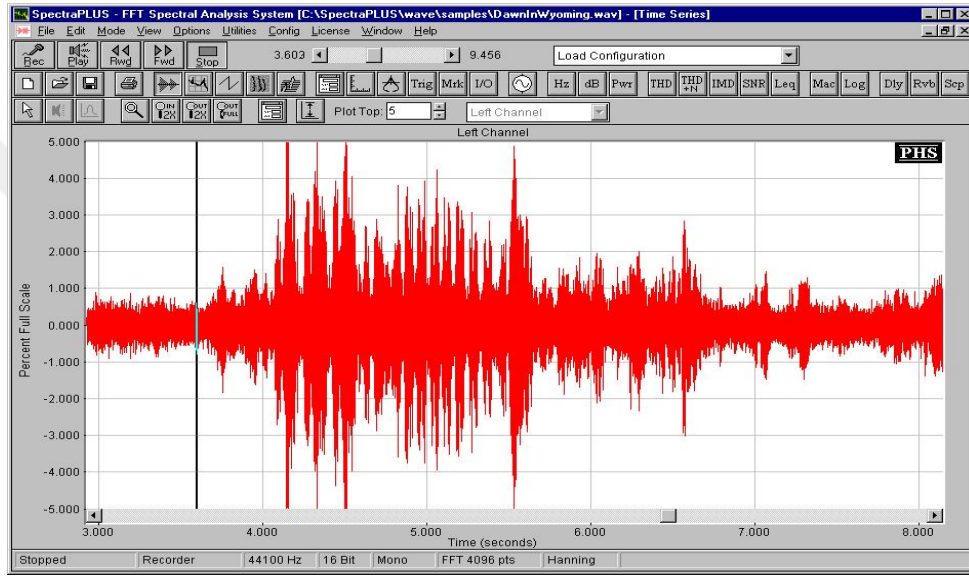
Bütünleşik biyoloji alanında çalışan A.B.D’li Marcos Gridi-Papp tarafından 2011 yılında açık kaynak kodlu olarak geliştirilen SoundRuler, akustik eğitimi için sesi ölçüp grafiğe dökabilen bir ses analiz yazılımıdır. SoundRuler yazılımının geliştirilmesinin asıl amacı doğal seslere olan farkındalığı arttırmaktır. [67].



Şekil 4.21. SoundRuler yazılımı arayüzü

4.3.1.26. SpectraPLUS

A.B.D. merkezli Pioneer Hill Software firmasının geliştirdiği SpectraPLUS yazılımı ses sinyalleri üzerinde gerçek zamanlı spektral analiz olanağı sağlamaktadır. SpectraPLUS yazılımı ile ayrıca sinyal üretime, hızlı fourier dönüşümü, sayısal filtreleme ve bozukluk (distortion) analizi işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. [68].



Şekil 4.22. SpectraPLUS dalga formu gösterim ekranı

4.3.1.27. QuickEnhance Plug-in

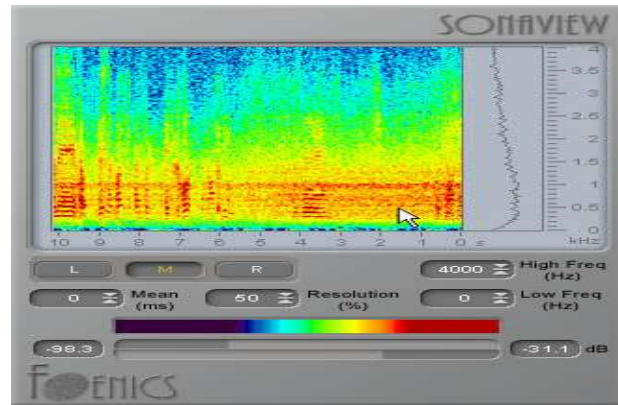
2013 yılında A.B.D’de kolluk kuvvetleri, adli birimler ve istihbarat kurumları için ileri düzeyde dijital delil temizleme sistemleri üreten Salient Sciences firması tarafından geliştirilen QuickEnhance Plug-in, Windows işletim sistemi yüklü bilgisayarlarda bulunan Adobe Audition, Acoustica ve Sound Forge gibi yazılımlar üzerinde çalışan gelişmiş ses filtreleme/temizleme ve adli ses inceleme eklentisidir. QuickEnhance Plug-in ile ses kayıtlarındaki arka plan gürültüleri temizlenerek sesin anlaşılabilirliği arttırılabilmektedir [69].



Şekil 4.23. Acoustica yazılımı üzerine kurulan QuickEnhance Plug-in görüntüsü

4.3.1.28. Foenics

Almanya’da bulunan Cube-Tec firması tarafından geliştirilen Foenics yazılımı ile ses kayıtlarındaki vızıltı şeklindeki gürültüler ve çarpıtılmış frekanslar iyileştirilebilmektedir. Adli bilişim uzmanlarına yönelik üretilen Foenics yazılımının en önemli özelliklerinden biri cep telefonu kayıtlarındaki GSM parazitlerini yok edebilmesidir. Foenics içerisinde ayrıca ses sinyallerinin spektrum analizini gerçekleştiren SonaView, sesin anlaşılabilirliğini arttıran Buzz-Removal ve yüksek geçirgen, alçak geçirgen, band-stop, band-pass vs. filtrelerini uygulayabilen FrequencyBand-Removal gibi araçlar bulunmaktadır [70].



Şekil 4.24. Foenics içerisinde bulunan SonaView aracıyla spektrogram analizi

Tablo 4.1. Ses incelemelerinde kullanılan yazılımların adli açıdan karşılaştırılması [79].

YAZILIM DEĞERLENDİRME		DC Forensics	STC SIS II	SESTEK	Acu-Exp. Forensic Audio	CEDAR Cambr.	Audacity	PhonEdit	SFS/WASP	Agnitio SIFT	Speech Analyzer	Praat	UCL Enhance	CoolEdit	Acoustica 7	WaveSurfer	Adobe Audition	IKAR Lab	lingWaves	WinPitch 10	TrueRTA	GoldWave	WavePad	Raven	Sound Forge	SoundRuler	SpectraPLUS	QE Plug-in	C-T FOENICS
Teknik	Konuşma çözümleme (transkripsiyon)	-	✓		✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kayıt bütünlüğünün doğrulanması	✓	✓		✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
	Otomatik ses izi eşleştirme (Konuşmacı teşhis ve tanıma)	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
	Spektrum analizi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Otomatik formant frekansları tespiti	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
	Kayıt iyileştirme (filtreler)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	Konuşmacı profili (yaş, cinsiyet) belirleme	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Birden çok konuşmacıyı ayırt edebilme	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Maskelenmiş ses analizi	✓	✓		-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Gerçek zamanlı ses analizi	✓	-		-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-
	GSM gürültülerini yok etme	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓
	Dil-Aksan tanıma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Performans	Lisans gereksinimi																												
	Ücretli	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	Ücretsiz	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
	USB Linsansı (dongle)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-
	Eklenti desteği	-	-		-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-
	Platform																												
	Windows	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Linux	-	-				✓	✓	-		-	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-
	MAC	-	-				✓	-	-		-	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-
	Backup	✓	✓		✓		✓	-	-		✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	Ağ/Bulut’tan dosya aktarımı ve yönetme	-	-			✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
	Arayüz kişiselleştirme	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-
	Önceden kaydedilmiş (preset) yüklenebilir ayarlar	✓	-				-	-	-		-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-
	Gelişmiş klavuz ve yardım	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Raporlama desteği	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-

Ses incelemelerinde kullanılan yazılımların adli bilişim açısından karşılaştırılması sonucunda özellikle takip ve istihbarat alanda önemli bir yeri olan aksan tanımının mevcut hiçbir yazılım ile gerçekleştirilmediği görülmektedir.

Adli ses incelemelerinde bir ses kaydındaki konuşmacının aksanının tanınması konuşmacının etnik yapısı ile ilgili önemli ipuçlarını ortaya koymaktadır. Mevcut sistemlerde konuşmacı aksanının belirlenmesinde başarı, dinleme işini yapan görevlinin işitsel (kulak yoluyla) kabiliyetine ve aksan bilgisine dayanmaktadır. Bu işlemin işitsel yol yerine otomatik olarak gerçekleştirilmesi için bir dilin her ünlü harfine ait farklı aksan seslendirmelerinin formant frekans değerleri analizinin yapılması gerekmektedir. Aksan analizinde formant frekansı değerlerinin farklılıklarının analiz edilmesinin nedeni formant frekans değerlerinin kişiye münhasır vokal yol şekliyle ilgili olduğu ve vokal yol gelişiminin kişinin yetiştiği bölgeden etkilendiği sebeplerine dayanmaktadır. Bu sebepten ötürü bir dile ait aksanların analizi ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalarda formant frekansı değerlerine dayalı analizler gerçekleştirilmiştir.

5. AKSAN ANALİZİ İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Ekrem Malkoç, “*Türkçe Ünlü Formant Frekans Değerleri ve Bu Değerlere Dayalı Ünlü Dörtgeni*” çalışması ile Türkçe ünlü harfler için formant frekanslarını kullanarak ünlü dörtgenini çıkarmaya çalışmıştır. Çalışmasında 10 kadın ve 10 erkek gruplarına metinden okutma yapılarak elde ettiği kayıtlardan çıkardığı formant frekanslarını başka çalışmalar ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada ses kayıtlarından sesli bölgeleri almak için CoolEdit programı ve formant frekanslarını bu sesli ifadelerden otomatik elde etmek için ise ücretsiz Praat programını kullanmıştır. Kendisinden önce Bark değerlerine dayalı ünlü dörtgeni oluşturulmaya çalışmıştır. Formant frekansları ve Bark değerleri, ünlülerin ağız içinde çıkış yerleri açısından fark oluşturup oluşturmadığı araştırılmıştır. Çalışmasında ters ölçekli F1/F2 grafiği ile ünlü dörtgenini elde etmeye çalışmıştır. Sonuç olarak erkek ve kadınları inceleyen diğer çalışmalarla benzer sonuçlar elde etmiştir. Türkçe ünlüler için formant frekanslarına dayalı ünlü dörtgeni oluşturulması ise ünlülerin ağız içinde çıkış yerlerinin belirlenmesine farklı bir yaklaşım getirmektedir. Daha önce Bark ölçeği ile elde edilen bu ünlü dörtgeni ile karşılaştırma yapılmış ve farkın olmadığı ortaya konmuştur. Ekrem Malkoç bu çalışma ile analiz için kullanılacak veri tabanında konuşmacı sayısının fazla olmasının daha net sonuçlar elde ettiğini vurgulamıştır [34].

Oytun Türk, Ömer Şayli, A.Sumru Özsoy ve Levent M.Arslan, “*Türkçe Ünlülerin Formant İncelemesi*” çalışmasında sesin en yüksek enerjiye sahip olduğu formant frekanslarının Türkçe ünlüleri açısından tespit edilmesini işlemiştir. Çalışmada 15 yetişkin erkek, 14 yetişkin kadın, 15 erkek çocuk ve 8 kız çocuğa ait kayıtlardan faydalanılmıştır. Ses kayıtları alınırken, istanbul ağzıyla konuşan kişiler ve sınıf laboratuvar ortamından faydalanılmıştır. 16-bit 16 kHz’de SESTEK kayıt programı kullanılmıştır. Ses işaretlerinin spektogram görüntüsü için WaveSurfer programı kullanılmıştır. Her grup için (yetişkin erkek, yetişkin kadın, erkek çocuk ve kız çocuk) elde edilen formant frekans değerlerinin ortalaması ve standard sapmaları tablolar halinde verilmiştir. Formant frekanslarının belirlenmesi Matlab’ta yazılan LPC tabanlı programla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada konuşmacılara, hem yalıtılmış ünlü (doğrudan söylenen) hemde tümce içinde geçen ünlü okutulup istatistikleri ayrı tablolarda verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre erkek ve kadın konuşmacıların F1 ve F2 formant frekanslarında ayırım bulunmadığı gözlemlenmiştir. Kadınlarda F1, ön ve arka ünlüler arasındaki farkı belirlerken, erkeklerde açık kapalı ayırımını belirlemektedir. Erkeklerde F1’in 430 Hz ve 600 Hz sınırlarına göre değişmesi

ünlülerin açıklık kapalılık derecesini belirlemektedir. Bu çalışma ile ayrıca 1979'da Selen'in yaptığı çalışmada elde edilen /ı/'nın ön ve arka dil ünlüleri arasında yer aldığı sonucu kanıtlanmış olmaktadır. Ancak kadın konuşmacılarda bu ayırım gözlemlenmemiştir. Çocuklarda ünlü formant frekans değerlerinin yetişkinlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çocuklarda kız ve erkek değerleri yetişkinlere göre daha yakın olduğu sonucuna varılmıştır [35].

Özlem Batur Dinler ve Fatih Karabiber, “*Kürtçe Dilindeki Ünlüler İçin Formant Analizi*” 2017 yılında yapıları çalışmalarıyla Türkiye’de konuşulan Kürtçe dilindeki ünlü harflerin formant analizi yapılmıştır. Ünlüler yalıtılmış ünlü olarak incelenmiştir. F1, F2, F3 ve F4 değerlerinin görsel ve istatistiksel analizi yapılmıştır. Kürtçe ünlülerinin fonem seviyesinde yapılmış ilk çalışması sayılmaktadır. 8 tane ünlü (/a/, /e/, /ê/, /i/, /î/, /o/, /u/ ve /û/) sesleri incelenmiştir. Kayıtlar sessiz ve az gürültülü ortamda GM Discovery II marka cep telefonuna yüklenen Easy Voice Recorder Pro programı ile alınmıştır. Yaşları 19-35 arasında değişen Kürtçe dilini okuyup yazabilen 33 yetişkin erkek ve yaşları 21-30 arasında değişen 7 yetişkin kadın konuşucunun ses kaydı kullanılmıştır. Kaydedilen ses sinyalleri 16-bit çözünürlükte, 16kHz örnekleme frekansı ve PCM Wave dosya formatındadır. Formant frekansları görsel olarak Praat ve istatistiksel olarak Sptoolbox programları ile gerçekleştirilmiştir. Sptoolbox yazılım aracılığıyla tüm konuşmacıların yalıtılmış ses örneklerinin formant özellik değeri Linear Predictive Coding(LPC) yöntemi ile elde edilmiştir. İstatistiksel olarak kadın ve erkeklerin formant frekans değeri her yalıtılmış ünlü için ayrı ayrı hesaplanıp, ortalama ve standart sapma değeriyle tabloda verilmiştir. Erkek ve kadınlara ait seslerdeki F1, F2, F3 ve F4 frekanslarının her ünlü için nasıl özellik taşıdığı belirtilmiştir. Kadınlarda ve erkeklerde ünlülerin F1 ve F2 değeri ortalama dağılım grafiği F1/F2 uzayında gösterilmiştir. Sonuç olarak Kürtçe’deki yalıtılmış ünlü seslere ait ses örüntülerinin, ortalama ve standart sapma değeri birbirlerinden farklı olduğu görülmüştür [36].

Disha Kaur Phull ve G.Bharadwaja Kumar, “*Vowel Analysis for Indian English*” çalışmasıyla Hindistan İngilizcesi üzerinde sesli harflerin formant frekans analiziyle aksan çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada Hindistan Doğu, Batı, Kuzey ve Güney olmak üzere 4 bölgede incelenmiştir. Çalışmada formant frekansları “formant ortalama analizi” ve “formant uzay analizi” olmak üzere iki aşamada incelenmiştir. Yaşları 20-60 arasında değişen 16 adet konuşmacıya ait ses kayıtları NPTEL ders videolarından alınmıştır. Toplamda 13 adet ünlü harf incelenmiştir. Kayıtlardan formant frekanslarının

kullanılması için Praat programı kullanılmıştır. Formant ortalama analizi sonucunda F1, F2, F3 ve F4 formantlarının bütün ünlülerdeki değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca F1/F2 formantları kullanılarak oluşturulan formant uzay analizinde bütün sesli harfleri içeren çokgenin çizildiği grafik oluşturulmuştur. Hindistan İngilizcesinin bu 4 aksanı içinde yine F1/F2 tabanlı ünlü üçgen analizi görselleştirilmiştir. Sonuç olarak Batı aksanının en yüksek F1'e ve en düşük F4'e sahip olduğu görülmüştür. Güney aksanı en düşük F2 değeri ve Kuzey aksanının /u/ seslisi için en yüksek F4'e sahip olduğu ve Doğu aksanında en yüksek F3 ve F4 değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Formant uzay analizi ile Hindistan İngilizcesinde bu 4 aksanın birbirinden farklı formant uzaylarında oldukları gözlemlenmiştir. Ünlü üçgen analizi ile de Batı aksanının /u/ sesinde diğer aksanlardan bariz ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu farklılığın L1 yani anadil etmeninden kaynaklanabileceği görüşüne varılmıştır [37].

Kun Liu ve arkadaşları, “*Mandarin Accent Analysis Based on Formant Frequencies*” çalışmasında, Mandarin Çincesine ait 8 aksanda 430 konuşmacı ve 5 adet sesli harfe [a,e,i,o,u] ait formant frekansları üzerinde aksan çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada Siemens ten satın alınan Mandarin-5000 veritabanı kullanılmıştır. Analiz edilen tüm kayıtlar PCM telefon kanalı ile 8-bit çözünürlük ve 8kHz örnekleme frekansına sahiptir. Elle formant frekansı çıkarımında hata olabileceği düşüncesiyle formant frekansları Praat programı ile çıkarılmaktadır. Erkekler için ilk 3 formant frekansı bayanlar için ise ilk 4 formant frekansı dikkate alınmaktadır. Her aksandaki her ünlüye ait kişi bazlı çıkarılan bütün formant frekans değerlerinin IBM'in SPSS yazılımında bulunan UNIANOVA modülü ile varyans analizi gerçekleştirilmektedir. Bu analizin gerçekleştirilmesinin sebebi, aksanın yanında, yaş ve cinsiyet parametrelerinin de formant frekanslarını etkileyebileceği düşüncesidir. UNIANOVA testi sonuçları tablolar halinde gösterilmektedir. UNIANOVA'da bir hipotezin doğru kabul edilebilmesi için “önem değeri” parametresinin 0.05 veya aşağısında çıkması gerektiği vurgulanıp sonuç olarak aksan'ın [o,i,u] tek seslilerinin F2 formant frekansı üzerinde büyük derecede etkisinin olduğu, [a] tek seslisi üzerinde ise neredeyse hiç etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca [a,i,o,u,e] bütün tek sesliler için F1 ve F3 üzerinde aksanın kesin etkisi olmadığı anlaşılmıştır [38].

Sayed Ghorshi ve arkadaşları, “*Comparative Analysis of Formants of British, American and Australian Accents*” çalışmasında, İngiliz, Amerikan ve Avustralya aksanlı İngilizceler arasında karşılaştırmalı formant analizi yapılmaktadır. Bu üç aksanın sesli harflerine ait formant frekanslarının karşılaştırılmasında “cross entropy” ölçümü

kullanılmaktadır. Formant izlerini takip etmek için ayrıca LP özellikli analizi ve 2D-HMM tabanlı geliştirilmiş formant tahmin çıkarım metodu önerilmiştir. Çalışmada anlaşıyor ki bu üç aksanı daha çok ilk iki formant frekansı F1 ve F2 ayırmaktadır. Aksanlar arasında sadece bazı ünlülerin F3 ve F4 formant frekansı ayırım teşkil etmektedir. Bu ayırım ‘r’ sesi söylenirken çıkan ünlü sestten kaynaklanmaktadır. Her bir aksanın [AA AE AH AO EH ER IH IY OH UW UH] ikili seslileri için F1, F2, F3 ve F4 formant frekansları ayrı tablolarda karşılaştırılmıştır. Sonuçlar ünlü formantlarının aksanlar arasında farklılık ortaya çıkarmak için kullanılabileceğini göstermiştir. Cross Entropy, konuşmacı grupları üzerinde denenen modellerin farklılıklarını ölçerek aksan ve konuşmacı değişkenlik etkisini analiz etmek için kullanılmaktadır. Sonuç olarak formantların farklılaşması üzerinde aksan parametresinin etkisi yaş parametresinin etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür [39].

Emmanuel Ferragne ve François Bellegrino “*Formant frequencies of vowels in 13 accents of the British Isles*” çalışmasında, ingiliz adalarında konuşulan 13 farklı aksanın analizi yapılmıştır. Bu analizde erkek konuşmacılara ait toplamda 6624 sesli harf örneği üzerinde formant frekansları incelenmiştir. Asıl amaç F1 ve F2 bazında, ingiliz adalarındaki aksanlara ait sesli harfler arasındaki varyasyonları tespit etmektir. Konuşmacılar aslen o bölgeyi olup yaşamlarını orada geçirmişlerdir. “Head” gibi tek ünlüye sahip kelimeler (söylenildiğinde ağızdan tek ünlü gibi çıkan kelimeler-monophthong) ve çift ünlüye sahip kelimeler (diphthong) ayrı ayrı analiz edilmiştir. Koartikülasyon etkisi ve akustik varyasyonu yok etmek için her kelime 5 defa okutulmuştur. Cinsiyet, fonetik varyasyona etki eden önemli bir parametre olduğu için bu çalışmada sadece erkekler incelenmiştir. Formant çıkarımı için ücretsiz Praat programından faydalanılmıştır. Çalışmanın sonucunda iki zorluğa değinilmektedir. Bunlardan ilki şahsi çeşitlilikten kaynaklanan zorluklar (yaş, sosyal faktörler vs.) iken ikincisi formant frekansı ölçümleri insan müdahalesi gerektirdiğinden otomatik formant frekansı çıkarmadan kaynaklanan zorluklardır [40].

Qin Yan ve arkadaşları, “*Comparative Analysis and Synthesis of Formant Trajectories of British and Broad Australian Accents*” çalışmasında, Britanya aksanı ve yaygın kullanılan Avusturalya ingilizcesi aksanı arasındaki farklılıklar ünlülerin formant frekansına dayalı analiz ile ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmada, bu iki aksan arasındaki formant değerleri ve formant izlerinin karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. LP (Linear Prediction) ve 2D-HMM tabanlı geliştirilen formant modeli kullanılarak ünlülerin formant değerleri ve formant izleri kestirilmeye çalışılmıştır. Aksan tespit etme

işlemi, formantların, formantlar arası uzaklıkların normalleştirilmiş değerlerine göre sıralanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Veritabanı olarak Australian National Database of Spoken Language (ANDOSL) ve Wall Street Journal Cambridge University (WSJCAM0) kullanılmıştır. ANDOSL içerisinde 18 bayan ve 18 erkek sesinden oluşan toplamda 7200 kayıt bulunmakta iken WSJCAM0 içerisinde 40 bayan ve 46 erkek sesinden oluşan 9476 kayıt bulunmaktadır. Aksan tespitinde, ilk iki formant değerinin diğer formantlara göre daha bariz farklar taşıdığı görülmüştür [41].

Yusnita M.A. ve arkadaşları, “*Malaysian English Accents Identification using LPC and Formant Analysis*” çalışmasında, aksanlı konuşmacı girişinin konuşma tanıma uygulamalarında hatalara yol açtığı probleminden yola çıkarak Malezya’da ki Malay, Çin ve Hint olmak üzere 3 etnik grubun aksan farklılıkları incelenmektedir. 23-30 yaş arası 14 erkek konuşmacının yer aldığı bu çalışmada, 5 Malezyalı’dan toplamda 120 ses kaydı, 5 Hintli’den toplamda 100 ses kaydı ve 4 Çinli’den toplamda 125 ses kaydı “better”, “boy”, “communication”, “student” ve “target” kelimelerinin 5’er kez okutulmasıyla alınmıştır. Sigara faktörü konuşmacıların vokal yolunda hasar oluşturduğundan bu çalışmada özellikle sigara kullanmayan konuşmacılar seçilmiştir. Seslendirilen kelimeler Colorado Üniversitesinin aksana özgü kelimeler listesinden alınmıştır. Seslendirmeler, arkaplan gürültüsü 22 dB olan bir odada close-talk mikrofona aracılığıyla MATLAB programı kullanılarak 16 kHz örnekleme oranı ve 16 bps çözünürlük ile “.wav” formatında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ses kayıtlarının her birine sırayla ortalama-varyans normalizasyonu, ön vurgulama filtresi (pre-emphasis filter), çerçevelere bölme, hamming pencereleme, otokorelasyon, Levinson-Durbin algoritması işlemleri uygulanarak LPC katsayıları çıkartılmaktadır. LPC katsayılarından kaynak-filtre ayırımı (source-filter separation) metodu kullanılarak formant frekansları elde edilmektedir. Çıkarılan bu formant frekans değerlerine dayalı olarak konuşmacının aksan tahmini çıkarılan K-Nearest Neighbors (KNN) sınıflandırıcısıyla gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada küçük bir ses veritabanı üzerinde ticari olarak görülen MFCC ve HMM yöntemleri yerine LPC ve KNN yöntemleri tercih edilmiş olup başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlardan LPC özellik setinin, formant özellik setinden daha başarılı olduğu ancak bu ikisinin birlikte kullanımının aksan sınıflandırması açısından en iyi yöntem olduğu görülmüştür. Veri tabanının büyütülmesinin, gelecekteki çalışmalarda daha net sonuçlar elde etmek için en önemli kriter olduğu vurgulanmıştır [42].

6. TÜRKÇE'DEKİ ÜNLÜLERİN FORMANT FREKANS DEĞERLERİNE DAYALI ADLİ AKSAN ANALİZİNİN GERÇEKLEŞTİRİMİ

6.1. Giriş

Bu bölümde Türkçe aksan analizi için tez çalışmasında tasarlanan mimari ayrıntıları ile açıklanmaktadır. Yapılan çalışma, literatürde de sıklıkla karşılaşılan formant frekans değerlerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde öncelikle mimarinin genel yapısı anlatılacak, daha sonra mimari içerisinde kullanılan tüm modüller aşama aşama anlatılacaktır. Mimarinin genel yapısı Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

6.2. Hece (seslem) Seçimi

Bu tez çalışmasında, konuşmacılara okutulan seslem listesi Türkçe dilinde kullanım sıklığı yüksek seslemler arasından seçilmiştir [75]. Okutulan seslemlerin her birinde mutlaka en az bir ünlü harf bulunmakta olup her konuşmacı Türkçe’deki bütün ünlü harfleri seslendirmiştir. Konuşmacılara okutulan seslem listesi Tablo 6.1’de gösterilmiştir. Seslem listesi; 8 adet yalın ünlü, içinde her ünlünün 6 defa geçtiği toplam 48 adet iki harfli, ve içinde ‘ö’ ünlüsünün 5 defa diğer herhangi bir ünlünün 6 defa geçtiği toplam 47 adet üç harfli seslem içermektedir. Okuma listesinde toplamda 103 adet Türkçe dili için anlamlı olan seslemler bulunmaktadır.

Türkçe’deki patlamalı ünsüzlerden bazıları, kendisinden sonra gelen ünlü harf üzerinde formant frekansı bazında değişikliklere yol açmaktadır. Bununla ilgili “*Formant Frequency Alteration Effects of Plosive Stop Consonants on Adjacent Vowels in Turkish Language*” başlığıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir [76]. Çalışmanın sonucuna göre seçilen seslem listesi güncellenmiştir. Bu tez çalışmasına 2 harfli ve 3 harfli seslemlerin eklenmesinin temel sebebi doğal konuşmada genelde yalın ünlülerin tek başlarına seslendirilmedikleridir. Böylece aksan analizin “adli” açıdan gerçekleştiriminden de bahsedilebilmektedir.

Tablo 6.2. Okuma listesinde bulunan seslemler

Yalın	a	e	ı	i	o	ö	u	ü
İki harfli seslemler	at aç az ta ça za	el er ev le re ve	ıs ır ız sı rı zı	in ir is ni ri si	ok or oy ko ro yo	ön öt öz nö tö zö	uk um us ku mu su	üç ül üz çü lü zü
Üç harfli seslemler	tak saç bal art aşk arz	def cem seç erg elk erk	yıl hız zıt ırk ırz ısı	fiş giz bir ilk inç irs	boy kol sor ons org oje	göl köz föy örf örs	sur mum şut uca ulu ula	kül yüz düş ürk üst üye

6.3. Konuşmacı Profili ve Ses Kayıtlarının Elde Edilmesi

Konuşmacılar, yaşları 18-35 aralığında, tek dilli (monolingual), çoğunluğu farklı şehirlerde doğup büyümüş, üniversite öğrencisi kız ve erkeklerden oluşmaktadır. Tez süresince yapmış olduğumuz “*Analysis of Speaker’s Gender Effects in Voice Onset Time of Turkish Stop Consonants*” başlıklı başka bir çalışmada, Türk konuşmacıların seslendirdiği kayıtlar içerisindeki kişiye özgü parametrelerden biri olan ses başlangıç süresi’nin cinsiyete bağlı değişebilirliği gözlemlenmiştir [77]. Formant frekans değerlerinin de patlamalı ünsüzlerde tespit edilebilen ses başlangıç süresi gibi cinsiyete bağlı değişebildiği bilinmektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasında formant frekans değerleri analiz edilirken cinsiyet ayrımı göz önünde bulundurulmuştur.

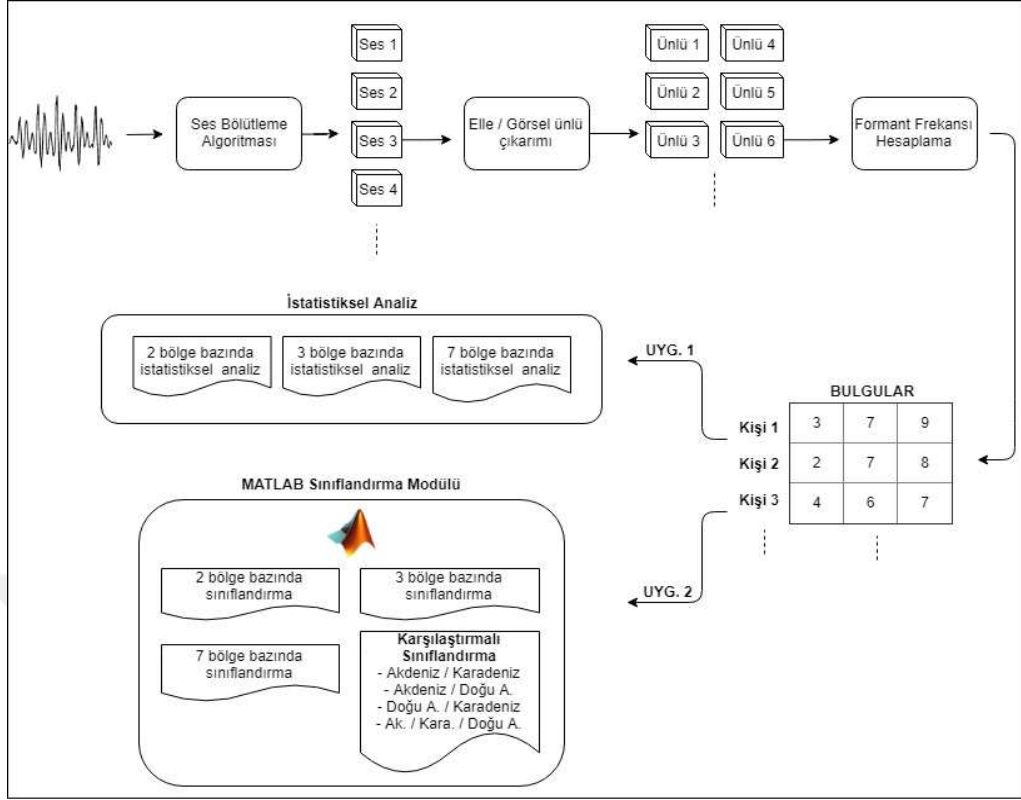
Ses kayıtları, Fırat Üniversitesi Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü Ses ve Görüntü Analiz Laboratuvarında bulunan sessiz odada alınmıştır. Ses kayıtları Olympus marka ses kayıt cihazı ile .wav uzantılı şekilde toplanmıştır. Örnekleme aralığı ve çözünürlük literatürde bu tür çalışmalar için en sık kullanılan değerler olan, sırasıyla 44.1 kHz ve 16

bit'e ayarlanmıştır. Ses kayıt cihazının konuşmacının ağızına olan mesafesi yaklaşık 20 cm. olarak belirlenmiş olup, kayıt cihazının önüne nefes patlaması kesici pop filtre konulmuştur. Tablo 6.1'de bulunan her seslem daha sonra ortalamaları alınmak üzere 3'er defa seslendirilmiştir. Bir konuşmacı için, tüm seslemler, yaklaşık 3 dk. uzunluğunda tek bir .wav dosyasına kaydedilmiştir. Alınan bu .wav dosyasına, Bölüm 6.3.1'de bahsedilecek olan ses bölütleme işleminin başarıyla uygulanabilmesi için Audacity yazılımında bulunan "Tıklama Giderici (Click Removal)" filtresi uygulanmıştır. Böylece, ses kaydı esnasında sessiz oda içerisinde bulunan herhangi bir cisimden kaynaklı küçük ani gürültüler yok edildikten sonra oluşan filtrelenmiş sesin analiz modüllerine aktarılması amaçlanmıştır.

6.2. Tasarlanan Aksan Analiz Mimarisinin Genel Yapısı

Bu tez çalışmasında Türkçe'deki ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı aksan analizi yapılmıştır. Aksan analizi mimari yapısının ve dolayısıyla tez çalışmasının amacı, farklı bölgelerde yetişmiş konuşmacılardan alınan ses kayıtları içerisinde aksan ipuçları aramaktır. Aksan analiz mimarisi genel olarak şu aşamalardan oluşmaktadır;

- Konuşmacılardan ses toplanması,
- Ses içerisindeki birimlerin (yalın harfler, iki harfliler, üç harfliler ve kelimeler) bölütlenmesi,
- Her birimde bulunan ünlü harfin manuel/görsel çıkarımı,
- Tespit edilen bu ünlü harflerin frekans uzayında analizi yapılarak formant frekanslarının elde edilmesi,
- Formant frekans değerleri ve kişinin bölge bilgisi göz önünde bulundurularak uygulamaların gerçekleştirilmesi.



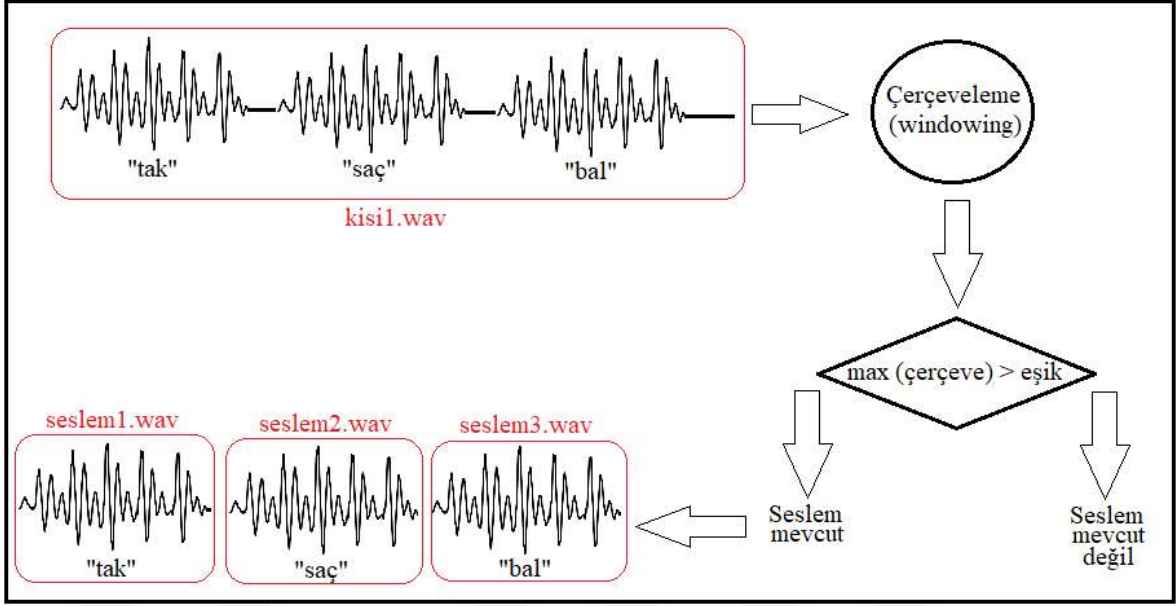
Şekil 6.1. Aksan analizi mimarisinin genel yapısı

6.3. Mimarideki Modüllerin Yapısı

Bu bölümde aksan analiz mimarisi içerisindeki modüllerin yapısı açıklanacaktır. Öncelikle konuşmacıdan alınan ses sinyali içerisindeki birimlerin nasıl bölütlendiği, daha sonra sırasıyla bölütlenmiş birimlerden ünlü harf bölgesinin çıkarımı, ünlü harflerden formant frekanslarının elde edilmesi ve bu formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi ve sınıflandırılması modüller halinde açıklanacaktır.

6.3.1. Modül 1: Ses Sinyallerinin Bölütlenmesi

Bu modülde konuşmacıdan alınan ses kayıtları içerisinde bulunan ses birimlerinin ayrıştırılması işlemi (ses bölütleme) gerçekleştirilmiştir. Bu işlem görsel olarak gözlemlenen belirli bir eşik değerine göre MATLAB ortamında geliştirilen bir yazılım ile yapılmıştır. Bölütleme işlemi sonunda konuşmacıya tek bir ses kaydı ile söylenen bütün seslemler ayrıştırılmaktadır. Şekil 6.2’de ses sinyallerinin bölütlenmesi modülünün akış diyagramı gösterilmektedir.

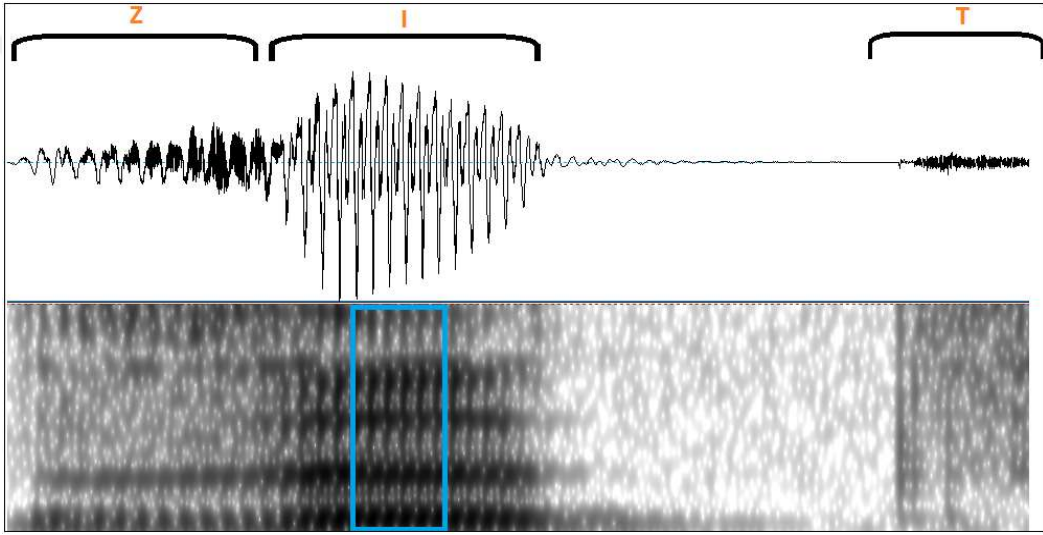


Şekil 6.2. Ses bölütleme işlemi akış diyagramı

6.3.2. Modül 2: Ses Sinyalinde Ünlü Harf İçeren Bölgenin Elle/Görsel Çıkarımı

Bir konuşma sinyali içerisinde ünlü harfin bulunduğu bölgenin otomatik tespiti için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemlerden biri de ses sinyalini çerçevelere bölerek her çerçevenin formant frekans değerlerini sınıflandırmaktır. Tez süresi içerisinde yapmış olduğumuz “*Classification of Turkish Vowels Based on Formant Frequencies*” başlıklı çalışmamızda da sınıflandırma algoritmaları kullanılarak Türkçe ünlü harflerin formant frekans değerlerine göre sınıflandırılabilmesi tespit edilmiştir [78]. Benzer şekilde daha önce yazmış olduğumuz bir kod bloğu ile, Praat programı kullanarak görsel çıkardığımız ünlü bölgelerine ait formant frekans değerleriyle eğitmiş olduğumuz KNN algoritmasını test ettiğimizde %90’a yakın başarı elde edildiğini lakin ünlü harfin ünsüz harfler içerisinde neredeyse algılanamayacak kadar yok olduğu kelimelerde (ör: “yıl”, “örf”, “örs” gibi) ünlü bölgenin otomatik çıkarımının zorlaştığı görülmüştür. Bu nedenle bu tez çalışmasında seslem içerisindeki ünlü harf içeren bölgenin elle/görsel olarak çıkarılması daha uygun bulunmuştur. Konuşmacılara okutulan seslem içerisinde ünlü harf içeren bölgenin elle çıkarılması Şekil 6.3’te mavi kare ile gösterildiği gibi ünlü harf için en uygun bölgenin (ünlü harfin formant frekans değerlerinin kendisinden önce ve sonra gelen ünsüzden etkilenme durumunun en az olduğu bölge) seçilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bölgenin seslem içerisinde görsel çıkarımında Praat

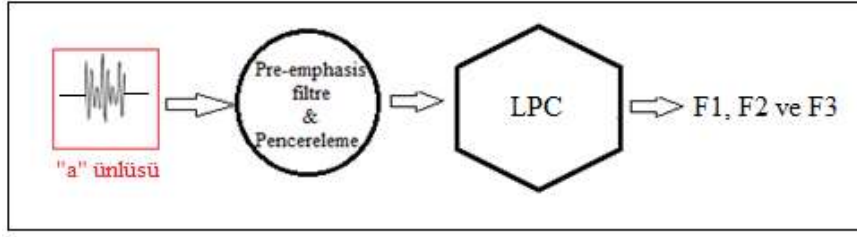
yazılımı kullanılmıştır. Şekil 6.3'te “zıt” seslemine ait ses dalgası (waveform) ve spektrogram görüntüleri gösterilmektedir. Her iki görselde de “z”, “ı” ve “t” harflerinin seslem içerisindeki yerleri gözle ayırt edilebilmektedir. Bu tez çalışmasının ana konusu olan formant frekans değerleri “ı” ünlüsünün spektrogram görüntüsünde yatay sıralanmış koyu renkteki hatlar şeklinde görülmektedir. Bu hatlar en aşağıdan yukarıya F1 (1.formant), F2 (2.formant), F3 (3.formant) ve F4 (4.formant) olarak kabul edilmektedir. Spektrogram görüntüsünden de anlaşıldığı üzere kişiye özgü bir parametre olan formant frekans değerleri en bariz halde ünlü sesler yardımıyla ölçülebilmektedir.



Şekil 6.3. “Zıt” seslemi içerisindeki “ı” ünlüsünün dalgaformu ve spektrogram yardımıyla çıkarımı

6.3.3. Modül 3: Ünlü Harflerin Formant Frekans Değerlerinin Elde Edilmesi

Bu modülde bir önceki modülde elde edilen ünlü harf içeren bölge, sırasıyla önce pre-emphasis (ön vurgulama) filtresi sonra hamming pencereleme uygulanarak doğrudan LPC algoritmasına gönderilmektedir. LPC algoritması kendisine gelen ses sinyalinin F1, F2 ve F3 formant frekanslarını hesaplamaktadır.



Şekil 6.4. Ünlü harf içeren bölgenin formant frekans değerlerinin hesaplanması akış diyagramı

6.3.4. Modül 4: Formant Frekans Değerlerinin Analizi

Formant frekans değerlerinin analizi modülünde, analizin hangi kategorilerde ve ne şekilde gerçekleştirildiği anlatılmaktadır. Formant frekans değerleri, Bölüm 6.3'te bahsedildiği ve genel olarak literatürde de kabul gördüğü üzere cinsiyete bağlı bir parametre olduğundan, bu tez çalışmasında kızların ve erkeklerin formant frekans değerleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu tez çalışmasında analiz, 2'si genel olmak üzere çeşitli başlıklar altında gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Formant Frekans Değerlerinin İstatistiksel Analizi
 - 2 bölge (Batı, Doğu) bazında analiz
 - 3 bölge (Batı, Doğu, Kuzey) bazında analiz
 - 7 bölge (coğrafik bölgeler) bazında analiz
- Formant Frekans Değerlerinin Sınıflandırılması Uygulaması
 - 2 bölge (Batı, Doğu) bazında sınıflandırma
 - 3 bölge (Batı, Doğu, Kuzey) bazında sınıflandırma
 - 7 bölge (coğrafik bölgeler) bazında sınıflandırma
 - Akdeniz - Karadeniz Bölgeleri Karşılaştırmalı Sınıflandırma
 - Akdeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Karşılaştırmalı Sınıflandırma
 - Karadeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Karşılaştırmalı Sınıflandırma
 - Akdeniz - Karadeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Karşılaştırmalı Sınıflandırma

Analizde, her konuşmacının o ünlüye ait F1, F2, F3 değerleri ve aksan analizine konu olan doğup büyüdüğü bölge bilgisi olmak üzere toplam 4 parametre dikkate alınmıştır. 2 bölge, 3 bölge ve 7 bölge bazındaki istatistiksel analizlerde bölgeler arası farklılıklar tüm

ünlü harfler göz önünde bulundurularak inceleme yapılmıştır. “MATLAB Classification Learner” aracı kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmada ise 4.parametre olan bölge bilgisi, “yanıt (response)” parametresi olarak atanmış ve çapraz doğrulama (cross validation) değeri sınıflandırmada çoğunlukla kullanılan 10 değerine sabitlenmiştir.



7. UYGULAMALAR

Bu bölümde yüksek lisans tez çalışmasının asıl amacı olan Türkçe ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı aksan analizinin uygulama aşaması istatistiksel analizler ve sınıflandırma analizleri olmak üzere 2 genel başlık altında gerçekleştirilmiştir.

7.1. Formant Frekans Değerlerinin İstatistiksel Analizi Uygulaması

7.1.1. 2 Bölge (Batı, Doğu) Bazında Adli Aksan Analizi

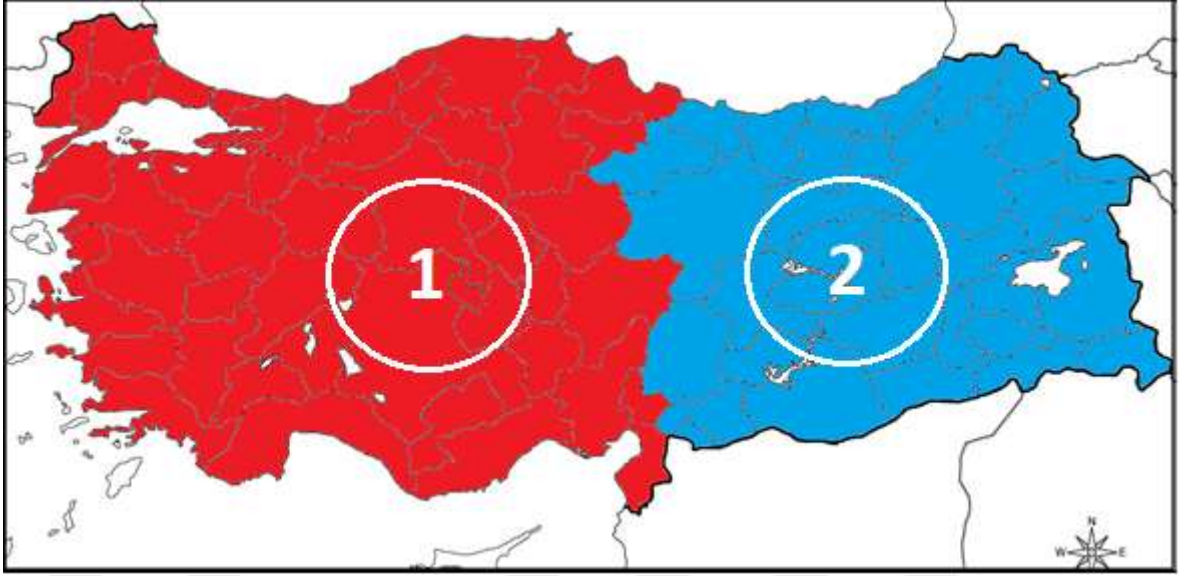
Türkçe ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizinin ilk istatistiksel uygulaması 2 bölge bazında adli aksan analizi olarak gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada Türkiye, aksanın en belirgin şekilde algılanabilirliği açısından Şekil 7.1'deki gibi 2 bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler;

- Batı (1)
- Doğu (2)

olarak belirlenmiştir.

Batı illeri içerisinde Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, İstanbul, Çanakkale, Yalova, Balıkesir, Manisa, Bursa, Kütahya, Bilecik, Kocaeli, Sakarya, Düzce, Bolu, Eskişehir, Uşak, İzmir, Aydın, Muğla, Denizli, Burdur, Isparta, Afyonkarahisar, Antalya, Konya, Karaman, Aksaray, Ankara, Çankırı, Çorum, Amasya, Samsun, Sinop, Kastamonu, Karabük, Bartın, Zonguldak, Kırıkkale, Kırşehir, Yozgat, Nevşehir, Niğde, Mersin, Adana, Kayseri, Osmaniye ve Hatay olmak üzere toplam 48 il yer almaktadır.

Doğu illeri içerisinde Tokat, Ordu, Giresun, Gümüşhane, Trabzon, Bayburt, Rize, Artin, Sivas, Malatya, Kahramanmaraş, Gaziantep, Kilis, Şanlıurfa, Adıyaman, Elazığ, Tunceli, Erzincan, Diyarbakır, Mardin, Bingöl, Muş, Erzurum, Bitlis, Batman, Siirt, Ardahan, Kars, Iğdır, Ağrı, Van, Şırnak ve Hakkari olmak üzere toplam 33 il bulunmaktadır.



Şekil 7.1 2 bölge bazında adli aksan analizine göre Türkiye aksan haritası

Bu uygulamadaki aksan haritası baz alındığında konuşmacıların bölgelere göre dağılımı Tablo 7.1’te gösterilmektedir.

Tablo 7.1 Konuşmacıların cinsiyete ve 2 bölge bazında bölgelere göre dağılımı

Cinsiyet	Bölge		
		Batı (1)	Doğu (2)
	Erkek	28	44
	Kız	11	29

7.1.1.1. Erkek Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları

2 bölge bazlı formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi uygulamasında, Batı (1) ve Doğu (2) bölgelerinden olan erkek konuşmacıların yalın ünlülerdeki, iki harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ve üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ortalama formant frekans değerleri sırasıyla Tablo 7.2’de ve Tablo 7.3’te gösterilmektedir.

Tablo 7.2 Erkek konuşmacıların 2 bölge bazında Batı (1) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
<i>a</i>	552	1060	2685	619	1123	2570	623	1109	2502
<i>e</i>	401	1724	2513	485	1523	2417	502	1556	2449
<i>ı</i>	327	1287	2475	337	1428	2519	339	1378	2502
<i>i</i>	279	2179	2863	291	2024	2816	288	2043	2828
<i>o</i>	360	862	2724	388	921	2600	378	888	2608
<i>ö</i>	374	1424	2378	374	1368	2397	338	1121	1950
<i>u</i>	290	820	2531	299	906	2494	300	946	2523
<i>ü</i>	293	1684	2302	306	1629	2337	303	1673	2322

Tablo 7.3 Erkek konuşmacıların 2 bölge bazında Doğu (2) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
<i>a</i>	534	1052	2607	586	1098	2545	571	1074	2474
<i>e</i>	408	1650	2470	475	1558	2433	464	1508	2401
<i>ı</i>	331	1294	2476	343	1401	2483	340	1375	2506
<i>i</i>	274	2094	2856	282	1907	2734	284	2024	2801
<i>o</i>	366	853	2625	385	898	2557	363	875	2573
<i>ö</i>	377	1413	2379	371	1336	2361	326	1091	1943
<i>u</i>	295	821	2514	297	891	2479	289	946	2481
<i>ü</i>	286	1654	2289	300	1587	2302	287	1659	2298

Bu değerlere bakıldığında, 2 bölge bazında Batı ve Doğu bölgeleri erkek konuşmacıların iki harfli ve üç harfli seslemlerdeki ünlülerine ait ortalama formant frekans değerleri yalın ünlü olarak seslendirdikleri ünlülere ait ortalama formant frekans değerlerinden yüksek çıktığı görülmektedir. Ayrıca Batı bölgesi ortalama formant frekans değerleri hemen hemen bütün ünlülerde Doğu bölgesi formant frekans değerlerinden daha yüksek çıkmıştır.

7.1.1.2. Kız Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları

2 bölge bazlı formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi uygulamasında, Batı (1) ve Doğu (2) bölgelerinden olan kız konuşmacıların yalın ünlülerdeki, iki harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ve üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ortalama formant frekans değerleri sırasıyla Tablo 7.4'te ve Tablo 7.5'te gösterilmektedir.

Tablo 7.4 Kız konuşmacıların 2 bölge bazında Batı (1) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
<i>a</i>	375	1050	1752	524	1131	1999	533	1113	1909
<i>e</i>	462	1393	2630	543	1425	2466	574	1334	2324
<i>ı</i>	377	1071	2183	391	1083	2222	384	1069	2172
<i>i</i>	304	1217	2939	276	1081	2770	270	1394	2806
<i>o</i>	459	869	1950	483	920	2185	478	927	2260
<i>ö</i>	398	983	1988	414	1019	1967	381	897	1706
<i>u</i>	339	916	2490	346	964	2488	320	976	2602
<i>ü</i>	318	1390	2414	331	1386	2363	317	1549	2417

Tablo 7.5 Kız konuşmacıların 2 bölge bazında Doğu (2) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
<i>a</i>	360	1009	1608	531	1116	2049	553	1136	2053
<i>e</i>	367	1021	2400	454	1260	2358	459	1226	2232
<i>ı</i>	322	896	1948	345	1016	2059	342	1004	2055
<i>i</i>	268	1060	2708	273	1125	2682	267	1179	2671
<i>o</i>	354	840	1672	421	924	2052	418	916	2106
<i>ö</i>	330	901	1873	353	972	1873	335	826	1559
<i>u</i>	275	873	2627	305	940	2387	299	975	2455
<i>ü</i>	274	1189	2242	292	1294	2270	289	1395	2321

2 bölge bazında kız konuşmacılarda, erkek konuşmacılarda olduğu gibi ünlün bulunduğu seslemdeki harf sayısı arttıkça her iki bölgeye ait formant frekans değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kız konuşmacılarda da Batı bölgesi formant frekans değerleri Doğu bölgesi formant frekans değerlerinden daha yüksek olarak ölçülmüştür.

7.1.2. 3 Bölge (Batı, Doğu, Kuzey) Bazında Adli Aksan Analizi

Türkçe ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizinin ikinci istatistiksel uygulaması 3 bölge bazında adli aksan analizi olarak gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada Türkiye, aksanın en belirgin şekilde algılanabilirliği açısından Şekil 7.2'deki gibi 3 bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler;

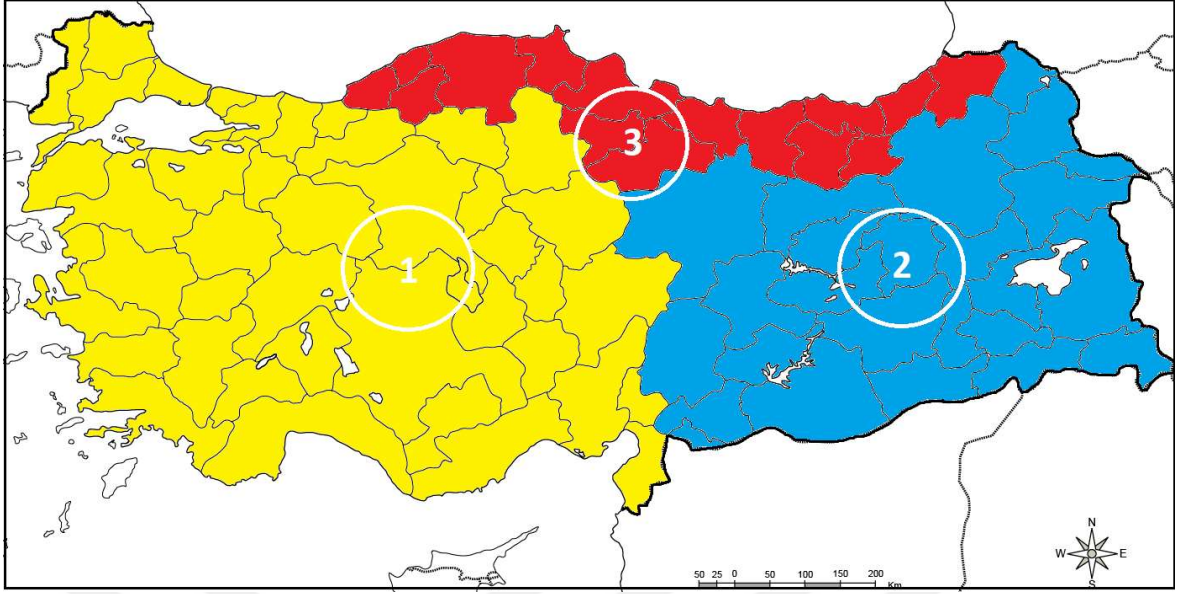
- Batı (1)
- Doğu (2)
- Kuzey (3)

olarak belirlenmiştir.

Batı illeri içerisinde Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, İstanbul, Çanakkale, Yalova, Balıkesir, Manisa, Bursa, Kütahya, Bilecik, Kocaeli, Sakarya, Düzce, Bolu, Eskişehir, Uşak, İzmir, Aydın, Muğla, Denizli, Burdur, Isparta, Afyonkarahisar, Antalya, Konya, Karaman, Aksaray, Ankara, Çankırı, Çorum, Kırıkkale, Kırşehir, Yozgat, Nevşehir, Niğde, Mersin, Adana, Kayseri, Osmaniye ve Hatay olmak üzere toplam 41 il yer almaktadır.

Doğu illeri içerisinde Sivas, Malatya, Kahramanmaraş, Gaziantep, Kilis, Şanlıurfa, Adıyaman, Elazığ, Tunceli, Erzincan, Diyarbakır, Mardin, Bingöl, Muş, Erzurum, Bitlis, Batman, Siirt, Ardahan, Kars, Iğdır, Ağrı, Van, Şırnak ve Hakkari olmak üzere toplam 25 il bulunmaktadır.

Kuzey illeri ise Zonguldak, Bartın, Karabük, Kastamonu, Sinop, Samsun, Amasya, Tokat, Ordu, Giresun, Gümüşhane, Trabzon, Bayburt, Rize ve Artvin olmak üzere toplam 15 ili kapsamaktadır.



Şekil 7.2. 3 bölge bazında adli aksan analizine göre Türkiye aksan haritası

Bu uygulamadaki aksan haritası baz alındığında konuşmacıların bölgelere göre dağılımı Tablo 7.6’da gösterilmektedir.

Tablo 7.6 Konuşmacıların cinsiyete ve 3 bölge bazında bölgelere göre dağılımı

Cinsiyet	Bölge		
	Batı (1)	Doğu (2)	Kuzey (3)
Erkek	23	39	10
Kız	9	28	3

7.1.2.1. Erkek Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları

3 bölge bazlı formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi uygulamasında, Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) bölgelerinden olan erkek konuşmacıların yalın ünlülerdeki, iki harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ve üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ortalama formant frekans değerleri sırasıyla Tablo 7.7, Tablo 7.8 ve Tablo 7.9’da gösterilmektedir.

Tablo 7.7 Erkek konuşmacıların 3 bölge bazında Batı (1) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	542	1044	2648	615	1103	2546	627	1095	2482
<i>e</i>	394	1697	2494	489	1526	2415	499	1553	2444
<i>ı</i>	326	1283	2471	334	1429	2512	336	1373	2483
<i>i</i>	279	2196	2859	292	2029	2813	288	2049	2832
<i>o</i>	360	860	2711	379	920	2595	371	883	2601
<i>ö</i>	372	1425	2378	368	1359	2386	331	1116	1944
<i>u</i>	287	813	2528	297	901	2487	299	940	2508
<i>ü</i>	293	1697	2312	304	1632	2327	302	1674	2315

Tablo 7.8 Erkek konuşmacıların 3 bölge bazında Doğu (2) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	530	1051	2624	580	1096	2549	558	1073	2449
<i>e</i>	411	1619	2443	478	1578	2449	461	1525	2407
<i>ı</i>	333	1295	2463	345	1400	2470	342	1378	2495
<i>i</i>	274	2064	2835	285	1906	2724	285	2000	2798
<i>o</i>	367	849	2610	385	898	2548	365	875	2558
<i>ö</i>	377	1413	2379	372	1339	2359	326	1097	1945
<i>u</i>	295	820	2508	298	893	2466	291	944	2463
<i>ü</i>	285	1653	2282	300	1582	2292	288	1659	2288

Tablo 7.9 Erkek konuşmacıların 3 bölge bazında Kuzey (3) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	579	1097	2664	631	1162	2597	637	1129	2630
<i>e</i>	407	1868	2640	458	1454	2369	501	1471	2412
<i>ı</i>	322	1294	2535	338	1414	2569	338	1376	2591
<i>i</i>	278	2216	2953	273	1957	2822	282	2109	2818
<i>o</i>	359	879	2759	407	911	2624	381	890	2666
<i>ö</i>	380	1419	2378	384	1362	2412	349	1093	1953
<i>u</i>	300	839	2555	302	906	2553	291	965	2607
<i>ü</i>	294	1642	2300	307	1618	2384	292	1663	2366

3 bölge bazında Batı, Doğu ve Kuzey bölgelerinden erkek konuşmacıların seslendirdiği ünlülerin ortalama formant frekans değerleri sonuçlarına bakıldığında, Kuzey bölgesinden olan konuşmacıların genel olarak daha yüksek formant frekans değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her üç bölgede de ünlü harfin yalın halde, iki harfli seslemler içerisinde ve üç harfli seslemler seslemler içerisinde seslendirilişi arasında belirli formant frekans farklılıklarının bulunması, adli açıdan aksan analizi yapılırken bu durumun göz önünde bulundurulması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

7.1.2.2. Kız Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları

3 bölge bazlı formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi uygulamasında, Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) bölgelerinden olan kız konuşmacıların yalın ünlülerdeki, iki harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ve üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ortalama formant frekans değerleri sırasıyla Tablo 7.10, Tablo 7.11 ve Tablo 7.12’de gösterilmektedir.

Tablo 7.10 Kız konuşmacıların 3 bölge bazında Batı (1) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	333	1019	1646	505	1124	1971	539	1116	1912
<i>e</i>	453	1441	2663	546	1479	2491	562	1336	2338
<i>ı</i>	375	1024	2201	385	1050	2203	389	1083	2211
<i>i</i>	296	1143	2933	281	1146	2809	272	1472	2830
<i>o</i>	457	834	1932	464	906	2135	454	934	2195
<i>ö</i>	396	937	1937	400	1011	1959	377	884	1680
<i>u</i>	340	917	2637	347	966	2534	320	984	2626
<i>ü</i>	336	1600	2532	326	1397	2370	316	1561	2421

Tablo 7.11 Kız konuşmacıların 3 bölge bazında Doğu (2) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	340	994	1553	529	1115	2040	538	1126	2023
<i>e</i>	357	1002	2402	443	1246	2355	447	1210	2222
<i>ı</i>	320	871	1929	343	1005	2043	339	993	2037
<i>i</i>	267	1085	2715	273	1128	2684	267	1182	2671
<i>o</i>	350	838	1618	411	918	2021	410	914	2079
<i>ö</i>	323	872	1841	344	954	1857	328	814	1545
<i>u</i>	274	870	2623	303	935	2363	296	970	2442
<i>ü</i>	272	1164	2230	289	1274	2255	286	1377	2310

Tablo 7.12 Kız konuşmacıların 3 bölge bazında Kuzey (3) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	681	1271	2535	604	1157	2176	654	1208	2230
<i>e</i>	554	1305	2435	611	1339	2382	689	1443	2341
<i>ı</i>	391	1386	2226	413	1261	2366	379	1111	2179
<i>i</i>	331	1160	2815	266	870	2605	265	1060	2682
<i>o</i>	463	980	2413	613	1012	2576	606	921	2657
<i>ö</i>	444	1366	2402	523	1195	2111	447	1019	1865
<i>u</i>	327	952	2130	354	997	2542	334	1002	2602
<i>ü</i>	268	924	2116	359	1507	2460	334	1627	2478

Kız konuşmacıların seslendirdiği ünlülerin ortalama formant frekans değerleri sonuçlarına bakıldığında, erkeklerde olduğu gibi yine Kuzey bölgesinden olan

konuşmacıların neredeyse bütün ünlülerde genel olarak daha yüksek formant frekans değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yine erkek konuşmacılarla aynı şekilde kız konuşmacılarda da, adli açıdan aksan analizi yapılırken ünlü harfin yalın halde, iki harfli seslemler içerisinde ve üç harfli seslemler içerisinde seslendirilişi durumlarının göz önünde bulundurulması gerekliliğini ortaya koymaktadır. 3 bölge bazındaki istatistiksel analiz uygulamasına genel olarak bakıldığında, kız konuşmacılardaki aksan farklılıklarının erkek konuşmacılardaki aksan farklılıklarına göre daha çok anlaşılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

7.1.3. 7 Bölge (Coğrafik Bölgeler) Bazında Adli Aksan Analizi

Türkçe ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizinin üçüncü istatistiksel uygulaması 7 bölge bazında adli aksan analizi olarak gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada Şekil 7.3'te olduğu gibi Türkiye'nin mevcutta bulunan 7 coğrafi bölgesi baz alınarak, bu bölgeler arasındaki aksan farklılıkları ünlü harflerin formant frekans değerlerine göre analiz edilmiştir. Analizde bölgeler:

- Marmara (1)
- Ege (2)
- İç Anadolu (3)
- Karadeniz (4)
- Akdeniz (5)
- Doğu Anadolu (6)
- Güneydoğu Anadolu (7)

olarak numaralandırılmıştır.

Marmara bölgesi illeri içerisinde Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, İstanbul, Çanakkale, Yalova, Balıkesir, Kocaeli, Bursa, Sakarya ve Bilecik olmak üzere toplamda 11 il bulunmaktadır.

Ege bölgesi İzmir, Aydın, Muğla, Manisa, Denizli, Uşak, Kütahya ve Afyonkarahisar olmak üzere toplamda 8 ili kapsamaktadır.

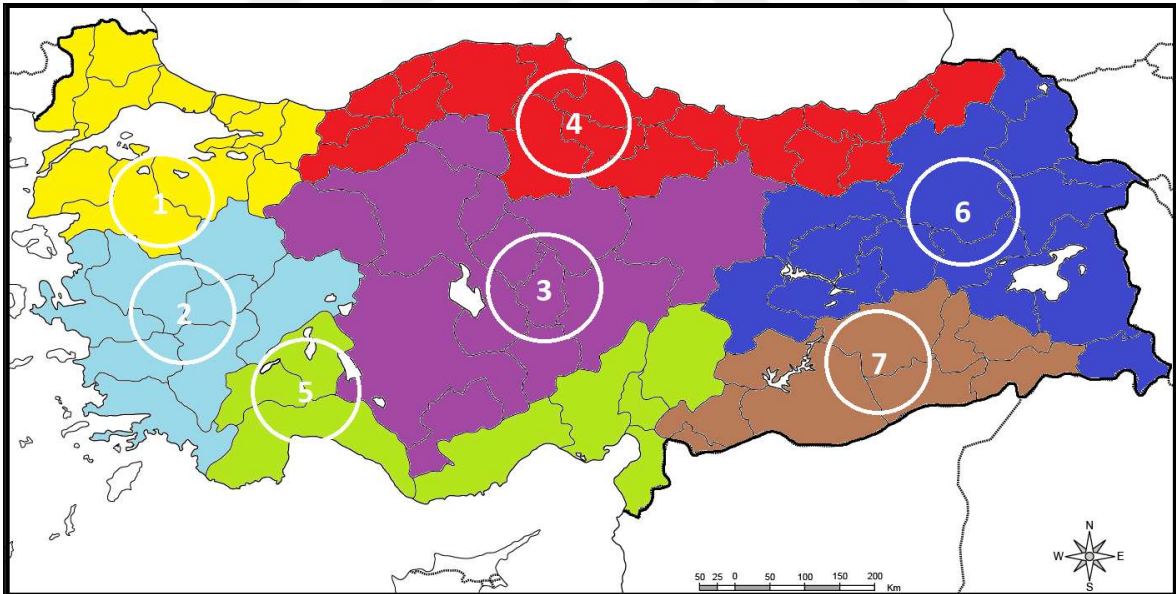
İç Anadolu bölgesi illeri içerisinde Ankara, Eskişehir, Konya, Karaman, Aksaray, Kırşehir, Kırıkkale, Çankırı, Yozgat, Nevşehir, Niğde, Kayseri ve Sivas olmak üzere toplamda 13 il yer almaktadır.

Karadeniz bölgesinde Düzce, Bolu, Zonguldak, Karabük, Bartın, Kastamonu, Sinop, Çorum, Samsun, Amasya, Tokat, Ordu, Giresun, Gümüşhane, Trabzon, Bayburt, Rize ve Artvin olmak üzere toplam 18 adet ilimiz bulunmaktadır.

Akdeniz bölgesi Burdur, Isparta, Antalya, Mersin, Adana, Osmaniye, Hatay ve Kahramanmaraş olmak üzere toplam 8 ili kapsamaktadır.

Doğu Anadolu bölgesinde Malatya, Elazığ, Tunceli, Erzincan, Erzurum, Bingöl, Muş, Bitlis, Ardahan, Kars, Iğdır, Ağrı, Van ve Hakkari olmak üzere 14 ilimiz yer almaktadır.

Güneydoğu Anadolu bölgesi ise Kilis, Gaziantep, Adıyaman, Şanlıurfa, Diyarbakır, Mardin, Batman, Siirt ve Şırnak olmak üzere toplamda 10 ili kapsamaktadır.



Şekil 7.3. 7 bölge bazında adli aksan analizine göre Türkiye aksan haritası

Bu uygulamadaki aksan haritası baz alındığında konuşmacıların bölgelere göre dağılımı Tablo 7.12’de gösterilmektedir.

Tablo 7.13 Konuşmacıların cinsiyete ve 7 bölge bazında bölgelere göre dağılımı

Bölge	Cinsiyet	
		<i>Erkek</i>
		<i>Kız</i>
	<i>Marmara (1)</i>	4
	<i>Ege (2)</i>	5
	<i>İç Anadolu (3)</i>	4
	<i>Karadeniz (4)</i>	10
	<i>Akdeniz (5)</i>	12
	<i>Doğu Anadolu (6)</i>	31
	<i>Güneydoğu Anadolu (7)</i>	6

7.1.3.1. Erkek Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları

7 bölge bazlı formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi uygulamasında, Marmara (1), Ege (2), İç Anadolu (3), Karadeniz (4), Akdeniz (5), Doğu Anadolu (6) ve Güneydoğu Anadolu (7) bölgelerinden olan erkek konuşmacıların yalın ünlülerdeki, iki harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ve üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ortalama formant frekans değerleri sırasıyla Tablo 7.14, Tablo 7.15, Tablo 7.16, Tablo 7.17, Tablo 7.18, Tablo 7.19 ve Tablo 7.20’de gösterilmektedir.

Tablo 7.14 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Marmara (1) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	626	1040	2659	731	1098	2695	742	1098	2582
<i>e</i>	416	1890	2582	550	1822	2551	643	1717	2504
<i>ı</i>	314	1306	2406	333	1480	2455	333	1338	2362
<i>i</i>	267	2267	2914	282	2065	2787	272	2202	2885
<i>o</i>	368	809	2712	386	900	2608	378	846	2604
<i>ö</i>	372	1464	2387	361	1330	2362	328	1071	1925
<i>u</i>	289	833	2509	293	853	2434	285	905	2453
<i>ü</i>	277	1699	2286	285	1620	2258	272	1664	2258

Tablo 7.15 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Ege (2) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	656	1076	2712	715	1148	2644	743	1152	2636
<i>e</i>	442	1875	2560	540	1667	2472	532	1628	2443
<i>ı</i>	319	1296	2465	336	1397	2464	345	1366	2465
<i>i</i>	279	2272	2957	298	2074	2851	287	2098	2873
<i>o</i>	351	869	2673	388	906	2554	398	891	2569
<i>ö</i>	403	1457	2372	400	1410	2357	354	1088	1899
<i>u</i>	269	713	2497	294	874	2423	315	905	2487
<i>ü</i>	282	1733	2246	306	1661	2284	309	1722	2311

Tablo 7.16 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında İç Anadolu (3) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	430	1015	2866	460	1034	2370	513	1062	2332
<i>e</i>	374	1471	2449	402	1199	2275	356	1223	2245
<i>ı</i>	325	1182	2538	333	1409	2548	333	1333	2496
<i>i</i>	270	2138	2853	288	2195	2858	285	2006	2802
<i>o</i>	363	854	2714	396	927	2662	374	894	2660
<i>ö</i>	365	1482	2467	373	1414	2444	322	1162	2021
<i>u</i>	291	826	2574	297	957	2573	291	946	2566
<i>ü</i>	301	1667	2353	299	1594	2314	297	1673	2268

Tablo 7.17 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Karadeniz (4) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	579	1097	2664	631	1162	2597	637	1129	2630
<i>e</i>	407	1868	2640	458	1454	2369	501	1471	2412
<i>ı</i>	322	1294	2535	338	1414	2569	338	1376	2591
<i>i</i>	278	2216	2953	273	1957	2822	282	2109	2818
<i>o</i>	359	879	2759	407	911	2624	381	890	2666
<i>ö</i>	380	1419	2378	384	1362	2412	349	1093	1953
<i>u</i>	300	839	2555	302	906	2553	291	965	2607
<i>ü</i>	294	1642	2300	307	1618	2384	292	1663	2366

Tablo 7.18 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Akdeniz (5) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yahın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	494	1039	2534	578	1099	2458	587	1099	2458
<i>e</i>	374	1535	2405	477	1507	2418	478	1590	2490
<i>ı</i>	327	1300	2466	332	1434	2535	329	1414	2524
<i>i</i>	284	2131	2786	290	1924	2781	292	1989	2793
<i>o</i>	357	880	2696	364	925	2575	350	877	2574
<i>ö</i>	359	1375	2341	352	1339	2367	324	1129	1924
<i>u</i>	293	838	2530	298	907	2491	295	967	2491
<i>ü</i>	300	1685	2353	308	1628	2381	307	1649	2352

Tablo 7.19 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Doğu Anadolu (6) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yahın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	535	1051	2613	589	1098	2571	564	1077	2466
<i>e</i>	415	1645	2450	483	1572	2435	469	1531	2414
<i>ı</i>	339	1305	2460	346	1410	2477	345	1376	2498
<i>i</i>	276	2058	2819	285	1902	2704	283	1985	2782
<i>o</i>	373	846	2604	390	906	2544	366	878	2551
<i>ö</i>	382	1404	2391	374	1340	2382	325	1083	1955
<i>u</i>	296	826	2505	295	902	2468	290	948	2467
<i>ü</i>	285	1644	2267	298	1577	2282	285	1654	2283

Tablo 7.20 Erkek konuşmacıların 7 bölge bazında Güneydoğu Anadolu (7) bölgesi analiz sonuçları

Ünlü	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yahın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	522	1060	2694	544	1106	2546	489	1008	2306
<i>e</i>	398	1653	2483	450	1572	2482	421	1457	2362
<i>ı</i>	318	1259	2489	350	1334	2423	342	1361	2491
<i>i</i>	267	2113	2937	291	1925	2816	300	2069	2898
<i>o</i>	345	852	2665	370	866	2574	371	881	2622
<i>ö</i>	360	1465	2330	366	1309	2270	332	1161	1930
<i>u</i>	293	798	2518	315	849	2476	300	922	2483
<i>ü</i>	282	1700	2311	311	1609	2315	301	1697	2304

7 bölge bazında Marmara, Ege, İç Anadolu, Karadeniz, Akdeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinden erkek konuşmacıların seslendirdiği ünlülerin ortalama

formant frekans değerlerine bakıldığında üç harfli seslemlerde geçen “a” ünlüsünün F1, F2 ve F3 formant frekans değerleri en yüksek Ege bölgesi konuşmacılarında görülmüştür. İki harfli ve üç harfli seslemlerde bulunan “e” ünlüsünün tüm formant frekans değerleri en yüksek Marmara bölgesi konuşmacılarında ölçülmüştür. İç Anadolu bölgesinde yer alan konuşmacıların iki harfli seslemlerde seslendirdiği “i”, “o”, “ö” ve “u” ünlülerinin F2 ve F3 değerleri diğer bölgelerdeki konuşmacılara göre en yüksek değerde çıkmıştır. Ayrıca “ö” ünlüsünün F1 değeri seslem sayısına bakılmaksızın en yüksek Ege, F2 ve F3 değerleri ise aynı şekilde seslem sayısına bakılmaksızın en yüksek İç Anadolu bölgesinde olduğu görülmektedir. Kuzey bölgesinden olan konuşmacıların genel olarak daha yüksek formant frekans değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her üç bölgede de ünlü harfin yalın halde, iki harfli seslemler içerisinde ve üç harfli seslemler içerisinde seslendirilişi arasında belirli formant frekans farklılıklarının bulunması, adli açıdan aksan analizi yapılırken bu durumun göz önünde bulundurulması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

7.1.3.2. Kız Konuşmacılara ait Adli Aksan Analizi Sonuçları

7 bölge bazlı formant frekans değerlerinin istatistiksel analizi uygulamasında, Marmara (1), Ege (2), İç Anadolu (3), Karadeniz (4), Akdeniz (5), Doğu Anadolu (6) ve Güneydoğu Anadolu (7) bölgelerinden olan kız konuşmacıların yalın ünlülerdeki, iki harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ve üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerdeki ortalama formant frekans değerleri sırasıyla Tablo 7.21, Tablo 7.22, Tablo 7.23, Tablo 7.24, Tablo 7.25, Tablo 7.26 ve Tablo 7.27’de gösterilmektedir.

Tablo 7.21 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Marmara (1) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalın Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
<i>a</i>	331	890	1419	606	1166	2403	288	858	1515
<i>e</i>	335	606	2408	431	1054	2466	404	778	2080
<i>ı</i>	267	439	1654	398	494	1771	390	1205	2498
<i>i</i>	381	2643	3473	304	1191	2939	285	732	2719
<i>o</i>	424	601	1010	383	737	1111	375	716	1421
<i>ö</i>	268	611	1749	350	729	1709	287	558	1400
<i>u</i>	392	1028	3267	389	1157	3049	324	832	2530
<i>ü</i>	408	1948	2916	399	1836	2976	357	1917	2913

Tablo 7.22 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Ege (2) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	254	998	1443	406	1081	1780	425	1080	1757
<i>e</i>	489	1708	2893	556	1557	2515	520	1348	2283
<i>ı</i>	409	1357	2601	385	1239	2485	392	1045	2264
<i>i</i>	239	427	2738	265	1031	2801	272	1551	2822
<i>o</i>	452	801	2011	453	918	2131	443	967	2168
<i>ö</i>	429	929	1994	409	1002	1971	369	845	1643
<i>u</i>	306	858	2268	332	941	2251	308	994	2702
<i>ü</i>	319	1599	2491	317	1451	2411	300	1514	2371

Tablo 7.23 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında İç Anadolu (3) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	476	1097	2125	543	1135	2060	640	1189	2022
<i>e</i>	328	1181	2473	508	1413	2469	606	1430	2378
<i>ı</i>	310	836	1602	385	1290	2532	371	1175	2212
<i>i</i>	266	455	2637	269	1013	2691	260	1403	2821
<i>o</i>	325	898	1893	411	947	2451	428	898	2272
<i>ö</i>	320	926	1727	429	1156	2120	301	805	1476
<i>u</i>	305	920	3022	338	900	2610	311	979	2601
<i>ü</i>	315	1346	2435	303	1201	2255	289	1408	2333

Tablo 7.24 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Karadeniz (4) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	681	1271	2535	604	1157	2176	654	1208	2230
<i>e</i>	554	1305	2435	611	1339	2382	689	1443	2341
<i>ı</i>	391	1386	2226	413	1261	2366	379	1111	2179
<i>i</i>	331	1160	2815	266	870	2605	265	1060	2682
<i>o</i>	463	980	2413	613	1012	2576	606	921	2657
<i>ö</i>	444	1366	2402	523	1195	2111	447	1019	1865
<i>u</i>	327	925	2130	354	997	2542	334	1002	2602
<i>ü</i>	268	924	2116	359	1507	2460	334	1627	2478

Tablo 7.25 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Akdeniz (5) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	222	957	1308	466	1082	1759	610	1187	2009
<i>e</i>	514	1413	2473	506	1317	2295	518	1203	2300
<i>ı</i>	395	809	2232	376	724	1701	397	911	2005
<i>i</i>	385	2527	3288	304	1330	2800	280	1310	2769
<i>o</i>	581	949	2888	542	950	2576	512	970	2564
<i>ö</i>	432	1142	2094	332	861	1707	498	1122	2039
<i>u</i>	384	961	2667	353	938	2577	356	1030	2496
<i>ü</i>	325	1907	2600	327	1088	2032	358	1594	2408

Tablo 7.26 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Doğu Anadolu (6) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	370	1017	1631	501	1099	1970	578	1148	2101
<i>e</i>	335	935	2353	459	1273	2374	453	1226	2218
<i>ı</i>	327	857	1931	351	998	2038	339	993	2021
<i>i</i>	267	1067	2690	274	1119	2688	266	1157	2645
<i>o</i>	349	838	1548	410	920	1977	412	922	2066
<i>ö</i>	341	858	1837	357	973	1880	332	804	1532
<i>u</i>	279	888	2643	302	938	2274	295	987	2409
<i>ü</i>	269	1103	2158	288	1287	2236	287	1402	2309

Tablo 7.27 Kız konuşmacıların 7 bölge bazında Güneydoğu Anadolu (7) bölgesi analiz sonuçları

	Ortalama Formant Frekans Değerleri (Hertz)								
	Yalnız Ünlüler			İki Harfli Seslemler			Üç Harfli Seslemler		
Ünlü	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>a</i>	257	928	1312	674	1203	2381	445	1055	1848
<i>e</i>	456	1263	2577	414	1218	2330	455	1215	2290
<i>ı</i>	307	937	1989	308	976	1921	337	994	2051
<i>i</i>	271	1246	2833	272	1229	2694	269	1381	2786
<i>o</i>	371	828	1616	429	899	2027	409	904	2092
<i>ö</i>	273	906	1883	297	909	1798	324	880	1623
<i>u</i>	261	805	2490	304	948	2694	299	914	2549
<i>ü</i>	287	1273	2422	290	1299	2342	284	1297	2297

7 bölge bazında Marmara, Ege, İç Anadolu, Karadeniz, Akdeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinden kız konuşmacıların seslendirdiği ünlülerin ortalama

formant frekans değerleri sonuçlarına göre yalın halde ve üç harfli seslemler içerisinde bulunan “a” ünlüsüne ait en yüksek F1, F2 ve F3 değerleri Karadeniz bölgesi konuşmacılarında bulunmaktadır. Yalın halde ve iki harfli seslemler içerisinde geçen “e” ünlüsünde en yüksek F1 değeri yine Karadeniz bölgesi konuşmacılarında lmş iken bu ünlüye ait aynı seslemlerdeki en yüksek F2 ve F3 değerleri ise Ege bölgesi konuşmacılarında gözlemlenmektedir. Yalın halde bulunan “” ünlüsüne ait en yüksek F1, F2 ve F3 değerleri Karadeniz bölgesinde bulunmakta iken, aynı ünlünün üç harfli seslemlerdeki en yüksek formant frekans değerleri Akdeniz bölgesi konuşmacılarında görülmektedir. Yalın halde ve iki harfli seslemlerde bulunan “u” ve “” ünlüsünün en yüksek formant frekans değerleri Marmara bölgesi konuşmacılarında ölçülmüştür. Ayrıca “” ünlüsüne ait en yüksek F2 ve F3 değerleri seslem sayısından bağımsız olarak yine Marmara bölgesi konuşmacılarında bulunmaktadır.

7.2. Formant Frekans Değerlerinin Sınıflandırılması Uygulaması

Tez kapsamında gerçekleştirilen Türkçe nl harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizinde ikinci genel uygulama formant frekans değerlerinin sınıflandırılması olarak gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın bu bölümünde analizler önceki bölümlerde olduğu gibi erkek ve kız konuşmacılar olmak üzere iki genel başlıkta incelenmiştir. Yalnızca Bölüm 7.2.4’te bölgeler arası karşılaştırmalı sınıflandırma yapılırken tez çalışmasına dahil olan konuşmacı sayıları göz önünde bulundurularak her bölgede 10 erkek analiz edilecek şekilde karşılaştırmalar yapılmıştır. Sınıflandırmalarda “MATLAB Classification Learner” aracı kullanılmıştır. Her konuşmacının seslendirdiği her ünlüye ait F1, F2 ve F3 değerlerinin yanında 4.parametre olan bölge bilgisi, “yanıt (response)” parametresi olarak atanmış ve çapraz doğrulama (cross validation) değeri sınıflandırmada çoğunlukla kullanılan 10 değerine sabitlenmiştir. Sınıflandırma için kullanılacak veri setinin büyük olması gerekliliği göz önünde bulundurularak konuşmacının seslendirdiği her seslem den alınan formant frekans değerlerinin ortalaması alınmadan veri seti oluşturulmuştur. Örneğin: konuşmacı iki harfli seslemlerden “a” ünlüsü ile ilgili kısmı seslendirmişse (at, a, az, ta, a, za), bu seslemlerdeki her “a” ünlüsünün formant frekans değerleri ayrı bir gözlem (observation) olarak hesaba katılmış olup o kişinin bölge bilgiside 4.sutn olarak atanmıştır. Bu sayede veri setinin daha geniş olması sağlanmıştir. Bu bölümdeki tablolarda sınıflandırma başarım oranları yüzde (%) olarak

verilmiş olup, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 sütunları sırasıyla SVM, KNN, Tree, Linear Discriminant, Quadratic Discriminant ve Ensemble sınıflandırma algoritmalarını belirtmektedir.

7.2.1. 2 Bölge (Batı, Doğu) Bazında Sınıflandırma

Bu sınıflandırma alt başlığında Türkiye, batı ve doğu olmak üzere 2 bölge olarak analiz edilmiştir. Sınıflandırma başarımları sonuçları erkek ve kızlarda ayrı ayrı verilmektedir.

7.1.2.1. Erkek Konuşmacılar ile Sınıflandırma

Tablo 7.28 Erkek konuşmacı aksan analizi başarı oranları (2 bölge)

Ünl ü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	61	61	44	59	56	59	61	60	64	61	60	64	64	63	62	62	61	63
<i>e</i>	70	61	61	61	54	59	66	64	65	61	62	63	63	61	63	62	59	63
<i>ı</i>	61	61	45	55	50	62	61	61	56	60	56	60	61	61	56	61	58	61
<i>i</i>	65	61	56	58	59	62	63	64	62	61	58	61	64	64	60	60	61	62
<i>o</i>	62	61	62	58	48	61	63	63	63	60	62	61	61	61	58	61	60	61
<i>ö</i>	63	61	56	61	59	61	62	62	65	60	60	61	63	61	58	59	61	61
<i>u</i>	61	61	58	63	61	66	61	61	60	60	59	61	61	61	58	61	59	61
<i>ü</i>	61	61	51	52	51	56	63	64	58	59	57	62	67	65	62	63	63	64

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “e” ünlüsü yoluyla %70, iki harfli seslemlerde seslendirilen “e” ünlüsü yoluyla %66 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ü” ünlüsü yoluyla %67 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Batı ve Doğu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.1.2.2. Kız Konuşmacılar ile Sınıflandırma

Tablo 7.29 Kız konuşmacı aksan analizi başarı oranları (2 bölge)

	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
Ünlü	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	72	72	57	65	65	72	73	72	74	72	71	72	73	72	73	70	71	72
<i>e</i>	72	72	62	75	75	72	72	72	70	71	69	72	74	72	72	71	72	72
<i>ı</i>	72	72	60	67	67	72	76	<u>78</u>	70	71	72	72	76	77	71	70	71	74
<i>i</i>	75	75	75	67	67	82	77	74	70	72	69	72	74	72	73	71	72	72
<i>o</i>	77	80	60	67	70	77	74	<u>78</u>	72	72	70	72	<u>79</u>	75	73	72	71	72
<i>ö</i>	72	72	62	65	67	72	73	72	70	68	69	71	76	73	72	71	68	72
<i>u</i>	82	<u>85</u>	80	80	75	80	74	72	69	70	73	72	72	72	71	70	71	72
<i>ü</i>	72	80	75	75	80	72	75	75	71	75	74	74	76	76	74	71	72	74

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “u” ünlüsü yoluyla %85, iki harfli seslemlerde seslendirilen “ı” ve “o” ünlüleri yoluyla %78 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ö” ünlüsü yoluyla %79 başarı oranında, sesi alınan kız konuşmacılar Batı ve Doğu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.2.2. 3 Bölge (Batı, Doğu, Kuzey) Bazında Sınıflandırma

Bu sınıflandırma alt başlığında Türkiye, batı, doğu ve kuzey olmak üzere 3 bölge olarak analiz edilmiştir. Sınıflandırma başarımları sonuçları erkek ve kızlarda ayrı ayrı verilmektedir.

7.1.2.1. Erkek Konuşmacılar ile Sınıflandırma

Tablo 7.30. Erkek konuşmacı aksan analizi başarı oranları (3 bölge)

	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
Ünlü	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	54	54	45	50	33	51	58	57	56	53	53	58	58	56	53	57	54	54
<i>e</i>	<u>62</u>	54	48	51	37	52	<u>62</u>	59	57	52	57	59	57	55	56	56	54	54
<i>ı</i>	54	54	50	54	50	55	54	53	47	52	51	53	54	54	51	54	52	54
<i>i</i>	58	54	47	51	54	55	56	55	59	56	52	55	<u>60</u>	55	57	53	53	59
<i>o</i>	54	54	55	48	36	54	57	54	53	53	57	54	54	54	50	53	52	53
<i>ö</i>	54	54	45	52	54	54	54	55	51	54	53	54	58	55	52	53	54	55
<i>u</i>	54	54	43	51	47	54	54	54	51	53	53	54	54	54	51	54	51	53
<i>ü</i>	54	56	50	50	48	51	55	56	51	50	51	53	57	57	56	55	55	56

Bu sonuçlara göre; yalın halde ve iki harfli seslemlerde seslendirilen “e” ünlüsü yoluyla %62 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “i” ünlüsü yoluyla %60 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Batı, Doğu ve Kuzey bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.1.2.2. Kız Konuşmacılar ile Sınıflandırma

Tablo 7.31. Kız konuşmacı aksan analizi başarı oranları (3 bölge)

Ünlü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	70	72	65	67	60	70	70	70	68	70	69	70	70	70	70	70	69	70
<i>e</i>	67	70	52	70	70	70	70	70	67	58	57	69	70	70	68	62	59	70
<i>ı</i>	70	70	65	62	65	70	71	72	67	66	62	70	71	72	69	67	65	68
<i>i</i>	72	70	72	57	55	70	<u>74</u>	70	66	66	60	70	70	71	67	67	67	69
<i>o</i>	75	70	65	60	65	70	70	70	66	63	62	70	<u>75</u>	71	67	68	65	70
<i>ö</i>	70	72	70	65	62	70	70	70	70	67	65	68	<u>75</u>	72	66	63	62	70
<i>u</i>	75	<u>77</u>	75	72	70	75	70	70	68	70	69	70	70	70	70	67	66	69
<i>ü</i>	75	<u>77</u>	67	75	75	75	72	70	69	67	68	70	72	72	68	69	69	71

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “u” ve “ü” ünlüleri yoluyla %77, iki harfli seslemlerde seslendirilen “i” ünlüsü yoluyla %74 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “o” ve “ö” ünlüleri yoluyla %75 başarı oranında, sesi alınan kız konuşmacılar Batı, Doğu ve Kuzey bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.2.3. 7 Bölge (Coğrafik Bölgeler) Bazında Sınıflandırma

Bu sınıflandırma alt başlığında Türkiye, Marmara, Ege, İç Anadolu, Karadeniz, Akdeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu olmak üzere 7 bölge olarak analiz edilmiştir. Sınıflandırma başarımları sonuçları erkek ve kızlarda ayrı ayrı verilmektedir.

7.1.2.1. Erkek Konuşmacılar ile Sınıflandırma

Tablo 7.32. Erkek konuşmacı aksan analizi başarı oranları (7 bölge)

Ünlü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	43	43	<u>45</u>	38	23	38	44	43	42	42	40	43	<u>47</u>	44	43	40	35	43
<i>e</i>	41	43	36	40	31	40	46	43	41	40	41	43	43	43	42	40	38	43
<i>ı</i>	43	43	33	41	38	43	<u>47</u>	43	45	42	43	43	44	43	45	42	42	42
<i>i</i>	44	43	36	40	40	41	44	43	43	43	40	44	44	44	46	43	37	43
<i>o</i>	43	43	36	43	30	43	45	43	44	44	46	43	43	43	41	42	40	42
<i>ö</i>	43	43	34	37	38	41	44	43	41	42	43	42	45	43	42	42	42	43
<i>u</i>	43	43	29	38	34	41	43	43	42	41	42	42	43	43	38	41	42	42
<i>ü</i>	43	43	36	37	34	41	43	43	40	41	41	43	46	43	43	43	43	44

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “a” ünlüsü yoluyla %45, iki harfli seslemlerde seslendirilen “ı” ünlüsü yoluyla %47 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “a” ünlüsü yoluyla %47 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Marmara, Ege, İç Anadolu, Karadeniz, Akdeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.1.2.2. Kız Konuşmacılar ile Sınıflandırma

Tablo 7.33. Kız konuşmacı aksan analizi başarı oranları (7 bölge)

Ünlü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	52	52	42	47	42	52	52	52	51	45	43	52	52	53	51	52	45	52
<i>e</i>	55	52	45	52	45	52	55	55	47	48	47	52	52	52	48	47	45	52
<i>ı</i>	52	52	32	47	47	52	54	54	53	46	42	54	55	56	52	50	48	52
<i>i</i>	<u>55</u>	52	42	45	50	<u>55</u>	52	<u>56</u>	50	51	43	52	53	52	50	50	49	52
<i>o</i>	52	52	40	47	42	50	52	55	49	47	42	54	54	53	52	47	48	50
<i>ö</i>	52	52	45	50	40	52	55	52	49	49	38	54	<u>57</u>	55	51	47	45	54
<i>u</i>	52	52	45	45	42	47	52	52	48	51	48	52	52	52	52	51	49	51
<i>ü</i>	52	52	42	45	42	50	52	52	54	53	52	52	53	52	50	51	53	51

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “i” ünlüsü yoluyla %55, iki harfli seslemlerde seslendirilen “ı” ünlüsü yoluyla %56 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ö” ünlüsü yoluyla %57 başarı oranında, sesi alınan kız konuşmacılar Marmara, Ege, İç

Anadolu, Karadeniz, Akdeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.2.4. Bölgeler Arası Karşılaştırmalı Sınıflandırma

Bu sınıflandırma alt başlığında bölgeler arasında karşılaştırmalı sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Seçilen bölgeler içerisinde Karadeniz, Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgeleri yer almaktadır. Bu bölgelerin seçilme sebebi oluşturulan veri seti içerisinde bu üç bölgenin her birinde en az 10’ar erkek bulunmasıdır. Bu sebeple sadece erkek konuşmacılar bu sınıflandırma analizine dahil edilmiştir.

7.2.4.1. Akdeniz - Karadeniz Bölgeleri Arasında Sınıflandırma

Tablo 7.34 Erkek konuşmacı karşılaştırmalı aksan analizi başarı oranları (Akdeniz - Karadeniz)

Ünlü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	<u>75</u>	70	75	70	55	<u>75</u>	<u>73</u>	70	64	63	62	67	68	68	64	59	54	72
<i>e</i>	65	55	45	55	50	60	61	64	58	53	43	65	63	62	59	55	56	59
<i>ı</i>	60	50	40	30	50	50	70	64	64	52	52	62	69	72	68	60	62	67
<i>i</i>	70	70	55	65	55	65	64	58	50	57	59	58	68	66	61	62	59	71
<i>o</i>	60	50	55	20	45	55	68	68	64	66	62	65	64	62	59	64	59	60
<i>ö</i>	60	70	30	40	55	50	62	59	59	59	56	63	60	60	50	64	61	63
<i>u</i>	<u>75</u>	65	50	15	70	60	63	63	57	54	56	59	59	54	50	56	58	57
<i>ü</i>	45	55	30	55	40	50	70	67	59	44	52	62	70	64	61	58	50	<u>73</u>

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “a” ve “u” ünlüleri yoluyla %75, iki harfli seslemlerde seslendirilen “a” ünlüsü yoluyla %73 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ü” ünlüsü yoluyla %73 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Akdeniz ve Karadeniz bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.2.4.2. Akdeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Arasında Sınıflandırma

Tablo 7.35 Erkek konuşmacı karşılaştırmalı aksan analizi başarı oranları (Akdeniz - Doğu Anadolu)

Ünlü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	65	65	75	60	40	70	70	70	70	51	59	69	67	70	70	43	57	74
<i>e</i>	85	90	80	60	65	85	75	70	69	53	56	69	70	65	63	46	47	65
<i>ı</i>	60	60	55	20	55	55	75	70	68	44	52	69	65	65	61	53	59	60
<i>i</i>	65	70	45	70	60	65	66	64	55	55	64	55	69	63	63	58	61	65
<i>o</i>	65	65	35	45	45	50	70	67	63	55	54	67	61	56	56	50	50	60
<i>ö</i>	45	55	40	35	35	50	70	64	65	48	51	65	71	70	65	73	66	69
<i>u</i>	45	50	40	35	55	50	62	62	57	55	52	58	66	65	59	55	50	63
<i>ü</i>	80	75	55	60	65	60	70	71	65	64	62	71	65	62	71	64	65	68

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “e” ünlüsü yoluyla %90, iki harfli seslemlerde seslendirilen “e” ve “ı” ünlüleri yoluyla %75 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ö” ve “ü” ünlüleri yoluyla %71 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Akdeniz ve Doğu Anadolu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir. Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgeleri arasında yapılan sınıflandırmada alınan %90 başarı oranı bu tez çalışması için yapılan sınıflandırma uygulamaları arasındaki en yüksek başarı oranı olarak kaydedilmiştir.

7.2.4.3. Karadeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Arasında Sınıflandırma

Tablo 7.36 Erkek konuşmacı karşılaştırmalı aksan analizi başarı oranları (Karadeniz - Doğu Anadolu)

Ünlü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	65	60	55	40	40	60	73	69	60	60	53	62	63	66	63	55	49	63
<i>e</i>	85	80	75	75	70	80	65	73	57	54	55	68	56	58	54	50	47	56
<i>ı</i>	45	50	10	40	20	50	69	58	64	54	57	65	60	57	56	58	57	58
<i>i</i>	80	85	55	60	70	65	75	72	72	53	61	73	82	75	76	67	72	78
<i>o</i>	55	55	50	40	50	50	65	60	55	58	53	59	61	56	54	53	48	53
<i>ö</i>	60	55	60	35	45	60	79	75	75	64	55	80	71	73	64	61	62	75
<i>u</i>	75	65	60	50	65	65	65	65	64	54	61	60	64	66	64	60	60	59
<i>ü</i>	65	60	30	55	45	55	78	73	74	66	69	78	78	80	76	64	60	78

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “e” ve “i” ünlüleri yoluyla %85, iki harfli seslemlerde seslendirilen “ö” ünlüsü yoluyla %80 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ı” ünlüsü yoluyla %82 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Karadeniz ve Doğu Anadolu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

7.2.4.4. Akdeniz - Karadeniz - Doğu Anadolu Bölgeleri Arasında Sınıflandırma

Tablo 7.37 Erkek konuşmacı karşılaştırmalı aksan analizi başarı oranları (Akdeniz - Karadeniz - Doğu Anadolu)

Ünl ü	Yalın Ünlüler						İki Harfli Seslemler						Üç Harfli Seslemler					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	43	40	53	40	30	56	58	55	49	43	42	50	51	52	46	31	35	53
<i>e</i>	63	53	50	50	50	56	53	55	45	31	33	55	43	38	43	36	26	42
<i>ı</i>	36	40	33	20	33	33	49	48	46	40	38	47	47	47	49	36	38	46
<i>i</i>	56	56	40	53	40	53	51	48	48	40	43	47	56	53	47	43	44	56
<i>o</i>	30	33	16	16	26	33	51	47	46	43	40	46	43	40	36	42	37	43
<i>ö</i>	26	33	23	20	30	33	55	50	53	41	41	57	53	49	50	50	46	50
<i>u</i>	50	43	20	23	46	46	46	42	42	36	41	41	46	41	39	38	36	38
<i>ü</i>	36	36	26	36	36	33	55	54	51	37	46	50	56	54	58	39	45	63

Bu sonuçlara göre; yalın halde seslendirilen “e” ünlüsü yoluyla %63, iki harfli seslemlerde seslendirilen “a” ünlüsü yoluyla %58 ve üç harfli seslemlerde seslendirilen “ü” ünlüsü yoluyla %63 başarı oranında, sesi alınan erkek konuşmacılar Akdeniz, Karadeniz ve Doğu Anadolu bölge sınıflarından birine dahil edilebilmektedir.

8. SONUÇ

Bu tez çalışmasında adli ses incelemeleri, bu incelemelerde kullanılabilecek yazılımlar ve bu yazılımların temelinde yer alan konuşma işleme teknikleri incelenmiş ve ses incelemede kullanılabilecek yazılımlarda bulunan eksik yönler doğrultusunda konuşmacının aksan analizi üzerinde durulmuştur. İncelenen yazılımlardan hiçbirinin özellikle takip ve istihbarat alanında önemli sayılabilecek aksan analizini içermediği gözlemlenmiş ve mevcut durumda aksan analizinin ilgili kişi veya kişilerin işitsel kabiliyetlerine ve aksan bilgilerine dayalı olduğu anlaşılmıştır. Bu amaçla Türkçe ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının sonuçları Bölüm 7’de yapılan uygulamalar ışığında, istatistiksel analiz ve sınıflandırma analizi olmak üzere 2 genel başlıkta değerlendirilmiştir.

İstatistiksel Analiz Sonuçları

Uygulama sonuçlarının istatistiksel analiz bölümünde ünlülerin yalın haldeki, iki harfli seslemlerdeki ve üç harfli seslemlerdeki ortalama formant frekans değerleri kız ve erkeklerde ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Türkiye aksan haritasında 3 bölge yer aldığı varsayıldığında; yalın halde seslendirilen ünlüler bazında, Kuzey (3) bölgesinden olan erkek konuşmacıların “a” ve “u” ünlülerine ait bütün (F1, F2 ve F3) formant frekans değerlerinin diğer bölgelere göre daha yüksek değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yine Kuzey (3) bölgesinden olan erkek konuşmacıların “e”, “i”, “o” ünlülerine ait F2 ve F3 değerlerinin diğer bölgelere göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Batı (1) bölgesinden olan erkek konuşmacıların “ü” ünlüsüne ait F2 ve F3 değerleri diğer bölgelerden yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, “ı” ve “ö” ünlülerinin 3 bölge arasında bariz ayırt edici özellik taşımadığı gözlemlenmiştir. İki harfli seslemlerde geçen ünlüler bazında, Kuzey (3) bölgesinden olan erkek konuşmacıların “a” ve “ö” ünlülerine ait bütün formant frekans değerleri tıpkı yalın halde seslendirilen ünlülerde olduğu gibi diğer bölgelerden yüksek çıkmıştır. Doğu (2) bölgesinden olan erkek konuşmacıların “e” ünlüsüne ait F2 ve F3 değerlerinin diğer bölgelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Batı (1) bölgesinden olan erkek konuşmacıların “i” ünlüsüne ait F1 ve F2 değerlerinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bariz farklılıklar olmaması sebebiyle “ı”, “o” ve “ü” ünlüleri ile aksan farklılıklarının ortaya konulamayacağı anlaşılmıştır. Üç harfli seslemlerde geçen ünlüler bazında, Kuzey (3)

bölgesinden olan erkek konuşmacıların “a” ve “o” ünlülerine ait bütün formant frekans değerleri diğer bölgelerden yüksek çıkmıştır. “e”, “ı”, “i”, “ö”, “u” ve “ü” ünlüleriyle ise aksan farklılıklarının sağlıklı bir şekilde tespit edilemeyeceği görülmüştür. 3 bölge bazında kız konuşmacılar analiz edildiğinde, Kuzey (3) bölgesi konuşmacılarının seslendirdiği “a” ünlüsüne ait bütün formant frekans (F1, F2 ve F3) değerlerinin bariz bir şekilde diğer bölgelerden yüksek ve ayırt edici olduğu gözlemlenmektedir. Bu ayırt edici özellik ünlünün yalın halde, iki harfli seslemlerde ve üç harfli seslemlerde söylenmesine bağlı olarak değişmemektedir. Batı (1) aksanındaki konuşmacıların yalın halde ve iki harfli seslemlerde söylediği “e” ünlüsünün F2 ve F3 değerleri diğer bölgelere göre yüksek çıkmakta iken bu durum üç harfli seslemlerde Kuzey (3) aksanındaki konuşmacıların söylediği “e” ünlüsünün bütün formant frekans değerlerinin diğer bölgelere göre yüksek olduğu şeklinde değişmektedir. Yine Kuzey (3) aksanının yalın halde ve iki harfli seslemlerde söylenilen “ı” ünlüsünün bütün formant frekans değerleri diğer bölgeler arasında en yüksek iken Doğu (2) aksanının en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Batı (1) aksanında iki harfli ve üç harfli seslemlerde söylenen “i” ünlüsünün bütün formant frekans değerleri diğer bölgelerden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Kuzey (3) aksanındaki konuşmacılarda yalın halde ve iki harfli seslemlerde söylenen “o” ünlüsüne ait bütün formant frekans değerleri diğer bölgelerde bulunan konuşmacılara ait formant frekans değerlerinden yüksek bulunmuştur. Aksanlar arası bariz farklılıklardan biriside “ö” ünlüsünde gözlemlenmiştir. Bu ünlünün yalın halde mi, iki harfli seslemlerde mi yoksa üç harfli seslemlerde mi söylendiği fark etmeksizin, bütün formant frekans değerleri Kuzey (3) aksanından en yüksek Doğu (2) aksanında en düşük olarak ölçülmüştür. “u” ünlüsü analiz edildiğinde, F1, F2 ve F3 değerlerinin üçündede Batı (1) bölgesindeki konuşmacıların yalın ünlü, iki harfli seslemlerdeki ünlü ve üç harfli seslemlerdeki ünlü durumuna bakılmaksızın Doğu (2) bölgesindeki konuşmacılara göre daha yüksek formant frekans değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Yine Batı (1) bölgesindeki konuşmacıların seslendirdiği yalın haldeki, iki harfli seslemlerdeki ve üç harfli seslemlerdeki “ü” ünlüsünün bütün formant frekans değerleri Doğu (2) aksanına göre yüksek olduğu gözlemlenmiş iken iki harfli ve üç harfli seslemlerde Kuzey (3) aksanındaki konuşmacıların “ü” ünlüsüne ait bütün formant frekans değerlerinin en yüksek olduğu anlaşılmıştır.

3 bölge bazındaki istatistiksel analiz uygulamasına genel olarak bakıldığında, kız konuşmacılardaki aksan farklılıklarının erkek konuşmacılardaki aksan farklılıklarına göre

daha çok anlaşılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle Batı (1) aksanı bölgesine dahil edilen kız konuşmacıların Doğu (2) aksanı bölgesine dahil edilen kız konuşmacılardan daha yüksek formant frekans değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Neredeyse bütün ünlü harflerde bu durumla karşılaşmıştır. Benzer çıkarımları 7 bölge bazında gerçekleştirilen istatistiksel analiz uygulamasında da yapabilmek mümkündür.

Sınıflandırma Analizi Sonuçları

Uygulama sonuçlarının sınıflandırma analizi bölümünde istatistiksel analizde olduğu gibi ünlülerin yalın haldeki, iki harfli seslemlerdeki ve üç harfli seslemlerdeki ortalama formant frekans değerleri kız ve erkeklerde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu bölümde verilen değerler bahsi geçen ünlü için en yüksek başarı oranını ifade etmektedir.

Türkiye aksan haritasında 3 bölge yer aldığı varsayıldığında; erkek konuşmacıların yalın halde seslendirdiği ünlülerden “a” ünlüsünde %52.4, “e” ünlüsünde %62.5, “ı” ünlüsünde %55.6, “i” ünlüsünde %58.3, “o” ünlüsünde %55.6, “ö” ünlüsünde %54.2, “u” ünlüsünde %54.2, “ü” ünlüsünde %56.9 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yalın halde “e” ünlüsünü seslendiren bir erkek konuşmacının Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının SVM algoritması kullanılarak %62.5 başarı oranı ile bulunabileceğini belirtmektedir. İki harfli seslemlerde geçen ünlülere baktığımızda, “a” ünlüsünde %58.3, “e” ünlüsünde %62, “ı” ünlüsünde %54.4, “i” ünlüsünde %59.5, “o” ünlüsünde %57.4, “ö” ünlüsünde %55.1, “u” ünlüsünde %54.2, “ü” ünlüsünde %56.9 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, iki harfli seslemlerde bulunan “e” ünlüsünü seslendiren bir erkek konuşmacının Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının SVM algoritması kullanılarak %62 başarı oranı ile bulunabileceğini belirtmektedir. Üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerden “a” ünlüsünde %58.1, “e” ünlüsünde %57.9, “ı” ünlüsünde %54.9, “i” ünlüsünde %60, “o” ünlüsünde %54.2, “ö” ünlüsünde %58.1, “u” ünlüsünde %54.4, “ü” ünlüsünde %57.9 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile, üç harfli seslemlerde bulunan “i” ünlüsünü seslendiren bir erkek konuşmacının Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının yine SVM algoritması kullanılarak %60 başarı oranı ile bulunabileceği anlaşılmaktadır. Yine 3 bölge bazında kız konuşmacılar analiz edildiğinde, yalın halde seslendirilen ünlülerden “a” ünlüsünde %72.5, “e” ünlüsünde %70, “ı” ünlüsünde %70, “i” ünlüsünde %72.5, “o” ünlüsünde %75, “ö” ünlüsünde %72.5, “u” ünlüsünde %77.5, “ü” ünlüsünde %77.5 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yalın halde “u” veya yalın halde “ü” ünlüsünü

seslendiren bir kız konuşmacının Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının KNN algoritması kullanılarak %77.5 başarı oranı ile bulunabileceğini belirtmektedir. İki harfli seslemlerde bulunan ünlülerden “a” ünlüsünde %70, “e” ünlüsünde %70.4, “ı” ünlüsünde %72.5, “i” ünlüsünde %74.6, “o” ünlüsünde %70.4, “ö” ünlüsünde %70.8, “u” ünlüsünde %70.4, “ü” ünlüsünde %72.1 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile, iki harfli seslemlerde bulunan “i” ünlüsünü seslendiren bir kız konuşmacının Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının SVM algoritması kullanılarak %74.6 başarı oranı ile bulunabileceği anlaşılmaktadır. Üç harfli seslemlerde bulunan ünlülerden “a” ünlüsünde %70.8, “e” ünlüsünde %70, “ı” ünlüsünde %72.1, “i” ünlüsünde %71.3, “o” ünlüsünde %75.8, “ö” ünlüsünde %75.5, “u” ünlüsünde %70.8, “ü” ünlüsünde %72.1 başarı oranları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, üç harfli seslemlerde bulunan “o” ünlüsünü seslendiren bir kız konuşmacının Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının SVM algoritması kullanılarak %75.8 başarı oranı ile bulunabileceğini belirtmektedir.

3 bölge bazında yapılan sınıflandırma uygulamasına genel olarak bakıldığında kız konuşmacılarda aksan tespitinin erkek konuşmacılara göre daha yüksek başarı ile gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Özellikle, yalın halde “u” veya “ü” ünlüsünü seslendiren bir kız konuşmacının SVM sınıflandırma algoritması kullanılarak %75 başarı oranı ile Batı (1), Doğu (2) ve Kuzey (3) aksanlarından hangisine dahil olacağının belirlenebilmesi bu tez çalışmasının sınıflandırma uygulaması içerisindeki en önemli sonuçlardan biri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, erkek konuşmacılarda ünlü harfin söylendiği seslem içerisinde yer alan harf sayısı arttıkça, aksan tespiti başarı oranının düştüğü görülmektedir. Bu duruma kız konuşmacılarda rastlanmamaktadır. Dolayısıyla istihbarat anlamında gerçek zamanlı takiplerde, kişilerin ünlü harfleri yalın olarak çok nadir kullandığı hatta hiç kullanmadığı düşünülürse, kız konuşmacıların adli açıdan aksan analizinde daha sağlıklı sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir. 7 bölge bazında yapılan sınıflandırma uygulamasında daha düşük başarı oranları elde edilmiştir. Buna bölge sayısının artması ve sınıflandırmada bölge başına düşen konuşmacı sayısının az olması sebep olarak gösterilebilir. 3 bölge bazında yapılan sınıflandırma uygulamasındaki diğer benzer çıkarımları 7 bölge bazında gerçekleştirilen sınıflandırma uygulaması için de ayrıca yapabilmek mümkündür.

Tez çalışmasının en belirgin sonuçlarını maddeler halinde sıralamak gerekirse;

1. İstatistiksel uygulama sonuçlarına göre Türkiye'nin 7 coğrafi bölgesinden Kuzey bölgesi formant frekans değerleri diğer bölgelere göre daha yüksek iken Doğu bölgesi formant frekans değerleri diğer bölgelere göre daha düşük çıkmaktadır. Bu duruma kız konuşmacılarda daha belirgin rastlanmaktadır.
2. Kız konuşmacılarda formant frekans değerlerine göre aksan sınıflandırması erkek konuşmacılara oranla daha yüksek başarı oranları vermektedir. Bu da aksan analizinde formant frekansının kullanılması durumunda kız konuşmacılarda daha yüksek doğrulukta sonuçlar alınacağını göstermektedir.
3. Ünlü harflerin formant frekans değerlerine göre aksan analizi gerçekleştirilmek istendiğinde, ünlü harfin içinde bulunduğu seslem sayısı arttıkça aksan sınıflandırması başarı oranında düşüş gözlemlenmektedir.
4. Sınıflandırma uygulamasında bölge sayısı arttıkça sınıflandırma başarı oranı düşmekte iken konuşmacı sayısının artırılması ile daha yüksek başarı oranları elde edilmektedir.
5. Bir erkek konuşmacının Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgelerinin birinden olduğu biliniyor olması şartıyla, seslendirilen yalın ünlüden faydalanılarak formant frekansı bazında sınıflandırma uygulaması gerçekleştirildiğinde bu konuşmacının hangi bölgeden olduğu **%90** doğrulukla hesaplanabilmektedir.
6. Türkiye, Batı ve Doğu olmak üzere iki bölgeye ayrılır ise, seslendirilen yalın ünlüden faydalanılarak formant frekansı bazında sınıflandırma uygulaması yoluyla herhangi bir kız konuşmacının hangi bölgeden olduğu **%85** başarı ile belirlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında Türkçe'deki ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı adli aksan analizi gerçekleştirilmiştir. Gerek istatistiksel sonuçlar gerekse sınıflandırma sonuçları Türkçe'deki ünlü harflerin aksan analizinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle daha fazla sayıda konuşmacı ile eğitilmiş sınıflandırma algoritmaları kullanılarak, ünlü harflerin formant frekans değerlerine dayalı bir eş zamanlı otomatik aksan analiz sisteminin tasarlanması bu tez çalışmasının ışığında gelecek çalışması olarak hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kara, O. K.**, 2011. Adli amaçlı ses analizinde otomatik konuşmacı tanıma yazılımı kullanılarak kardeşler arası ses benzerliklerinin ve farklılıklarının belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Adli Tıp Enstitüsü, İstanbul.
- [2] M.E.B., Müzik aletleri yapımı ses oluşum uygulamaları, Ankara, 2006.
- [3] **Makkook, M. A.**, 2007. A Multimodal Sensor Fusion Architecture for Audio-Visual Speech Recognition, *Master Thesis*, University of Waterloo, Canada.
- [4] **Campbell, J. P.**, 1997. Speaker Recognition: A Tutorial, *Proceedings of the IEEE*, **85**, 1437-1462.
- [5] **Parsons, T. W.**, 1987. Voice and Speech Processing, McGraw-Hill, New York.
- [6] **Pentz, A.**, 1990. Speech science (Spath 4313) class notes, Oklahoma State University, Stillwater.
- [7] **Ergenç, İ.**, 1995. Konuşma Dili ve Türkçenin Söyleyiş Sözlüğü, Şafak Matbaacılık, Ankara.
- [8] **Mengüşoğlu, E.**, 2004. Confidence Measures for Speech/Speaker Recognition and Applications on Turkish LVCSR, *PhD Thesis*, University of Mons, Belgium.
- [9] **Flanagan, J. L.**, 1972. Speech Analysis; Synthesis and Perception, Springer, U.S.A.
- [10] **Bayram, L.**, 2008. Adli Bilimlerde Ses ve Konuşma İncelemeleri, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [11] **Sever, H.**, 2008. Adli Ses İncelemeleri ve Hukuki Boyutu, Adalet Yayınevi, Ankara.
- [12] **Selen, N.**, 1979. Söyleyiş sesbilimi Akustik sesbilim ve Türkiye türkçesi, TDK yayınları, Ankara.
- [13] **Artuner, H.**, 1994. Bir Türkçe Fonem Kümeleme Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirimi, *Doktora Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [14] **Demircan, Ö.**, 1979. Türkiye Türkçesinin Ses Düzeni Türkiye Türkçesinde Sesler, TDK yayınları, Ankara.
- [15] **Shete, D. S. and Patil, S. B.**, 2014. Zero crossing rate and Energy of the Speech Signal of Devanagari Script, *IOSR journal of VLSI and Signal Processing*, **4**, 1-5.
- [16] **Xie, L. and Liu, Z. Q.**, 2006. A Comparative Study of Audio Features for Audio to Visual Conversion in MPEG-4 Compliant Facial Animation, *Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Dalian, August 13-16.

- [17] **Dave, N.**, 2013. Feature Extraction Methods LPC, PLP and MFCC in Speech Recognition, *International Journal for Advance Research in Engineering and Technology*, **1**, Issue VI.
- [18] **Kavitha. R., Nachammai. N., Ranjani. R. and Shifali. J.**, 2014. Speech Based Voice Recognition System for Natural Language Processing (Voice Recognition using Dynamic Time Warping and Mel-Frequency Cepstral Coefficients Algorithms), *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, **5**, 5301-5305.
- [19] **Gaudard, C., Aradilla, G. and Bourlard, H.**, 2007. Speech Recognition based on Template Matching and Phone Posterior Probabilities, *IDIAP*, Switzerland.
- [20] **Karasartova, S.**, 2011. Metinden Bağımsız Konuşmacı Tanıma Sistemlerinin İncelenmesi ve Gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [21] **Gelegin, İ. ve Bolat, B.**, 2011. Ayırık Kelime Tabanlı Bir Konuşma Tanıma Sistemiyle Bilgisayar Kontrolü, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ, 5-7 Ekim.
- [22] **Yalçın, N.**, 2008. Konuşma Tanıma Teorisi ve Teknikleri, *Kastamonu Eğitim Dergisi*, **16**, 249-266.
- [23] **Rumelhart, D.E. and McClelland, J.L.**, 1986. Parallel Distributed Processing, MIT Press, Cambridge, 10-16.
- [24] **Akçayol, M.A.**, 2001. Bir Anahtarlama Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] **Loizou, P.C.**, 2013. Speech Enhancement Theory and Practice, CRC Press, U.S.A.
- [26] **Vaseghi, S.V.**, 2008. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Wiley Publication, U.K.
- [27] **Kutlu, C. ve Arserim, M. A.**, 2012. Spektral çıkarma tabanlı kalman filtresi ile ses sinyallerinin iyileştirilmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, **3/1**, 49-59.
- [28] **Lemmetty, Sami.**, 1999. Review of Speech Synthesis Technology, *Master Thesis*, Helsinki University of Technology, Finland.
- [29] http://www.cs.tut.fi/courses/SGN-4010/puhesynteesi_en.pdf, Speech Synthesis. 7 Haziran 2017.
- [30] **Macon, M. W.**, 1996. Speech Synthesis Based on Sinusoidal Modeling, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology, U.S.A.
- [31] **Tamura, M., Masuko, T., Tokuda, K. and Kobayashi T.**, 1999. Speaker Adaptation for HMM-Based Speech Synthesis System Using MLLR, *The 3rd ESCA/COCOSDA Workshop on Speech Synthesis*, Australia, November 26-29.

- [32] **Kayte, S., Mundada, M. and Kayte C.**, 2015. A Review of Unit Selection Speech Synthesis, *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, **5**, 5.
- [33] **Gros, J. Z. and Mario, Z.**, 2008. An Efficient Unit-selection Method for Concatenative Text-to-speech Synthesis Systems, *Journal of Computing and Information Technology*, **16**, 69-78.
- [34] **Malkoç, E.**, 2010. Türkçe Ünlü Formant Frekans Değerleri ve Bu Değerlere Dayalı Ünlü Dörtgeni, *Ankara Üniversitesi Dil dergisi*, **146**, 71-85.
- [35] **Türk, O., Şayli, Ö., Özsoy, A. S. ve Arslan, L. M.**, 2004. Türkçe’de Ünlülerin Formant İncelemesi, *Ankara Üniversitesi 18.Ulusal Dilbilim Kurultayı*, Ankara, 20-21 Mayıs.
- [36] **Dinler, Ö. B. ve Karabiber, F.**, 2017. Kürtçe Dilindeki Ünlüler İçin Formant Analizi, *25. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Antalya, 15-18 Mayıs.
- [37] **Phull, D. K. and Kumar, G. B.**, 2016. Vowel Analysis for Indian English, *Procedia Computer Science*, **93**, 533-538.
- [38] **Liu, K., Shuang, Z., Qin, Y., Zhang, J. and Yan, Yonghong.**, 2007. Mandarin Accent Analysis Based On Formant Frequencies, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Honolulu, U.S.A., April 16-20.
- [39] **Ghorshi, S., Vaseghi, S. and Yan, Q.**, 2006. Comparative Analysis of Formants of British, American and Asutralian Accents, *The Ninth International Conference on Spoken Language Processing*, Pittsburgh, U.S.A., September 17-21.
- [40] **Ferragne, E. and Pellegrino, F.**, 2010. Formant frequencies of vowels in 13 accents of the British Isles, *Journal of the International Phonetic Association*, **40**, 1-34.
- [41] **Yan, Q., Vaseghi, S., Ho, C. H. and Turajlic, E.**, 2003. Comperative Analysis and Synthesis of Formant Trajectories of British and Broad Australian Accents, *The 8th European Conference on Speech Communication and Technology*, Switzerland, September 1-4.
- [42] **Ali, Y. M., Paulraj, M. P., Yaacob, S., Bakar, S. A. and Saidatul, A.**, 2011. Malaysian English Accents Identification using LPC and Formant Analysis, *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Malaysia, November 25-27.
- [43] <https://www.tracertek.com/index.php?app=ecom&ns=prodshow&ref=dc-live-forensics-10-audio-forensics-software>, Diamond Cut Productions Forensics10 Audio Forensics Software, 28 Haziran 2017.
- [44] http://speechpro.com/product/forensic_analysis/ikarlab, IKAR Lab: Forensic Audio Suite, 28 Haziran 2017.
- [45] <http://es.speechpro.com/product/analisis/sis2#tab2>, SIS II, 28 Haziran 2017.

- [46]<http://www.sestek.com/tr/ses-inceleme-sistemi/#>, Ses İnceleme Sistemi, 28 Haziran 2017.
- [47]<http://acustek.com/en/forensic/lab-solutions/audio-analysis-lab.html>, Acustek Audio Analysis, 29 Haziran 2017.
- [48]<https://www.cedar-audio.com/products/cambridge/forensic.shtml>, CEDAR's Forensic Systems, 29 Haziran 2017.
- [49]<http://www.audacityteam.org/about/features/>, Audacity, 29 Haziran 2017.
- [50]<http://www.lpl-aix.fr/~lpldev/phonedit/>, PHONEDIT Signaix, 29 Haziran 2017.
- [51]<http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/sfs/wasp.php>, Windows Tool for Speech Analysis, 30 Haziran 2017.
- [52]<http://www.agnitio-corp.com/products/government/speaker-recongnition>, SIFT, 30 Haziran 2017.
- [53]http://www-01.sil.org/computing/catalog/show_software.asp?id=57, SIL Software Catalog, 30 Haziran 2017.
- [54]<http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, Praat: doing phonetics by computer, 30 Haziran 2017.
- [55]<http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/sfs/enhance.php>, UCL Enhance, 30 Haziran 2017.
- [56]<https://www.videomaker.com/article/c5/9263-syntrillium-cool-edit-pro-20-audio-editing-software-review>, Syntrillium Cool Edit Pro 2.0 Audio Editing Software Review, 1 Temmuz 2017.
- [57]<https://acondigital.com/products/acoustica-audio-editor/>, Acoustica 7, 1 Temmuz 2017.
- [58]<http://www.speech.kth.se/wavesurfer/>, Wavesurfer, 1 Temmuz 2017.
- [59]<https://www.adobe.com/tr/products/audition.html>, Adobe Audition ile neler yapabilirsiniz?, 1 Temmuz 2017.
- [60]<https://www.wevosys.com/products/lingwaves/lingwaves.html>, A leading tested product for voice and speech analysis, biofeedback and documentation, 1 Temmuz 2017.
- [61]<http://www.winpitch.com/>, WinPitch, 1 Temmuz 2017.
- [62]https://trueaudio.com/rta_abt1.htm, TrueRTA, 1 Temmuz 2017.
- [63]<https://www.goldwave.com/goldwave.php>, GoldWave, 2 Temmuz 2017.
- [64]<http://www.nch.com.au/wavepad/index.html>, WavePad Audio Editing Software, 2 Temmuz 2017.
- [65]<http://www.birds.cornell.edu/brp/raven/RavenOverview.html>, Raven Interactive Sound Analysis Spftware, 3 Temmuz 2017.
- [66]<http://www.magix.com/tr/sound-forge-audio-studio/>, Sound Forge Audio Studio, 3 Temmuz 2017.

- [67]<http://soundruler.sourceforge.net/main/goals.php?xlang=English>, Sound Ruler Project Goals, 3 Temmuz 2017.
- [68]<http://www.spectraplus.com/>, Acoustic and Vibration Spectrum Analyzer solutions, 3 Temmuz 2017.
- [69]<https://www.salientciences.com/product/quickenhance-plugin-in/>, Simplified Speech Clarification Plug-In for Audio/Video Editors, 3 Temmuz 2017.
- [70]<https://www.cube-tec.com/en-uk/products/audio/foenics/overview>, Overview, Features and Benefits, 3 Temmuz 2017.
- [71]<https://en.wikipedia.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lb3JlbnNpY3M>, Digital forensics, 4 Temmuz 2017.
- [72]<http://www.ni.com/tutorial/7107/en/>, IS-95 (CDMA) and GSM(TDMA) Overview, 4 Temmuz 2017.
- [73]<http://www.forensiclinguistics.net/POST-PN-0509.pdf>, Houses of Parliament, Forensic Language Analysis, 5 Temmuz 2017.
- [74]<https://www.biyolojigunlugu.com/lys-kulak-konu-anlatimi-kulak-islevi-kulak-yapisi-kulak-bilesenleri/>, YS, Kulak Konu Anlatımı, Kulak İşlevi, Kulak Yapısı, Kulak Bileşenleri, 15 Eylül 2017.
- [75] **Keklik, S.**, 2011. Türkçe'de on bir yaşına kadar çocuklara öğretilmesi gereken, birleşim gücü yüksek ilk bin kelime, ODU Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, Cilt:2 Sayı:4.
- [76] **Korkmaz, Y. ve Boyacı, A.**, 2018. Formant Frequency Alteration Effects of Plosive Stop Consonants on Adjacent Vowels in Turkish Language, *IETS'18 (International Engineering and Technology Symposium)*, Batman, Türkiye, 3-5 Mayıs.
- [77] **Korkmaz, Y. ve Boyacı, A.**, 2018. Analysis of Speaker's Gender Effects in Voice Onset Time of Turkish Stop Consonants, *ISDFS'18 (6th International Symposium on Digital Forensic and Security)*, Antalya, Türkiye, 22-25 Mart.
- [78] **Korkmaz, Y. ve Boyacı, A.**, 2018. Classification of Turkish Vowels Based on Formant Frequencies, *IDAP'18 (International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, accepted paper)*, Malatya, Türkiye, Eylül.
- [79] **Korkmaz, Y. ve Boyacı, A.**, 2018. Adli Bilişim Açısından Ses İncelemeleri, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 329-343.

ÖZGEÇMİŞ



Bilgisayar Müh. Yunus KORKMAZ

Fırat Üniversitesi, Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ / Türkiye

Kişisel Bilgiler	
Doğ. Tar./Yeri	28/09/1989 - DİYARBAKIR
GSM	0 (546) 862 06 76
E-Posta	ykorkmaz@firat.edu.tr, yunusciu@gmail.com
Eğitim Bilgileri	
Lisans Eğitimi	Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, Bilgisayar Müh. 2008-2013.
Önlisans Eğitimi	Anadolu Üniversitesi, Adalet, 2015-2018.
Lise Eğitimi	Diyarbakır Fatih Lisesi, 2003-2006.
İş Deneyimleri	
2016-Halen	Fırat Üniversitesi Adli Bilişim Müh. Arş. Gör., ELAZIĞ
2015-2016	Türk Hava Kurumu Üni. Bilg.Müh. Arş. Gör., ANKARA
2013-2015	Yapı Kredi Sigorta Sistemleri Yazılım Geliştirme, KOCAELİ
Adakemik Çalışmalar	
Bildiri (tam)	Classification of Turkish Vowels Based on Formant Frequencies, IDAP'18 - Malatya, Eylül 2018.
Bildiri (tam)	Formant Frequency Alteration Effects of Plosive Stop Consonants on Adjacent Vowels in Turkish Language, IETS'18 - Batman, Mayıs 2018.
Makale	Adli Bilişim Açısından Ses İncelemeleri, F.Ü. Müh. Bil. Dergisi, 30(1), 2018
Bildiri (tam)	Analysis of Speakers' Gender Effects in Voice Onset Time of Turkish Stop Consonants, ISDFS'18, Antalya, Mart 2018.
Bildiri (özet)	Evaluation of Audio Analysis Tools in Terms of Digital Forensics, IATS'17, Elazığ, Ekim 2017.
Bildiri (özet)	A Prevention Model for APT Attacks During Application Lifecycle, IATS'17, Elazığ, Ekim 2017.