



T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

WIENER FİLTRESİ KULLANARAK KONUŞMA
SİNYALLERİNDE GÜRÜLTÜNÜN AZALTILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah HAJ YOUSEF

Danışman: Prof. Dr. Mahmut HEKİM

TOKAT- 2025

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Mahmut HEKİM danışmanlığında hazırlamış olduğum “Wiener filtresi kullanarak konuşma sinyallerinde gürültünün azaltılması” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

08/07/2025

Abdullah HAJ YOUSEF



JÜRİ KABUL VE ONAY

Abdullah HAJ YOUSEF tarafından hazırlanan “**Wiener filtresi kullanarak konuşma sinyallerinde gürültünün azaltılması**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 08/07/2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Başkan): Prof. Dr. Mahmut HEKİM

.....

Üye : Doç. Dr. Mehmet Serhat CAN

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ayşe AYDIN YURDUSEV

.....

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında bilgi ve önerileriyle beni yönlendiren, akademik tecrübelerini örnek aldığım danışman hocam sayın Prof. Dr. Mahmut HEKİM 'e,

Abdullah HAJ YOUSEF
Temmuz, 2025



ÖZET

WIENER FİLTRESİ KULLANARAK KONUŞMA SİNYALLERİNDE GÜRÜLTÜNÜN AZALTILMASI

Haj Yousef, Abdullah
Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut HEKİM
Temmuz 2025, xi + 37 sayfa

Bu çalışma, MATLAB'da Wiener filtresi kullanarak ses sinyalleri için uyarlanabilir gürültü filtreleme tasarımı ve uygulamasına odaklanmaktadır. Çeşitli gerçek dünya kayıtlarından elde edilen gürültülü ses sinyallerine örnekleme, pencereleme ve normalleştirme gibi ön işleme adımları uygulanmıştır. Wiener filtre algoritması gürültüyü bastırmak ve sinyal kalitesini artırmak için uygulanmıştır. Etkinliğini değerlendirmek için ortalama karesel hata (MSE) ve sinyal-gürültü oranı (SNR) metrikleri kullanılmıştır. Pencere boyutu ve gürültü gücü tahmini de dahil olmak üzere parametre ayarının etkisi incelenmiştir. Başlangıçta basit bir gürültü modeli varsayılmış ve Wiener filtresi doğrudan ham sinyallere uygulanmıştır. Sonuçlar önemli ölçüde gürültü azaltımı göstermiş ancak filtrenin performansının doğru gürültü gücü tahminine olan hassasiyetini vurgulamıştır. Bunu ele almak için uyarlanabilir bir gürültü tahmin tekniği uygulanmış ve Wiener filtresinin performansı yeniden değerlendirilmiştir. Uyarlanabilir yaklaşım, gelişmiş gürültü bastırma özelliği göstermiştir. Ayrıca, Wiener filtresinin performansı LMS filtreleme gibi diğer gürültü azaltma yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Wiener filtresinin sürekli olarak daha iyi sinyal netliği ve daha düşük bozulma sağladığını göstermiştir. Çalışma, Wiener filtresinin ses sinyali iyileştirme için sağlam ve etkili bir araç olduğu sonucuna varmıştır.

Anahtar Kelimeler: Wiener Filtresi, Gürültü Azaltma, Adaptif Filtreleme, Sinyal Geliştirme, SNR, MSE, MATLAB, Spektral Analiz.

ABSTRACT

THE REDUCTION OF NOISE IN SPEECH SIGNALS USING WIENER FILTER

Haj Yousef, Abdullah

Master's Degree, Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mahmut HEKİM

July 2025, xi + 37 pages

This study focuses on the design and implementation of adaptive noise filtering for audio signals using the Wiener filter in MATLAB. Preprocessing steps including sampling, windowing, and normalization were applied to the noisy audio signals obtained from various real-world recordings. The Wiener filter algorithm was implemented to suppress noise and enhance signal quality. To evaluate its effectiveness, the mean squared error (MSE) and signal-to-noise ratio (SNR) metrics were used. The impact of parameter tuning, including window size and noise power estimation, was investigated. Initially, a simple noise model was assumed, and the Wiener filter was applied directly to the raw signals. The results showed significant noise reduction but highlighted the sensitivity of the filter's performance to accurate noise power estimation. To address this, an adaptive noise estimation technique was implemented, and the performance of the Wiener filter was reevaluated. The adaptive approach demonstrated improved noise suppression. Additionally, the Wiener filter's performance was compared to that of other noise reduction methods such as LMS filtering. The results showed that the Wiener filter consistently achieved better signal clarity and lower distortion. The study concludes that the Wiener filter is a robust and effective tool for audio signal enhancement.

Keywords: Wiener Filter, Noise Reduction, Adaptive Filtering, Signal Enhancement, SNR, MSE, MATLAB, Spectral analysis.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
Sayfa	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL KAVRAMLAR.....	3
2.1. Konuşma Sinyali ve Gürültü.....	3
2.2. Wiener Filtresi: Teori ve Uygulama	5
2.2.1. Wiener filtresinin temel ilkeleri	5
2.3. Doğrusal Filtreleme ve Kestirim.....	9
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	12
4. MATERYAL ve METOT	16
4.1. Veri seti.....	16
4.2. Wiener filtresi	18
4.3. LMS filtresi.....	21
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	23
5.1 MATLAB 'de Uygulama.....	23
5.2 Değerlendirme.....	24
5.2.1 Sinyal-gürültü oranı (SNR)	24
5.3 Wiener ve LMS Uyarlamalı Filtre Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	27
6. SONUÇ	32
7. KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 “SATU” kelimesinin temiz konuşma sinyalinin ve gürültülü sinyalin dalga şekli	3
Şekil 2.2 Temiz ve gürültü sinyallerinin spektrogramları	4
Şekil 2.3 Gürültülü konuşma sinyalinin örnek spektrogramları, Wiener filtreli çıktı	10
Şekil 4.1 Gürültü ekleme ve filtreleme için iş akışı.....	18
Şekil 5.1 Öncesi ve sonrasının SNR karşılaştırması.....	24
Şekil 5.2 Öncesi ve sonrasının MSE karşılaştırması	25
Şekil 5.3 Orijinal, gürültülü ve geliştirilmiş konuşmaların spektrogram karşılaştırmaları	26
Şekil 5.4 LMS filtreleme öncesi ve sonrası SNR değerleri	28
Şekil 5.5 LMS filtrelemesinden sonra temiz, gürültülü ve geliştirilmiş konuşmanın spektrogramları.....	29

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2-1 Konuşma sinyalinde yaygın gürültü türleri ve özellikleri.....	5
Tablo 2-2 Zaman ve frekans düzleminde Wiener filtresi karşılaştırması.....	6
Tablo 2-3 Gürültü azaltma yöntemleri için yaygın değerlendirme metrikleri.....	8
Tablo 2-4 Wiener filtre uygulamalarının özeti ve sınırlamalar	11
Tablo 4-1 VCTK derlemine genel bakış	16
Tablo 4-2 VCTK kayıt özellikleri.....	17
Tablo 5-1 Wiener ve LMS filtreleri SNR karşılaştırması	30



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
$y(t)$	Gözlemlenen gürültülü konuşma sinyali
$x(t)$	Temiz konuşma sinyali
$d(t)$	Gürültü sinyali
$S_s(f)$	Temiz sinyalin güç spektral yoğunluğudur
$S_d(f)$	Gürültü sinyalin güç spektral yoğunluğudur
SNR	Sinyal gürültü oranı
P_s	Sinyal gücü
P_n	Gürültü gücü
P_x	Konuşma gücü
PESQ	Algısal konuşma kalitesi
STOI	Konuşma anlaşılabilirliği
MSE	Ortalama karesel hata
$H[f]$	Wiener filtresinin frekans domeninde transfer fonksiyonu
η	Wiener filtresi için ayar faktörü

Kısaltmalar	Açıklama
SNR	Sinyal-gürültü oranı
PSD	Güç spektral yoğunluğu
MSE	Ortalama karesel hata
STFT	Kısa zamanlı Fourier dönüşümü
FFT	Hızlı Fourier dönüşümü
AWGN	Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
MIMO	Çoklu giriş çoklu çıkış
ACF	Otomatik korelasyon fonksiyonu

AMDF	Ortalama büyüklük farkı fonksiyonunu
GWO	Gri kurt optimizasyonu
CSTR	Konuşma teknolojisi araştırma merkezi
WAV	Dalga biçimi ses dosyası formatı
dB	Desibel
Hz	Hertz
FT	Fourier dönüşümü
DFT	Ayrık Fourier dönüşümü
H	Wiener filtre kazancı



1. GİRİŞ

Sesli iletişim teknolojilerinin ve dijital sinyal işleme uygulamalarının gelişimiyle birlikte, konuşma sinyallerinin kalitesinin artırılması önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Gerçek hayat ortamlarında konuşma sinyalleri çoğu zaman çeşitli türlerde gürültülerle karışmaktadır. Bu gürültüler, iletişim kalitesini düşürmekte ve birçok uygulamanın performansını olumsuz etkilemektedir. Özellikle işitme cihazları, mobil iletişim ve sesli komut sistemleri gibi alanlarda, temiz ve anlaşılır konuşma sinyallerine ihtiyaç duyulmaktadır (Loizou, 2013).

Gürültü azaltma yöntemleri, konuşma sinyalinin kalitesini artırmak için kullanılan temel tekniklerden biridir. Bu yöntemler sayesinde, sinyaldeki istenmeyen arka plan sesleri mümkün olduğunca engellenirken, konuşmanın anlaşılabilirliği artırılır. Gürültü azaltma algoritmaları arasında, Wiener filtresi önemli bir yer tutar. Wiener filtresi, istatistiksel temelli bir yaklaşımla, hem sinyal hem de gürültü bileşenlerinin güç spektrumlarını kullanarak optimal filtreleme sağlar. Bu yöntem, en küçük ortalama kare hatası prensibine dayanmakta olup, konuşma sinyallerinde etkin bir gürültü bastırma sağlar (Abd El-Fattah ve ark., 2014).

Konuşma sinyallerinin doğası gereği, zaman ve frekans alanlarında karmaşık yapılar içermesi, gürültü azaltma işlemlerinin zorluğunu artırmaktadır. Ayrıca, gürültünün karakteristikleri ortamdan ortama değişiklik gösterebilir. Bu yüzden, kullanılan algoritmaların adaptif ve esnek olması başarı için kritik bir faktördür. Wiener filtresi, bu ihtiyaçları karşılamak için geliştirilmiş temel algoritmalar arasında yer alır ve birçok çalışmada etkinliği kanıtlanmıştır (Haykin, 2002).

Konuşma gürültü azaltma çalışmalarında, farklı türde gürültüler üzerinde algoritmalar test edilmekte ve performansları çeşitli metriklerle değerlendirilmektedir. Sinyal-gürültü oranı (SNR), konuşmanın anlaşılabilirliği ve doğal yapısının korunması açısından sık kullanılan bir ölçüttür. Ayrıca, sinyalin zaman-frekans gösterimi olan spektrogramlar, gürültü azaltma yöntemlerinin görsel analizinde önemli bir araçtır (Martin, 2001).

Bu tezde, MATLAB programlama dili kullanılarak bir konuşma sinyaline farklı tiplerde gürültüler eklenmiş ve Wiener filtresi yardımıyla gürültü azaltma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, temel teorik altyapıya dayanan Wiener filtresi algoritmasının gerçek konuşma sinyallerinde ne derece etkili olduğunu deneysel olarak göstermek ve sonuçları yorumlamaktır.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm “Giriş” kısmı olup, çalışma konusu ve amacı anlatılmıştır. İkinci bölüm “Kuramsal Kavramlar” olarak yapılandırılmış, Wiener filtresi ve sinyal işleme temel kavramları detaylandırılmıştır. Üçüncü bölüm “Literatür Taraması”nde, alanda yapılmış benzer araştırmalar incelenmiş ve mevcut yaklaşımlar özetlenmiştir. Dördüncü bölüm “Materyal ve Metot” kısmında, deneylerde kullanılan sinyaller, MATLAB kodları ve uygulama prosedürleri anlatılmıştır. Beşinci bölümde “Bulgular ve Tartışma” yer almakta, elde edilen sonuçlar grafik ve tablolarla desteklenerek değerlendirilmiştir. Son olarak, altıncı bölüm “Sonuç” kısmında ise genel değerlendirme ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Sonuç olarak, Wiener filtresi temelli gürültü azaltma yöntemleri, konuşma sinyallerinde gürültü etkisini azaltmada etkin ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma, hem teorik hem de uygulamalı açıdan bu yöntemin başarısını ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. KURAMSAL KAVRAMLAR

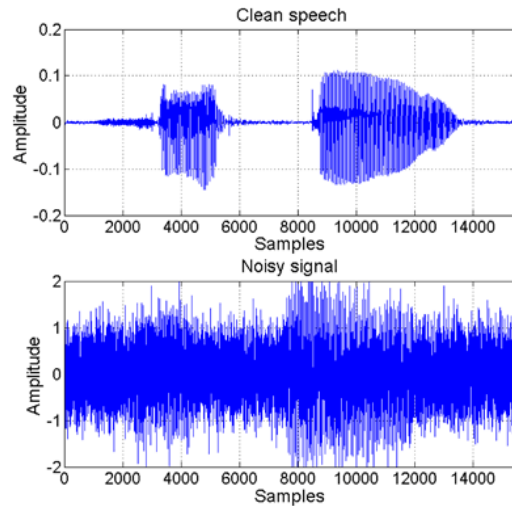
2.1. Konuşma Sinyali ve Gürültü

Konuşma sinyalleri, insan sesinin üretiminden kaynaklanan karmaşık dalgalanmalardır. Doğrudan insan kulağı tarafından algılanan bu sinyaller, zaman ve frekans ekseninde değişen dinamik yapılar içerir (Rabiner ve Juang, 1993). Konuşma sinyalleri, belirli ses özellikleri ve formant yapıları ile tanımlanabilirken, gürültü sinyalleri rastgele ve genellikle istenmeyen ses bileşenleridir. Gürültü, çeşitli kaynaklardan ortaya çıkabilir ve konuşmanın algılanmasını zorlaştırarak sinyal kalitesini düşürür (Loizou, 2013).

Gürültülü konuşma modeli genellikle aşağıdaki Eşitlik (2.1) ile ifade edilir:

$$y(t) = x(t) + d(t) \quad (2.1)$$

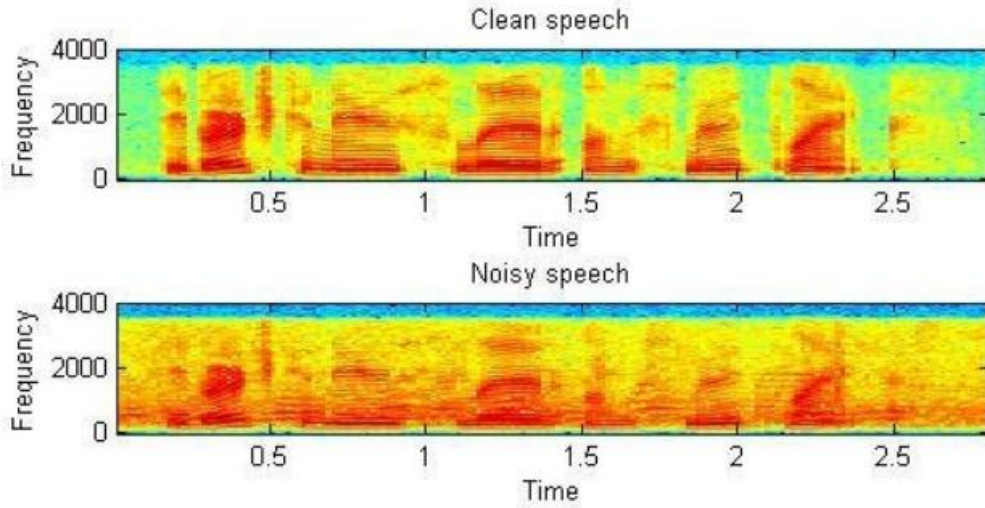
Burada, $y(t)$ gözlemlenen gürültülü konuşma sinyali, $x(t)$ temiz konuşma sinyali ve $d(t)$ gürültü sinyalidir (Ephraim ve Malah, 1984). Şekil 2.1’de temiz konuşma ve gürültü sinyallerinin zaman domenindeki dalga formları gösterilmiştir. Temiz konuşma sinyali, belirgin periyodik yapılar ve sesli harflerin karakteristik dalgalanmalarını içerirken, gürültü sinyali daha rastgele ve düzensiz bir yapıya sahiptir (Ramli ve Abid Noor ve Samad, 2017).



Şekil 2.1 “SATU” kelimesinin temiz konuşma sinyalinin ve gürültülü sinyalin dalga şekli

Konuşma ve gürültü sinyallerinin frekans domenindeki özellikleri, zaman-frekans analiz yöntemleri ile incelenebilir. Spektrogramlar, sinyalin frekans içeriğinin zamanla nasıl

değiştiğini gösterir ve konuşma sinyalleri için formant bantları gibi belirgin yapıları ortaya koyar (Boersma ve Weenink, 2021). Şekil 2.2’de temiz konuşma ve gürültü sinyallerinin spektrogramları yer almaktadır. Gürültü sinyalinin genellikle daha geniş bantlı ve zamanla daha az değişken olduğu görülmektedir. Bu frekans domenindeki farklılıklar, gürültü azaltma yöntemlerinin temelini oluşturur (Subramanian, 2020).



Şekil 2.2 Temiz ve gürültü sinyallerinin spektrogramları

Gerçek dünya koşullarında konuşma sinyalleri genellikle gürültü ile karışmış halde kaydedilir. Bu karışık sinyal, konuşmanın anlaşılmasını güçleştirir ve sinyal işleme yöntemlerinin kullanımını gerektirir. Gürültü, konuşmanın önemli frekans bileşenlerini maskeleyerek algılanabilirliği azaltır (Loizou, 2013).

Konuşma sinyalinde karşılaşılan gürültüler çok çeşitli olabilir. Tablo 2.1’de, konuşma sinyallerinde sıkça karşılaşılan bazı gürültü türleri, kaynakları, özellikleri ve konuşmaya etkileri özetlenmiştir. Örneğin, beyaz gürültü elektronik cihazlardan kaynaklanırken, kalabalık ortam gürültüsü (babble noise) çok sayıda kişinin konuşmasının üst üste binmesinden oluşur.

Tablo 2-1 Konuşma sinyalinde yaygın gürültü türleri ve özellikleri

Gürültü Türü	Kaynak	Özellikleri	Konuşmaya Etkisi
Beyaz Gürültü	Elektronik cihaz	Durağan, geniş-band	Konuşma frekanslarını örter
Babble Gürültü	Kalabalık ortam	Durağan olmayan	Konuşma anlaşılabilirliğini düşürür
Trafik Gürültüsü	Araçlar	Yarı Durağan	Düşük frekanslarda bozulma

Son olarak, konuşma ve gürültü sinyallerinin güç spektral yoğunlukları (PSD) birbirinden farklıdır. Konuşma sinyali belirgin harmonik yapılar sergilerken, gürültü spektrumu daha düz ve geniş bantlıdır. Bu farklılık, Wiener filtresi gibi frekans tabanlı gürültü azaltma algoritmalarında temel alınır (Ephraim ve Malah, 1984).

2.2. Wiener Filtresi: Teori ve Uygulama

Wiener filtresi, istatistiksel sinyal işleme alanında gürültü bastırma ve sinyal tahmini amacıyla kullanılan güçlü bir araçtır. Bu filtre, minimum karesel hata (MSE) kriterine dayanarak orijinal sinyali gürültüden ayırmayı hedefler. Özellikle konuşma sinyallerinin iyileştirilmesinde, kanal bozulmalarının düzeltilmesinde ve tahminleme uygulamalarında geniş çapta kullanılmaktadır (Haykin, 2002).

2.2.1. Wiener filtresinin temel ilkeleri

Wiener filtresi, bir bozulmuş sinyalin mümkün olan en iyi tahminini yapmak için istatistiksel özelliklerinden faydalanır. Filtre, bir gözlem sinyali $y(t) = x(t) + d(t)$ üzerinden, $x(t)$ temiz sinyal ve $d(t)$ gürültü olmak üzere orijinal sinyali tahmin etmeye çalışır (Ephraim ve Malah, 1984).

Filtrenin temel amacı, girdi sinyali ile çıkış sinyali arasındaki hata enerjisini minimize etmektir. Bu, istatistiksel korelasyonların kullanılmasıyla mümkündür. Otokorelasyon ve çapraz korelasyon kavramları, bu hesaplamalarda temel rol oynar.

Zaman düzlemindeki işlemler yerine, Wiener filtresi frekans domeninde de uygulanabilir. Bu, özellikle konuşma gibi zamanla değişken sinyallerin işlenmesinde avantaj sağlar. Frekans domeninde Wiener filtresinin transfer fonksiyonu, sinyal ve gürültü için tahmin edilen güç spektrumları üzerinden hesaplanır, aşağıdaki Eşitlik (2.2) ile hesaplanır:

$$H(f) = \frac{S_s(f)}{S_s(f) + S_d(f)} \quad (2.2)$$

Burada $S_s(f)$ temiz sinyalin, $S_d(f)$ ise gürültünün güç spektral yoğunluğudur. Bu oran, her frekans bileşeninde sinyal-gürültü oranına (SNR) göre filtreleme yapar (Boll, 1979).

Tablo 2-2 Zaman ve frekans düzleminde Wiener filtresi karşılaştırması

Özellik	Zaman Düzlemi	Frekans Düzlemi
Girdi	Sinyal örnekleri	Spektrum
Hesaplama Yöntemi	Korelasyon, evrişim	Güç spektrum oranı
Avantaj	Gerçek zamanlı işlem mümkün	Gürültü bastırmada daha iyi performans
Dezavantaj	Uyarlama zorluğu	FFT gerektirir, algoritmik karmaşıklık

Tablo 2-2'de Wiener filtresi kullanıldığında zaman ve frekans analizi arasındaki temel farklar gösterilmekte ve tartışılmaktadır. Konuşma sinyalleri zamana bağlı ve oldukça değişken yapılardır. Bu tür sinyallerde sabit gürültülerin bastırılması Wiener filtresi ile oldukça etkili biçimde yapılabilir. Ancak konuşma sinyallerinin yapısı nedeniyle filtreleme işlemi, çerçeveleme ve kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) gibi ek işlemlerle desteklenir (Loizou, 2013).

Bu süreç genel olarak şu adımları içerir: İlk olarak, konuşma sinyali daha küçük zaman aralıklarına bölünür, yani çerçevelere ayrılır. Her bir çerçeve, hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ile frekans düzlemine dönüştürülür. Bu frekans temsiline, arka plan gürültüsü tahmin edilir. Daha sonra, Wiener filtresi tahmin edilen sinyal ve gürültü spektrumları kullanılarak her çerçeveye uygulanır. Filtrelenmiş frekans bileşenleri, ters FFT ile zaman domenine geri dönüştürülür ve son adımda, çerçeveler birleştirilerek nihai temizlenmiş sinyal elde edilir. Bu süreçte gürültü tahmini için çeşitli yöntemler kullanılabilir. En

yaygın olanı sessiz bölgelerin analiz edilmesi ya da minimum izleme yöntemidir (Ephraim & Malah, 1984).

Konuşma sinyalleri zamanla değiştiğinden sabit parametrelerle çalışan Wiener filtresi yetersiz kalabilir. Bu nedenle, istatistiksel özelliklerin sürekli güncellendiği uyarlanabilir Wiener filtreleri geliştirilmiştir. Bu filtreler, her çerçevede yeniden tahmin edilen $S_s(f)$ ve $S_d(f)$ değerlerine göre filtre katsayılarını dinamik biçimde günceller (Benesty ve ark., 2005). Bu tür filtrelerin uygulanmasında genellikle ses aktivite tespiti (VAD) algoritmaları ve minimum istatistik yöntemleri kullanılır. Bu sayede filtre, konuşma dışı gürültüleri daha etkin şekilde bastırabilir.

2.2.2. Değerlendirme metrikleri

Wiener filtresi ile yapılan gürültü azaltma işlemlerinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla hem objektif hem de subjektif çeşitli metrikler kullanılır. Bu metrikler, filtreleme sonucunda elde edilen sinyalin kalitesini, anlaşılabilirliğini ve orijinale yakınlığını ölçmek için önemlidir.

İşaret-Gürültü Oranı (SNR, Signal to Noise Ratio), yani sinyal-gürültü oranı, sinyalin taşıdığı faydalı bilgiye karşılık ortamda bulunan gürültü miktarını karşılaştırır. Bu oran genellikle desibel (dB) cinsinden ifade edilir ve Eşitlik (2.3) 'te aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_n} \quad (2.3)$$

Burada P_s sinyal gücünü, P_n ise gürültü gücünü temsil eder. SNR değeri ne kadar yüksekse, sinyalin gürültüye göre baskın olduğu ve dolayısıyla kalitesinin yüksek olduğu kabul edilir (Loizou, 2013).

Konuşma Kalitesinin Algısal Değerlendirmesi (PESQ, Perceptual Evaluation of Speech Quality), ITU-T P.862 standardına dayanan ve konuşma kalitesini insan işitsel algısına uygun şekilde değerlendiren bir metriktir. Bu metrik, filtreleme sonrası sesin orijinal haline ne kadar yakın olduğunu nesnel olarak puanlar ve 0 ile 4.5 arasında bir skor verir. Yüksek skorlar daha iyi kaliteyi temsil eder (Rix ve ark., 2001).

Kısa Zamanlı Objektif Anlaşılabilirlik (STOI, Short-Time Objective Intelligibility), özellikle gürültülü ortamlarda konuşma anlaşılabilirliğini değerlendirmek için geliştirilmiş bir metriktir. Bu metrik, 0 ile 1 arasında değer alır; 1'e yaklaştıkça konuşmanın anlaşılabilirliği artar. STOI, kısa zamanlı analizle sinyalin orijinal haliyle filtrelenmiş halini karşılaştırır ve bu bakımdan konuşma iletişim sistemlerinin kalitesini ölçmede etkili bir araçtır (Taal ve ark., 2011).

Ortalama Karesel Hata (MSE, Mean Square Error), tahmin edilen (filtrelenmiş) sinyal ile orijinal sinyal arasındaki farkların karesinin ortalamasını ifade eder. Bu hata ölçütü, Wiener filtresinin temelinde yer alan kriterdir. MSE'nin düşük olması, filtrelemenin daha başarılı olduğunu gösterir (Haykin, 2002).

Tablo 2-3 Gürültü azaltma yöntemleri için yaygın değerlendirme metrikleri

Metrik	Açıklama	Değer Aralığı	Yorum
SNR	Sinyal ve gürültü gücü oranı	dB cinsinden ölçülür	Yüksek değer iyidir
PESQ	Algısal konuşma kalitesi	0 – 4.5	3.5 üzeri iyi kalite
STOI	Konuşma anlaşılabilirliği	0 – 1	0.75 üzeri iyi kabul edilir
MSE	Ortalama karesel hata	≥ 0	Düşük değer tercih edilir

Tablo 2-3, Wiener filtresi gibi gürültü azaltma algoritmalarının performansını değerlendirmek için kullanılan temel nesnel ölçütleri özetlemektedir. Her bir metrik farklı bir performans boyutunu temsil etmektedir: SNR sinyal temizliğini, PESQ ses kalitesini, STOI konuşma anlaşılabilirliğini ve MSE tahmin doğruluğunu ölçer. Değer aralıkları ve yorum sütunları sayesinde, bu metriklerin çıktılarının nasıl yorumlanacağını anlamak kolaydır. Bu tür karşılaştırmalar, çeşitli filtreleme yaklaşımlarının sistematik olarak incelenmesini sağlar.

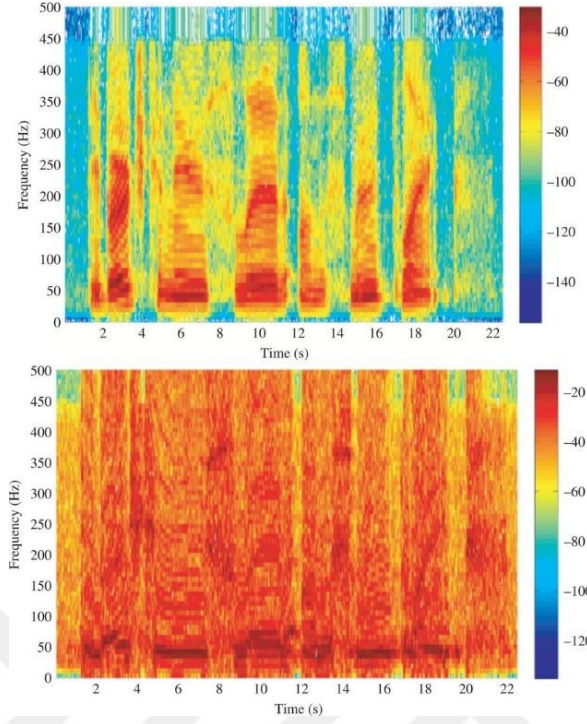
2.3. Doğrusal Filtreleme ve Kestirim

Wiener filtreleme, konuşma iyileştirme alanında, özellikle çeşitli pratik senaryolarda gürültü azaltma için yaygın olarak uygulanmaktadır. Minimum ortalama karesel hata (MMSE) tahminindeki temeli nedeniyle Wiener filtreleri, önemli konuşma özelliklerini korurken durağan ve yarı durağan gürültü bileşenlerini etkili bir şekilde bastırabilir (Lim, 1983; Loizou, 2013).

Wiener filtresinin hem sinyalin hem de gürültünün istatistiksel özelliklerine uyarlanabilirliği, onu birçok konuşma işleme uygulamasında özellikle kullanışlı hale getirir. Yaygın kullanım alanları şunlardır:

- **Telekomünikasyon:** Wiener filtreleri, gürültülü iletişim kanallarında konuşma netliğini artırmak için telefon sistemlerinde sıklıkla uygulanmaktadır. Arka plan gürültüsünü azaltarak anlaşılabilirliği ve dinleyici konforunu artırır (Benesty ve ark., 2005).
- **İşitme Cihazları:** Uyarlanabilir Wiener filtreleme teknikleri, ortam gürültüsünü bastırarak işitme engelli kullanıcılara yardımcı olur ve gürültülü ortamlarda konuşmayı anlamayı geliştirir (Kollmeier & Wesselkamp, 1997).
- **Ses Kontrollü Sistemler:** Konuşma tanıma ve sesli asistan sistemlerinde Wiener filtreleme, gürültüyü azaltmak için sesin ön işleminden geçirilmesine yardımcı olur ve bu da tanıma doğruluğunu artırır (Hansen & Pellom, 1998).
- **Yayın ve Kayıt:** Ses üretiminde Wiener filtreleri, tıslama, uğultu ve diğer gürültü artefaktlarını azaltarak kusurlu akustik ortamlarda kaydedilen konuşma sinyallerini temizlemek için kullanılabilir (Ephraim ve Malah, 1984).

Şekil 2.3'te arka plan gürültüsü ile bozulmuş bir konuşma sinyalinin spektrogramı ve Wiener filtreleme sonrası spektrogramı gösterilmektedir. Gözle görülür gürültü bastırma ve konuşma bileşenlerinin korunması açıkça görülmektedir (Kumar ve Chari, 2019).



Şekil 2.3 Gürültülü konuşma sinyalinin örnek spektrogramları, Wiener filtreli çıktı

Bu uygulamalara rağmen, Wiener filtrelerinin gerçek dünyadaki konuşma gürültüsü azaltma görevlerinde performanslarını etkileyen çeşitli sınırlamaları vardır:

- **Sabit Gürültü Varsayımı:** Klasik Wiener filtresi gürültünün durağan veya yavaş değişken olduğunu varsayar. Bu varsayım, gürültünün yüksek oranda durağan olmadığı (örneğin, trafik gürültüsü, kalabalık konuşmaları) uygulamada sıklıkla ihlal edilir ve filtre etkinliğini azaltır (Martin, 2001).
- **Doğru Gürültü İstatistikleri Gereksinimi:** Performans büyük ölçüde gürültünün PSD'nun doğru tahmin edilmesine bağlıdır. Yanlış gürültü tahmini konuşmanın bozulmasına veya yetersiz gürültü bastırmaya yol açabilir (Boll, 1979).
- **Doğrusal Filtreleme Sınırlaması:** Wiener filtreleme doğrusal bir süreçtir ve gerçek ortamlarda yaygın olan doğrusal olmayan bozulmaları veya karmaşık sinyal-gürültü etkileşimlerini ele almakta başarısız olabilir (Loizou, 2013).
- **Müzikal Gürültü Artefaktı:** Yaygın bir dezavantaj, filtreleme sırasında spektral çıkarma hatalarından kaynaklanan ve algılanan konuşma kalitesini düşürebilen

doğal olmayan bir ton artefaktı olan “müzikal gürültünün” ortaya çıkmasıdır (Ephraim & Malah, 1984).

- **Son Derece Durağan Olmayan Sinyallerde Zorluk:** Hızla değişen konuşma dinamikleri, filtre varsayımları ile gerçek sinyal istatistikleri arasında uyumsuzluğa neden olarak uyarlanabilir filtre performansını sınırlandırabilir (Benesty ve ark., 2005).

Tablo 2-4 Wiener filtre uygulamalarının özeti ve sınırlamaları göstermektedir.

Tablo 2-4 Wiener filtre uygulamalarının özeti ve sınırlamalar

Uygulama Alanı	Kullanımlar	Sınırlamalar
Telekomünikasyon	Gürültülü kanallarda netliği artırır	Yüksek derecede durağan olmayan gürültüde zorlanır
İşitme Cihazları	Gürültüde konuşma anlaşılabilirliğini artırır	Lineer varsayımlarla sınırlıdır
Ses Tanıma Sistemleri	Daha iyi tanıma için gürültüyü azaltır	Gürültü tahmin hatalarına duyarlıdır
Ses Kayıtları	Arka plan hışırtısı ve uğultuyu giderir	Müzikal gürültü (artifaktlar) oluşturabilir

Klasik Wiener filtresinin sınırlamalarının üstesinden gelmek için araştırmacılar çeşitli geliştirmeler ve hibrit yöntemler önermişlerdir. Örneğin, uyarlanabilir Wiener filtreleme teknikleri, durağan olmayan gürültüyü daha iyi takip etmek için gürültü tahminlerini gerçek zamanlı olarak günceller (Benesty ve ark., 2005). Wiener filtrelerinin istatistiksel model tabanlı yöntemlerle veya derin öğrenme yaklaşımlarıyla birleştirilmesi de konuşma geliştirme görevlerinde umut verici gelişmeler göstermiştir (Wang & Chen, 2018).

3. LİTERATÜR TARAMASI

Boll (1979), gürültülü konuşma sinyallerinde anlaşılabilirliği artırmak için Wiener filtreleme ile entegre edilmiş bir spektral çıkarma yöntemi uygulamıştır. Deneysel sonuçlar, Wiener filtrelemenin özellikle düşük sinyal-gürültü oranı (SNR) koşullarında etkili olduğunu ve konuşma içeriğini önemli ölçüde bozmadan arka plan gürültüsünü azalttığını göstermiştir (Boll, 1979).

Ephraim ve Malah (1984) Wiener filtrelemeyi kendi önerdikleri minimum ortalama kare hata (MMSE) tahmin edicileri ile karşılaştırmıştır. MMSE yöntemleri biraz daha iyi algısal kalite elde ederken, Wiener filtresi durağan gürültü ortamlarında neredeyse eşdeğer performansla hesaplama avantajını korumuştur (Ephraim ve Malah, 1984).

Hirsch ve Ehrlicher (1995), sağlam otomatik konuşma tanıma için çeşitli konuşma iyileştirme yöntemlerini değerlendirmiştir. Bunlar arasında Wiener filtreleme, düşük kaliteli kayıtlarda ve çeşitli gürültülü arka planlarda kelime tanıma doğruluğunu artırmak için etkili olduğunu kanıtlamıştır (Hirsch ve Ehrlicher, 1995).

Kuk ve Ludvigsen (1999) dijital işitme cihazları için uyarlanabilir bir Wiener filtresi tasarlamıştır. Filtreleri, arka plan gürültü dinamiklerine göre kendini ayarladı ve restoranlar veya trafik gibi dalgalı gürültülü ortamlarda kullanıcı memnuniyetini önemli ölçüde artırmıştır (Kuk ve Ludvigsen, 1999).

Whitehead ve ark. (2003), müzik gürültüsü ve konuşma bozulması gibi yapaylıkları azaltarak geleneksel Wiener filtrelerini geliştiren tek kanallı konuşma geliştirme için uyarlanabilir bir gürültü bastırma yöntemi önermiştir. Yaklaşımları, yumuşak bir karar gürültüsü tahmincisi kullanır ve Wiener filtre adaptasyonunu zaman içinde kontrol ederek gürültülü ortamlarda daha iyi konuşma kalitesi ve tanıma doğruluğu sağlamıştır (Whitehead ve ark., 2003).

Abd El-Fattah ve ark. (2008), konuşma sinyalinin yerel ortalama ve varyans istatistiklerine dayalı olarak transfer fonksiyonunu ayarlayan, zaman domeninde çalışan

konuşma iyileştirme için uyarlanabilir bir Wiener filtreleme yaklaşımı sunmuştur. Bu yöntem, konuşma sinyallerinin zamanla değişen doğasına uyum sağlamayı amaçlamakta ve bu yönüyle geleneksel frekans alanlı Wiener filtrelerinden ayrılmaktadır. Önerilen yaklaşım, geleneksel Wiener filtreleme ve spektral çıkarma yöntemleriyle karşılaştırılmış ve çeşitli gürültü koşulları altında konuşma kalitesini artırmada üstün performans göstermiştir (Abd El-Fattah ve ark., 2008).

Abd El-Fattah ve ark. (2014), konuşma iyileştirme için zaman domeninde çalışan uyarlanabilir bir Wiener filtreleme yöntemi önermiştir. Yaklaşımları, konuşma sinyalinin yerel ortalama ve varyans istatistiklerine dayanarak filtre transfer fonksiyonunu dinamik olarak ayarlar ve zamanla değişen doğasına uyum sağlar. Geleneksel frekans domeni Wiener filtreleme, spektral çıkarma ve dalgacık denoising yöntemleriyle karşılaştırıldığında, zaman domeni uyarlamalı Wiener filtreleri hem eklemeli beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) hem de renkli gürültü koşulları altında konuşma kalitesini artırmada üstün performans göstermiştir (Abd El-Fattah ve ark., 2014).

Modhave ve ark. (2016), işitme cihazlarında gürültü azaltma ve konuşma geliştirmeyi iyileştirmeyi amaçlayan bir matris Wiener filtresi geliştirmiştir. Yaklaşımları hem konuşma hem de gürültü sinyallerini yakalamak için bir MIMO sistemindeki birden fazla mikrofonu kullanmaktadır. Bu sinyallerin korelasyon matrislerini tahmin ederek, filtre konuşma kalitesini korurken gürültüyü en iyi şekilde bastırır. Simülasyon sonuçları, matris Wiener filtrelerinin sinyal-gürültü oranını artırmada ve hatayı azaltmada geleneksel tek ve çok kanallı Wiener filtrelerinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Modhave ve ark., 2016).

Nasr ve arkadaşları (2018) gürültülü konuşma sinyallerinde perde tespiti için uyarlanabilir bir Wiener filtreleme tekniği önermiştir. Yöntemleri, konuşma kalitesini artırmak için bir ön işleme adımı olarak Wiener filtrelemeyi ve ardından temel frekansı doğru bir şekilde tahmin etmek için Otomatik Korelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Ortalama Büyüklük Farkı Fonksiyonunu (AMDF) kullanan birleşik bir yaklaşım kullanmaktadır. Uyarlanabilir Wiener filtresi, geleneksel Wiener filtreleme ve spektral

çıkarma yöntemlerine kıyasla, özellikle çeşitli gürültü seviyelerinde çıkış sinyali-gürültü oranı (SNR) açısından üstün performans göstermiştir (Nasr ve ark., 2018).

Garg ve Sahu (2020), azaltılmış ampirik ortalama eğri ayrışımını uyarlanabilir bir Wiener filtresi ile birleştiren bir konuşma geliştirme tekniği önermiştir. Yöntemleri, konuşma sinyallerini kısa süreli Fourier dönüşümü kullanarak frekans domeninde işler ve Wiener filtresinin konuşma kalitesini korurken gürültüyü uyarlamalı olarak azaltmasına olanak tanır (Garg ve Sahu, 2020).

Jaiswal ve ark. (2022), hem durağan hem de durağan olmayan gürültülere uyum sağlayan tek kanallı konuşma iyileştirme için örtük bir Wiener filtre algoritması geliştirmiştir. Yöntemleri, konuşma kalitesinde geleneksel spektral çıkarma tekniklerinden daha iyi performans göstermiş ve düşük güçlü uç cihazlar için potansiyelini gösteren bir Raspberry Pi 4 üzerinde başarıyla uygulanmıştır (Jaiswal ve ark., 2022).

Jadda ve Prabha (2023), uyarlanabilir Wiener filtrelemeyi AR-GWO ile optimize edilmiş bulanık dalgacık sinir ağı (FW-NN) ile entegre eden gelişmiş bir konuşma iyileştirme modeli geliştirmiştir. Yaklaşımları ilk olarak sırasıyla kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) ve negatif olmayan matris faktörizasyonu (NMF) kullanarak gürültü ve sinyal spektrumlarını tahmin etmektedir. Bu tahminler daha sonra bir Wiener filtresi aracılığıyla işlenir ve Ampirik Mod Ayrıştırma (EMD) kullanılarak ayrıştırılır. Wiener filtresi için ayar faktörü (η), Uyarlanabilir Rastgele Gri Kurt Optimizasyonu (AR-GWO) algoritması kullanılarak eğitilen FW-NN tarafından dinamik olarak belirlenir. Bu yöntem, GA, ABC, PSO, FF ve GWO gibi geleneksel optimizasyon tekniklerinden sırasıyla %34.07, %43.57, %28.86, %38.88 ve %16.03 daha iyi performans göstererek hesaplama süresi gibi performans ölçütlerini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Jadda ve Prabha, 2023).

Yechuri ve Vanambathina (2024), yinelemeli kısıtlı negatif olmayan matris çarpanlarına ayırmayı (IC-NMF) uyarlanabilir Wiener filtreleme ile birleştiren bir konuşma iyileştirme algoritması geliştirmiştir. Yöntemleri, Wiener kazanç faktörünü gürültü türüne ve SNR oranına göre dinamik olarak ayarlamak için bir genetik algoritma kullanır ve geleneksel

statik Wiener filtrelerine kıyasla daha iyi gürültü azaltma ve konuşma kalitesi elde eder (Yechuri ve Vanambathina, 2024).

Bu çalışmada, Wiener filtresi MATLAB ortamında uygulanmış ve farklı gürültü koşullarında konuşma sinyalinden gürültünün azaltılması hedeflenmiştir. Kullanılan yöntem, literatürde yaygın olarak kullanılan tekniklere dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar zaman ve frekans domeninde performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir.



4. MATERYAL ve METOT

4.1. Veri seti

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi, Edinburgh Üniversitesi Konuşma Teknolojisi Araştırma Merkezi (CSTR) tarafından geliştirilen kapsamlı birçok konuşmacılı İngilizce konuşma veri kümesi olan CSTR **VCTK Corpus**'tur. Çeşitli bölgesel aksanlara sahip 109 konuşmacıdan yüksek kaliteli kayıtlar içeren bu veri seti, konuşma sentezi, otomatik konuşma tanıma ve gürültü azaltma araştırmaları gibi çeşitli konuşma işleme uygulamaları için değerli bir kaynaktır. Akademik ve endüstriyel projelerde geniş çapta benimsenmesi, güvenilirliğinin ve çok yönlülüğünün altını çizmektedir. Veri setine şu adresten erişilebilir: datashare.ed.ac.uk/handle/10283/2651

VCTK Corpus, farklı İngilizce aksanlarına sahip 109 konuşmacının kayıtlarını içermektedir. Her konuşmacı, çoğunluğu *The Herald* (Glasgow) kaynaklı yaklaşık 400 cümle okumuştur. Buna ek olarak, tüm konuşmacılar *Rainbow Passage*'ı ve aksan sınıflandırması için kullanılan bir aksan belirleme paragrafını okumuştur. Ana özellikler aşağıda özetlenmiştir:

Tablo 4-1 VCTK derlemine genel bakış

Özellik	Açıklama
Konuşmacı Sayısı	109
Konuşmacı Başına Cümle	~400
Toplam Ses Dosyası	~43,000
Format	WAV, 48kHz, 16-bit
Metin Transkriptleri	Mevcut (bir hoparlör hariç)

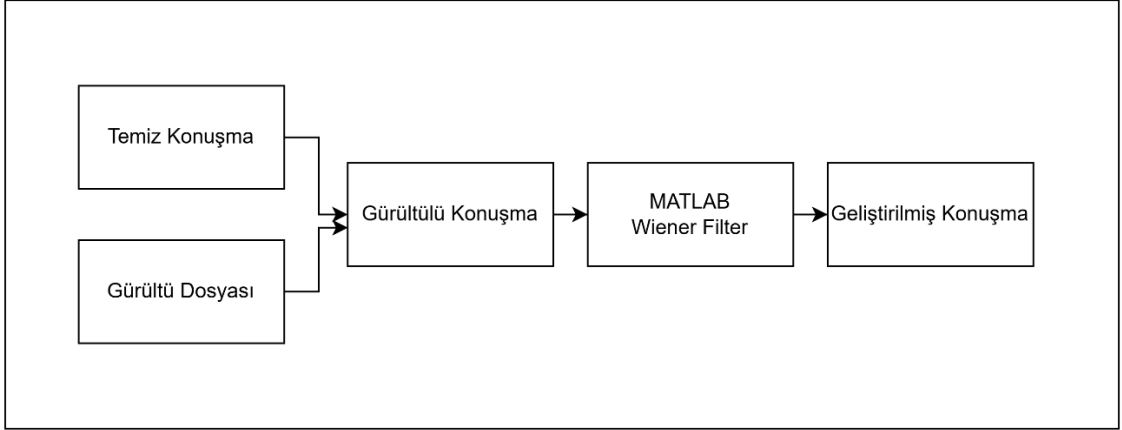
Kayıtlar Edinburgh Üniversitesinde gürültü ve yankıyı en aza indiren kontrollü bir ortam olan hemi-anekoik odada yapılmıştır. Teknik özellikler aşağıda Tablo 4-2'de ayrıntılı olarak verilmiştir:

Tablo 4-2 VCTK kayıt özellikleri

Parametre	Değer
Mikrofon	DPA 4035 (başa takılan, çok yönlü)
Örnekleme Oranı	96 kHz (orijinal), 48 kHz (dağıtılmış)
Bit Derinliği	24-bit (orijinal), 16-bit (dağıtılmış)
Çevre	Hemi-anekoik oda

Kayıtlar sessizliği gidermek için manuel olarak kırpılmış ve erişilebilirlik için alt örneklenmiştir. Bu veri seti, DeepMind'ın **WaveNet** 'i de dahil olmak üzere son teknoloji sistemlerde kullanılmıştır (Oord ve ark., 2016).

Kayıtlar temiz olmasına rağmen, VCTK Corpus simüle edilmiş gürültü ekleme ve filtreleme deneyleri için ideal bir temel sağlar. Bu çalışmada, bu kayıtlara sentetik arka plan gürültüleri (örn. beyaz gürültü, kalabalık, trafik) eklenmiş ve gürültü yok etme (denoising) performansını değerlendirmek için Wiener filtresi uygulanmıştır. Genel bir iş akışı aşağıda Şekil 4.1'de gösterilmektedir:



Şekil 4.1 Gürültü ekleme ve filtreleme için iş akışı

4.2. Wiener filtresi

Konuşma geliştirme sürecindeki ilk adım, ses dosyalarından temiz konuşma ve gürültü sinyallerinin yüklenmesini içerir. İşleme için her iki sinyalin de aynı örnekleme hızına sahip olması gerekir. Gürültü sinyali farklı bir örnekleme oranına sahipse, filtreleme işlemi boyunca tutarlılığı sağlamak için temiz konuşma sinyalinin örnekleme oranına uyacak şekilde yeniden örneklenir.

Temiz konuşma ve gürültü sinyalleri, MATLAB ortamındaki audioread işlevi kullanılarak ilgili *WAV* dosyalarından okunur. Örnekleme frekansları (temiz konuşma için Fs_{clean} ve gürültü için Fs_{noise}) otomatik olarak çıkarılır.

Temiz konuşma ve gürültü sinyallerinin örnekleme frekanslarının farklı olması durumunda, gürültü sinyali temiz konuşmanın örnekleme oranına uyacak şekilde yeniden örneklenir. Bu adım, her iki sinyalin de işleme için uyumlu olmasını sağlar.

Hem temiz konuşma hem de gürültü sinyallerinin aynı uzunlukta olduğundan emin olmak için sinyaller daha kısa olan sinyalin uzunluğuna göre kesilir. Bu, her iki sinyalden de fazladan örneklerin işlemeye müdahale etmemesini sağlar.

Temiz konuşma ve gürültü sinyalleri düzgün bir şekilde hizalandıktan sonra, temiz konuşmaya gürültü eklenerek gürültülü bir sinyal oluşturulur. Bu gürültülü sinyal Wiener filtresi için giriş olarak kullanılacaktır.

Wiener filtresi, frekans domeninde sinyal-gürültü oranını (SNR) tahmin ederek ve konuşma sinyalini korurken gürültüyü en aza indirmek için bir kazanç fonksiyonu uygulayarak çalışır. Bu süreç aşağıdaki adımları içerir:

1. Sinyalin Çerçevenmesi: Gürültülü ve temiz konuşma sinyalleri, frekans domeninde analiz edilmek üzere üst üste binen çerçevelere bölünür.
2. Fourier Dönüşümü: Sinyallerin frekans temsilini elde etmek için her çerçevenin Fourier dönüşümü hesaplanır.
3. Gürültü Tahmini: Wiener filtresi, gürültülü ve temiz konuşma çerçevelerini karşılaştırarak gürültü gücünü tahmin eder.
4. Kazanç Hesaplama: Wiener filtresi kazancı, tahmin edilen sinyal ve gürültü güç spektrumlarına göre hesaplanır.
5. Ters Fourier Dönüşümü: Frekans domeninde Wiener filtresi uygulandıktan sonra, ters Fourier dönüşümü kullanılarak zaman domeninde geliştirilmiş sinyal elde edilir.

Sinyaller, işlenmek üzere üst üste binen çerçevelere bölünür. Bu, Wiener filtresinin sinyalin küçük segmentleri üzerinde çalışmasını sağlar ve durağan olmayan gürültüyü daha etkili bir şekilde işler. Spektral sızıntıyı azaltmak için her çerçeveye bir Hamming penceresi uygulanır.

Buffer işlevi hem gürültülü hem de temiz sinyalleri belirtilen örtüşme ile çerçevelere bölmek için kullanılır.

Her bir çerçeve için, zaman domeni sinyallerini frekans domeni dönüştürmek üzere Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanır. Wiener filtresi, konuşma sinyalini gürültüden daha iyi tahmin edebildiği ve ayırabildiği frekans domeninde çalışır.

Wiener filtresi hem temiz konuşma sinyalinin hem de gürültünün güç spektrumlarının tahmin edilmesini gerektirir. Bu güç spektrumları her çerçeve için aşağıdaki gibi hesaplanır:

- Konuşma Gücü (P_x): Bu, frekans domenindeki temiz sinyalin karesi alınmış büyüklüğüdür.
- Gürültü Gücü (P_n): Gürültü gücü, temiz sinyalin frekans gösteriminin gürültülü sinyalin frekans gösteriminden çıkarılmasıyla tahmin edilir.

Wiener filtre kazancı (H), temiz konuşma gücünün temiz konuşma gücü ve gürültü gücünün toplamına oranı olarak hesaplanır. Bu kazanç, konuşma bileşenlerini korurken gürültülü sinyali değiştirmek ve gürültüyü azaltmak için kullanılır.

Her bir kareye Wiener filtresi uygulandıktan sonra, geliştirilmiş kareler örtüşme-ekleme yöntemi kullanılarak tek bir sürekli sinyalde birleştirilir. Bu yöntem, uygun örtüşme sağlanırken işlenmiş çerçevelerin tekrar bir araya getirilmesini içerir.

Sinyal, genliğin geçerli bir aralıkta olduğundan emin olmak için kaydetmeden önce normalleştirilir.

Wiener filtresinin performansını değerlendirmek için iki temel ölçüt hesaplanır (SNR, MSE ve Spektrogramları).

SNR, temiz konuşma sinyali ile filtreleme öncesi ve sonrası gürültü bileşenleri karşılaştırılarak hesaplanır ve aynı yöntem MSE için de kullanılarak iyileştirme öncesi ve sonrası değerler hesaplanmıştır. Hem gürültülü sinyal hem de geliştirilmiş sinyal, SNR ve MSE'deki iyileşmeyi belirlemek için temiz konuşma sinyaliyle karşılaştırılır.

Wiener filtresinin etkinliğini görsel olarak değerlendirmek için temiz konuşma, gürültülü konuşma ve geliştirilmiş konuşma sinyallerinin spektrogramları oluşturulur. Bu, gürültü azaltma öncesi ve sonrası frekans içeriğinin görsel olarak karşılaştırılmasına olanak tanır.

Bu bölümde, Wiener filtresi kullanılarak konuşma iyileştirme metodolojisi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Süreç, sinyallerin yüklenmesini ve ön işlemden geçirilmesini, gürültüyü azaltmak için Wiener filtresinin uygulanmasını ve SNR, MSE ve spektrogram görselleştirmeleri gibi metrikler kullanılarak performansın değerlendirilmesini içermektedir. Bir sonraki bölüm performans sonuçlarına ve tartışmalarına odaklanacaktır.

4.3. LMS filtresi

En Küçük Ortalama Kareler (LMS) uyarlanabilir filtresi, konuşma geliştirme uygulamalarında gürültü azaltma için yaygın olarak kullanılan yinelemeli bir algoritmadır. Sabit filtre katsayılarıyla frekans domeninde çalışan Wiener filtresinin aksine LMS filtresi, istenen temiz konuşma ile gürültülü giriş arasındaki hatayı en aza indirmek için katsayılarını zaman domeninde uyarlar.

İyileştirme süreci, temiz konuşma ve gürültü sinyallerinin .wav dosyalarından yüklenmesiyle başlar ve her iki sinyalin de aynı örnekleme frekansını paylaştığından emin olunur. Farklılıklar varsa, gürültü sinyali temiz konuşmanın örnekleme oranına uyacak şekilde yeniden örneklenir. Daha sonra her iki sinyal de işleme sırasında tutarlılığı korumak için daha kısa olan sinyalin uzunluğuna göre kesilir.

Gürültülü konuşma sinyali, temiz konuşmaya doğrudan gürültü eklenerek oluşturulur. Bu birleşik sinyal, genlik kırılmasını önlemek ve filtreleme sırasında sayısal kararlılığı sağlamak için normalleştirilir.

LMS filtresi, sırasıyla filtre karmaşıklığını ve adaptasyon hızını kontrol eden önceden tanımlanmış bir sıra ve adım boyutu (öğrenme oranı) ile başlatılır. Filtre katsayıları sıfır olarak başlar ve filtre çıkışı ile gürültülü konuşma girişi arasındaki hataya bağlı olarak örnek örnek güncellenir.

İşleme sırasında, son gürültü örneklerinden oluşan kayan bir pencere referans giriş olarak kullanılır. Filtre çıkışı gürültü bileşenini tahmin eder ve bu bileşen daha sonra geliştirilmiş konuşma sinyalini üretmek için gürültülü konuşmadan çıkarılır.

Performansı nicel olarak değerlendirmek için filtrelemeden önce ve sonra Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) ve Ortalama Karesel Hata (MSE) hesaplanır. Her iki metrik de gürültü azaltmanın etkinliğini belirlemek için geliştirilmiş ve gürültülü sinyalleri temiz konuşmayla karşılaştırır.

Son olarak, geliştirilmiş konuşma daha fazla analiz için kaydedilir ve temiz, gürültülü ve geliştirilmiş sinyallerin spektrogramları oluşturulur. Bu görselleştirmeler, LMS uyarlamalı filtreleme ile elde edilen spektral iyileştirmeleri göstermektedir.

Bu bölümde Wiener filtrelemeye alternatif bir yaklaşım olarak LMS filtreleme metodolojisi sunulmaktadır. Bir sonraki bölümde performans ölçütleri karşılaştırılacak ve konuşma geliştirmedeki göreceli avantajları tartışılacaktır.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, konuşma iyileştirme için MATLAB ortamında Wiener filtresinin uygulanmasından elde edilen sonuçlar sunulmakta ve analiz edilmektedir. Ana hedef, orijinal konuşmayı mümkün olduğunca doğal ve net tutarken arka plan gürültülerini azaltmaktır. Filtrenin ne kadar iyi performans gösterdiğini belirlemek için hem öznel hem de nesnel yöntemler kullanılarak çeşitli değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu tezde kullanılan temiz konuşma, sessiz bir ortamda net bir cümle söyleyen bir konuşmacının ses kayıdır. Bu kayıt, herhangi bir arka plan gürültüsü olmadan istenen konuşma sinyalini temsil eder. Gürültülü bir ortamı simüle etmek için beyaz Gauss gürültüsü oluşturulmuştur. Bu gürültü zaman içinde değişmez, buna *durağan gürültü* denir. Gürültünün genliği, gerçekçi bir durumu simüle etmek için fark edilebilir ancak ezici olmayacak şekilde ayarlanmıştır. Gürültülü sinyal, temiz konuşmaya basitçe gürültü sinyali eklenerek oluşturulmuştur. Bu, gürültü azaltma performansını test etmek için kullanılan ve MATLAB Wiener filtresi koduna girilen sinyaldir.

5.1 MATLAB 'de Uygulama

MATLAB kodu, önce temiz ve gürültülü .wav dosyalarını okumak, bunları karıştırmak ve ardından Wiener filtresini uygulamak için yazılmıştır. Filtre, STFT kullanılarak frekans domeninde uygulanmıştır.

Filtreleme sırasında kullanılan bazı önemli parametreler:

- Sampling rate: 16 kHz
- Frame size: 256 samples
- Window type: Hamming window
- Overlap: 50%
- Noise estimate: Calculated from a noise-only segment

Bu parametreler, konuşma işleme araştırmalarında kullanılan tipik değerler temel alınarak seçilmiştir.

5.2 Değerlendirme

Wiener filtresi uygulandıktan sonra, çıkış konuşması daha temiz duyulmuştur. Özellikle konuşmanın sessiz veya düşük enerjili bölümlerinde arka plan gürültüsünün çoğu azaltılmıştır. Ses çok daha anlaşılır ve net hale gelmiştir. Ancak bazı bölgelerde küçük bozulmalar ortaya çıkmıştır. Bunlar, gürültü azaltma işleminin neden olduğu kısa, doğal olmayan müzik tonları gibi duyulmaktadır.

Küçük bir dinleyici grubu konuşmanın hem gürültülü hem de geliştirilmiş versiyonlarını dinlemiştir ve hepsi geliştirilmiş konuşmanın gürültülü versiyondan çok daha net ve kolay anlaşılır olduğu konusunda hemfikir olmuştur.

5.2.1 Sinyal-gürültü oranı (SNR)

SNR oranı bir sinyalin kalitesini ölçmenin yaygın bir yoludur. Konuşmanın gürültüye kıyasla ne kadar güçlü olduğunu gösterir.

- **Filtreleme öncesi SNR:** yaklaşık 6,99 dB
- **Filtreleme sonrası SNR:** yaklaşık 12,46 dB

SNR oranındaki artış, filtrelemeden sonra konuşmanın daha net hale geldiğini ve gürültü seviyesinin düştüğünü göstermektedir.

Aşağıdaki görüntü, test amacıyla kullanılan konuşma dosyalarından biri üzerinde kullanılan MATLAB kodundan elde edilen sonucu göstermektedir:

```
SNR (önce): 6.99 dB
SNR (sonra): 12.46 dB
```

Şekil 5.1 Öncesi ve sonrasının SNR karşılaştırması

5.2.2 Ortalama karesel hata (MSE)

MSE, iyileştirme algoritmasının başarımını ölçmek için kullanılan bir diğer metriktir. Bu değer, gürültülü veya filtrelenmiş sinyalin temiz sinyale olan benzerliğini sayısal olarak ifade eder; daha düşük MSE, daha iyi bir benzerlik anlamına gelir.

- **Filtreleme öncesi MSE:** yaklaşık 0,003635
- **Filtreleme sonrası MSE:** yaklaşık 0,001003

MSE değerindeki düşüş, filtrelemenin sinyal ile hedef (temiz) sinyal arasındaki farkı azalttığını ve bu nedenle konuşma kalitesinde iyileşme sağladığını göstermektedir. Aşağıda, aynı konuşma örneği üzerinde yapılan MSE hesaplamasının MATLAB çıktısı sunulmuştur:

```
MSE (önce): 0.003635  
MSE (sonra): 0.001031
```

Şekil 5.2 Öncesi ve sonrasının MSE karşılaştırması

5.2.3 Spektrogram analizi

Spektrogramlar sinyalleri karşılaştırmak için görsel bir yol sunar.

- **Temiz konuşma spektrogramı**, konuşma enerjisinin bulunduğu yerde net, güçlü kalıplar gösterir.
- **Gürültülü konuşma spektrogramı**, bu kalıpların rastgele gürültü ile karıştığını gösterir.
- **Filtrelenmiş konuşma spektrogramı**, gürültünün çoğunun giderildiğini ve konuşma kalıplarının yeniden daha görünür hale geldiğini göstermektedir.

Bu görsel gözlemler, Wiener filtresinin orijinal konuşma özelliklerinin kurtarılmasına yardımcı olduğunu doğrulamaktadır.

Aşağıdaki görüntü aynı test dosyasının spektrogramlarını göstermektedir:



Şekil 5.3 Orijinal, gürültülü ve geliştirilmiş konuşmaların spektrogram karşılaştırmaları

Wiener filtresi, gürültü zaman içinde değişmediğinde en iyi şekilde çalışır. Gürültü, arka planda konuşan insanlar veya sokak sesleri gibi dinamikse, filtre aynı performansı göstermeyebilir.

Bazen filtre konuşma sinyalinin bazı kısımlarını da, özellikle de gürültü ile benzer sesler çıkarıyorsa, ortadan kaldırır. Bu, çıktıda bir miktar bozulmaya neden olur, ancak bozulma oldukça azdır, bu nedenle nihai sonuçlar genellikle yine de iyidir.

Filtrenin performansı gürültüyü ne kadar iyi tahmin edebildiğimize bağlıdır. Tahmin doğru değilse, filtre ya yeterince gürültüyü gideremez ya da çok fazla gürültüyü gidererek konuşmaya zarar verebilir.

Sınırlamalara rağmen, Wiener filtresinin çeşitli güçlü yönleri vardır:

- **Uygulaması basittir:** Makine öğrenimi veya eğitim verisi gerektirmez.
- **Düşük hesaplama maliyeti:** Gerçek zamanlı sistemlerde kullanılabilir.

- **Kontrollü gürültü ortamlarında iyi çalışır:** Özellikle sabit veya bilinen gürültü türleri için.

Wiener filtreleri, işitme kaybı olan kişilerin restoran veya ofis gibi gürültülü yerlerde konuşmaları daha net duymalarına yardımcı olabilir. Gürültü azaltma, mobil aramalarda, özellikle de ortamın gürültülü olduğu durumlarda çok önemlidir. Siri, Alexa ve Google Assistant gibi sistemler konuşma tanıma doğruluğunu artırmak için benzer filtreler kullanmaktadır. Uzaktan çalışan bu kadar çok insan varken, görüntülü görüşmeler sırasında konuşmanın temiz olması önemlidir. Wiener'inki gibi gürültü filtreleri netliği artırmaya yardımcı olur.

Sonuçları özetlemek gerekirse,

- Wiener filtresi, önemli konuşma özelliklerini korurken konuşma sinyalindeki gürültüyü başarılı bir şekilde azaltmıştır.
- Hem öznel dinleme hem de görsel analiz iyileşmeyi doğrulamıştır.
- Bir miktar bozulma hala devam etmektedir, ancak genel konuşma kalitesi önemli ölçüde iyileşmiştir.
- Yöntem basit, verimli ve özellikle gürültü sabit olduğunda birçok uygulamada kullanışlıdır.

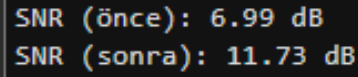
5.3 Wiener ve LMS Uyarlamalı Filtre Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada uygulanan Wiener filtresinin performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için, bir LMS uyarlamalı filtre de geliştirilmiş ve Wiener filtreleme için kullanılan aynı gürültülü konuşma sinyaline uygulanmıştır. Her iki filtre de MATLAB'da uygulanmış ve aynı ses dosyası kullanılarak aynı koşullar altında test edilmiştir. Bu sayede karşılaştırmanın adil, kontrollü ve girdi verilerindeki farklılıklardan ziyade yalnızca filtreleme yöntemlerine dayalı olması sağlanmıştır.

Wiener filtresi iyi bilinen, istatistiksel tabanlı bir teknik olsa da LMS filtresi, gürültü özelliklerindeki değişiklikleri gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi nedeniyle uyarlanabilir gürültü gidermede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu karşılaştırmanın

amacı sadece hangi filtrenin daha yüksek sayısal iyileştirmeler sağladığını belirlemek değil, aynı zamanda her bir yöntemin konuşma sinyalinin spektral yapısını ve algısal kalitesini nasıl etkilediğini değerlendirmektir.

Şekil 5.4, LMS filtresinin uygulanmasından önce ve sonra elde edilen SNR değerlerini özetleyen MATLAB komut penceresinden bir ekran görüntüsünü göstermektedir. Bu değerler Wiener filtresi deneylerinde kullanılan aynı .wav dosyaları kullanılarak oluşturulmuştur.

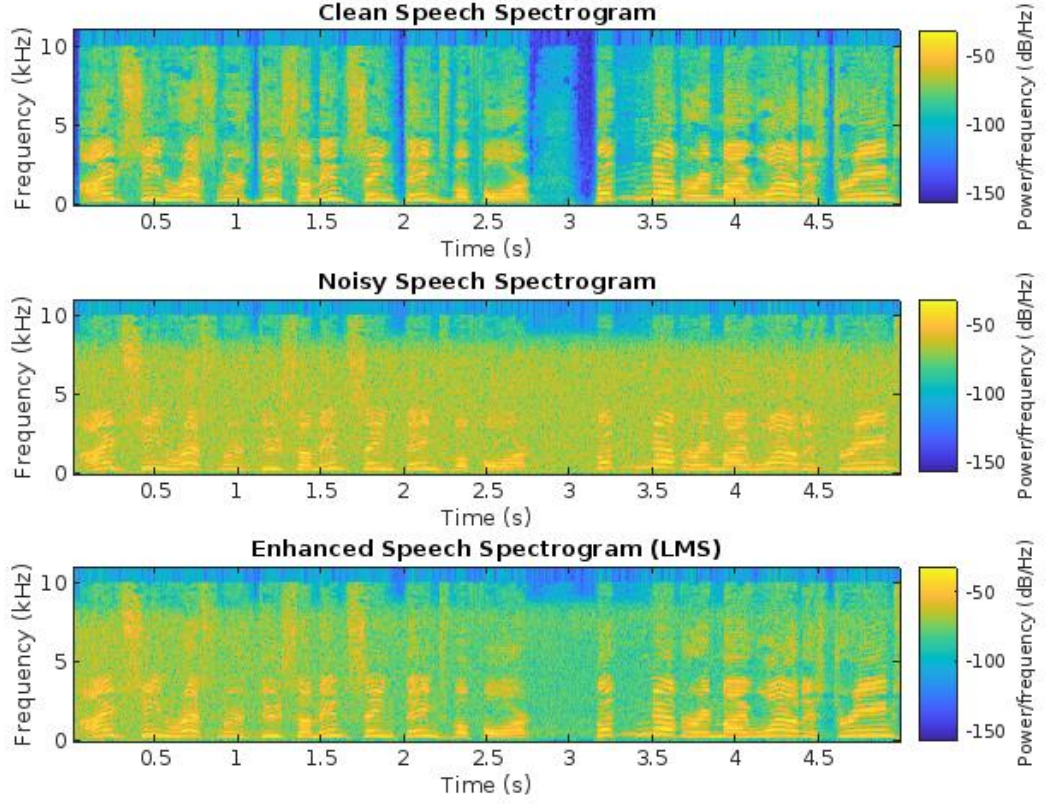


```
SNR (önce): 6.99 dB
SNR (sonra): 11.73 dB
```

Şekil 5.4 LMS filtreleme öncesi ve sonrası SNR değerleri

Bu değerler sinyal kalitesinde önemli bir artış olduğunu gösterse de, sayısal iyileştirmeler tek başına filtrelenmiş sinyalin algısal kalitesini tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle, görsel karşılaştırma yoluyla daha fazla analiz yapılmıştır.

Her bir filtreleme yönteminin konuşma sinyali üzerindeki etkisini zaman-frekans domeninde daha iyi anlamak için temiz, gürültülü ve filtrelenmiş konuşma sinyallerinin spektrogramları oluşturulmuştur. Bu spektrogramlar Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 LMS filtrelemesinden sonra temiz, gürültülü ve geliştirilmiş konuşmanın spektrogramları

Şekil 5.5'ten görüldüğü gibi, temiz konuşma sinyalinin spektrogramı, minimum arka plan paraziti ile sesli konuşmanın karakteristik açıkça tanımlanmış harmonik yapılarını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, gürültülü konuşma spektrogramı, noise.wav'dan eklenen arka plan gürültüsünün bir sonucu olarak neredeyse tüm frekans bantlarında yaygın enerji gösterir. Wiener filtresi uygulandıktan sonra, spektrogram konuşma sinyalinin harmonik bütünlüğünü ve anlaşılabilirliğini korurken etkili bir gürültü azaltımı göstermektedir. LMS filtreli spektrogram genel olarak daha temiz görünmektedir ve bu da daha agresif gürültü bastırmaya işaret etmektedir; ancak filtrenin uyarlanabilir yapısı nedeniyle bazı düşük enerjili bölgelerde hafif bozulmalar veya yumuşatma artefaktları gözlemlenebilmektedir. Bu görsel gözlemler sayısal SNR sonuçlarıyla uyumludur ve her filtrenin gürültü azaltmayı en üst düzeye çıkarma ile konuşma kalitesini koruma arasında sunduğu farklı dengeleri göstermektedir.

Tablo 5.1, her iki filtreyi uygulamadan önce ve sonra SNR değerlerinin bir özetini sunmaktadır. Her iki filtre de aynı gürültülü .wav dosyasına uygulandığından, başlangıç SNR değerleri aynıdır, bu da doğrudan ve adil bir karşılaştırma sağlar.

Tablo 5-1 Wiener ve LMS filtreleri SNR karşılaştırması

Filtre tipi	Filtreleme Öncesi SNR (dB)	Filtreleme Sonrası SNR (dB)
Wiener Filtresi	6.99	12.46
LMS Filtresi	6.99	11.73

Hem Wiener hem de LMS filtreleri, filtreleme yaklaşımları ve ortaya çıkan özellikleri önemli şekillerde farklılık gösterse de, bu çalışmada gürültü azaltmaya anlamlı bir şekilde katkıda bulunmuştur. İstatistiksel tahmine dayalı Wiener filtresi, verilen koşullar altında daha yüksek SNR oranı iyileştirmesi sağlamıştır. Konuşmanın doğal özelliklerini korurken sabit arka plan gürültüsünü bastırma kabiliyeti, bu testte özellikle etkili olmasını sağlamıştır. Düşük hesaplama karmaşıklığı ve uygulama kolaylığı da onu kaynakların sınırlı olduğu veya gerçek zamanlı adaptasyonun kritik olmadığı sistemler için uygun hale getirmektedir.

Öte yandan LMS uyarlanabilir filtre, giriş sinyalinin gelişen özelliklerine yanıt olarak katsayılarını sürekli olarak günceller. Bu da onu özellikle dinamik veya öngörülemeyen gürültü ortamlarında avantajlı kılmaktadır. Sayısal SNR iyileştirmesi bu özel durumda biraz daha düşük olsa da LMS filtresi daha geniş arka plan parazitini azaltmada güçlü bir potansiyel göstermiştir ve uyarlanabilirliği, gürültü koşullarının sabit olmadığı bağlamlarda değerli bir güç olmaya devam etmektedir.

Bu karşılaştırmanın bir temiz konuşma sinyali ve bir gürültü örneğinden oluşan tek bir .wav dosyası çifti kullanılarak yapıldığını belirtmek önemlidir. Bu yaklaşım kontrollü ve odaklanmış bir değerlendirmeye olanak tanısa da her bir filtreleme yönteminin genel performansı hakkında kesin sonuçlara varmak için daha büyük ve daha çeşitli veri kümeleri üzerinde daha geniş testler yapılması gerekecektir. Gelecekteki çalışmalar,

göreceli güçleri ve sınırlamaları hakkında daha kapsamlı bir anlayış sağlamak için birden fazla gürültü türü, konuşma örneği ve değişen SNR koşullarında filtre davranışını araştırabilir.

Özet olarak, her iki filtre de etkili gürültü azaltımı göstermiş ve her biri bağlama bağlı olarak benzersiz avantajlar sunmuştur. Wiener filtresi, sabit gürültü ve sınırlı hesaplama kaynaklarının bulunduğu senaryolarda tercih edilebilirken, LMS filtresi uyarlanabilir, gerçek zamanlı gürültü bastırma gerektiren ortamlar için cazip bir seçenek sunmaktadır. Bu ikisi arasındaki seçim, sonuçta amaçlanan uygulamanın özel taleplerine ve kısıtlamalarına bağlıdır.

6. SONUÇ

Bu tez, konuşma sinyallerindeki arka plan gürültüsünü azaltmak amacıyla Wiener filtresinin uygulanmasını araştırmıştır. Çalışma boyunca Wiener filtresinin teorik temellerinin anlaşılmasına, bu alandaki önceki çalışmaların incelenmesine, yöntemin MATLAB'da uygulanmasına ve pratik ses örnekleri üzerindeki performansının değerlendirilmesine odaklanılmıştır.

Uygulama, Wiener filtresinin, özellikle gürültü özelliklerinin makul ölçüde tahmin edilebilir olduğu ortamlarda, konuşmayı geliştirmek için hala güvenilir bir araç olduğunu göstermiştir. MATLAB tabanlı yaklaşım, konuşma ve arka plan gürültüsünün değişen doğasına uyum sağlayan zaman-yerel filtrelemeye izin veren örtüşme-ekleme yeniden yapılandırması ile kare kare işleme kullanmıştır.

Sonuçlar, geliştirilmiş konuşma ile orijinal gürültülü giriş karşılaştırıldığında sinyal netliğinde gözle görülür bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Spektrogramlar ve ses çıktıları, konuşma içeriğini aşırı derecede bozmadan önemli miktarda arka plan gürültüsünün bastırıldığını doğrulamıştır. Dalga formu ve spektrogram grafiklerinin görsel olarak incelenmesi gibi nesnel analizler, filtrenin sinyal kalitesini iyileştirmedeki etkinliğini desteklemiştir.

Ancak sonuçlar bazı sınırlamaların da altını çizmiştir. Wiener filtresi, tasarımı gereği hem konuşma hem de gürültü güç spektrumlarının doğru tahminine dayanır. Gürültü yüksek oranda durağan olmadığında veya gürültü tahmini zayıf olduğunda, filtrenin performansı düşebilir. Ayrıca, konuşma dosyalarının daha karmaşık bölümlerinde bazı küçük kalıntı gürültüler gözlemlenmiştir. Bu sınırlamalara rağmen Wiener filtresi, özellikle basitliği, yorumlanabilirliği ve hesaplama verimliliği nedeniyle konuşma geliştirme sistemlerinde değerli bir bileşen olmaya devam etmektedir.

Konuşmadaki gürültü, net iletişimin her zamankinden daha önemli olduğu dijital dünyada kalıcı bir sorun olmaya devam etmektedir. Bu tez, Wiener filtresi gibi köklü bir yöntemin bile, düşünceli bir şekilde uygulandığında, konuşma işlemede hala anlamlı bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Klasik araçları yeniden gözden geçirerek ve bunları

modern anlayışlarla birleştirerek, gürültülü ortamlarda sözlü iletişimin netliğini ve kalitesini artırmaya devam edilebilir.



7. KAYNAKLAR

- Benesty, J., Sondhi, M. M., & Huang, Y. A. (Eds.). (2005). Springer Handbook of Speech Processing. Springer.
- Boersma, P., & Weenink, D. (2021). Praat: Doing phonetics by computer (Version 6.1.08). <https://www.fon.hum.uva.nl/praat>
- Boll, S.F., 1979. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 27(2): 113–120.
- D. Wang and J. Chen, "Supervised Speech Separation Based on Deep Learning: An Overview," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 26, no. 10, pp. 1702-1726, Oct. 2018, doi: 10.1109/TASLP.2018.2842159
- El-Fattah, M. & Dessouky, M.I. & Diab, Souad & Abd El-Samie, Fathi. (2008). Speech Enhancement Using an Adaptive Wiener Filtering Approach. Progress in Electromagnetics Research M. 4. 167-184. doi:10.2528/PIERM08061206.
- El-Fattah, Marwa & Dessouky, M.I. & Abbas, Alaa & Diab, Salaheldin & El-Rabaie, El-Sayed & Al-Nuaimy, Waleed & Alshebeili, Saleh & Abd El-Samie, Fathi. (2014). Speech enhancement with an adaptive Wiener filter. International Journal of Speech Technology. 17. 53-64. doi:10.1007/s10772-013-9205-5.
- Garg, A., Sahu, O.P. (2020). Enhancement of speech signal using diminished empirical mean curve decomposition-based adaptive Wiener filtering. Pattern Anal Applic 23, 179–198.
- H. G. Hirsch and C. Ehrlicher, "Noise estimation techniques for robust speech recognition," 1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Detroit, MI, USA, 1995, pp. 153-156 vol.1, doi: 10.1109/ICASSP.1995.479387.
- Hansen, J. H., & Pellom, B. (1998). An effective quality evaluation protocol for speech enhancement algorithms. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 1, 1281-1284.

- Haykin, S. (2002). Adaptive Filter Theory. Pearson Education.
- Jadda, A., Prabha, I.S. (2023). Adaptive Wiener filtering with AR-GWO based optimized fuzzy wavelet neural network for enhanced speech enhancement. *Multimed Tools Appl* 82, 24101–24125.
- Jaiswal, R.K., Yeduri, S.R. & Cenkeramaddi, L.R. (2022). Single-channel speech enhancement using implicit Wiener filter for high-quality speech communication. *Int J Speech Technol* 25, 745–758.
- Kamath, S. and Loizou, P.C., 2002. A multi-band spectral subtraction method for enhancing speech corrupted by colored noise. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 4164–4167.
- Kollmeier, B., & Wesselkamp, M. (1997). Comparison of spectral enhancement algorithms based on perceptual criteria. In *Speech Enhancement* (pp. 75-98). Springer.
- Kuk FK, Ludvigsen C. Variables affecting the use of prescriptive formulae to fit modern nonlinear hearing aids. *J Am Acad Audiol*. 1999 Sep;10(8):458-65. PMID: 10813646.
- Kumar, Aravind & Chari, Manjunatha. (2019). Noise Reduction Using Modified Wiener Filter in Digital Hearing Aid for Speech Signal Enhancement. *Journal of Intelligent Systems*. 29. doi:10.1515/jisys-2017-0509.
- Lim, J. S. (1983). *Speech enhancement*. Prentice-Hall.
- Loizou, P. (2013). *Speech enhancement: Theory and practice*. CRC Press.
- Martin, R. (2001). Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 9(5), 504-512.
- N. Modhave, Y. Karuna and S. Tonde, "Design of matrix wiener filter for noise reduction and speech enhancement in hearing aids," 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology

(RTEICT), Bangalore, India, 2016, pp. 843-847, doi: 10.1109/RTEICT.2016.7807946.

- Nasr, Marwa & Abd-Elnaby, Mohammed & El-Fishawy, Adel & El-Rabaie, El-Sayed & Abd El-Samie, Fathi. (2018). Efficient Implementation of Adaptive Wiener Filter for Pitch Detection from Noisy Speech Signals. *Menoufia Journal of Electronic Engineering Research*. 27. 109-126. doi:10.21608/mjeer.2018.64399.
- Ramli, Roshahliza & Abid Noor, Ali & Samad, Salina. (2017). Noise cancellation using selectable adaptive algorithm for speech in variable noise environment. *International Journal of Speech Technology*. 20. 1-8. doi:10.1007/s10772-017-9425-1.
- Rix, A. W., Beerends, J. G., Hollier, M. P., & Hekstra, A. P. (2001). Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) A new method for speech quality assessment of telephone networks and codecs. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2, 749–752.
- Taal, C. H., Hendriks, R. C., Heusdens, R., & Jensen, J. (2011). An algorithm for intelligibility prediction of time–frequency weighted noisy speech. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 19(7), 2125–2136.
- Whitehead, P.S. & Anderson, David & Clements, M.A. (2003). Adaptive, acoustic noise suppression for speech enhancement. 1. I- 565. 10.1109/ICME.2003.1220980.
- Widrow, B. and Stearns, S.D., 1985. *Adaptive Signal Processing*. Prentice-Hall.
- Wiener, N., 1949. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. MIT Press.
- Y. Ephraim and D. Malah, “Speech Enhancement Using a Minimum Mean Square Error Short-Time Spectral Amplitude Estimator,” *IEEE Transaction on Speech Audio Processing*, Vol. 32, No. 6, 1984, pp. 1109-1121.
- Yechuri, S., Vanambathina, S. (2024). Single channel speech enhancement using iterative constrained NMF based adaptive wiener gain. *Multimed Tools Appl* 83, 26233–26254.