

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AKTİF GÜRÜLTÜ GİDERİMİ ALGORİTMALARININ ANALİZİ,  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**

**Süleyman Kerem GÖKALP**

**ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2013**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Süleyman Kerem GÖKALP tarafından hazırlanan “**Aktif Gürültü Giderimi Algoritmalarının Analizi, Gerçekleştirilmesi ve Karşılaştırılması**” adlı tez çalışması 06/12/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç Dr. Murat EFE

**Jüri Üyeleri:**

**Başkan:** Prof. Dr. Kemal LEBLEÇİOĞLU  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye:** Doç. Dr. Murat EFE  
Ankara Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Selçuk TAŞCIOĞLU  
Ankara Üniversitesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Prof. Dr. İbrahim DEMİR**  
Enstitü Müdürü

## **ETİK**

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

12/12/2013

Süleyman Kerem GÖKALP

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### AKTİF GÜRÜLTÜ GİDERİMİ ALGORİTMALARININ ANALİZİ, GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Süleyman Kerem GÖKALP

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat EFE

Gürültü giderimi, özellikle yüksek şiddetli ve sürekli gürültünün bulunduğu ortamda çalışan insanların psikolojik ve fizyolojik anlamda sağlığını korumak adına önemli bir faaliyettir. Gürültü giderimi yöntemlerinden bir tanesi olan aktif gürültü giderimi ise gürültü sinyalinin, aynı genlikte ve fazı 180 derece kaydırılmış anti gürültü sinyali ile girişime sokulması esasına dayanmaktadır. Bu esasa göre, gürültünün aktif olarak giderilmesini sağlamak için bir çok teknik ve algoritma geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında aktif gürültü giderimi parametrelerinin etkileri ve algoritmaların farklı gürültü tiplerindeki performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, parametrelerin performans ve kararlılık açısından büyük bir öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca algoritmalar da kendi aralarında karşılaştırılmış, başarılı ve başarısız olduğu durumlar belirlenmiştir. Algoritmaların yetersiz olduğu durumlarda, farklı yapıdaki algoritmaları kullanarak veya hibrit yapıdaki algoritmalar kullanılarak yetersizliklerin giderilebileceği gözlemlenmiştir.

**Aralık 2013, 79 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Gürültü giderimi, aktif gürültü giderimi, aktif gürültü kontrolü

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **ANALYSIS, IMPLEMENTATION AND COMPARISON OF ACTIVE NOISE CANCELLATION ALGORITHMS**

Süleyman Kerem GÖKALP

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat EFE

Noise cancellation is an important task which is performed for physiological and psychological health protection of personnel working in especially highly and continuously noisy environment. Active noise cancellation, one of the most common noise cancellation methods, is based on the interference of the noise signal with anti noise signal which has same amplitude as noise signal, but 180 degree shifted in phase. On this basis, a lot of techniques and algorithms have been developed in order to cancel noise actively. In this thesis, effects of active noise cancellation parameters and performance of the algorithms on different noise types are investigated. According to the results, the active noise cancellation parameters were observed to have great importance in terms of performance and stability. Moreover, algorithms were compared with each other, and the successful and unsuccessful cases were determined. In cases when algorithms are inefficient, deficiencies might be eliminated by using different algorithms that has different structure or by using hybrid algorithms.

**December 2013, 79 pages**

**Key Words:** Noise cancellation, active noise cancellation, active noise control

## TEŞEKKÜR

Tüm çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat EFE'ye (Ankara Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Öğretim Üyesi) ve yüksek lisans ve tez çalışmalarımın tümünde yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Asım Egemen YILMAZ'a (Ankara Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Öğretim Üyesi) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hem bu süreçte, hem de hayatım boyunca yanımda olan ve ideallerimi gerçekleştirmemi sağlayan değerli aileme yürekten teşekkürü borç bilirim.

Hem iş hayatımda, hem okul hayatımda başarıya ulaşmam konusunda elinden gelen bütün yardımları yapan Bülent GÖKALP'e teşekkür ederim.

İş arkadaşlarıma ve yöneticilerime, bu süreç içerisinde sundukları imkan ve yardımlar için teşekkür ederim.

Son olarak, desteklerini esirgemeyen bütün arkadaşlarıma, özellikle Ezgi Gül ULU'ya içtenlikle teşekkür ederim.

Süleyman Kerem GÖKALP  
Ankara, Aralık 2013

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGE DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1 Adaptif Filtre Teorisi.....	9
2.1.1 LMS algoritması.....	11
2.1.2 RLS algoritması .....	13
2.1.3 Dijital filtre tipleri.....	14
2.1.4 Performans kriterleri.....	14
2.2 Aktif Gürültü Gideriminin Temelleri .....	15
2.2.1 Gürültü tipleri .....	15
2.2.2 Aktif gürültü giderimi modeli.....	18
2.2.3 İkincil yol etkisi ve kestirimi .....	20
2.2.4 Geri besleme etkisi .....	24
2.3 Oluk Modeli.....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1 Aktif Gürültü Giderimi Algoritmaları.....	27
3.1.1 FxLMS algoritması .....	27
3.1.2 Geri beslemeli FxLMS algoritması.....	29
3.1.3 FuLMS algoritması.....	30
3.1.4 Hibrit algoritma .....	31
3.1.5 FxRLS algoritması .....	33
3.1.6 Geri beslemeli FxRLS algoritması.....	34
3.2 Simülasyon Modeli.....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
4.1 Aktif Gürültü Giderimi Parametrelerinin Performansa Etkileri .....	40
4.1.1 Yakınsama katsayısının performansa etkisi.....	40
4.1.2 Filtre uzunluğunun performansa etkisi .....	42
4.1.3 Geri besleme etkisinin performansa etkisi.....	43
4.2 LMS Tabanlı Algoritmaların Karşılaştırılması .....	45
4.2.1 Tek tonlu gürültü ile yapılan testler .....	46
4.2.2 Dar bant gürültü ile yapılan testler .....	52
4.2.3 Geniş bant gürültü ile yapılan testler .....	57
4.2.4 İşlem yükü karşılaştırmaları.....	63
4.3 RLS ve LMS Tabanlı Algoritmaların Karşılaştırılması.....	64
4.3.1 Dar bant gürültü ile yapılan testler .....	65
4.3.2 Geniş bant gürültü ile yapılan testler .....	67
4.3.3 İşlem yükü karşılaştırmaları.....	70
5. SONUÇ .....	72
KAYNAKLAR .....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	79

## KISALTMALAR DİZİNİ

DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Dijital Sinyal İşlemcisi)
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> (Sonlu Dürtü Cevabı)
FxLMS	Girişi Filtrelenmiş LMS
FxRLS	Girişi Filtrelenmiş RLS
LMS	<i>Least Mean Square</i> (Karelerinin Ortalamasının En Küçüğü)
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i> (Hata Karelerinin Ortalamasının Minimumu)
MSE	<i>Mean Square Error</i> (Hata Karelerinin Ortalaması)
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i> (Sonsuz Dürtü Cevabı)
RLS	<i>Recursive Least Square</i> (Yinelemeli En Küçük Kareler)



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Süperpozisyon ilkesi .....	2
Şekil 1.2 Temel yaklaşım.....	3
Şekil 1.3 Paul Lueg tarafından yayınlanan patent (Lueg 1936).....	4
Şekil 1.4 Ticari aktif gürültü giderim kulaklığı .....	6
Şekil 1.5 Askeri aktif gürültü giderim kulaklığı .....	6
Şekil 1.6 Aktif gürültü giderimi havalandırma uygulaması.....	7
Şekil 1.7 Aktif gürültü giderimi binek araç uygulaması .....	7
Şekil 2.1 Adaptif filtre blok diyagramı .....	9
Şekil 2.2 Beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu .....	16
Şekil 2.3 Hata mikrofonu tarafından algılanan beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu .....	17
Şekil 2.4 Dar bant gürültü.....	17
Şekil 2.5 Tek tonlu gürültü (300 Hz) .....	18
Şekil 2.6 Aktif gürültü giderimi blok diyagramı.....	19
Şekil 2.7 İleri beslemeli aktif gürültü giderimi .....	19
Şekil 2.8 Geri beslemeli aktif gürültü giderimi.....	20
Şekil 2.9 Aktif gürültü giderimi problemi .....	21
Şekil 2.10 İkincil yol etkisi blok diyagramı .....	21
Şekil 2.11 İkincil yol etkisi eklenmiş aktif gürültü giderimi blok diyagramı .....	21
Şekil 2.12 İkincil yol etkisi çözümü.....	22
Şekil 2.13 İkincil yol etkisi kestirimi .....	23
Şekil 2.14 İkincil yol etkisi kestirimi sonucu.....	23
Şekil 2.15 İkincil yol etkisi kestirimi dürtü cevapları .....	24
Şekil 2.16 Geri besleme etkisi .....	24
Şekil 2.17 Geri besleme etkisi eklenmiş aktif gürültü giderimi blok diyagramı.....	25
Şekil 2.18 Oluk sınır frekansı .....	26
Şekil 3.1 FxLMS algoritması blok diyagramı.....	27
Şekil 3.2 Geri beslemeli FxLMS algoritması blok diyagramı .....	29
Şekil 3.3 FuLMS algoritması blok diyagramı.....	30
Şekil 3.4 İleri beslemeli ve geri beslemeli algoritmaların beraber kullanılması .....	31
Şekil 3.5 Hibrit algoritma blok diyagramı .....	32
Şekil 3.6 FxRLS algoritması blok diyagramı.....	33
Şekil 3.7 Geri beslemeli FxRLS algoritması blok diyagramı .....	34
Şekil 3.8 Oluk sistemi .....	35

Şekil 3.9 Gürültü hoparlörü - referans mikrofonu frekans cevabı .....	37
Şekil 3.10 Gürültü hoparlörü - hata mikrofonu frekans cevabı.....	38
Şekil 3.11 Anti gürültü hoparlörü - referans mikrofonu frekans cevabı .....	38
Şekil 3.12 Anti gürültü hoparlörü - hata mikrofonu frekans cevabı .....	39
Şekil 4.1 Yakınsama katsayısı testi.....	41
Şekil 4.2 Filtre uzunluğunun yakınsamaya etkisi .....	42
Şekil 4.3 Filtre uzunluğunun hesaplama zamanına etkisi .....	43
Şekil 4.4 Geri besleme etkisi testi (FxLMS).....	44
Şekil 4.5 Geri besleme etkisi testi (Geri beslemeli FxLMS) .....	45
Şekil 4.6 Geri besleme etkisi testi (FuLMS).....	45
Şekil 4.7 MSE değişim grafiği (tek tonlu gürültü) (FxLMS).....	46
Şekil 4.8 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (FxLMS).....	47
Şekil 4.9 MSE değişim grafiği (tek tonlu gürültü) (geri beslemeli FxLMS) .....	48
Şekil 4.10 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (geri beslemeli FxLMS) .....	48
Şekil 4.11 MSE değişim grafiği (tek tonlu gürültü) (hibrit algoritma) .....	49
Şekil 4.12 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (hibrit algoritma) .....	50
Şekil 4.13 MSE değişim grafiği tek tonlu gürültü (FuLMS) .....	50
Şekil 4.14 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (FuLMS) .....	51
Şekil 4.15 MSE değişimleri grafiği (tek tonlu gürültü) (LMS tabanlı algoritmalar) .....	51
Şekil 4.16 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (FxLMS).....	52
Şekil 4.17 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (FxLMS).....	53
Şekil 4.18 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS) .....	53
Şekil 4.19 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS) .....	54
Şekil 4.20 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (hibrit algoritma) .....	54
Şekil 4.21 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (hibrit algoritma) .....	55
Şekil 4.22 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (FuLMS).....	56
Şekil 4.23 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (FuLMS).....	56
Şekil 4.24 MSE değişimleri grafiği (dar bant gürültü) (LMS tabanlı algoritmalar) .....	57
Şekil 4.25 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (FxLMS) .....	58
Şekil 4.26 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (FxLMS) .....	58
Şekil 4.27 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS).....	59
Şekil 4.28 Güç spektrumu yoğunluğu (geniş bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS).....	60
Şekil 4.29 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (hibrit algoritma).....	61
Şekil 4.30 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (hibrit algoritma).....	61
Şekil 4.31 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (FuLMS) .....	62

Şekil 4.32 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (FuLMS) .....	62
Şekil 4.33 MSE değişimleri grafiği (geniş bant gürültü) (LMS tabanlı algoritmalar) .....	63
Şekil 4.34 İşlem yükü grafiği (LMS tabanlı algoritmalar) .....	64
Şekil 4.35 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (FxRLS) .....	65
Şekil 4.36 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (FxRLS) .....	66
Şekil 4.37 MSE değişimleri grafiği (dar bant gürültü) (FxLMS - FxRLS) .....	66
Şekil 4.38 MSE değişimleri grafiği (dar bant gürültü) (FxRLS - geri beslemeli FxRLS) .....	67
Şekil 4.39 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (FxRLS) .....	68
Şekil 4.40 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (FxRLS) .....	69
Şekil 4.41 MSE değişimleri grafiği (geniş bant gürültü) (FxLMS - FxRLS) .....	69
Şekil 4.42 MSE değişimleri grafiği (geniş bant gürültü) (FxRLS - geri beslemeli FxRLS) .....	70
Şekil 4.43 İşlem yükü grafiği (L = 16) (FxLMS - FxRLS) .....	71
Şekil 4.44 İşlem yükü grafiği (L = 64) (FxLMS - FxRLS) .....	71

## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1 Oluk parametreleri ve ortam katsayıları (Zimmer vd. 2003).....	36
----------------------------------------------------------------------------	----

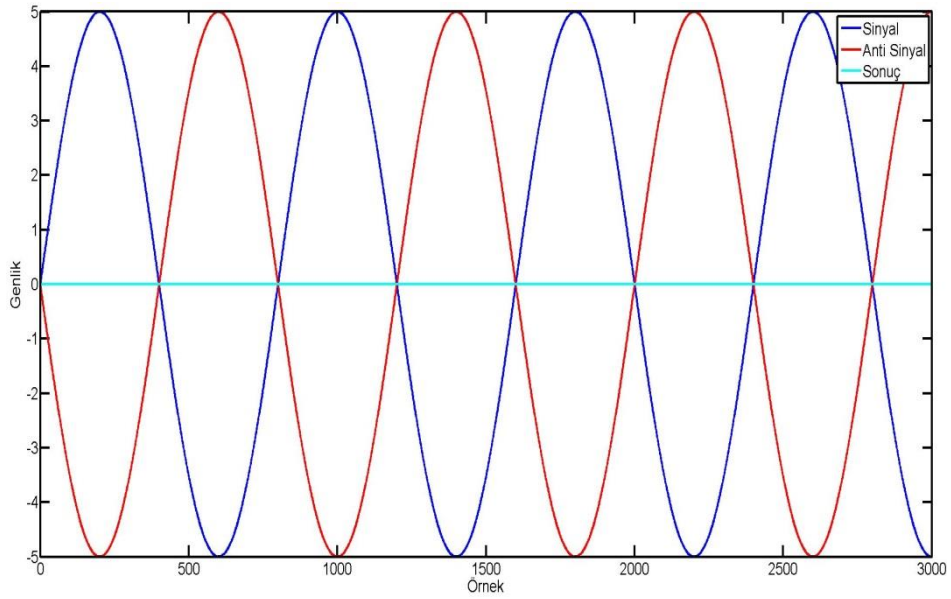
## 1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel makinelerin artmasıyla, ortamdaki istenmeyen ve rahatsızlık veren gürültü miktarı da artış göstermiştir. Motor, pervane, havalandırma gibi sürekli etrafımızda bulunan gürültü kaynakları insanların, hatta hayvanların hayatlarını olumsuz yönde etkilemekte ve maruz kalınan bu gürültünün etkileri hem fiziksel hem de psikolojik olarak gözlemlenmektedir (Pedersen vd. 2008). Maruz kalınan etkileri önlemek amacıyla gürültü giderimi yapılması gerekmektedir. Ses yalıtımı sağlayan malzemeler kullanılarak pasif gürültü giderimi yapılabildiği gibi elektro akustik sistemler yardımıyla da gürültü giderimi mümkün olmaktadır. Bu şekilde yapılan gürültü giderimine aktif gürültü giderimi adı verilmektedir.

Aktif gürültü giderimi, şekil 1.1'de gösterilen süperpozisyon ilkesine göre, gürültüyü kendisiyle aynı genlikte ve zıt fazda bir sinyal (anti-gürültü sinyali) ile girişime sokarak söndürmeyi amaçlar. Ancak pratik uygulamalarda gürültüyü algılamak, işlemek ve anti gürültü sinyalini oluşturmak gibi adımlardan oluşan süreç ilerlerken aynı zaman dilimi içerisinde gürültü de ortamda ilerlemeye devam etmektedir. Gürültünün geçen zaman içerisinde algılanan nokta ile girişim noktasına kadar ilerlediği yola birincil yol adı verilmektedir. Aktif gürültü giderimi algoritmalarının amacı birincil yolun kestirimini yapmak ve o yola ait etkilere eşdeğer bir filtre oluşturmaktır. Böylece algılanan sinyal oluşturulan filtre tarafından filtrelenip girişim noktasında istenen sinyal elde edilmiş olacaktır. Gürültü genellikle durağan olmadığından ve hakkında ön bilgi sahibi olunmadığından dolayı kestirim işlemi adaptif olarak yapılmalıdır. Aktif gürültü giderimi algoritmaları kullandıkları adaptasyon algoritması ve yapıları bakımından farklılaşmaktadırlar.

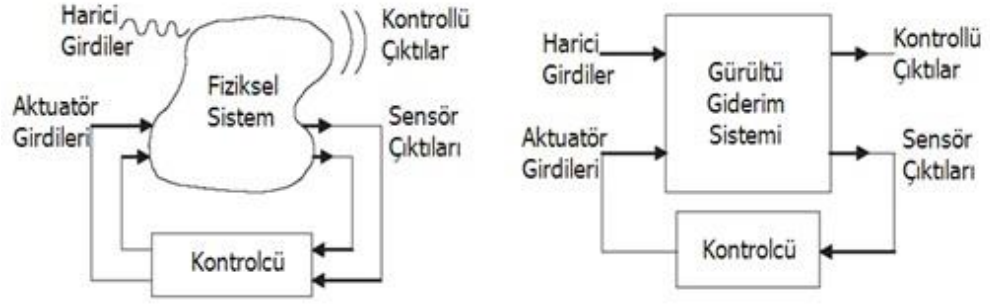
Aktif gürültü giderimi, orijinal "birincil" bir ses alanının kontrollü bir şekilde oluşturulmuş olan "ikincil" bir ses alanı ile girişime sokulması esasına dayanmaktadır. Aktif gürültü giderimi, şekil 1.1'de gösterilen süper pozisyon ilkesini esas alır. Aktif gürültü gideriminin fiziksel anlamı, birincil ve ikincil ses alanlarının uzamsal (*spatial*) olarak, dalga şekillerinin ise zamansal (*temporal*) olarak adaptasyonu olarak özetlenebilir. Uzamsal adaptasyon işleminin fiziksel kısıtlarından ötürü aktif gürültü

giderimi ancak dalga boylarının görece olarak büyük olduğu düşük frekanslarda mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla oluk (*duct*) tabir edilen geometriler içerisinde veya otomobil, uçak kabini, atölye gibi mekanlar içerisinde aktif gürültü giderimi, ancak birkaç yüz Hertz frekansa kadar mümkün olabilmektedir. Bu frekansların ötesinde geometrilerin dalga boyuna göre çok büyük olması, aktif gürültü giderimini pratikte imkansız kılmaktadır. Ancak, kulaklık gibi küçük bir hacmin çevrelendiği durum ve uygulamalarda, çalışma aralığı 1 kHz'e kadar çıkabilmektedir.



Şekil 1.1 Süperpozisyon ilkesi

Aktif gürültü gideriminin genel problem tanımı ve temel çözüm yaklaşımı, sol tarafta fiziksel sistem, sağ tarafta ise elektriksel sistem eşleniği olmak üzere şekil 1.2'de gösterilmektedir. Bu model uyarınca harici olarak bir uyarıma ("birincil" ses alanı olan ortam gürültüsü) maruz kalan fiziksel bir sistem, buna bir tepki ("ikincil" ses alanı olan gürültü giderim sinyali) vermeye çalışmaktadır. Söz konusu çıktının kontrolüne yönelik olarak, birtakım sensörlerden (genellikle, gürültü giderimi yapılan ortama konuşlandırılmış olan mikrofön(lar)) alınan elektriksel sinyallerin bir kontrolcü tarafından işlenerek bir takım aktuatörlere (genellikle, gürültü giderimi yapılan ortama konuşlandırılmış olan gürültü giderici hoparlör(ler)) iletilmektedir.



Şekil 1.2 Temel yaklaşım

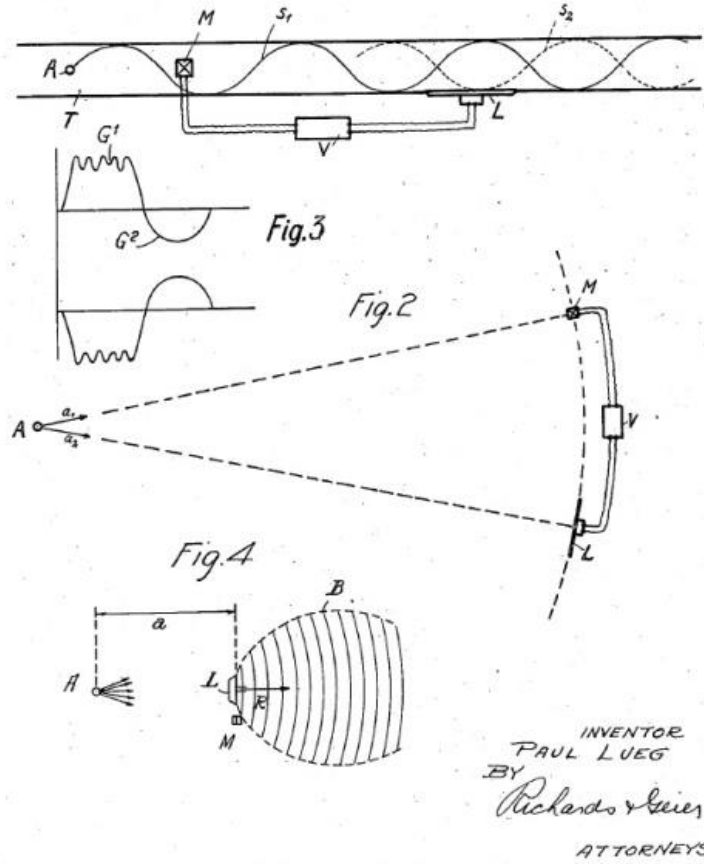
Gürültü giderimi iki farklı yolla yapılabilmektedir:

- Pasif gürültü giderimi
- Aktif gürültü giderimi

Akustik olarak soğurucu ve emici malzemeler kullanılarak kulağı veya ortamı gürültüden izole etme yöntemine pasif gürültü giderimi adı verilmektedir. Pasif gürültü giderimi sayesinde, geniş bir frekans bandında gürültü bastırımı yapılabilir. Ancak bu yaklaşım kullanılarak yalnızca yüksek frekanslarda etkili sonuçlar elde edilebilmekte, özellikle 500 Hz ve daha düşük frekanslarda, pasif yolla gürültü giderimi yapmak, maliyetli ve büyük malzemeler kullanmayı gerektirmektedir. Bunun sebebi, düşük frekanslı sinyallerin dalga boylarının soğurucu ve emici malzemelerin kalınlığından fazla olmasıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi, aktif gürültü giderimi yönteminde de tam tersi durum geçerlidir. Bu sebepten dolayı, aktif ve pasif gürültü giderimi, çoğu uygulamada beraber kullanılarak, geniş bir spektrum bandında gürültü giderimine olanak vermektedirler.

Aktif gürültü giderimi, günümüzde DSP'lerin hızla gelişmesiyle eskiye göre daha revaçta olmasına karşın, konuyla ilgili yapılmış ilk yayın 1936 yılında Mucit Paul Lueg tarafından yayınlanan patenttir (Lueg 1936). Bu patent aktif gürültü gideriminin temel fikirlerinin ortaya atıldığı ilk yayın olarak kabul edilmektedir. Şekil 1.3'te gösterilen patent içeriğindeki çizimden de görüleceği üzere, M noktasında algılanan S1 sinyali, V sisteminde belli bir işlem gördükten sonra üretilen S2 sinyali ile girişime sokulmuştur.

Süperpozisyon ilkesine göre eşit genlikli ve zıt fazlı bu iki sinyal birbirini sönmüştür. Ses sinyalinin yayılma hızının, V sisteminde yapılan sinyal işleme hızından daha uzun olacağından dolayı aktif gürültü gideriminin mümkün olduğu fikri de ilk olarak bu patentte ortaya atılmıştır. Bu fikir, aktif gürültü giderimi algoritmalarının, oluk sistemlerinde kullanılmasının kolaylığını da açıklamaktadır.



Şekil 1.3 Paul Lueg tarafından yayınlanan patent (Lueg 1936)

Paul Lueg'in patentinden sonra yapılan ilk yayın, yaklaşık 20 yıl sonra 1953 yılında, Harry Olson ve Everet May tarafından yayınlanan makale (Olson ve May 1953) olmuştur. Anti-gürültü sinyalini yayan hoparlöre yakın bir mikrofon kullanarak hata sinyalini sisteme besleme fikri, yani geri beslemeli konfigürasyon kullanılması fikri, ilk olarak bu makale de ortaya atılmıştır. Aktif gürültü giderimi sistemlerinin araba ve uçak gibi taşıtlarda kullanılabileceği fikri yazarların argümanları doğrultusunda ilk kez bu makalede ortaya çıkmıştır.



Olson ve May tarafından yayınlanan makale ile yaklaşık aynı zamanlarda 1956 yılında William Conover büyük trafoların yarattığı gürültüleri önleme konusunda çalışmalar yapmıştır (Conover 1956). Conover bu çalışmasında manüel olarak adapte edilen ileri beslemeli bir sistem tasarlamıştır. Bu makalede ortaya atılan fikirlerden en önemlisi, eğer giderilmesi istenen gürültü periyodik ise, ileri beslemeli algoritmada kullanılan referans sinyali mikrofonla algılamak yerine, sisteme aynı periyodikliğe sahip bir sinyal beslenebilmesi fikridir. Bu fikir dar bant aktif gürültü giderimi algoritmalarının temelini oluşturmaktadır. Ayrıca bu makalede, aktif gürültü sistemleri için çoklu kaynak ve çoklu hata mikrofonu kullanılabilmesi fikri ilk olarak öne sürülmüştür.

1950'lerde yapılan bu çalışmalardan sonra ortama göre adapte olması gereken sistemlerin gerekliliği ortaya çıkmıştır, fakat teknolojinin yetersizliğinden dolayı çalışmalar duraklama dönemine girmiştir. Bu dönemde, analog sistemler yetersiz kalmakta, dijital sistemler ise işlem hızı olarak çok yavaş kalmaktadır. Bu yetersizlikler sebebiyle dijital sistemlerin hızla gelişmeye başladığı 1970'lere kadar konu hakkında pek bir çalışma yapılmamıştır. 1970'lerden sonra, aktif gürültü gideriminin dijital tekniklerle gerçekleştirilmesini konu alan ilk makaleler yayımlanmıştır (Kido 1975, Chaplin 1978). Kido trafo gürültüsüyle, Chaplin periyodik gürültülerle ilgili çalışmalar yapmıştır.

Dijital tekniklerin kullanılmaya başlanması ve DSP (*Dijital Sinyal İşlemcisi*) çiplerinin hızla gelişmesiyle, bu konuda yapılmış çalışmalar hızlanmıştır. Aktif gürültü giderimi için en önemli gelişme ise 1981'de Widrow tarafından adaptasyon problemlerinde kullanılmak üzere ortaya koyulan LMS (*Least Mean Square*) algoritmasıdır (Widrow 1981). Aynı sene içerisinde Burgess, LMS algoritmalarının aktif gürültü giderimi algoritmalarında kullanabileceğini ortaya atan makalesini yayımlamıştır (Burgess 1981). Bahsedilen bu çalışmalar, aktif gürültü giderimi konusundaki kilometre taşlarıdır. Yapılmış olan diğer çalışmalar ve ortaya çıkarılan yaklaşımlar bu fikirleri temel alıp, geliştirmiş çalışmalardır.

Aktif gürültü gideriminin kullanıldığı bir çok alan ve uygulama vardır. Bu uygulamalar arasında en çok kullanılan ürün kulaklıktır. Ticari ve askeri örnekleri bulunan aktif

gürültü giderimli kulaklık sistemlerinde pasif ve aktif kontrol birlikte kullanılarak, geniş bir frekans spektrumunda gürültü giderimi yapılabilmektedir. Aktif gürültü giderimli kulaklık için ticari bir örnek şekil 1.4’te, askeri bir örnek ise şekil 1.5’te gösterilmiştir.

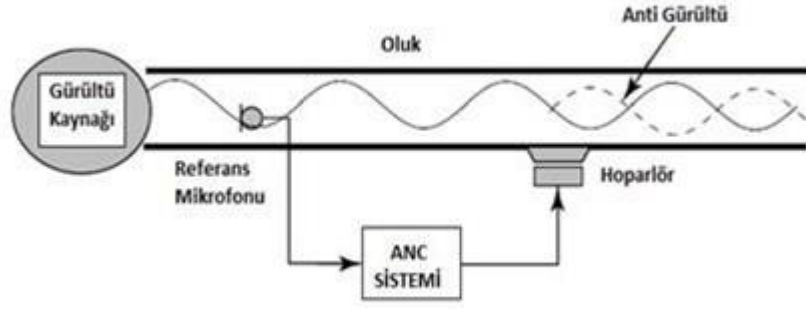


Şekil 1.4 Ticari aktif gürültü giderim kulaklığı



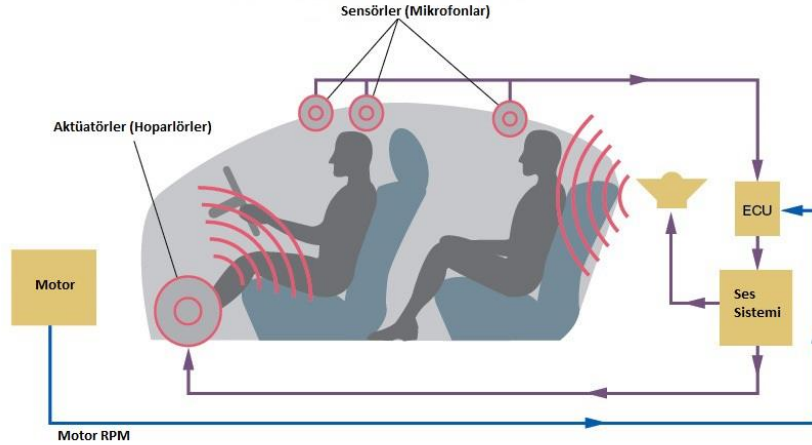
Şekil 1.5 Askeri aktif gürültü giderim kulaklığı

Bir başka yaygın kullanım ise, bu tez için de kullanılan simülasyon modeliyle aynı geometriye sahip olan havalandırma tarzı uygulamalardır. Özellikle Amerika’da olmak üzere büyük şirketler, çalışanlarının konforu için aktif gürültü giderim çözümlerine başvurmaktadır. Pasif yollarla maliyeti çok daha yüksek olabilecek gürültü giderimini, aktif gürültü giderimi yöntemlerini kullanarak çok daha maliyetsiz yapmak mümkün olmaktadır. Havalandırma uygulamasının örnek şeması şekil 1.6’da gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Aktif gürültü giderimi havalandırma uygulaması

Japonya üretimi araçlar başta olmak üzere son zamanlarda daha da yaygınlaşan bir diğer aktif gürültü giderimi uygulaması da binek araçlar üzerinde yapılan uygulamalardır (www.honda.co.nz/technology/driving/anc, 2013). Yol gürültüsü ve motor gürültüsünü önlemeye yönelik olan bu çalışma sürücü ve yolcuların konforunu arttırmaya yöneliktir. Eskiden lüks olarak görünen bir çok araç aksesuarının günümüzde ihtiyaç olduğu düşünüldüğü zaman, aktif gürültü gideriminin ileride çoğu araçta standart bir özellik olması çok normal olacaktır. Binek araç uygulamasının şeması şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Aktif gürültü giderimi binek araç uygulaması

Aktif gürültü gideriminin, yaygın olarak kullanıldığı bu üç uygulama alanı dışında da çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Motor gürültüsü önleyici motor kaskı (Liu vd. 2010), pervaneli uçak içerisinde pervane gürültüsünü önleme (Johansson 2000), sessiz

oda veya kabin gibi çalışmalar literatürde karşımıza çıkmaktadır. Gelişen işlem kapasitesiyle beraber gelecekte aktif gürültü giderimi uygulamalarının küresel çapta yaygınlaşacağı ve daha çeşitli ve güncel alanlarda kullanımının artacağı öngörülmektedir.

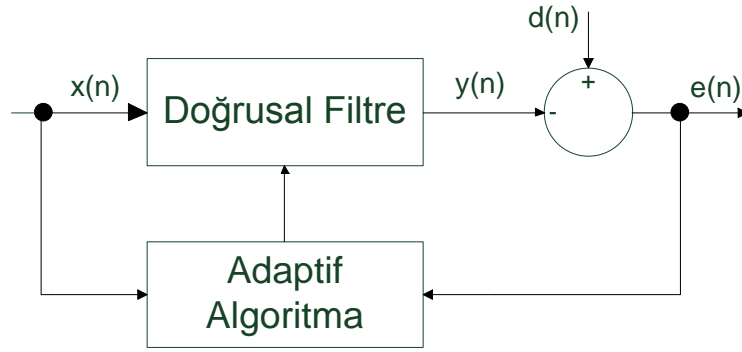
Aktif gürültü giderimi ile ilgili uygulamalarda her bir uygulamanın gürültü giderimine olumlu yönde katkı sağlayacağı durumlar olduğu gibi, gürültü giderimini zorlaştıracak durumlar da olabilir. Örneğin, havalandırma uygulamalarında mikrofon yerleşimleri ayarlanarak işlem zamanı esnetilebilirken, bu imkan kulaklık uygulamalarında mümkün olmamaktadır. Bu sebepten dolayı, kulaklık uygulamalarında geri beslemeli algoritmalar, havalandırma uygulamalarında ileri beslemeli algoritmalar tercih edilmektedir. Bir başka örnek vermek gerekirse, geniş alan uygulamalarında ve binek araç uygulamalarında, tek mikrofon ve tek hoparlör ile yeterli gürültü giderimi sağlanamadığı için birden fazla hoparlör ve mikrofonun kullanılmasına imkan veren algoritmalar tercih edilmektedir. Ayrıca havalandırma algoritmalarında oluk geometrisi sayesinde yüksek frekanslı gürültüler kendiliğinden bastırılmakta iken, geniş alan uygulamaları ve kulaklık uygulamalarında yüksek frekanslı bileşenler için pasif gürültü gideriminin de aynı zamanda yapılması gerekmektedir. Aktif gürültü giderim algoritmaları da bu ve bunun gibi gereksinimlere karşılık vermek üzere farklılaşmışlardır.

Türkiye’de aktif gürültü giderimi konusu hakkında yayımlanmış makale ve tez çalışmalarında (Güner 2000, Tokatlı 2004, Kandulu 2008, Erkan 2009 ve Aytaç 2010), belirli bir algoritmanın analizi veya aktif gürültü gideriminin belli bir platformda veya belirli bir uygulama için gerçekleştirimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde ise ortak bir model kullanılarak birden çok algoritma ve parametre test edilmiş, elde edilen sonuçlara göre test edilen algoritmaların tercih sebepleri tartışılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Adaptif Filtre Teorisi

Bir sinyal içerisinde istenmeyen bileşenleri çıkarmaya veya başka bir deyişle istenen bileşenleri ayırmaya yarayan, donanımsal veya yazılımsal olarak gerçekleştirilebilen cihaza filtre, yapılan işleme de filtreleme işlemi adı verilir (Haykin 2001). Veri hakkında önceden bilgi sahibi olunabilen uygulamalarda istenilen işlemi yapabilecek en uygun filtre, uygulamada kullanılmak üzere önceden tasarlanabilir. Bu tarz filtrelerin en önemli örneği Wiener filtresidir. Ancak, böyle bir ön bilginin olmadığı veya zamanla değişen bir verinin olduğu durumda Wiener filtresi yetersiz olacak, adaptif filtreye gerek duyulacaktır. Adaptif filtreler, kendi karakteristiklerini filtre girişinin değişen özelliklerine göre uyarlayabilen, esnek yapıya sahip filtrelerdir. Adaptif filtre, filtreleme ve adaptasyon olmak üzere iki ayrı süreç üzerine kuruludur. Filtreleme süreci, herhangi bir filtrenin yaptığı gibi giriş sinyali ile filtre katsayıları arasında konvolüsyon işleminin uygulanmasıdır. Adaptasyon sürecinde ise, filtre katsayıları, önceden belirli olan maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde güncellenir. Adaptif filtrenin blok diyagramı şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Adaptif filtre blok diyagramı

Adaptif filtrenin filtre katsayısı güncelleme algoritması,  $\mu(n)$  adım büyüklüğü,  $d(n)$  istenen çıkış,  $e(n)$  hata sinyali ve  $x(n)$  giriş sinyal vektörü olmak üzere eşitlik (2.1)’de verilmiştir. Bu algoritmaya aynı zamanda, dik iniş yöntemi adı verilmektedir.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mu(n)\mathbf{G}(e(n), \mathbf{x}(n)) \quad (2.1)$$

$\mathbf{G}(\cdot)$  fonksiyonunun formu adaptif filtrenin maliyet fonksiyonuna göre değişiklik göstermektedir. Ortalama hatanın karesi (MSE) maliyet fonksiyonu eşitlik (2.2)'de verilmiştir.

$$J_{MSE}(n) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} e^2(n) p_n(e(n)) de(n) = \frac{1}{2} E\{e^2(n)\} \quad (2.2)$$

Verilmiş olan maliyet fonksiyonunun türevi ise eşitlik (2.3)'te verilmiştir.

$$-\left( E\{d(n)\mathbf{x}(n-i)\} - \sum_{j=0}^{L-1} E\{\mathbf{x}(n-i)\mathbf{x}(n-j)\}\mathbf{w}_j(n) \right) \quad (2.3)$$

Oto korelasyon matrisi ve çapraz korelasyon vektörü sırasıyla eşitlik (2.4) ve (2.5)'te verilmiştir.

$$\mathbf{R}_{xx}(n) = E\{\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)\} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{P}_{dx}(n) = E\{d(n)\mathbf{x}(n)\} \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.3), (2.4) ve (2.5) birleştirildiğinde eşitlik (2.6) elde edilir. Bu eşitliğe optimum Wiener çözümü adı verilir.

$$\mathbf{W}_{MSE}(n) = \mathbf{R}_{xx}^{-1}(n)\mathbf{P}_{dx}(n) \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6)'dan görüleceği üzere bu çözümün uygulanabilmesi için oto korelasyon ve çapraz korelasyon vektörü gibi ön bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif gürültü giderimi probleminde de gürültü ve ortam zamanla değiştiği ve gürültünün frekans, faz,

genlik, hız gibi bileşenleri durağan olmadığı için ön bilgi sahibi olunamamakta ve dolayısıyla bu çözüm yeterli olmamaktadır.

Adaptif filtreler, kullandıkları adaptif algoritmalarla göre, adaptif algoritmalar da adaptasyon sürecinde filtre katsayılarını güncelleme algoritmalarına ve minimize ettikleri maliyet fonksiyonlarına göre farklılık gösterirler. Literatürde bir çok adaptif algoritma olmasına karşın aktif gürültü giderimi algoritmalarındaki adaptif algoritmaların çoğunluğu LMS (*Least Mean Square*) ve RLS (*Recursive Least Square*) algoritmaları üzerine kuruludur.

### 2.1.1 LMS algoritması

LMS algoritması, eşitlik (2.6)'da gösterilen optimum Wiener çözümünü, istatistiksel bir ön bilgiye sahip olmaksızın, yalnızca filtre girişi ve çıkışını algılayarak uygulamaktadır. LMS algoritması Bölüm 2.1'de bahsedilen dik iniş yöntemini esas alır (Haykin 2001). Dik iniş algoritmasındaki yöntem,  $J(n)$  maliyet fonksiyonunu,  $\mathbf{W}(n)$  parametresi yardımıyla minimize etmektir. Parametreler, eşitlik (2.7)'de gösterildiği gibi güncellenmektedir.

$$\mathbf{w}_i(n+1) = \mathbf{w}_i(n) - \frac{1}{2}\mu(n) \frac{\partial J(n)}{\partial \mathbf{w}_i(n)} \quad (2.7)$$

Bir başka deyişle, sistemin  $i$ . parametresi, maliyet fonksiyonunun  $i$ . parametreye göre türevine göre ayarlanmaktadır. Bu eşitliğin vektör formundaki hali,  $\partial J(n)/\partial \mathbf{w}_i(n)$  türevlerinin vektörü  $\partial J(n)/\partial \mathbf{W}(n)$  olmak üzere, eşitlik (2.8)'de verilmiştir.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \frac{1}{2}\mu(n) \frac{\partial J(n)}{\partial \mathbf{W}(n)} \quad (2.8)$$

Ortalama hatanın karesini minimize etmek için, eşitlik (2.2) kullanılarak, eşitlik (2.9) elde edilir.

$$\mathbf{W}(n + 1) = \mathbf{W}(n) + \mu(n)(\mathbf{P}_{dx}(n) - \mathbf{R}_{xx}(n)\mathbf{W}(n)) \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.9)'dan görüldüğü ve Bölüm 2.1'de bahsedildiği gibi dik iniş yöntemi algoritmasında da istatistiksel bir ön bilgi gereksinimi vardır. Aktif gürültü giderimi gibi adaptif bir problemde ise istatistiksel bilgiler mevcut olmamakta, yalnızca anlık istenen ve giriş değerleri mevcut olmaktadır. Bu durumda, istatistiksel bilgilerin kestiriminin yapılması gerekmektedir. LMS algoritması, dik iniş yöntemini baz alan ve istatistiksel bilgiye gerek duymadan çalışabilen adaptif bir algoritmadır. LMS algoritmasının, dik iniş algoritması ve Wiener çözümüyle arasındaki bağıntı eşitlik (2.10)'da belirtilmiştir.

$$J_{MSE}(n) = E\{J_{LMS}(n)\} \quad (2.10)$$

Bir başka deyişle LMS algoritmasının maliyet fonksiyonu ortalama hatanın karesi maliyet fonksiyonunun anlık kestirimi olup, eşitlik (2.11)'de belirtilmiştir.

$$J_{LMS}(n) = \frac{1}{2}e^2(n) \quad (2.11)$$

LMS algoritmasının maliyet fonksiyonuna göre eşitlik (2.8) güncellenir ise algoritmanın katsayı güncelleme eşitliği elde edilir. Elde edilen sonuç, eşitlik (2.12)'de gösterilmiştir.

$$\mathbf{W}(n + 1) = \mathbf{W}(n) + \mu(n)e(n)\mathbf{x}(n) \quad (2.12)$$

LMS algoritmasının diğer algoritmalar ile karşılaştırıldığında en büyük eksikliği, yakınsama hızının yavaş olmasıdır. Buna rağmen, gerçekleştirilmesinin basit olması, işlem yükünün az olması ve gürbüz bir performansa sahip olmasından dolayı literatürde adaptif algoritmalar arasında en çok tercih edilen algoritmadır.



### 2.1.2 RLS algoritması

RLS algoritması adaptif sistemlerdeki üstün performansı dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak bu başarılı performansının yanında ciddi bir işlem yükünü de beraberinde getirmektedir. RLS algoritmasında maliyet fonksiyonu olarak hatanın en küçük karelerinin ağırlıklı toplamı kullanılır. Minimize edilecek maliyet fonksiyonu,  $\lambda$  unutma katsayısı olmak üzere, eşitlik (2.13)'te gösterilmiştir.

$$J_{LS} = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} e^2(i) \quad (2.13)$$

Unutma katsayısı 1'e çok yakın ve 1'den küçük bir sayıdır. Unutma faktörünün değeri küçük seçilirse, bir önceki iterasyondaki hata değerinin ağırlığı azaltılmış olunur. Böylece unutma katsayısı ayarlanarak, adaptif filtrelerinin durağan olmayan ortamlarda da düzgün çalışması sağlanabilmektedir. RLS algoritmasında, filtre katsayısı  $\mathbf{w}(n)$  değeri 1. iterasyondan ( $i=1$ ),  $n$ . iterasyona ( $i=n$ ) kadar olan ölçümler kullanılarak optimize edilir.

RLS algoritmasının filtre katsayısı güncelleme eşitliği, eşitlik (2.14)'te verilmiştir.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mathbf{g}(n)e(n) \quad (2.14)$$

Kazanç vektörü  $\mathbf{g}(n)$  ise, giriş sinyali  $\mathbf{u}(n)$  olmak üzere eşitlik (2.15)'te verilmiştir.

$$\mathbf{g}(n) = \frac{\lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) \mathbf{u}(n)}{1 + \mathbf{u}^T(n) \lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) \mathbf{u}(n)} \quad (2.15)$$

Giriş sinyalinin korelasyon matrisi  $\mathbf{P}(n)$  ise yinelemeli olarak eşitlik (2.16)'da verildiği şekilde hesaplanır.

$$\mathbf{P}(n) = \lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) - \mathbf{g}(n) \mathbf{r}^T(n) \quad (2.16)$$

### 2.1.3 Dijital filtre tipleri

Dijital filtreler, dürtü cevaplarına göre, FIR (*Sonlu Dürtü Cevabı*) ve IIR (*Sonsuz Dürtü Cevabı*) olmak üzere ikiye ayrılır. Filtre çıkışı tamamen giriş sinyaline bağlı olan, geri beslemesi olmayan filtreye FIR filtre adı verilir. Kendi çıkışından girdi alan, geri beslemesi olan filtreye ise IIR filtre adı verilir. FIR filtreler, aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- Lineer faza sahiptirler.
- Her zaman kararlıdır.
- Tasarım metotları genellikle lineerdir.
- Tasarımı ve donanım üzerinde gerçekleşmesi daha kolaydır.

FIR filtrelerin dezavantajı ise, genellikle istenen performans seviyesine IIR filtrelere kıyasla daha yüksek filtre uzunluğu kullanarak ulaşabilmesi, bu sebepten dolayı işlem yükünün fazla olmasıdır (Lyons 2004).

### 2.1.4 Performans kriterleri

Adaptif filtrelerin başarılarını ölçmek için kullanılan performans kriterleri aynı zamanda aktif gürültü giderimi algoritmalarının başarılarını ölçmek için de kullanılabilirler. Tez kapsamında, algoritmaların testleri için kullanılan performans kriterleri şunlardır:

- Yakınsama hızı
- Durağan durum hatası (*steady-state error*)
- Frekans bölgesindeki bastırma oranı
- İşlem yükü

Yakınsama hızı, filtrenin durağan duruma ulaştığı zamanı belirtir. Adaptif sistemler için hızlı yakınsama tercih edilir. Yakınsama hızı, filtrenin diğer parametreleriyle (yakınsama katsayısı, filtre uzunluğu vb.) de doğrudan ilişkilidir. Yakınsama hızı ne

kadar arttırılırsa, filtrenin kararsızlığı da o derece artar. Bu sebepten dolayı filtre kararsız hale geçmeden önce ulaşabileceği maksimum bir yakınsama hızı vardır.

Durağan durum hatası, genellikle ortalama hatanın karesininin minimum değeri (MMSE) vasıtasıyla hesaplanır. Yani algılanan hata sinyalinin karesinin minimum değeri bu kriteri ifade etmektedir. Adaptif filtrelerin başarısı için en önemli kriterlerden biri olan bu parametre, ne kadar küçük olursa, filtre sisteme ve ortama o kadar iyi adapte olmuş demektir.

Frekans bölgesindeki bastırma oranı kriteri, alt bantlardaki aktif gürültü gideriminin etkin ve etkin olmadığı durumlar arasındaki güç yoğunluğu farkını belirtir. Aktif gürültü giderim algoritmaları yalnızca düşük frekans bantlarında başarılı sonuçlar verebilmektedir. Aktif gürültü giderim algoritması, geniş frekans spektrumuna sahip bir sinyalde diğer performans kriterlerine göre başarısız görünebilirken, düşük frekanslarda başarılı sonuçlar verdiği bu performans kriteri sayesinde belli olmaktadır.

İşlem yükü, adaptif filtreyi gerçek zamanlı bir uygulamaya taşımak istendiği takdirde büyük önem kazanır. İşlem yükü ne kadar artar ise, gerçek zamanlı donanımın işlem zamanı o kadar artacaktır. İşlem zamanının belli bir süreden fazla olması ise filtrenin doğru çalışmamasına sebebiyet verecektir. İşlem yükü ne kadar fazla olursa, o kadar güçlü bir donanım tercih edilmelidir.

## **2.2 Aktif Gürültü Gideriminin Temelleri**

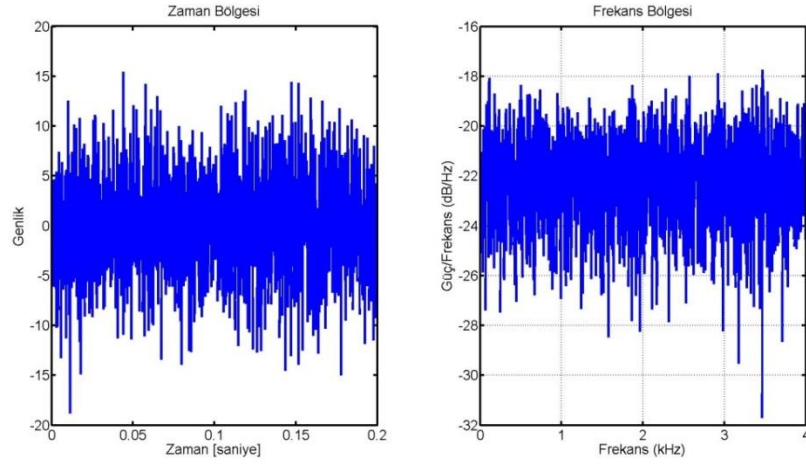
### **2.2.1 Gürültü tipleri**

En genel tanımıyla, istenmeyen sese gürültü adı verilir. Gürültü insanları ve hayvanları hem fiziksel, hem psikolojik yönde olumsuz etkilemektedir. Gürültü bir çok değişik şekilde sınıflandırılabilir:

- Periyodik / periyodik olmayan
- Durağan / durağan olmayan

- Rastgele / rastgele olmayan
- Dar bant / geniş bant

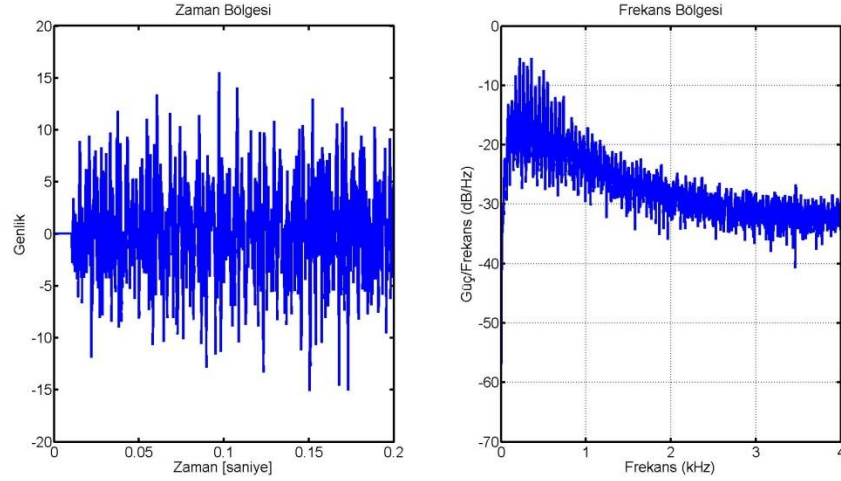
Aktif gürültü giderimi problemi için dar bant / geniş bant sınıflandırması kullanılmaktadır. Tamamen rastgele olan ve geniş bir frekans bandında enerjisi bulunan gürültüye geniş bant gürültü adı verilmektedir. Geniş bant gürültüye örnek olarak, jet uçak gürültüsü veya bir patlamanın gürültüsü örnek verilebilir. Tez kapsamında, geniş bant gürültü ile yapılan testlerde olabilecek en geniş bant gürültü olarak kabul edilen, şekil 2.2’de zaman ve frekans bölgesindeki grafiği gösterilen beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 2.2 Beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu

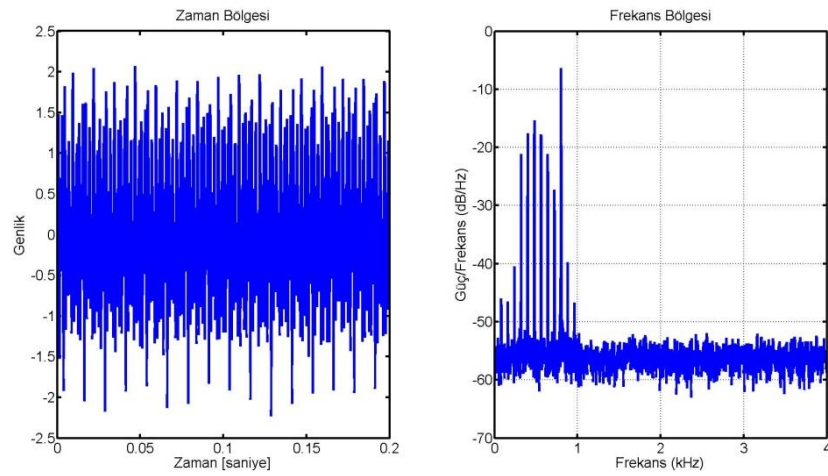
Beyaz gürültü, hem düşük hem de yüksek frekans bantlarında frekans bileşenine sahip olduğundan dolayı, yalnızca düşük frekanslarda gürültü giderimi yapabilen aktif gürültü giderimi algoritmalarının testleri için uygun bir gürültü tipi değildir. Ancak sonraki bölümlerde daha detaylı anlatılacak olan oluk modelinin yapısından dolayı, yüksek frekans bileşenleri bastırılmakta, aktif gürültü giderimi algoritmaları da yalnızca oluk modelinin bastıramadığı düşük frekans bileşenleriyle ilgilenmektedir. Yani, pasif ve aktif gürültü giderimi beraber kullanılmış olunur. Yüksek frekans bileşenine sahip olan gürültü tipleri ile ilgilenirken, başarılı sonuç elde etmek için bu iki yöntemin beraber kullanılması şarttır. Oluk içerisinden geçerek, hata mikrofonu tarafından algılanan

beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonunun zaman ve frekans bölgesindeki grafiği ise şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Hata mikrofonu tarafından algılanan beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu

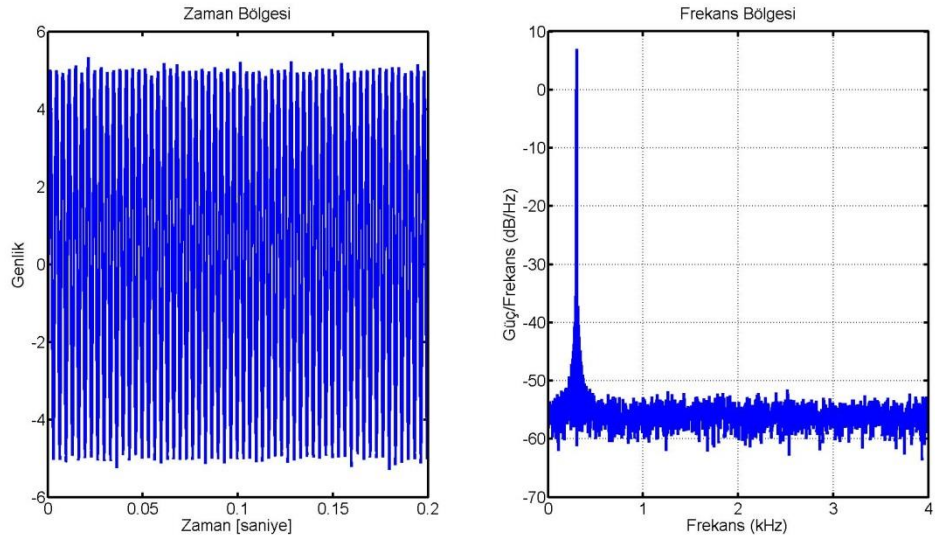
Belirli frekanslarda enerjiye sahip, periyodik veya nerdeyse periyodik olarak ifade edilebilen gürültüye ise dar bant gürültü adı verilmektedir. Dar bant gürültüye, motor veya pervane gürültüsü örnek verilebilir. Tez kapsamında, dar bant gürültü ile yapılan testlerde, belli frekanslarda enerjisi bulunan, zaman ve frekans bölgesindeki grafiği şekil 2.4'te gösterilen simule motor gürültüsü kullanılmıştır.



Şekil 2.4 Dar bant gürültü

Simule motor gürültüsünde olduğu gibi, gerçek motor gürültüleri de aktif gürültü giderimi algoritmalarının başarısının yüksek olduğu 1 kHz'den düşük frekans bantlarında frekans bileşenlerine sahiptir. Bu sebepten dolayı, dar bant gürültü, aktif gürültü giderimi konusunda yapılan çalışmalarda ve pratik uygulamalarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.4'te gösterilen dar bant gürültü için, 80 Hz, 160 Hz, ..., 880 Hz, 960 Hz frekanslarında enerjisi bulunan bir sinyal kullanılmıştır.

Bu iki tip gürültü, yapılacak olan testler için yeterli olsa da, sistemin parametrelerini test etmek, algoritmaları doğrulamak adına olabilecek en dar bant gürültü olan tek bir frekansta bileşene sahip olan tek tonlu gürültü de kullanılmıştır. Kullanılacak tek tonlu gürültü için düşük frekansa sahip herhangi bir gürültü seçilebilir. Aktif gürültü gideriminin performansının en yüksek olduğu aralıkta ki orta bir değer olmasından dolayı 300 Hz frekansına sahip gürültü tercih edilmiştir. 300 Hz'lik tek tonlu gürültünün zaman ve frekans bölgesindeki grafiği şekil 2.5'te gösterildiği gibidir.

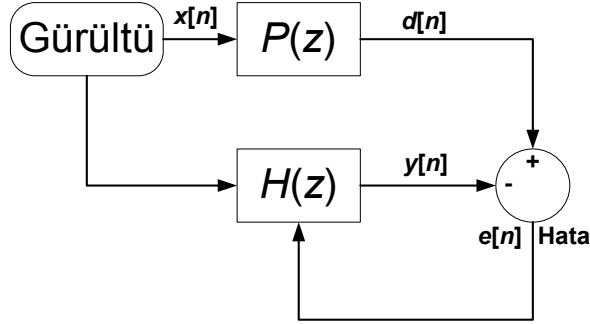


Şekil 2.5 Tek tonlu gürültü (300 Hz)

### 2.2.2 Aktif gürültü giderimi modeli

Basitleştirilmiş aktif gürültü giderimi blok diyagramı şekil 2.6'da gösterilmiştir.  $P(z)$ , birinci yol olarak adlandırılan, kaynaktan hatanın algılandığı algılayıcıya kadar olan

etkileri temsil eder. Sistemdeki amaç,  $e[n]$  hata sinyalini minimize ederek,  $P(z)$  transfer fonksiyonuna en yakın  $H(z)$  transfer fonksiyonunu adaptif olarak bulmaktır.

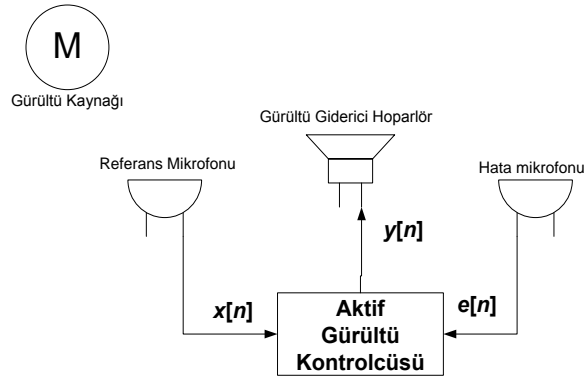


Şekil 2.6 Aktif gürültü giderimi blok diyagramı

Aktif gürültü giderimi kontrol stratejisi olarak sınıflandırıldığı zaman ikiye ayrılır:

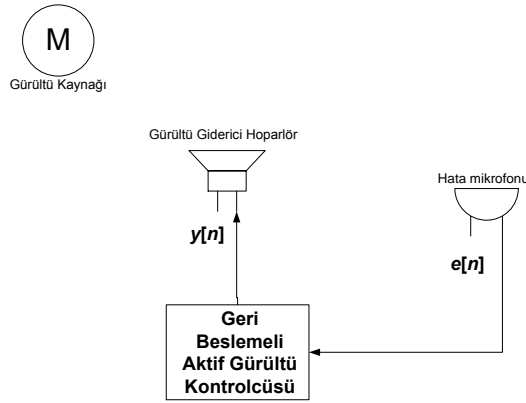
- İleri beslemeli aktif gürültü giderimi
- Geri beslemeli aktif gürültü giderimi

Tek kanallı ileri beslemeli aktif gürültü gideriminin blok diyagramı şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şekil 2.7’den görüleceği üzere, gürültü, referans mikrofonu tarafından algılanıp, adaptif kontrolcü tarafından filtrelenir ve gürültü giderici hoparlör yardımıyla filtrelenen sinyal ortama yayılır. Bu kontrol stratejisinde, istenmeyen gürültü, gürültü giderici hoparlöre ulaşmadan, gürültü hakkında bilgi sahibi olunur.



Şekil 2.7 İleri beslemeli aktif gürültü giderimi

Tek kanallı geri beslemeli aktif gürültü gideriminin blok diyagramı şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekil 2.8’den görüleceği üzere, geri beslemeli kontrol stratejisinin, ileri beslemeli kontrol stratejisinden farkı, referans mikrofonun olmamasıdır. Geri beslemeli kontrol stratejisinin temel fikri, gürültünün kestirimini yapma ve bu kestirimi referans sinyali olarak kullanmaktır. Daha sonraki bölümlerde anlatılacak olan, ileri beslemeli sistemlerde meydana gelen geri besleme probleminin önüne geçmek için geri beslemeli konfigürasyon kullanılabilir. Ayrıca ileri beslemenin fiziksel olarak mümkün olmadığı uygulamalarda da geri beslemeli konfigürasyon tercih edilmektedir.

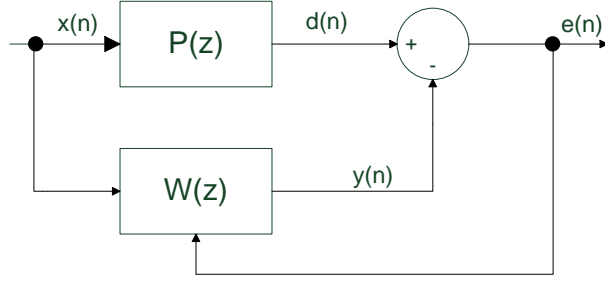


Şekil 2.8 Geri beslemeli aktif gürültü giderimi

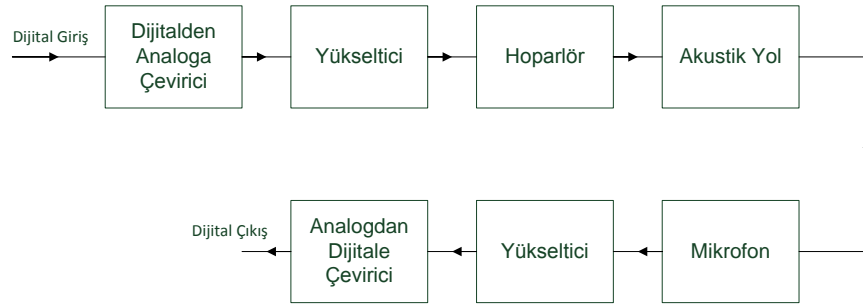
### 2.2.3 İkincil yol etkisi ve kestirimi

Teorik olarak, aktif gürültü giderim probleminin çözümü için şekil 2.9’da gösterildiği şekilde basit LMS veya RLS adaptif filtrelerini kullanmanın yeterli olması gerekir. Ancak pratikte, hesaplanan anti sinyal hesaplandığı anda hata mikrofonuna ulaşmaz, hata mikrofonuna ulaşana kadar ortama bağlı bazı değişimler gösterebilir ve belirli bir gecikmeye maruz kalır. Ayrıca elektriksel sinyalin, akustik bir sinyale çevrilmesi (dijitalden analoga çeviriciler vasıtasıyla) ve akustik sinyalin tekrar hata sinyalinin elde edilmesi için elektriksel sinyale çevrilmesi (analogdan dijitale çeviriciler vasıtasıyla) aşamalarında belli bir zaman geçmekte ve sinyal bazı etkilere maruz kalmaktadır. Şekil 2.10’daki blok diyagramda gösterilen bu etkiler pratik uygulamalarda göz ardı edilemez ve dikkate alınması gerekir.



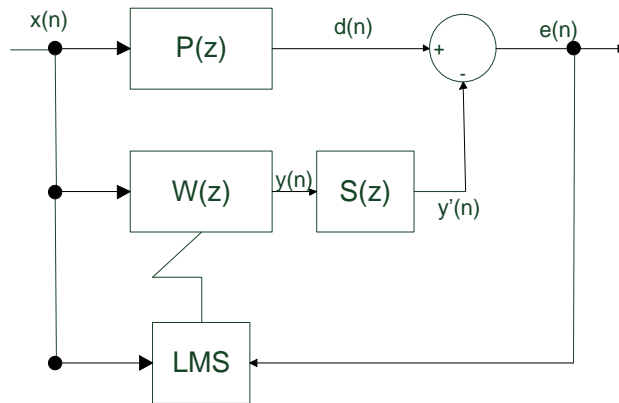


Şekil 2.9 Aktif gürültü giderimi problemi



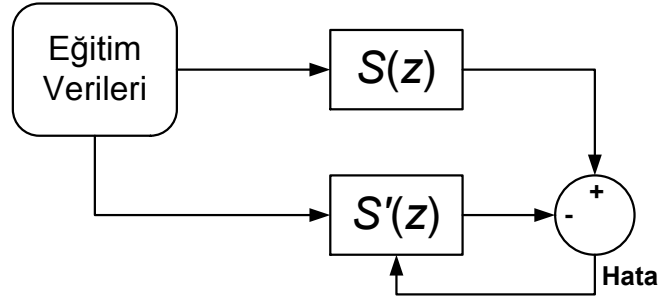
Şekil 2.10 İkincil yol etkisi blok diyagramı

Sözü edilen bu etkileri temsil eden, ikincil yol olarak adlandırılan etkinin adaptif algoritmalara eklenmesi gerekir. İkincil yol etkisinin de  $S(z)$  olarak gösterildiği aktif gürültü giderimi blok diyagramı şekil 2.11’de gösterilmiştir.



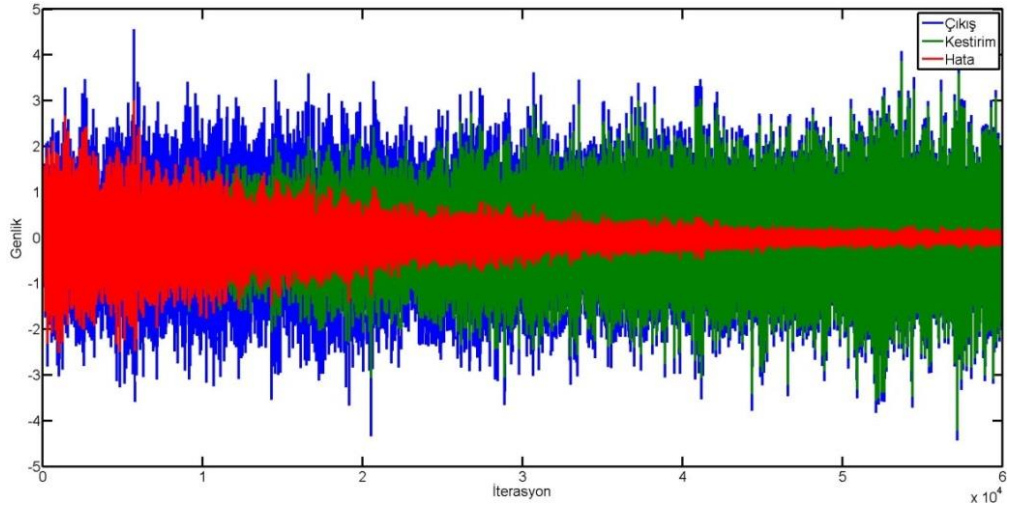
Şekil 2.11 İkincil yol etkisi eklenmiş aktif gürültü giderimi blok diyagramı



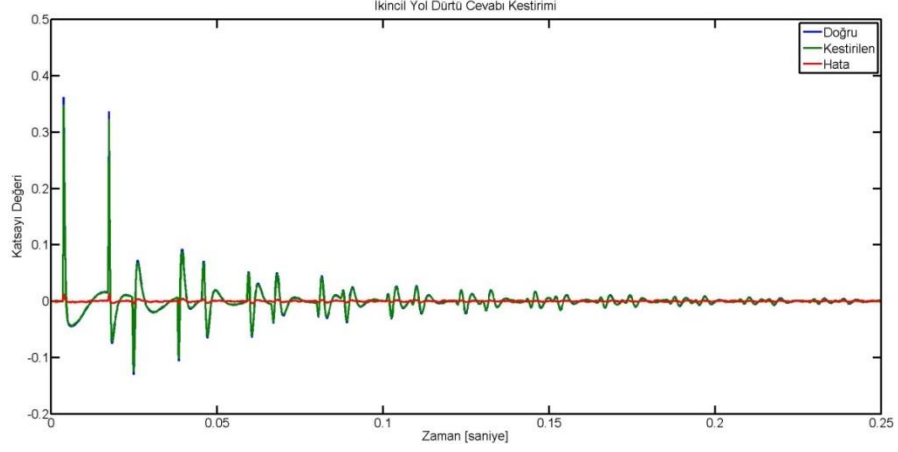


Şekil 2.13 İkincil yol etkisi kestirimi

Şekil 2.13'te gösterildiği gibi kestirim yapıldığında elde edilen sonuç şekil 2.14'te gösterildiği gibidir. Görüleceği üzere hata sinyali olabildiğince minimize edilmiş istenen düzeye getirilebilmiştir. Olması gereken filtre katsayıları, kestirilen filtre katsayıları ve aradaki hatanın gösterildiği grafik ise şekil 2.15'te gösterilmiştir. Performans kriteri olarak durağan durum hatası önem arz etmektedir. Yapılan kestirim sonucu durağan durum hatası ne kadar düşük ise, aktif gürültü gideriminin performansı da o kadar yüksek olacaktır. Şekil 2.14'te görülen durağan durum hatası ve şekil 2.15'te gösterilen filtre katsayı hataları sistemin performansı açısından yeterli seviyede kabul edilebilir.



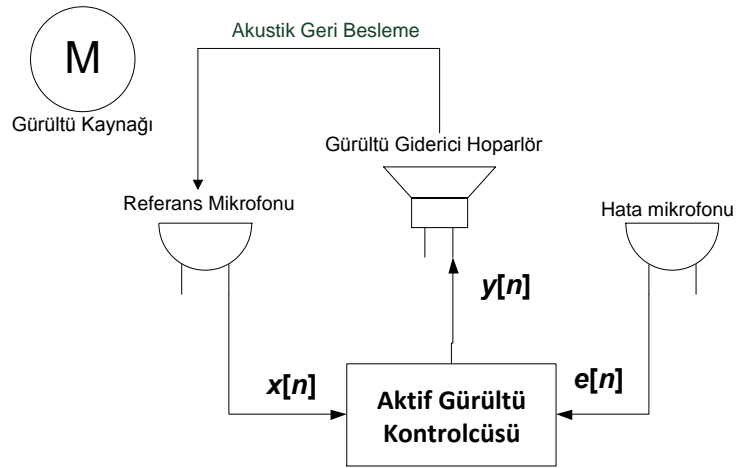
Şekil 2.14 İkincil yol etkisi kestirimi sonucu



Şekil 2.15 İkincil yol etkisi kestirimi dürtü cevapları

#### 2.2.4 Geri besleme etkisi

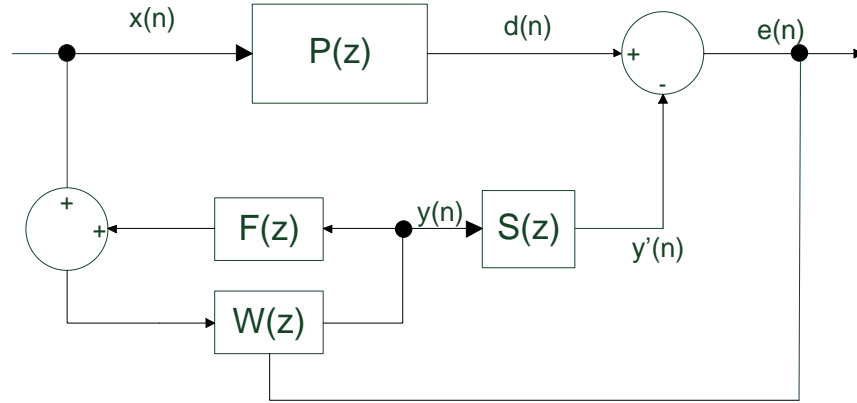
Şekil 2.7’de gösterilen, ileri beslemeli aktif gürültü giderimi sisteminde, gürültü giderici hoparlör tarafından yayılan ses yalnızca hata mikrofonu tarafında değil, aynı zamanda şekil 2.16’da gösterildiği gibi referans mikrofonu tarafından da algılanmaktadır. Geri besleme etkisinin de gösterildiği aktif gürültü giderimi blok diyagramı şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Geri besleme etkisi

Gerri besleme etkisinin önüne geçmek için bir kaç farklı yaklaşım vardır. Akla gelen ilk yaklaşım fiziksel olarak mikrofon ve hoparlörlerin yerleşimleri ayarlanarak veya

yapıları (yönlü mikrofon ve hoparlörler) değiştirilerek geri besleme etkisini azaltmaktır. Ayrıca sistemden bağımsız bir akustik eko gidericisi kullanarak da geri besleme etkisinin etkisi azaltılabilir. İleriki bölümlerde bahsedilecek FuLMS algoritması da geri besleme etkisini azaltmaya yönelik ortaya çıkarılmış adaptif IIR yapıda bir algoritmadır.



Şekil 2.17 Geri besleme etkisi eklenmiş aktif gürültü giderimi blok diyagramı

### 2.3 Oluk Modeli

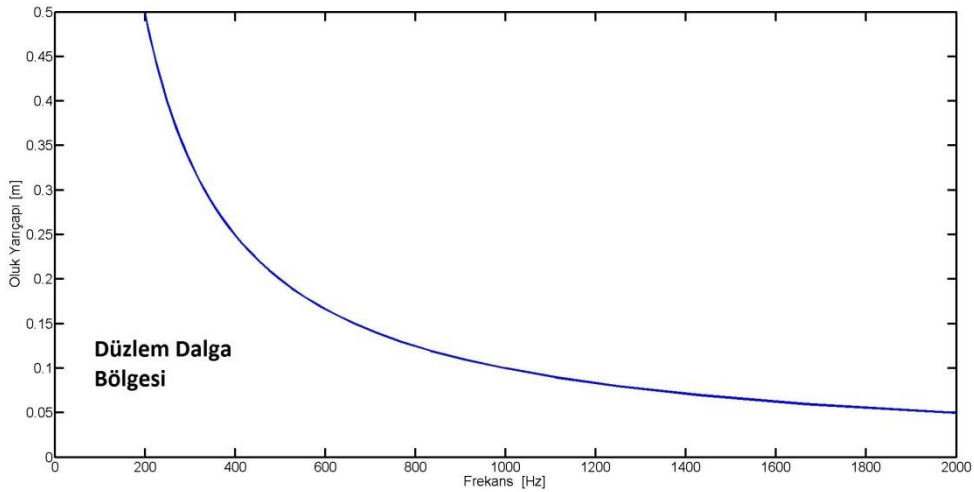
Simülasyonlar için kullanılacak ortam modeli olarak oluk (*duct*) modeli tercih edilmiştir. Oluk modeli, fiziksel yapısından dolayı aktif gürültü giderimi algoritmalarının bastırmada yetersiz olduğu yüksek frekansları bastırmaktadır (Möser 2009).

Pasif sistemlerde, gürültü giderimi yapılmak istenen ortamın boyutları başarıya etki etmezken, aktif sistemler için büyük önem arz etmektedir. Ortamın boyutları, ortamda yayılan dalga tiplerine etki etmektedir. Düzlem dalgalar gibi düşük modlu dalgaların, yayıldığı düzlem boyunca etki ettiği basınç değişmemektedir. Aktif gürültü giderim sistemlerinin bir noktada algılama yapıp diğer bir noktada doğru etki gösterebilmesi için dalgaların yayılımının tahmin edilebilirliğinin fazla olması gerekmektedir. Düzlem dalgalar da, sesin hızına ve kat edeceği yola göre tahmin edilebilirliği fazla olan dalgalardır (Möser 2009).

Eğer gürültü sinyalinin dalga boyu oluğun çapından çok büyükse, gürültü sinyali 1 boyutlu dalga olarak düşünülebilir. Oluk kesit alanının küçük olduğu durumlarda, 1 boyutlu dalga yaklaşımı uygulanabilir. 1 boyutlu akustik dalga denklemlerine göre, eşitlik (2.17)'de verilen sınır frekansından küçük frekanslar için oluk içerisinde yayılım yapan dalgalar düzlem dalga olarak kabul edilebilmekte, yüksek modlu dalgaların hızla sönümlendiği kabul edilebilmektedir (Möser 2009).

$$f_{co} = \left( \frac{0,293}{a} \right) c \quad (2.17)$$

Eşitlik (2.17)'ye ait oluk yarıçapı ve sınır frekansı grafiği ise şekil 2.18'de gösterilmiştir. Şekil 2.18'den görüleceği üzere, oluk yarıçapı küçüldükçe düzlem dalgalar, yüksek modlu dalgalara göre daha baskın hale gelmektedirler.



Şekil 2.18 Oluk sınır frekansı

Bahsedilen bu sebeplerden dolayı, düşük frekanslarda iyi sonuçlar veren aktif gürültü giderim algoritmalarının karşılaştırılması ve hem ileri beslemeli, hem de geri beslemeli algoritmalarının gerçekleştirilmesinin kolaylığı açısından en uygun ortam modeli olan oluk modeli simülasyonlarda kullanılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

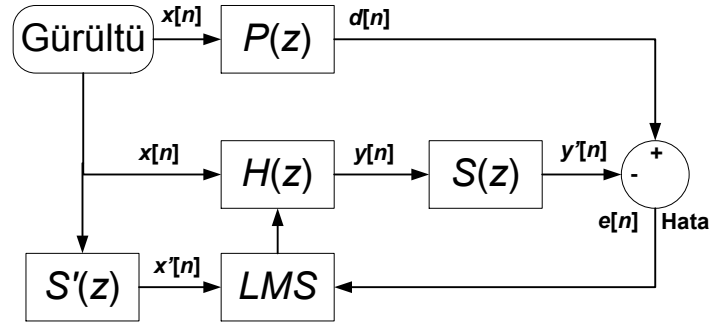
#### 3.1 Aktif Gürültü Giderimi Algoritmaları

Aktif gürültü giderimi kontrol stratejileri, yapıları ve kullandıkları adaptasyon algoritmaları bakımından farklılaşır. Tez kapsamında incelenen algoritmalar şunlardır:

- FxLMS algoritması
- Geri beslemeli FxLMS algoritması
- Hibrit algoritma
- FuLMS algoritması
- FxRLS algoritması
- Geri beslemeli FxRLS algoritması

##### 3.1.1 FxLMS algoritması

LMS algoritmasının, aktif gürültü giderimi probleminde kullanılmak üzere, ikincil yol etkilerini kompanse edecek şekilde geliştirilmiş haline FxLMS algoritması adı verilmektedir. Tez kapsamında incelenen, FxRLS haricindeki diğer algoritmalar, FxLMS algoritmasının kontrol stratejisi ve yapı bakımından farklılaşmış şekilleridir. Yani FxLMS algoritması LMS tabanlı aktif gürültü giderimi algoritmalarının temelini oluşturmaktadır. FxLMS algoritmasının blok diyagramı,  $P(z)$  birincil yolu,  $S(z)$  ikincil yolu,  $H(z)$  kontrolcüyü,  $S'(z)$  ikincil yol kestirimi olmak üzere şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 FxLMS algoritması blok diyagramı

Şekil 3.1'e göre filtre eşitlikleri ve eşitlik (2.12)'den çıkarılan güncelleme eşitlikleri eşitlik (3.1) – (3.3)'te verilmiştir.

$$e(n) = d(n) - \mathbf{s}(n) * [\mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n)] \quad (3.1)$$

$$\mathbf{x}'(n) = \mathbf{s}'(n) * \mathbf{x}(n) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{w}(n + 1) = \mathbf{w}(n) + \mu\mathbf{x}'(n)e(n) \quad (3.3)$$

FxLMS algoritmasında yakınsama katsayısının seçimi büyük önem arz etmektedir. Çok düşük seçilen yakınsama katsayısı sistemin en optimum değere yakınsamamasına sebep olurken, çok yüksek seçilen yakınsama katsayısı da oluşacak salınımların giderek artmasına, sistemin kararsız hale geçmesine sebep olacaktır. Kararlılığı korumak için, yakınsama katsayısının maksimum değeri eşitlik (3.4)'te gösterilmiştir (Elliott ve Nelson 1993). Yani, ikincil yoldaki gecikme artarsa, kullanılabilir maksimum yakınsama katsayısı değeri azalmakta, yakınsama süresi uzamaktadır. Hızlı yakınsama zamanı için, gürültü giderici hoparlör ile hata mikrofonunun mesafesi kısa tutulmalı, elektronik ekipmanların yarattığı gecikme azaltılabiliyorsa azaltılmalıdır.

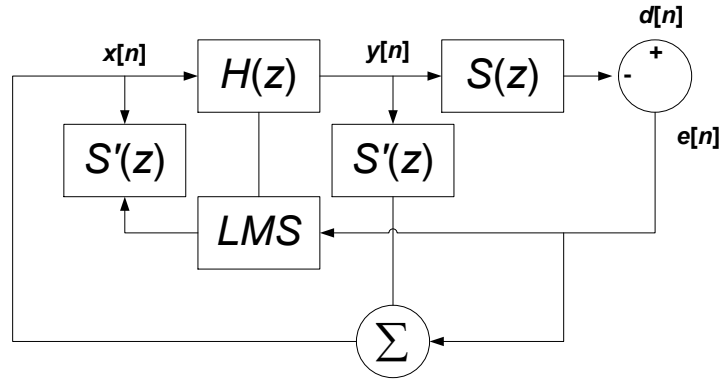
$$\mu_{max} = \frac{1}{E[\mathbf{x}'^2(n)](L + \Delta)} \quad (3.4)$$

FxLMS algoritması, basit gerçekleştirimi, işlem karmaşıklığı fazla olmaması sebebiyle aktif gürültü giderim problemlerinde en çok tercih edilen algoritma olmuştur. Ancak yakınsama zamanının uzun olması, referans mikrofonu kullanılamayacak ortamlar olması, geri besleme etkisi gibi sebeplerle farklı algoritmalara gerek duyulmuştur. Bu algoritmalar, bazı olumlu yönlerden feragat etmek suretiyle, olumsuz yönlerini düzeltecek şekilde FxLMS algoritması baz alınarak ortaya çıkartılmıştır.



### 3.1.2 Geri beslemeli FxLMS algoritması

Bölüm 2.2.4'te anlatılan geri besleme etkisinden veya referans mikrofonu kullanımından kurtulma gibi sebeplerden dolayı FxLMS algoritmasının sadece hata mikrofonu ile kullanılacak haline geri beslemeli FxLMS algoritması adı verilir. Geri beslemeli FxLMS algoritmasının temel fikri, birincil gürültünün kestirimini yapma ve kestirimi yapılan bu gürültüyü referans sinyali olarak kullanmaktır. Algoritmanın blok diyagramı şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Geri beslemeli FxLMS algoritması blok diyagramı

Şekil 3.2'den görüleceği üzere, giriş sinyalinin kestirimi, algılanan hata sinyali ve filtrenin çıkış sinyali kullanılarak eşitlik (3.5)'te gösterildiği şekilde hesaplanır.

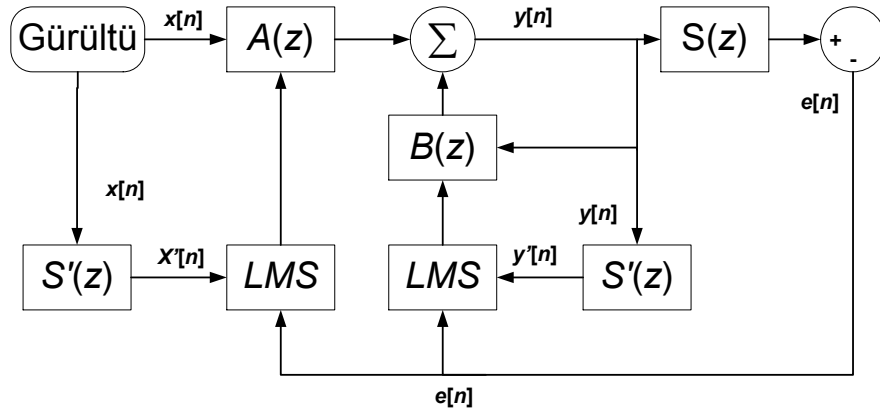
$$x(n) = d'(n) = e(n) + s'(n) * y(n) \quad (3.5)$$

Bu algoritmanın en büyük avantajı referans mikrofonu ve hata mikrofonu olarak çift mikrofona kullanmak yerine yalnızca hata mikrofonu kullanarak aktif gürültü giderim problemine bir çözüm getirebilmesidir. Yalnızca tek mikrofona kullanılmasının tercih edildiği ve geri besleme etkisinin yakınsamaya büyük etki yaptığı ortamlarda sıklıkla kullanılan bir algoritmadır. Bir başka avantajı ise IIR yapıda olmasından dolayı düşük dereceli filtre kullanabilme olanağı vermesidir. Algoritmanın en önemli dezavantajı ise ani değişimlere sahip, periyodikliği az olan sinyallerde giriş sinyalinin kestirimi

üzerinden çalıştığı için başarılı sonuçlar verememesi olacaktır. IIR yapıda olmasının dezavantajı ise kararsız hale geçme ihtimalinin yüksek olmasıdır.

### 3.1.3 FuLMS algoritması

Bölüm 2.2.4'te bahsedildiği gibi geri besleme etkisinin etkilerini azaltmak için adaptif IIR filtresi kullanılabilir. IIR filtre yapısı kullanılması fikri ile geliştirilmiş aktif gürültü giderimi algoritmasına FuLMS algoritması adı verilir. Bu algoritmadaki amaç IIR filtrenin kutuplarını kullanarak, şekil 2.17'de gösterilen geri besleme etkisi transfer fonksiyonu  $F(z)$ 'nin kutuplarını elimine etmektir. Yani sistem geri besleme etkisini sistemin ayrı bir parçası olarak düşünerek, birincil yol  $P(z)$ 'de olduğu gibi, geri besleme etkisi  $F(z)$ 'de olan değişimleri takip etmekte, buna göre parametreleri güncellemektedir. Algoritmanın blok diyagramı şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 FuLMS algoritması blok diyagramı

Şekil 3.3'e göre elde edilen algoritmaya ait eşitlikler, Eşitlik (3.6) – (3.9)'da verilmiştir.

$$y'[n - 1] = s'[n] * y[n - 1] \quad (3.6)$$

$$a[n + 1] = a[n] + \mu x'[n] e[n] \quad (3.7)$$

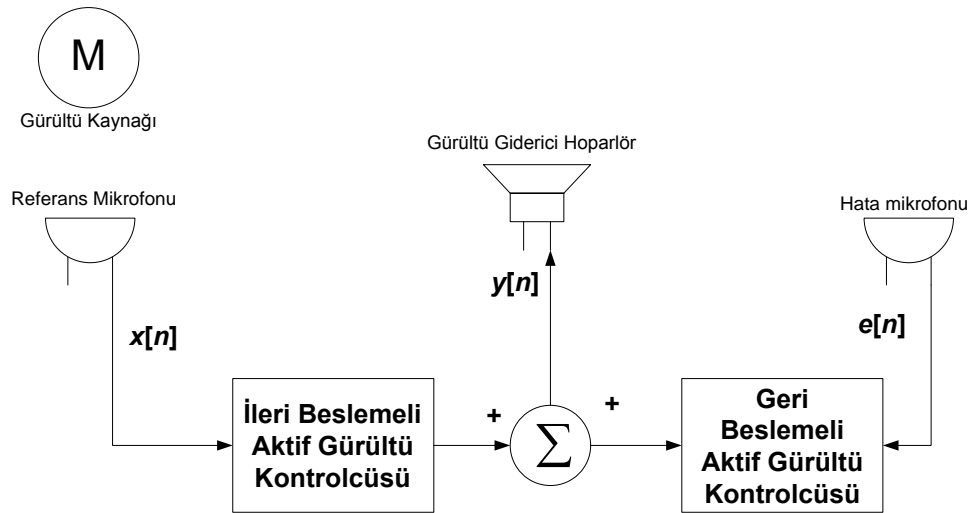
$$\mathbf{b}[n + 1] = \mathbf{b}[n] + \mu \mathbf{y}'[n - 1]e[n] \quad (3.8)$$

$$y[n] = \mathbf{a}^T[n]\mathbf{x}[n] + \mathbf{b}^T[n]\mathbf{y}[n - 1] \quad (3.9)$$

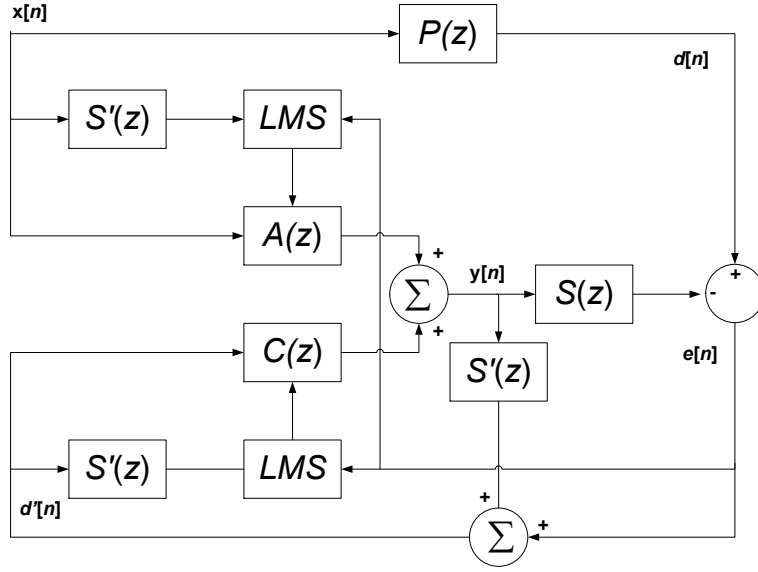
FuLMS algoritması, IIR yapının avantajlarını kullanarak büyük ölçüde geri besleme etkisinin etkilerini azaltmakta, ancak IIR yapıda olmasından dolayı IIR yapının kararsızlık gibi dezavantajlarına da maruz kalmaktadır. Ayrıca algortmada iki tane adaptif filtre kullanıldığından işlem yükü FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmasına göre daha fazla olacaktır.

### 3.1.4 Hibrit algoritma

Aktif gürültü giderimi problemlerinde, iki farklı yapıya sahip algoritmayı bir arada kullanarak, iki algoritmanın da iyi yönlerinden faydalanmak isteyen hibrit algoritmalar ortaya çıkarılmıştır. Bu algoritmalarından en sık kullanılanı ise, şekil 3.4'te gösterilen ileri beslemeli olan FxLMS algoritması ile geri beslemeli olan geri beslemeli FxLMS algoritmasının beraber kullanıldığı algoritmadır. Hibrit algoritmanın blok diyagramı şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 İleri beslemeli ve geri beslemeli algoritmaların beraber kullanılması



Şekil 3.5 Hibrit algoritma blok diyagramı

Şekil 3.5'e göre, algoritmaya ait eşitlikler, eşitlik (3.10) – (3.14)'te verilmiştir.

$$\mathbf{d}'[n] = \mathbf{s}[n] * \mathbf{d}[n] \quad (3.10)$$

$$\mathbf{d}[n] = e[n] + \mathbf{s}[n] * \mathbf{y}[n - 1] \quad (3.11)$$

$$\mathbf{a}[n + 1] = \mathbf{a}[n] + \mu \mathbf{x}'[n] e[n] \quad (3.12)$$

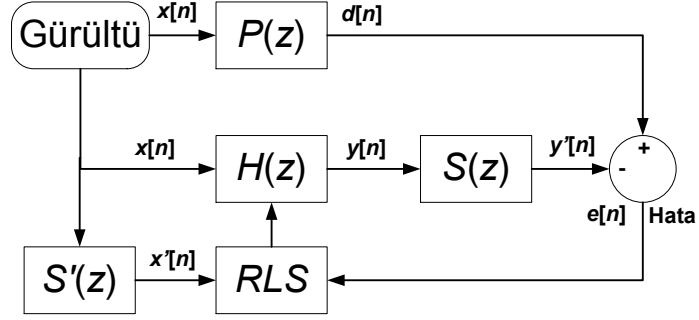
$$\mathbf{c}[n + 1] = \mathbf{c}[n] + \mu \mathbf{d}'[n] e[n] \quad (3.13)$$

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{a}^T[n] \mathbf{x}[n] + \mathbf{c}^T[n] \mathbf{d}[n] \quad (3.14)$$

Hibrit algoritma, ileri besleme ve geri besleme kontrol stratejilerinin düşük dereceli filtreler kullanma ve kararlılık gibi iyi özelliklerini bir araya getirmektedir. Bahsedilen olumlu yönler bir araya getirilirken, adaptif algoritma sayısı arttığı için işlem yükünde de artış meydana gelir. Bu artış hibrit algoritmanın en önemli dezavantajı olarak sayılabilir.

### 3.1.5 FxRLS algoritması

RLS algoritmasının, aktif gürültü giderimi probleminde kullanılmak üzere, ikincil yol etkilerini kompanse edecek şekilde geliştirilmiş haline FxRLS algoritması adı verilmektedir. FxRLS algoritmasının blok diyagramı şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 FxRLS algoritması blok diyagramı

Şekil 3.6’ya ve Bölüm 2.1.2’de elde edilen eşitliklere göre, algoritmaya ait eşitlikler, eşitlik (3.15) – (3.20)’de verilmiştir.

$$e(n) = d(n) - s(n) * [w^T(n)x(n)] \quad (3.15)$$

$$x'(n) = s'(n) * x(n) \quad (3.16)$$

$$w(n+1) = w(n) + g(n)e(n) \quad (3.17)$$

$$g(n) = \frac{r(n)}{1 + u^T(n)r(n)} \quad (3.18)$$

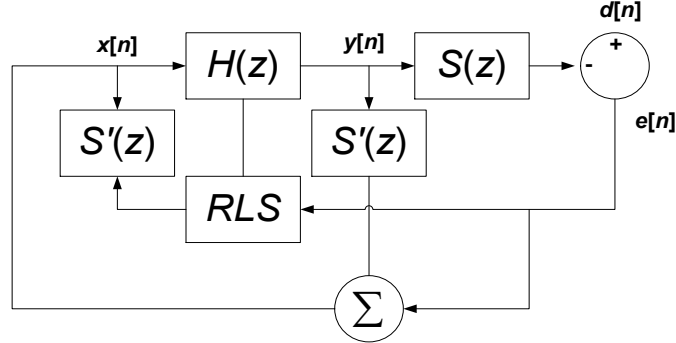
$$r(n) = \lambda^{-1}P(n-1)u(n) \quad (3.19)$$

$$P(n) = \lambda^{-1}P(n-1) - g(n)r^T(n) \quad (3.20)$$

FxRLS algoritması, kullandığı adaptasyon algoritması haricinde FxLMS algoritması ile tamamen aynı özellikleri taşır. Bu algoritmanın incelenmesindeki amaç, aktif gürültü giderimi probleminde RLS adaptif algoritmasını test etmektir. LMS tabanlı algoritmaların hepsini RLS tabanlı hale getirmek mümkündür. Bu tez kapsamında RLS ve LMS algoritmalarını karşılaştırmak için yalnızca FxLMS ve FxRLS algoritmaları kullanılmıştır. RLS algoritmasını da, LMS algoritmalarında olduğu gibi farklı yapılarda kullanabilmek mümkündür.

### 3.1.6 Geri beslemeli FxRLS algoritması

RLS algoritmasının farklı yapılarda kullanımını incelemek için geri beslemeli FxRLS algoritması kullanılmıştır. FxLMS algoritması ile geri beslemeli FxLMS algoritması arasındaki ilişki FxRLS algoritması ile geri beslemeli FxRLS algoritması arasında aynen geçerlidir. Geri beslemeli FxRLS algoritmasının blok diyagramı şekil 3.7’de gösterilmiştir.

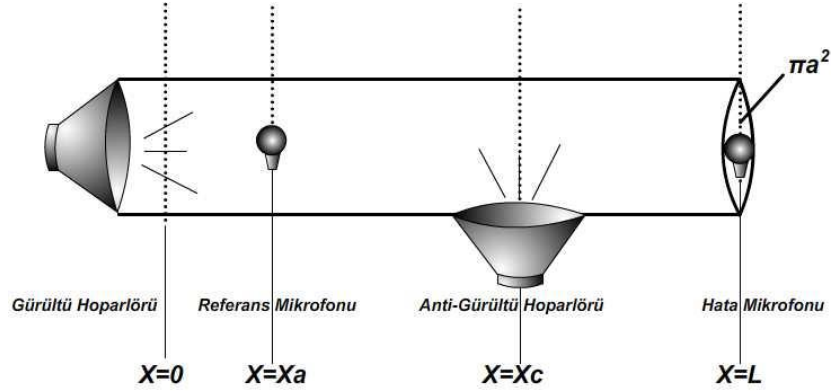


Şekil 3.7 Geri beslemeli FxRLS algoritması blok diyagramı

### 3.2 Simülasyon Modeli

Simülasyonlarda Bölüm 2.3’te bahsedilen oluk modeli kullanılmıştır. Kullanılan oluk modeli, sonlu uzunlukta, sesin enerji kaybının yalnızca oluğun sonunda olduğu sert duvarlı bir yapıya sahiptir. Fiziksel sistem, şekil 3.8’de gösterilmiştir. Fiziksel sistemin  $x=0$  noktasına gürültü hoparlörü,  $x=x_a$  noktasına referans mikrofonu,  $x=x_c$  noktasına

gürültü giderici hoparlörü ve açık uç olan  $x=L$  noktasına hata mikrofonu yerleştirilmiştir.



Şekil 3.8 Oluk sistemi

Simülasyon ortamını oluşturabilmek için, hoparlörlerden, mikrofonlara olan toplam 4 farklı akustik yolun hesaplanması gerekmektedir. Gürültü ve anti gürültü hoparlörü olmak üzere iki farklı tipte ses kaynağı bulunduğu için, hoparlöre verilen giriş sonrası oluğun herhangi bir noktasındaki ses yoğunluğunun hesaplanması için iki ayrı transfer fonksiyonuna gerek duyulmaktadır. Yapılacak olan hesaplamalarda kullanılacak oluk parametreleri ve ortam katsayıları çizelge 3.1’de verilmiştir. Eşitlik (3.21) – (3.24)’te transfer fonksiyonları verilen empedans parametreleri kullanılarak, gürültü hoparlörüne ait transfer fonksiyonu eşitlik (3.25), anti gürültü hoparlörüne ait transfer fonksiyonu ise eşitlik (3.26) kullanılarak hesaplanabilir. Bu iki eşitlik kullanılarak gürültü ve anti gürültü hoparlörlerine verilen giriş sonrası, oluğun herhangi bir noktasında oluşan ses yoğunluğu hesaplanabilmektedir. (Zimmer vd. 2003).

$$Z_0(s) = \frac{\pi a^2}{A_D s} (m_D s^2 + d_D s + k_D) \quad Z_c(s) = \frac{m_c s^2 + d_c s + k_c}{\pi r_c^2 s} \quad (3.21)$$

$$Z_L(s) = \pi a^2 \frac{(R_1 + R_2)M_s + R_1 R_2 M C s^2}{(R_1 + R_2) + (M + R_1 R_2 C)s + R_1 M C s^2} \quad (3.22)$$

$$\alpha_0(s) = \frac{Z_0(s) - \rho_0 c A_D}{Z_0(s) + \rho_0 c A_D} \quad \alpha_L(s) = \frac{Z_L(s) - \rho_0 c}{Z_L(s) + \rho_0 c} \quad (3.23)$$

$$R(s) = \frac{Bl\rho_0 c}{2R_c Z_c(s) \pi a^2 \left(1 - \alpha_0(s) \alpha_L(s) e^{-\frac{2Ls}{c}}\right)} \quad (3.24)$$

$$G_d(s) = \frac{Bl\rho_0 c (1 + \alpha_0(s))}{2R_{bobin} Z_0(s) \left(1 - \alpha_0(s) \alpha_L(s) e^{-\frac{2Ls}{c}}\right)} \times \left(1 + \alpha_L(s) e^{2(x-L)\left(\frac{s}{c}\right)}\right) \quad (3.25)$$

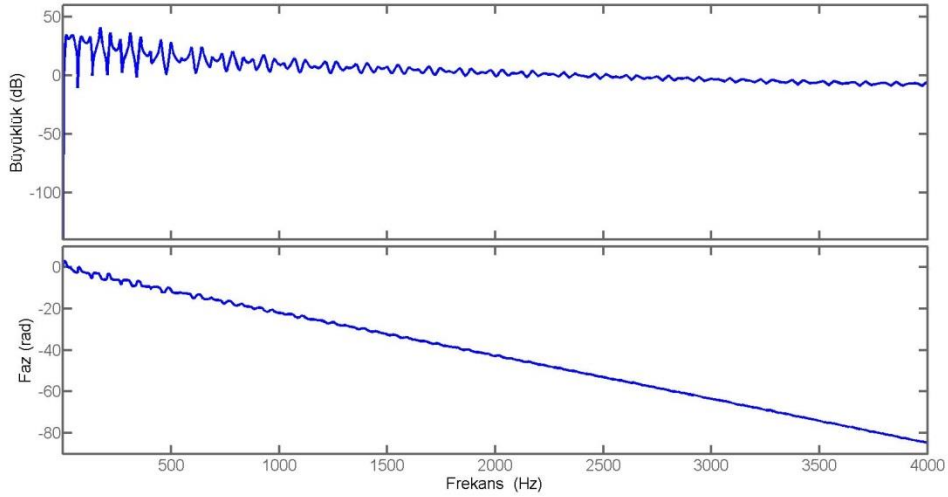
$$G_c(s) = R(s) \begin{cases} \left(1 + \alpha_L(s) e^{2(x-L)\left(\frac{s}{c}\right)}\right) \left(1 + \alpha_0(s) e^{-2x_c\left(\frac{s}{c}\right)}\right) & 0 < x_c \leq x \\ \left(1 + \alpha_L(s) e^{2(x_c-L)\left(\frac{s}{c}\right)}\right) \left(1 + \alpha_0(s) e^{-2x\left(\frac{s}{c}\right)}\right) & x < x_c \leq L \end{cases} \quad (3.26)$$

Çizelge 3.1 Oluk parametreleri ve ortam katsayıları (Zimmer vd. 2003)

L	Oluk uzunluğu	3,54 m
a	Oluk yarıçapı	0,101 m
$\rho$	Hava yoğunluğu	1,20 kg/m <sup>3</sup>
c	Ses hızı	341 m/s
R <sub>2</sub>	Son empedans parametresi	$\rho_0 c / \pi a^2$ mks ac.Ω
R <sub>1</sub>	Son empedans parametresi	0,504R <sub>2</sub> mks ac.Ω
C	Son empedans parametresi	5,44a <sup>3</sup> / $\rho_0 c^2$ m <sup>5</sup> /N
M	Son empedans parametresi	0,1952 $\rho_0/a$ kg/m <sup>4</sup>
m <sub>D</sub>	Gürültü hoparlörünün etkin kütlesi	0,015 kg
k <sub>D</sub>	Gürültü hoparlörünün asılma sertliği	810,87 N/m
R <sub>bobin</sub>	Ses bobininin elektriksel direnci (gürültü hoparlörü)	6,0 Ω
Bl	B . l manyetik ses bobin motoru (gürültü hoparlörü)	5,6 N/A
r <sub>d</sub>	Gürültü hoparlörünün etkin yarıçapı	0,087 m
m <sub>c</sub>	Anti gürültü hoparlörünün etkin kütlesi	0,006394 kg
k <sub>c</sub>	Anti gürültü hoparlörünün asılma sertliği	673,7 N/m
R <sub>c</sub>	Ses bobininin elektriksel direnci (anti gürültü hoparlörü)	6,05 Ω
Bl <sub>c</sub>	B . l manyetik ses bobin motoru (anti gürültü hoparlörü)	5.68 N/A
r <sub>c</sub>	Anti gürültü hoparlörünün etkin yarıçapı	0,06 m
x <sub>a</sub>	Referans mikrofonu lokasyonu	1,095 m
x <sub>c</sub>	Anti gürültü hoparlörü lokasyonu	2,32 m



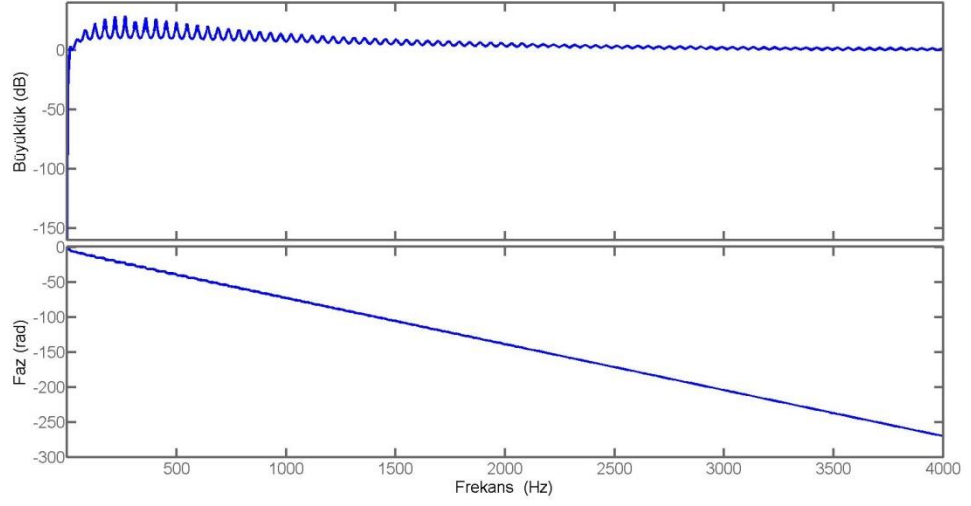
Eşitlik (3.25),  $x=x_a$  kabul edilerek hesaplanırsa, gürültü hoparlöründen referans mikrofonuna olan akustik yolun transfer fonksiyonu hesaplanmış olunur. Hesaplanan transfer fonksiyonunun frekans cevabının grafiği şekil 3.9’da gösterilmiştir. Aynı şekilde, eşitlik (3.25),  $x=L$  kabul edilerek hesaplanırsa, gürültü hoparlöründen hata mikrofonuna olan akustik yolun transfer fonksiyonu hesaplanmış olunur. Hesaplanan transfer fonksiyonunun frekans cevabının grafiği şekil 3.10’da gösterilmiştir. Şekil 3.9 ve 3.10’dan görüldüğü üzere gürültü hoparlörünün özellikle 1kHz ve üzeri yüksek frekans bileşenleri oluk tarafından bastırılmaktadır.



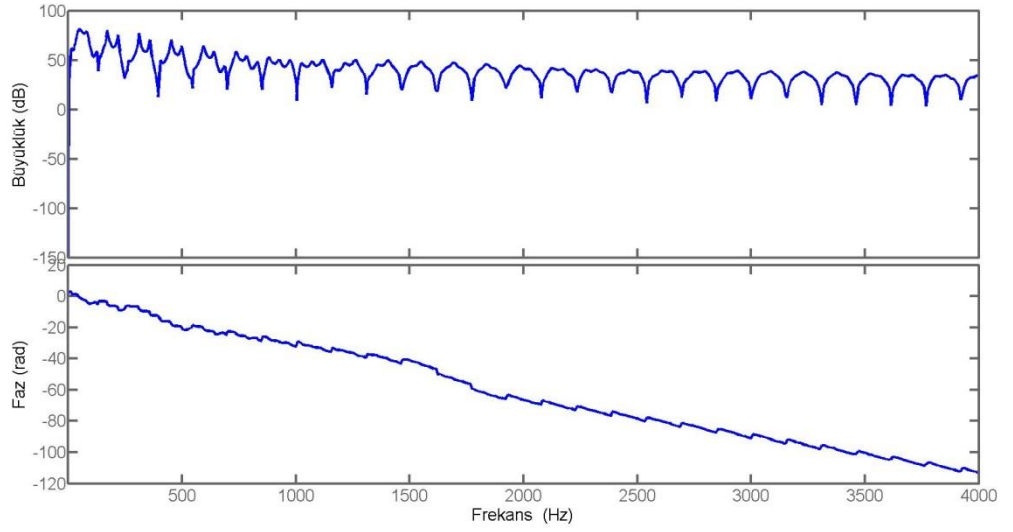
Şekil 3.9 Gürültü hoparlörü - referans mikrofonu frekans cevabı

Gürültü hoparlörüne ait transfer fonksiyonlarının hesaplandığı gibi, anti gürültü hoparlörünün de referans mikrofonuna ve hata mikrofonuna olan akustik yol transfer fonksiyonlarının hesaplanması gerekmektedir. Anti gürültü hoparlöründen hata mikrofonuna olan akustik yola ikincil yol, anti gürültü hoparlöründen referans mikrofonuna olan akustik yola ise geri besleme etkisine sebep olan geri besleme yolu adı verilir. Eşitlik (3.26),  $x=x_a$  kabul edilerek hesaplanırsa anti gürültü hoparlöründen referans mikrofonuna olan akustik yolun transfer fonksiyonu hesaplanmış olunur. Hesaplanan transfer fonksiyonunun frekans cevabının grafiği şekil 3.11’de gösterilmiştir. Aynı şekilde, eşitlik (3.26),  $x=L$  kabul edilerek hesaplanırsa, anti gürültü hoparlöründen hata mikrofonuna olan akustik yolun transfer fonksiyonu hesaplanmış

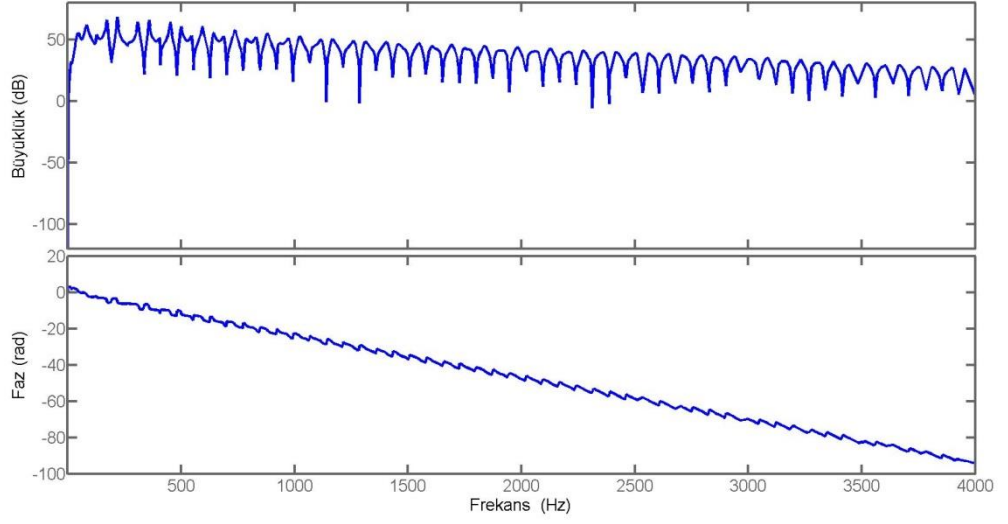
olunur. Hesaplanan transfer fonksiyonunun frekans cevabının grafiği Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Gürültü hoparlörü - hata mikrofonu frekans cevabı



Şekil 3.11 Anti gürültü hoparlörü - referans mikrofonu frekans cevabı



Şekil 3.12 Anti gürültü hoparlörü - hata mikrofonu frekans cevabı

Şekil 3.9 – 3.12’de gösterilen frekans cevabı grafikleri, Zimmer vd. (2003) tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla ve hesaplanan değerlerle uyuşmakta, böylece oluşturulan simülasyon ortam modelinin doğruluğu teyit edilebilmektedir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Aktif Gürültü Giderimi Parametrelerinin Performansa Etkileri

Bu bölümde, aktif gürültü giderimi sistemlerinin performanslarını etkileyen ortam ve sistem parametrelerinin performansa etkileri incelenmiştir.

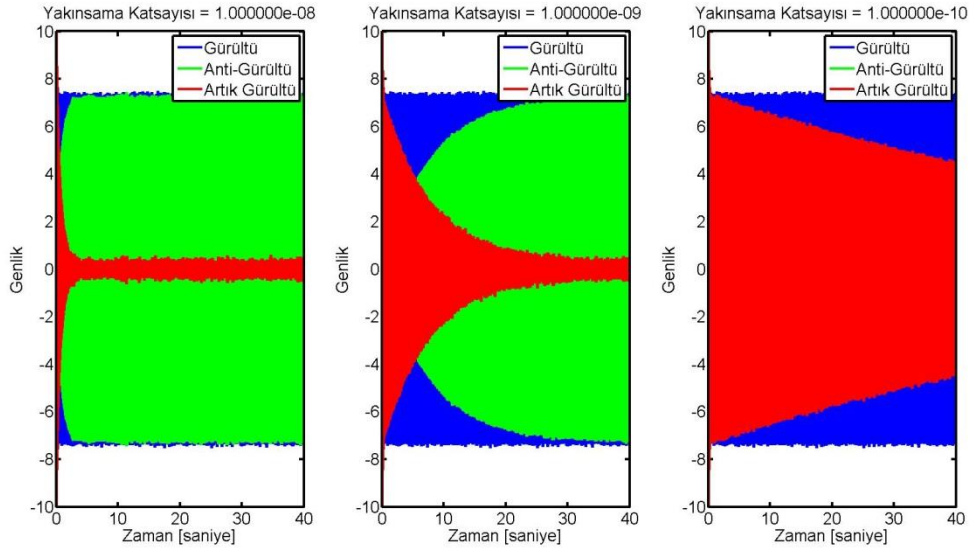
#### 4.1.1 Yakınsama katsayısının performansa etkisi

Adaptif algoritmalarda, yakınsama katsayısı ( $\mu$ ) değeri, sistemin performansını etkileyen en önemli parametredir. Bu parametre olması gerekenden düşük seçildiği zaman, yakınsama hızı ve yakınsama oranı düşmekte, hatta daha da düşük değerler kullanılır ise, sistem hiçbir zaman yakınsayamamaktadır. Eğer değer çok yüksek seçilir ise de, sistem kararsız hale geçmektedir. Bu sebepten dolayı ortam ve gürültü tipine göre, en optimum yakınsama katsayısı değerinin seçimi, büyük önem arz etmektedir. Sistemin kararsız hale geçmediği durumda, ne kadar büyük bir yakınsama katsayısı kullanılır ise, sistemin durağan durum hatası ve yakınsama hızı kriterleri olması gerekene o kadar yakın olacaktır. Tek tonlu gürültü kullanılarak, aynı ortamda ve aynı filtreler ile 3 farklı yakınsama katsayısı ile testler yapılmıştır. Buna göre elde edilen grafikler şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu testte, soldan sağa sırasıyla,  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$  ve  $10^{-10}$  olmak üzere yakınsama katsayıları kullanılmıştır. Bu katsayılar deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Bu değerlerden daha yüksek değerlerde sistem kararsız olmakta, daha düşük değerlerde ise yakınsama olmamaktadır. Sonuçlardan da görüleceği üzere, yakınsama katsayısı değeri düşükçe, yakınsama hızı azalmakta ve durağan durum hatası artmakta, daha da azaldığı durumda ise sistem yakınsayamamaktadır.

Yakınsama katsayısı değeri, adaptif sistemler için belirlenmesi gereken en kritik değerdir. Katsayının seçimini etkileyen bir çok etken vardır. Bu etkenler:

- Hoparlör ve mikrofonların sayısı (hoparlör ve mikrofonların sayısının artması daha küçük katsayı kullanılmasını gerektirir)

- İkincil yol transfer fonksiyonunun genliği (genlik yükseldikçe daha küçük katsayı kullanımı gerekir)
- İkincil yoldaki gecikme (gecikme arttıkça katsayının küçültülmesi gerekir)
- Filtre uzunluğu (filtre uzunluğu ne kadar fazla ise katsayı o kadar düşük olmalıdır)
- Gürültü tipi (dar bant gürültülerde daha küçük katsayı, geniş bant gürültü gibi gürültünün periyodikliği az ise daha büyük katsayı kullanmak gerekir)
- Filtre tipi (FIR filtrelerde, IIR filtrelere göre daha büyük katsayı kullanmak gerekir)
- İkincil yol kestirimindeki hata (hata ne kadar fazlaysa o kadar küçük katsayı kullanmak gerekir)

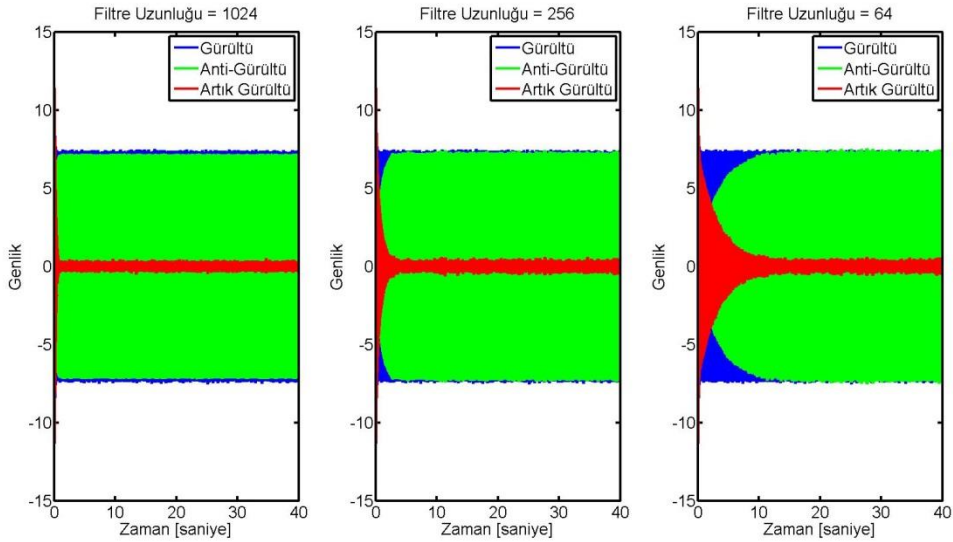


Şekil 4.1 Yakınsama katsayısı testi

Yakınsama katsayısının seçimini etkileyen bir çok etken olduğundan dolayı, tez kapsamında yapılan simülasyon çalışmalarında olduğu gibi bir çok aktif gürültü giderimi uygulamasında da optimum yakınsama katsayısı değeri deneme yanılma yoluyla belirlenir. Yakınsama katsayısı, çok küçük bir değerden başlatılarak adım adım artırılır ve sistemin kararsız hale geçmediği optimum yakınsama katsayısı değeri belirlenir. Ortamın veya gürültünün değişken olduğu durumlarda ise katsayı değerinin adaptif olarak belirlendiği algoritmalar tercih edilmelidir.

#### 4.1.2 Filtre uzunluğunun performansa etkisi

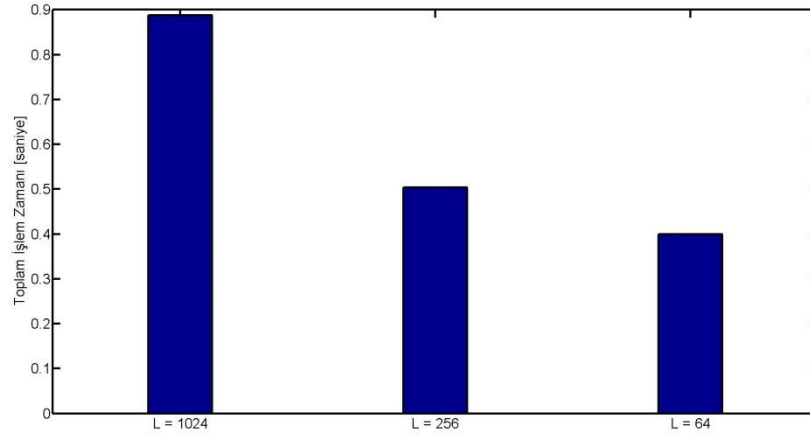
Filtre uzunluğu ( $L$ ), sistemin diğer parametre seçimlerini ve performans kriterlerini doğrudan etkilemektedir. Filtrenin uzunluğu ne kadar büyük olursa, sistem o kadar doğru modellenebilir. Adaptif algoritmalar için sistemin kararlı durumda kalabileceği en yüksek yakınsama katsayısının değerini, filtre uzunluğu değerini değiştirerek arttırmak mümkündür. Tek tonlu gürültü kullanılarak, aynı ortamda, aynı yakınsama katsayıları ile 3 farklı filtre uzunluğu ile testler yapılmıştır. Buna göre elde edilen grafikler şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu testte, soldan sağa sırasıyla, 1024, 256 ve 64 olmak üzere filtre uzunluğu değerleri kullanılmıştır. Sonuçlardan görüleceği üzere, büyük olan filtre uzunluğunda elde edilen yakınsama hızı, düşük olan filtre uzunluğunda elde edilen yakınsama hızından yüksektir. Bir başka deyişle, filtre uzunluğu arttıkça yakınsama hızı da artmaktadır.



Şekil 4.2 Filtre uzunluğunun yakınsamaya etkisi

Filtre uzunluğunu arttırmanın avantajları olduğu gibi, bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi filtre uzunluğunu arttırmanın, doğrudan işlem yükünü etkilemesidir. Filtre uzunluğu ne kadar fazla olursa, yapılması gereken işlem sayısı da o kadar fazla olmaktadır. Bir önceki test sonucu elde edilen hesaplama zamanı grafikleri

şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere, filtre uzunluğu azaldığında, işlem yükü ve hesaplama süresi azalmaktadır.



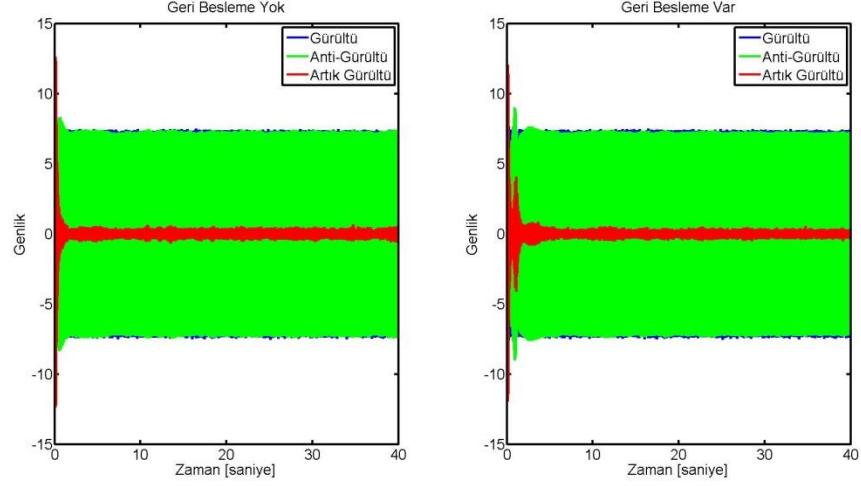
Şekil 4.3 Filtre uzunluğunun hesaplama zamanına etkisi

Eşitlik (3.4)'ten görüleceği üzere, seçilebilecek maksimum yakınsama katsayısı değeri ile filtre uzunluğu arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Filtrenin uzunluğunu arttırmak daha fazla sıfır veya kutup eklemeye eş değer olmakta, bunun sonucunda filtrenin kararlı olabileceği en yüksek yakınsama katsayısının değeri düşmektedir. Bir başka deyişle, filtre uzunluğu ne kadar artar ise, seçilebilecek yakınsama katsayısı aralığı o kadar azalmakta, bu da sistemin kararsız olma ihtimalini arttırmaktadır.

#### 4.1.3 Geri besleme etkisinin performansa etkisi

İleri beslemeli aktif gürültü giderimi algoritmaları için, adaptasyonu zorlaştıran en önemli etkenlerden biri Bölüm 2.2.4'te anlatılan geri besleme etkisidir. Geri besleme etkisi, genel olarak yakınsama hızında olumsuz etkilere sebebiyet verir. Tek tonlu gürültü ve ileri beslemeli FxLMS algoritması kullanılarak yapılan testin sonuçları, geri besleme etkisinin mevcut olmadığı durum sol tarafta, mevcut olduğu durum ise sağ tarafta olmak üzere şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, geri besleme etkisi salınımına neden olmakta, yakınsama süresi de bu salınımdan dolayı uzamaktadır. Geri besleme etkisinin fiziksel olarak (mikrofonların yerleşimleri gibi) önüne

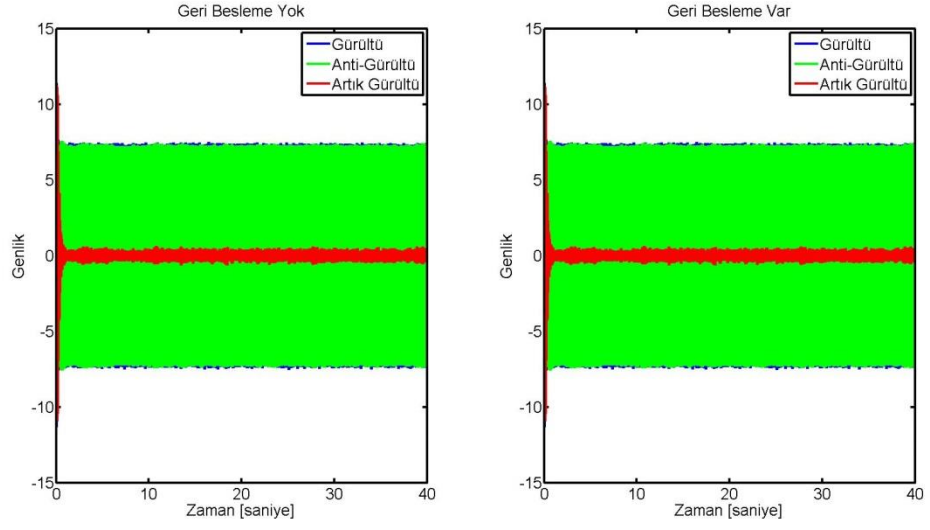
geçilebildiği gibi, farklı algoritmalar kullanılarak da önüne geçebilmek mümkündür. En etkili çözüm, geri beslemeli aktif gürültü giderim algoritması kullanmak olacaktır. Geri beslemeli algoritma ile aynı test yapıldığında şekil 4.5'te gösterilen sonuç elde edilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, geri beslemeli algoritmada referans mikrofonu kullanılmamasından dolayı, en ufak bir etki gözlemlenmemektedir.



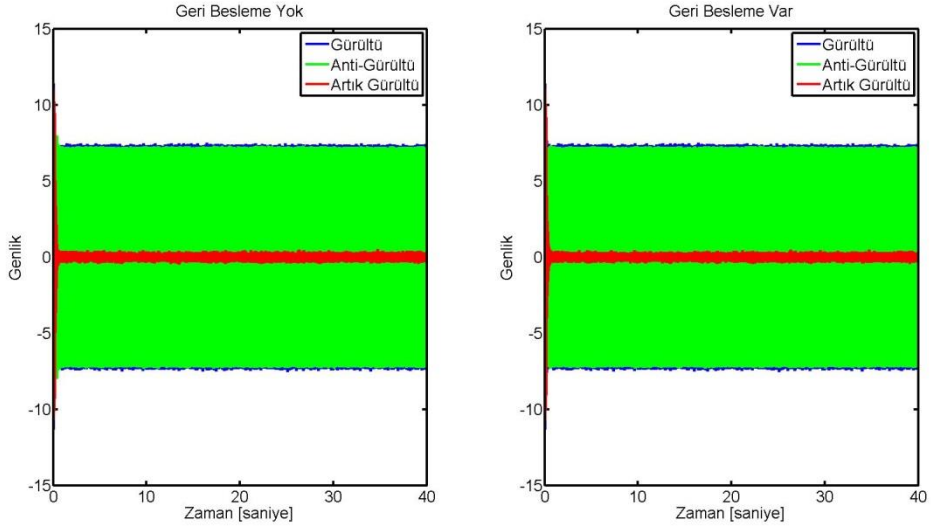
Şekil 4.4 Geri besleme etkisi testi (FxLMS)

Geri beslemeli algoritmanın yetersiz olduğu durumlarda veya referans mikrofonunun kullanılması gerektiği durumlarda, öne sürülen bu çözüm yetersiz olacaktır. Bu gibi durumlarda, geri besleme etkisini kompanse edecek şekilde FxLMS algoritmasının geliştirilmiş hali olan FuLMS algoritması kullanılabilir. Aynı test, bu algoritma üzerinde yapıldığı zaman, şekil 4.6'da gösterilen sonuç elde edilmektedir. Şekil 4.6'dan görüleceği üzere, FuLMS algoritmasında, FxLMS algoritmasında gözlemlenen salınımlar gözlemlenmemekte, daha iyi bir yakınsama hızı gözlemlenmektedir. Geri besleme etkisinin yüksek olduğu ve ileri beslemeli algoritma kullanılması gerektiğinde FuLMS algoritmasının iyi bir çözüm olduğu gözlemlenmektedir.





Şekil 4.5 Geri besleme etkisi testi (Geri beslemeli FxLMS)



Şekil 4.6 Geri besleme etkisi testi (FuLMS)

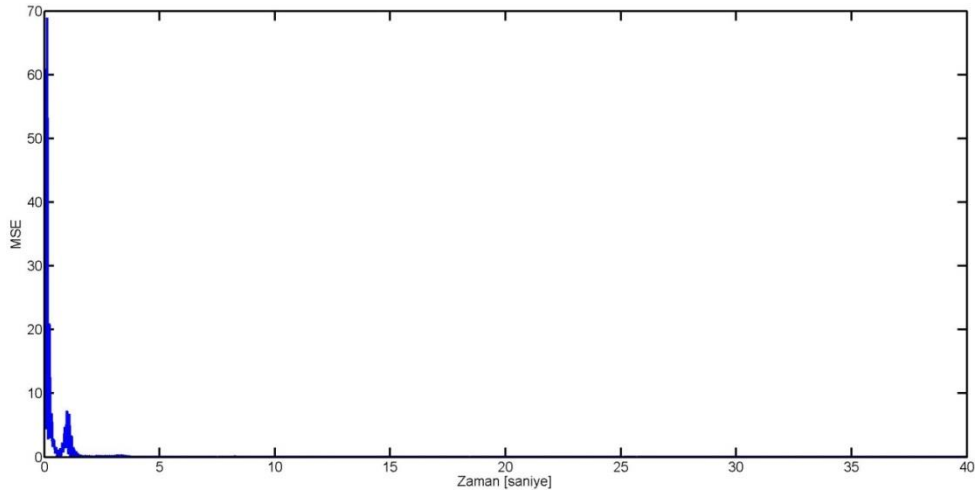
## 4.2 LMS Tabanlı Algoritmaların Karşılaştırılması

Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, aktif gürültü giderimi algoritmaları kullandıkları adaptasyon algoritmalarına ve yapılarına göre farklılaşır. Bu bölümde incelenen algoritmaların ortak özelliği LMS adaptasyon algoritmasını kullanmasıdır. Yani bu bölümün amacı, adaptasyon algoritması sabit tutularak, yapısal farklılıkların karşılaştırılmasıdır. Testler, Bölüm 3.2'de bahsedilen oluk geometrine sahip ortamda

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bir diğer değişken olan gürültü tipini de ortak kullanabilmek için, 3 farklı gürültü tipi kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, diğer bütün etkenler sabit tutularak, algoritmaların yapı bakımından incelenmesi amaçlanmıştır. Algoritmalarda kullanılan parametreler, her bir algoritma için deneme yanılma yoluyla bulunan optimum değerlerdir. Bütün sonuçlar 20 monte carlo simülasyonu sonucu elde edilmiş sonuçlardır.

#### 4.2.1 Tek tonlu gürültü ile yapılan testler

Yalnızca 300 Hz frekansında enerjisi bulunan gürültü tipi olan tek tonlu gürültü ile ilk olarak FxLMS algoritması kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.7’de gösterilmiştir.

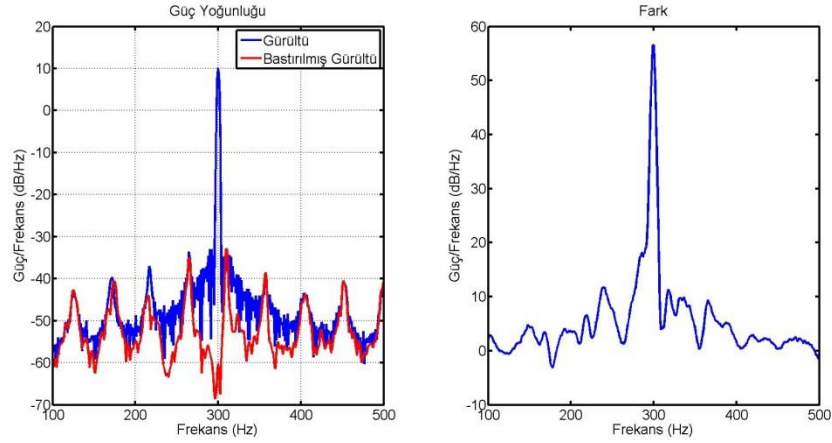


Şekil 4.7 MSE değişim grafiği (tek tonlu gürültü) (FxLMS)

Görüldüğü üzere, geri besleme etkisinden dolayı salınımlar meydana gelmekte, bu salınımlar sebebiyle de yakınsama zamanı uzamaktadır. Algoritmanın durağan duruma ulaştığı andaki hata miktarı (MMSE) ise  $3,4840e-04$  gibi çok düşük bir değer olarak hesaplanmıştır.

FxLMS algoritmasının tek tonlu gürültü ile yapılan simülasyonu sonucunda frekans bölgesindeki bastırma oranları şekil 4.8’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şeklin sol

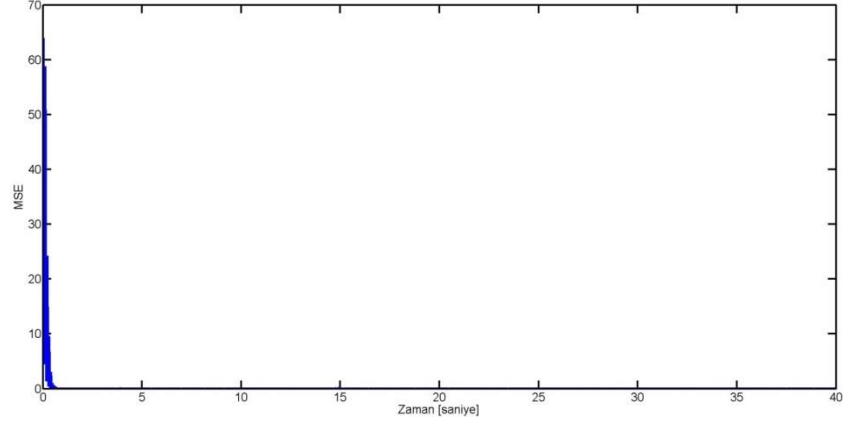
tarafındaki grafikte, mavi renk ile gürültünün güç spektrum yoğunluğu, kırmızı renk ile de bastırılmış gürültünün güç spektrum yoğunluğu gözlemlenmektedir. Şeklin sağ tarafındaki grafik ise gürültü ile bastırılmış gürültü arasındaki farkı göstermektedir. Bu grafikten görüleceği üzere 300 Hz frekansında 55 dB civarında bir gürültü bastırımı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.8 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (FxLMS)

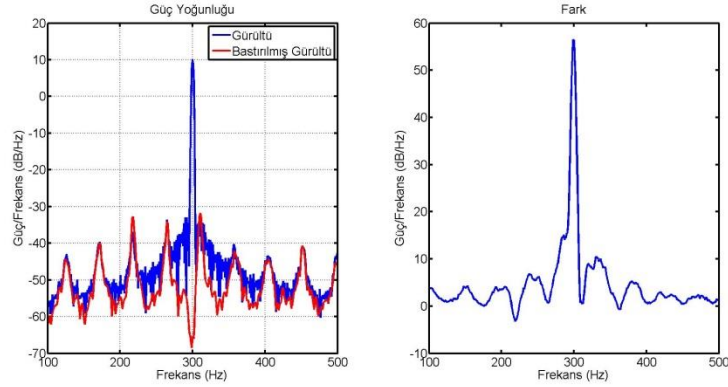
Bir sonraki testleri yapılacak olan algoritma, FxLMS algoritmasının referans mikrofonu kullanılmayan, yalnızca hata mikrofonu kullanarak gürültü giderimi yapmayı hedefleyen geri beslemeli FxLMS algoritmasıdır. Bu algoritmada referans mikrofonu kullanmak yerine, hata mikrofonundan algılanan değer ile filtre çıktısı kullanılarak FxLMS algoritmasında referans mikrofonundan algılanan değer kestirimi yapılmaya çalışılır. Geri beslemeli FxLMS algoritması ile yapılan simülasyon sonucu elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Şekil 4.7 ve 4.9 incelendiğinde, geri besleme etkisinden dolayı, geri beslemeli FxLMS algoritması referans mikrofonu kullanmamanın avantajını, FxLMS algoritmasına göre çok daha iyi bir yakınsama hızı ile göstermektedir. Ayrıca, simülasyon sonucunda MMSE değeri  $3,3945e-04$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer FxLMS algoritmasında olduğu gibi oldukça düşük bir değerdir.



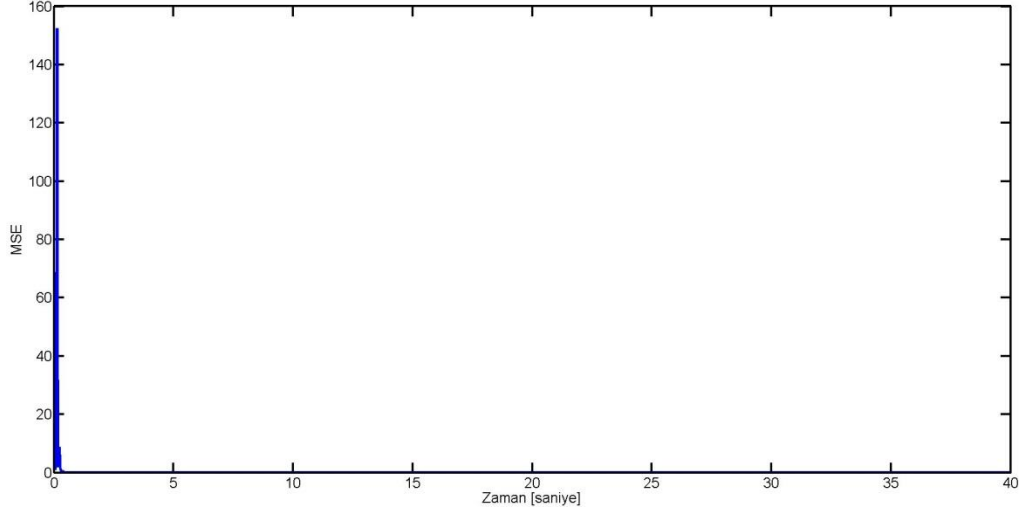
Şekil 4.9 MSE değişim grafiği (tek tonlu gürültü) (geri beslemeli FxLMS)

Şekil 4.8 ve 4.10'da gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafikleri incelendiğinde 300 Hz frekansında 55 dB civarında gürültü bastırımı gözlemlenmektedir. Tek tonlu gürültü ile yapılan testlerde geri beslemeli algoritma, ileri beslemeli algoritma ile karşılaştırıldığında birbirine yakın gürültü bastırım değerleri gözlemlenmektedir.



Şekil 4.10 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (geri beslemeli FxLMS)

Tek tonlu gürültü ile yapılan testlerde, durağan durum hatası ve frekans bastırma oranları incelendiğinde ileri beslemeli algoritma ile geri beslemeli algoritma birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Ancak, yakınsama hızı incelendiğinde geri beslemeli algoritmanın, ileri beslemeli algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. İleri beslemeli algoritma ile geri beslemeli algoritmanın birlikte kullanıldığı hibrit algoritmanın MSE değişim grafiği ise şekil 4.11'de gösterilmiştir.

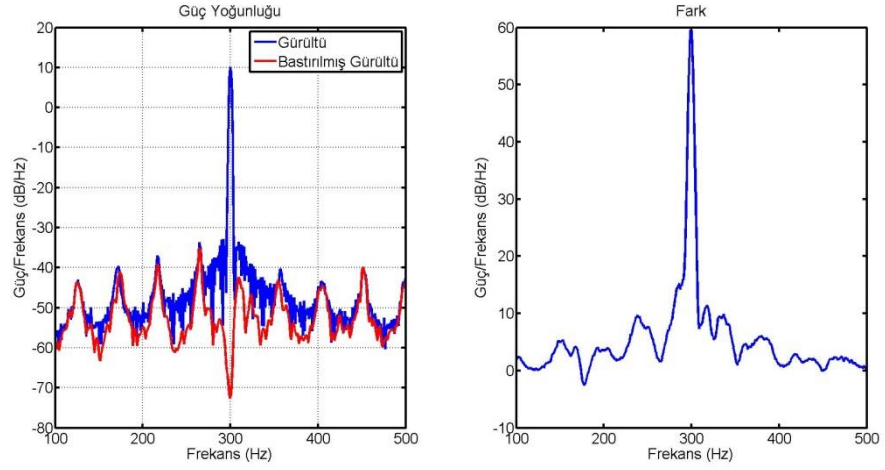


Şekil 4.11 MSE değişim grafiği (tek tonlu gürültü) (hibrit algoritma)

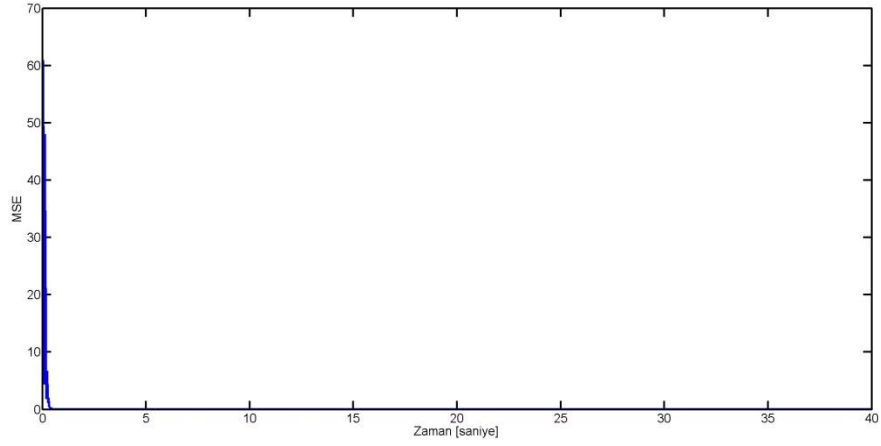
Hibrit algoritmanın, geri beslemeli FxLMS algoritmasının iyi yönlerini kullanarak FxLMS algoritmasında gözlemlenen, geri besleme etkisinin olumsuz etkilerini önemli ölçüde giderdiği gözlemlenmektedir. Sonuç olarak hibrit algoritmanın tek tonlu gürültü ile yapılan testlerinde yakınsama hızı, ileri beslemeli algoritmadan daha iyi, geri beslemeli algoritma ile de yakın olduğu gözlemlenmektedir. Durağan durum hatası için MMSE değeri  $3,0259e-04$  olarak hesaplanmıştır. Durağan durum hata değeri, önceki algoritmalarda elde edilen sonuçlarda olduğu gibi çok düşük bir değerdir.

Şekil 4.12’de hibrit algoritmanın testlerine ait güç spektrum yoğunluğu grafiği gösterilmektedir. 300 Hz frekansında 60 dB civarında gürültü bastırma değeri gözlemlenmiştir. Hibrit algoritma, bu performans kriteri açısından, FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmasına göre daha iyi bir sonuç vermiştir.

İncelenecek olan son algoritma adaptif IIR filtre yapısında olan, geri besleme etkisini kompanse etmeye yönelik ortaya çıkarılan FuLMS algoritmasıdır. FuLMS algoritması için tek tonlu gürültü testi sonrası elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.13’te gösterilmiştir.

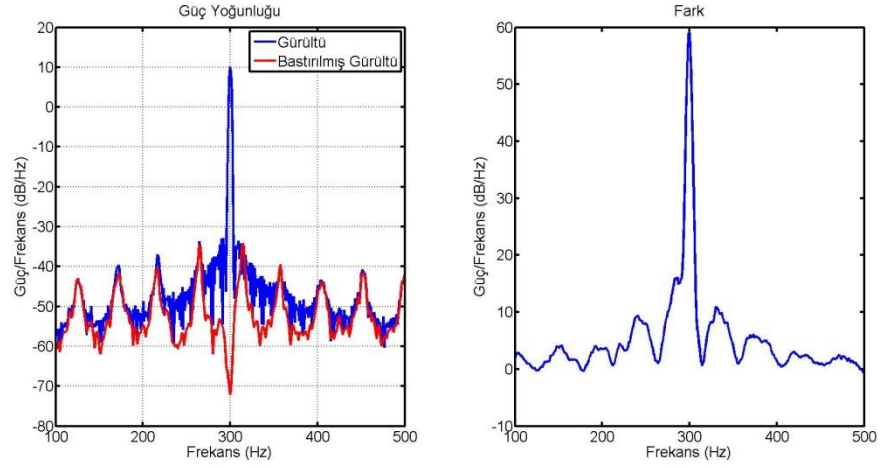


Şekil 4.12 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (hibrit algoritma)



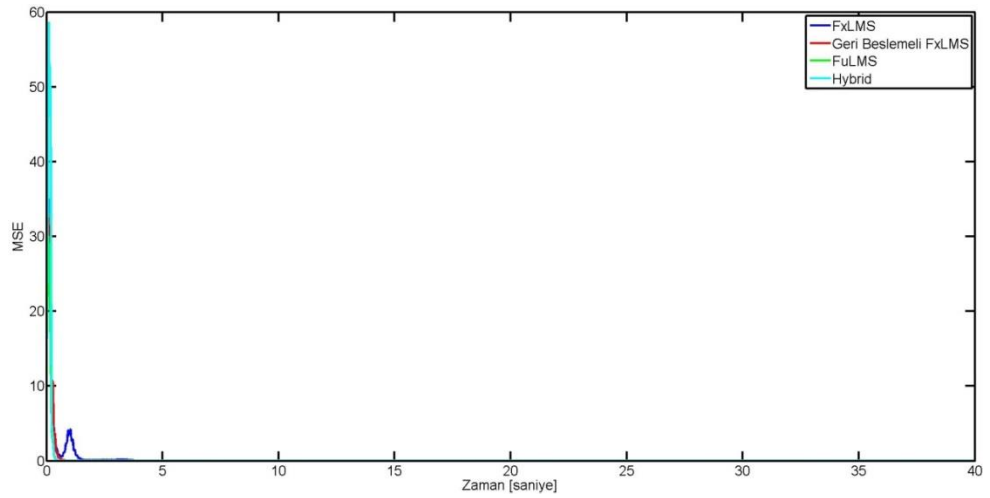
Şekil 4.13 MSE değişim grafiği tek tonlu gürültü (FuLMS)

Şekil 4.13'ten görüleceği üzere, tek tonlu gürültü testinde ve geri besleme etkisinin yoğun olarak sistemi etkilediği bir ortamda FuLMS algoritması yakınsama hızı açısından FxLMS algoritmasından daha iyi, diğer algoritmalara göre ise yakın sonuçlar vermiştir. FuLMS algoritması için MMSE değeri  $3,2107e-04$  olarak hesaplanmıştır. Diğer algoritmalarda olduğu gibi çok düşük bir değerdir. Ayrıca, şekil 4.14'ten görüleceği üzere, 300 Hz frekansında 60 dB civarında gürültü bastırımı sağlayan FuLMS algoritması, bu performans kriteri açısından hibrit algoritmaya yakın sonuç vermiştir.



Şekil 4.14 Güç spektrum yoğunluğu (tek tonlu gürültü) (FuLMS)

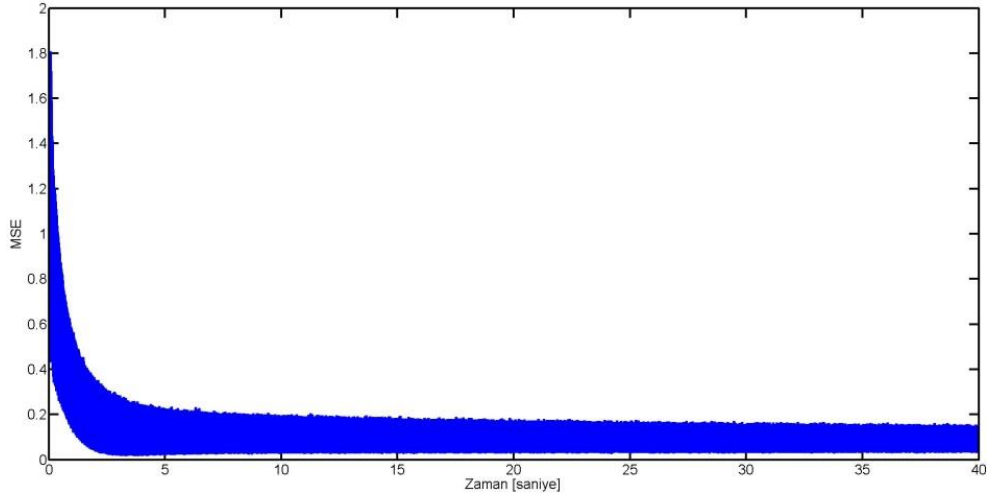
LMS tabanlı algoritmaların tek tonlu gürültü ile yapılan testleri sonucu, MSE değişim grafikleri üst üste çizdirildiği zaman şekil 4.15'te gösterilen MSE değişimleri grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.15'te gösterilen grafik daha önce ifade edilen çıkarımları doğrulamaktadır. Yakınsama hızı olarak geri beslemeli FxLMS, hibrit ve FuLMS algoritmaları birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Ancak FxLMS algoritmasının, geri besleme etkisinden dolayı, diğer algoritmalarından daha uzun bir yakınsama zamanına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Frekans bastırma oranları incelendiğinde ise hibrit ve FuLMS algoritmalarının, FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmalarına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15 MSE değişimleri grafiği (tek tonlu gürültü) (LMS tabanlı algoritmalar)

#### 4.2.2 Dar bant gürültü ile yapılan testler

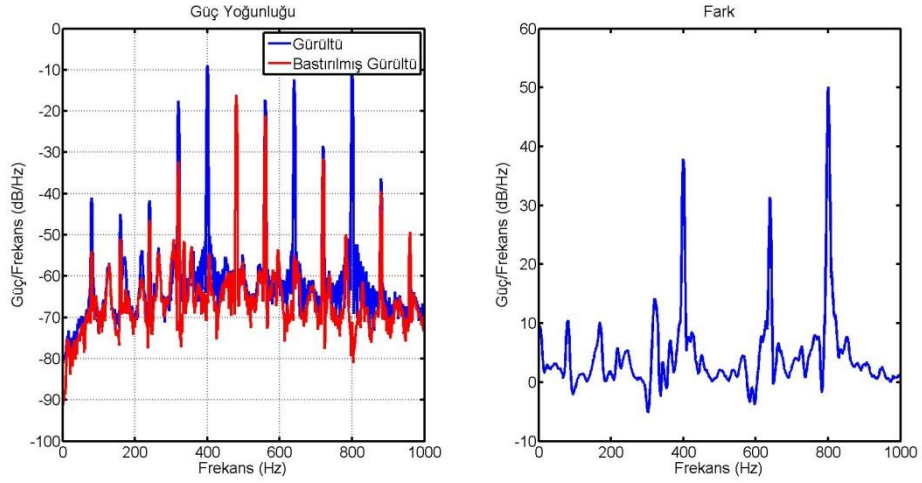
Aktif gürültü giderim algoritmalarının yoğun olarak ilgilendiği gürültü olan dar bant gürültü ile yapılan testlerde, 80 Hz, 160 Hz, ..., 880 Hz, 960 Hz frekanslarında enerjisi bulunan simule motor gürültüsü kullanılmıştır. İlk olarak FxLMS algoritması ile yapılan testlerde, şekil 4.16'da gösterilen MSE değişim grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.16 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (FxLMS)

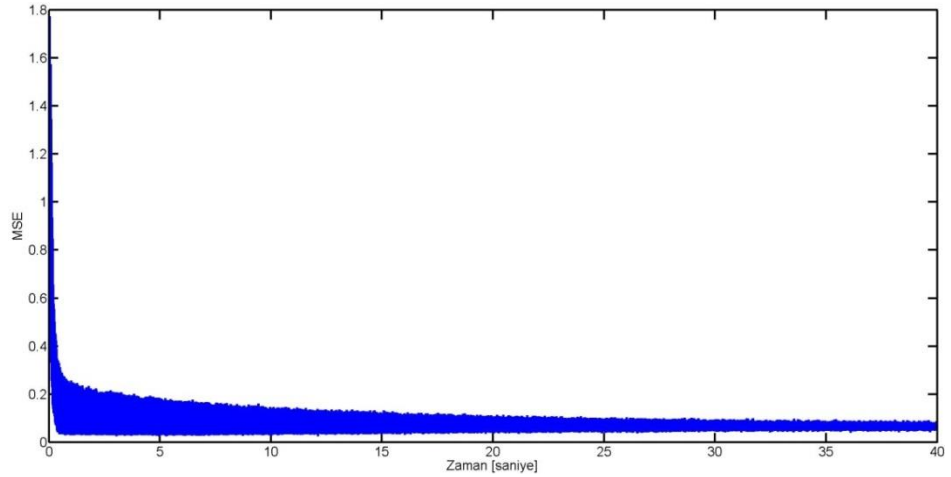
Grafikten görüleceği üzere, tek tonlu gürültü ile yapılan testlere göre, dar bant gürültü ile yapılan testlerde durağan durum hatasının ciddi oranda arttığı gözlemlenmiştir. FxLMS algoritması için MMSE değeri 0,09 olarak hesaplanmış ve bu değer tek tonlu gürültü ile yapılan testlerde hesaplanan miktardan çok fazladır. Gürültünün periyodikliği azaldıkça, kestirilebilirliği de azaldığından dolayı bu beklenen bir sonuçtur. Ayrıca şekil 4.17'de gösterilen güç yoğunluğu grafikleri incelendiğinde, frekans bölgesindeki bastırma oranlarının da tek tonlu gürültü ile yapılan testlere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.





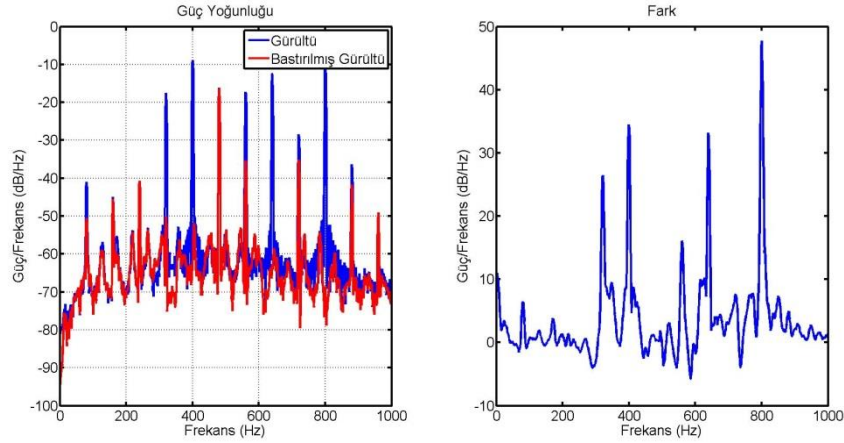
Şekil 4.17 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (FxLMS)

Geri beslemeli FxLMS algoritması ile yapılan testlerde ise şekil 4.18’de gösterilen MSE değişim grafiği elde edilmiştir. Bir önceki testlerde olduğu gibi, geri beslemeli algoritmanın yakınsama hızı ve 0,065 olarak hesaplanan MMSE değeri ile ileri beslemeli algoritmadan daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Gürültü, periyodik bir gürültü olduğu için geri beslemeli algoritmanın referans sinyali kestirimi doğru olmaktadır. Bu sebepten dolayı, geri besleme etkisinden olumsuz etkilenen FxLMS algoritmasına göre daha iyi sonuçlar veriyor olması beklenen bir sonuçtur.



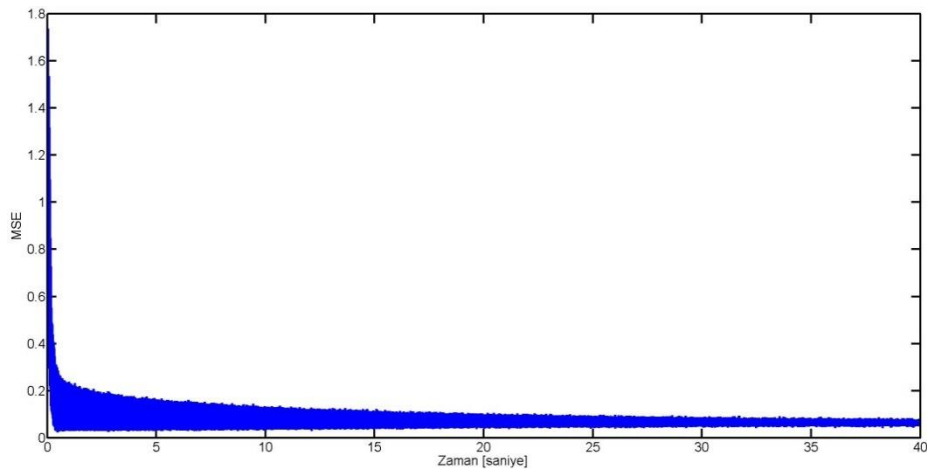
Şekil 4.18 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS)

Şekil 4.19’da gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafiği incelendiğine, ileri beslemeli algoritma ile bastırma oranları benzerlik gösterse de geri beslemeli algoritmada bastırılan frekans bileşeni daha fazladır. Sonuç olarak, dar bant gürültü ile yapılan testlerde, geri beslemeli algoritma ile elde edilen sonuçların, ileri beslemeli algoritma ile elde edilen sonuçlardan daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.



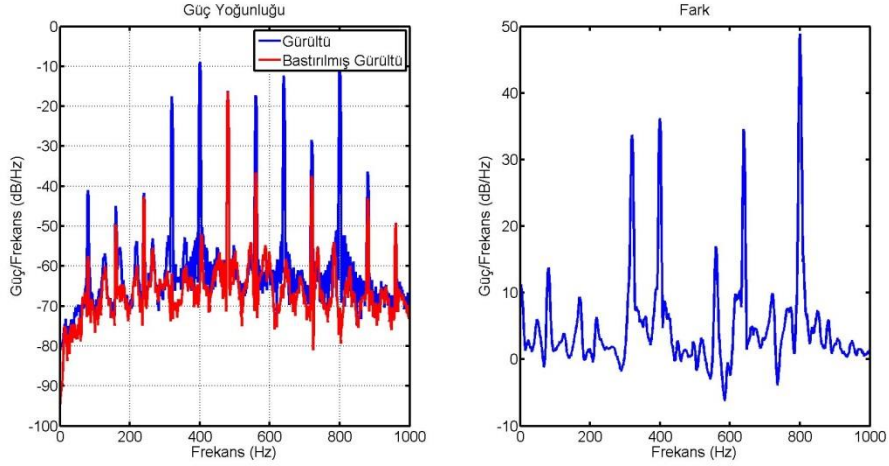
Şekil 4.19 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS)

Hibrit algoritma ile yapılan testlerde elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.20’de gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere MMSE değeri 0,0625 olarak hesaplanmıştır. Yakınsama zamanı ve durağan durum hatası incelendiği zaman, hibrit algoritmanın geri beslemeli algoritma ile yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



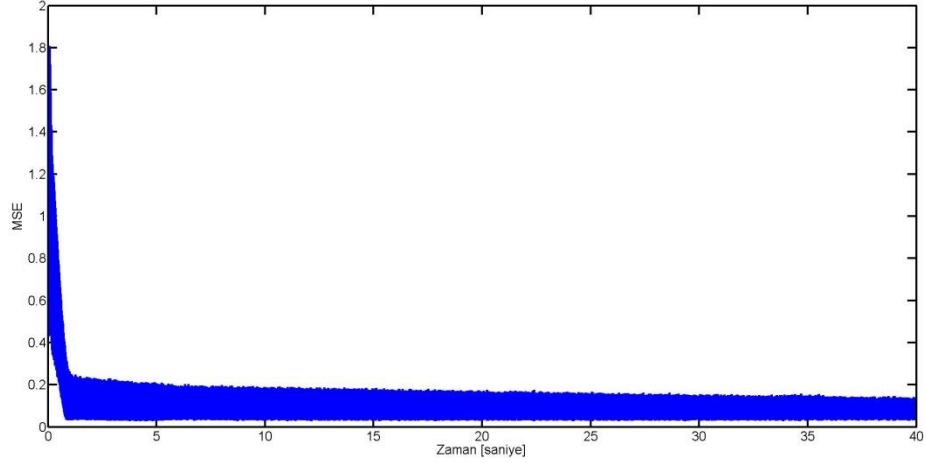
Şekil 4.20 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (hibrit algoritma)

Şekil 4.21’de grafiği gösterilen güç spektrum yoğunluğu da elde edilen bu bilgiyi destekler niteliktedir. Görüleceği üzere hibrit algoritmanın gürültü bastırma oranlarının geri beslemeli algoritmanın gürültü bastırma oranlarına yakın olduğu gözlemlenmektedir. Dar bant gürültü testlerinde, tek tonlu gürültü testlerinde olduğu gibi, hibrit algoritma ve geri beslemeli algoritma birbirine yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.21 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (hibrit algoritma)

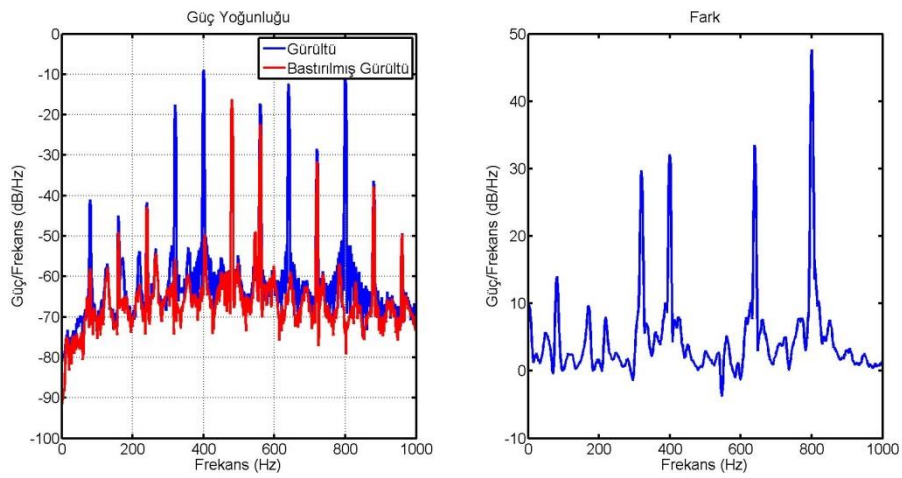
Dar bant gürültü için test edilecek LMS tabanlı algoritmaların sonucusu FuLMS algoritmasıdır. MSE değişim grafiği şekil 4.22’de gösterilen algoritmanın MMSE değeri 0,0832 olarak hesaplanmıştır. FuLMS algoritmasının dar bant gürültü ile yapılan testlerinde, yakınsama hızı olarak hibrit ve geri beslemeli FxLMS algoritmasına yakın sonuçlar verdiği, ancak durağan durum hatası olarak bu iki algortmadan geri kaldığı gözlemlenmiştir. FxLMS ve FuLMS algoritmalarının durağan durum hatalarının birbirine yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir. Tek tonlu gürültü testlerinde geri beslemeli FxLMS ve hibrit algoritmalarına yakın sonuçlar elde eden FuLMS algoritması dar bant gürültü testlerinde, durağan durum hatası olarak geride kalmıştır.



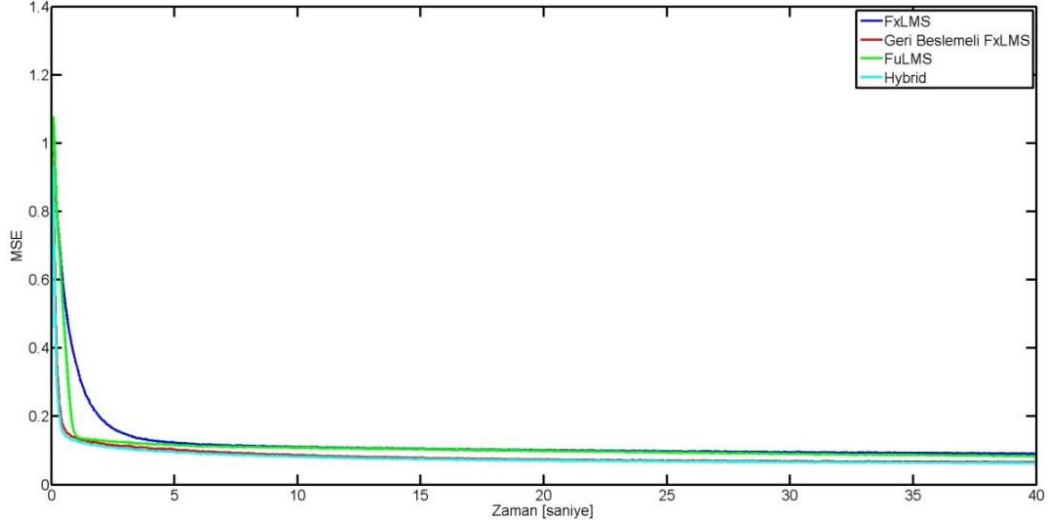
Şekil 4.22 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (FuLMS)

Şekil 4.23'te gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafikleri incelendiğinde ise FuLMS algoritmasının geri beslemeli FxLMS ve hibrit algoritma ile yakın sonuçlar verdiğini, FxLMS algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

Dar bant gürültü testleri için elde edilmiş MSE değişimleri grafiği ise şekil 4.24'te gösterilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere yakınsama zamanı ve durağan durum hataları karşılaştırıldığında en iyi sonucu geri beslemeli FxLMS ve hibrit algoritma vermiştir. FuLMS algoritması, FxLMS algoritmasına göre daha hızlı yakınsamasına rağmen durağan durum hataları birbirine yakın hesaplanmıştır.



Şekil 4.23 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (FuLMS)

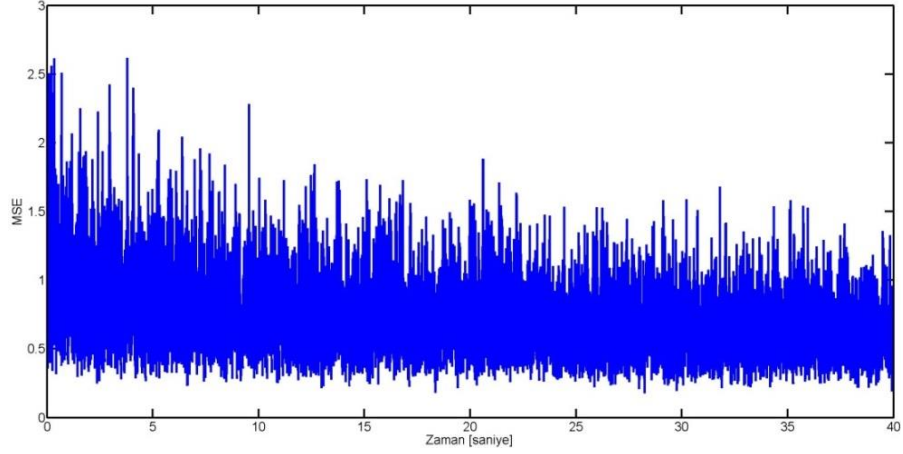


Şekil 4.24 MSE değişimleri grafiği (dar bant gürültü) (LMS tabanlı algoritmalar)

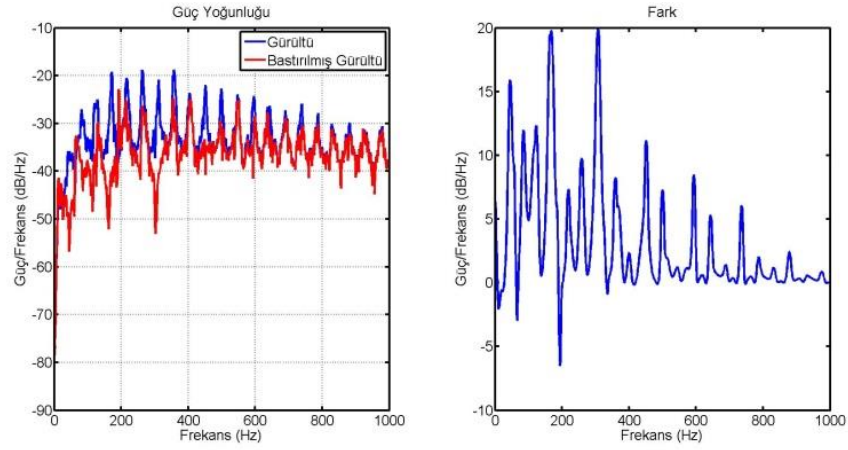
#### 4.2.3 Geniş bant gürültü ile yapılan testler

Son olarak geniş bant gürültü kullanılarak aynı testler gerçekleştirilmiştir. Beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilen testlerde, yüksek frekans bileşenleri oluk geometrisi sayesinde bastırılmıştır. Önceki testlerde olduğu gibi öncelikle FxLMS algoritması ile gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.25'te gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere önceki testlerde olduğu gibi periyodik bir gürültü kullanılmadığı zaman MMSE değeri 0,5060 olarak hesaplanmıştır. Durağan durum hatasında, önceki gürültü tipleri ile yapılan testlere göre artış gözlemlenmiştir. Her ne kadar oluk geometrisi sayesinde yüksek frekans bileşenleri bastırılırsa da, önceki gürültülere göre daha fazla yüksek frekans bileşeni algılanmaktadır. Bu sebepten dolayı MSE değişim grafiği incelendiği zaman çok iyi sonuçlar gözlemlenmemektedir.

Şekil 4.26'da gösterilen güç spektrumu yoğunluğu grafiği incelendiğinde düşük frekans bileşenlerinde 20 dB'e varan bir gürültü bastırımının gerçekleştiği gözlemlenmektedir. 1 Khz'e kadar olan frekanslarda da oran azalsa da gürültü bastırımı gerçekleşmiştir. MSE değişim grafiğinde de aynı performansın görülebilmesi için pasif kontrol kullanılarak yüksek frekans bileşenlerinin daha fazla bastırılması gerekmektedir.



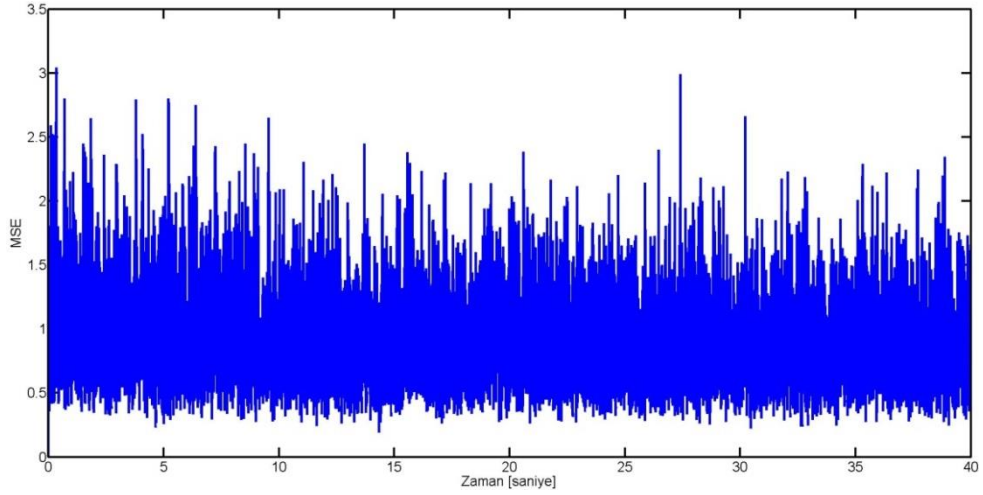
Şekil 4.25 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (FxLMS)



Şekil 4.26 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (FxLMS)

Geri beslemeli FxLMS algoritması ile yapılan testlerde ise şekil 4.27’de gösterilen MSE değişim grafiği elde edilmiştir. Geri beslemeli FxLMS algoritması için MMSE değeri 0,6872 olarak hesaplanmıştır. Bundan önceki testlerde ileri beslemeli algoritmadan daha başarılı olan geri beslemeli algoritma, geniş bant gürültüde daha başarısız sonuçlar vermiştir. Şekil 4.28’de gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafiği de bunu destekler niteliktedir. İleri beslemeli algoritmanın, geri beslemeli algoritmadan yaklaşık 2 kat fazla gürültü bastırımı yapabildiği gözlemlenmektedir. Periyodik olan gürültülerde, geri beslemeli algoritma ile yalnızca hata mikrofonu kullanarak daha iyi sonuçlar alınabilirken, geniş bant gürültü gibi periyodik olmayan gürültülerde daha kötü sonuçlar alınmıştır. Ayrıca gürültü bastırma grafiğinden de görüleceği üzere, geri beslemeli

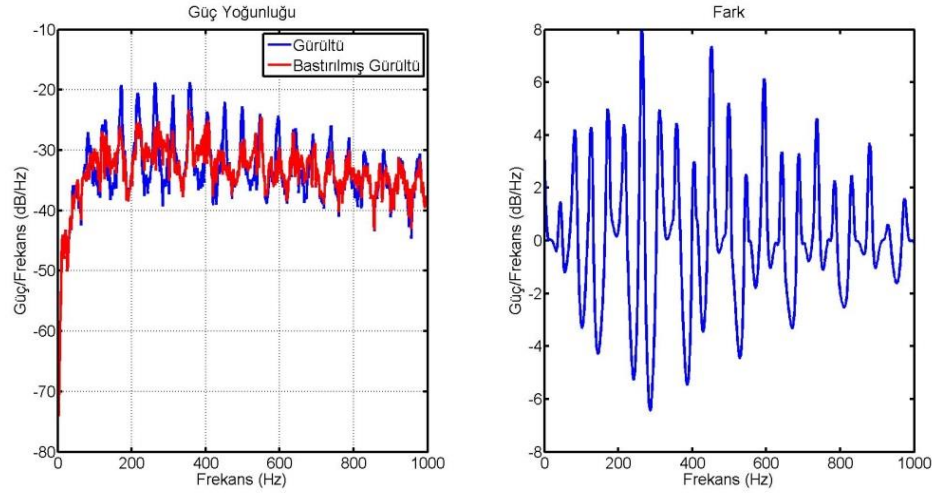
algoritma gürültüyü bastıracağı frekanslar gözlemlenebildiği gibi, gürültüyü arttırdığı frekanslarda gözlemlenmektedir. Bu da geri beslemeli algoritmanın, geniş bant gürültü testlerinde başarısız sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 4.27 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS)

Geri besleme etkisini yoksaydığımız ideal durumda ileri beslemeli algoritmanın, gürültü tipi farketmeksizin geri beslemeli algoritmadan daha iyi sonuç vermesi gerekir. Çünkü geri beslemeli algortmada, ileri beslemeli algoritmanın referans mikrofonu ile algıladığı sinyalin kestirimi yapılmakta, bu kestirim de algılanan sinyal kadar doğru olamamaktadır. Ancak bundan önceki testlerde, geri besleme etkisinden dolayı, geri beslemeli algoritmanın yaptığı kestirim, ileri beslemeli algoritmanın algıladığı sinyalden daha doğru olmaktadır. Bunun sebebi gürültülerin periyodik olması, kestirilebilirliklerinin fazla olmasıdır. Geniş bant gürültü de ise, kestirim işlemi çok doğru çalışmamakta, ileri beslemel, algoritma, geri besleme etkisine rağmen daha başarılı sonuçlar vermektedir.

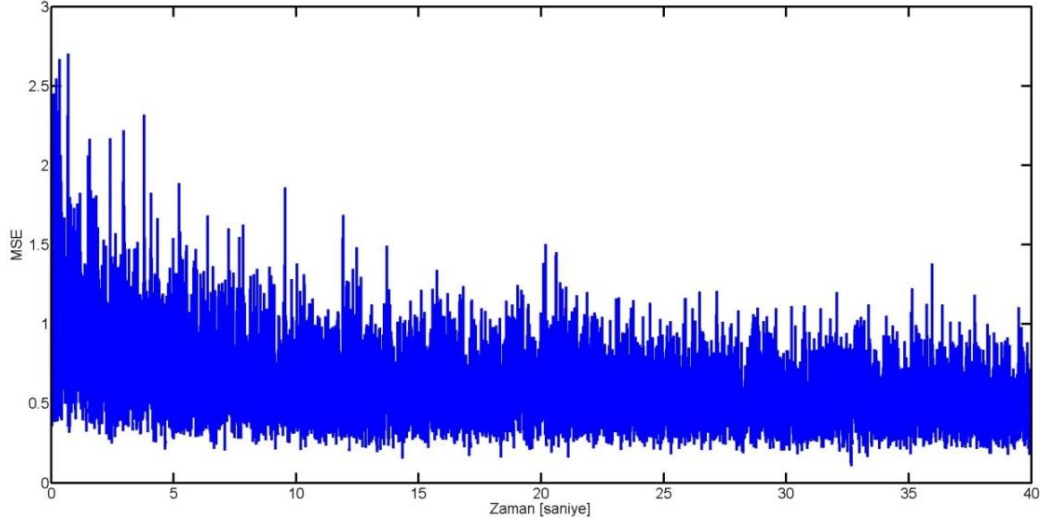




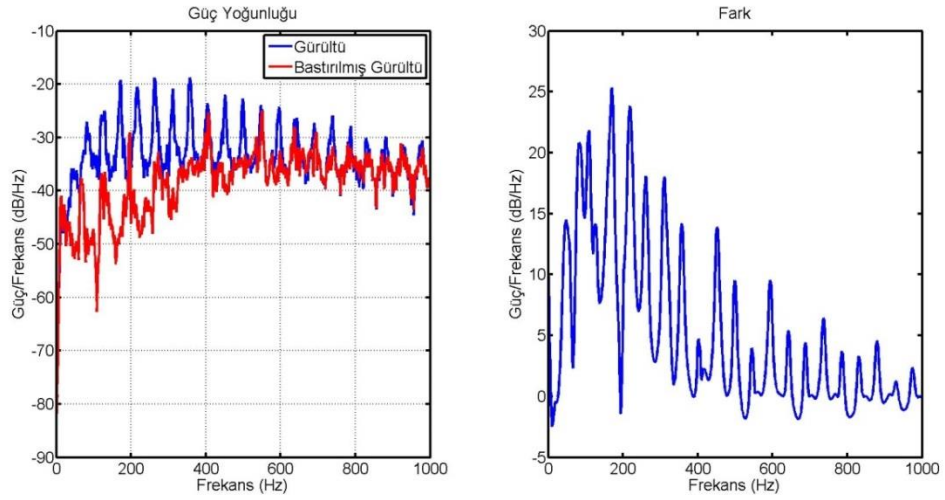
Şekil 4.28 Güç spektrumu yoğunluğu (geniş bant gürültü) (geri beslemeli FxLMS)

Geri beslemeli ve ileri beslemeli algoritmaların beraber kullanıldığı hibrit algoritma ile yapılan testler sonucu ise şekil 4.29'da gösterilen MSE değişim grafiği elde edilmiştir. Grafiktende belli olduğu gibi, hibrit algoritma, ileri beslemeli ve geri beslemeli algoritmaların avantajlarını iyi kullanarak hem durağan durum hatası açısından hem de yakınsama hızı açısından FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmasından daha iyi sonuçlar vermiştir. 0,4086 olarak hesaplanan MMSE değeri de bu savı destekler niteliktedir. Hibrit algoritmanın, geri besleme etkisinden dolayı başarı oranı düşen ileri beslemeli algoritmayı, geri beslemeli algoritmanın iyi özellikleriyle, kestirilebilirliği düşük olan gürültü bileşenlerinin fazlalığından dolayı başarı oranı düşen geri beslemeli algoritmayı da ileri beslemeli algoritmanın iyi özelliklerine kompanze ettiği gözlemlenmektedir. Başarı oranı düşük iki algoritmanın beraber kullanımı ile başarı oranı yüksek bir algoritma elde edilmiştir. Geniş bant gürültü ile yapılan testlerde hibrit algoritma ile çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.30'da gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafiğinden de görüleceği üzere 25 dB seviyelerine ulaşan gürültü bastırım oranı da bu başarının önemli ölçütlerinden biridir.



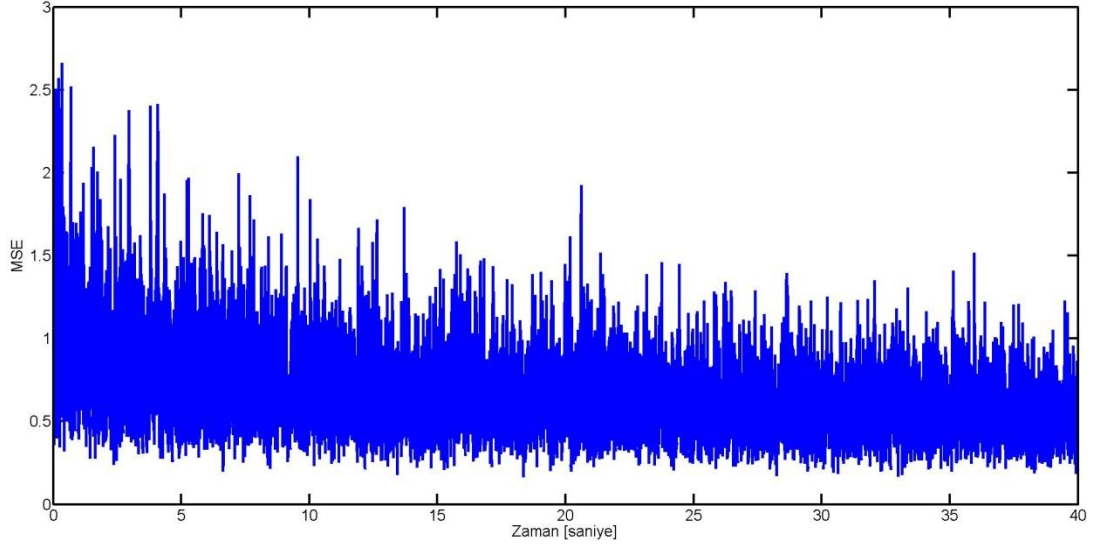


Şekil 4.29 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (hibrit algoritma)

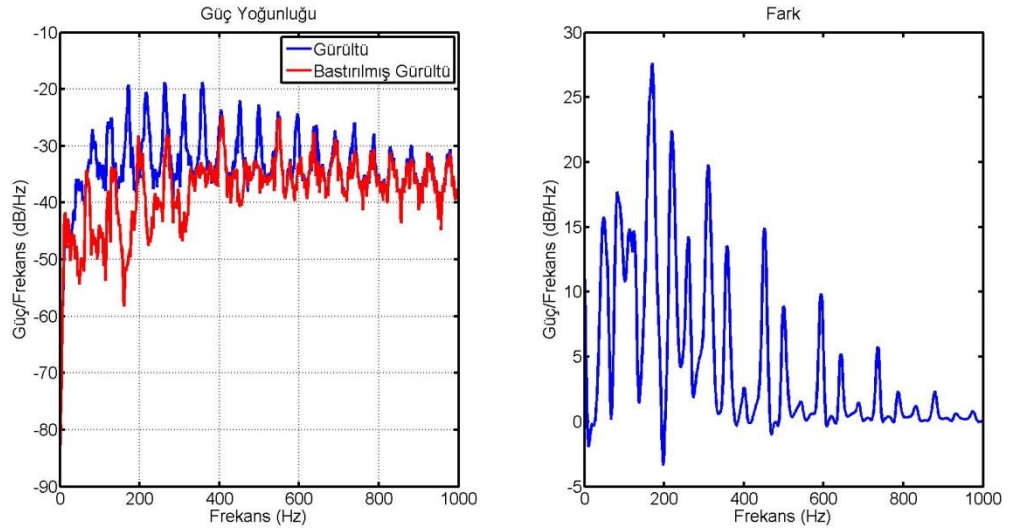


Şekil 4.30 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (hibrit algoritma)

Geniş bant gürültü için yapılan testlerde LMS tabanlı algoritmalar için son olarak FuLMS algoritması için testler gerçekleştirilmiştir. FuLMS algoritması ile yapılan testler sonucu elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.31’de gösterilmiştir. 0,4473 olarak hesaplanan MMSE değeri ile yakınsama hızı ve durağan durum hatası olarak hibrit algoritma kadar başarılı sonuçlar veremese de ileri beslemeli ve geri beslemeli FxLMS algoritmalarına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 4.32’de gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafiklerinden görülen 25 dB seviyelerinde ki gürültü bastırım oranı da bu savı desteklemektedir.



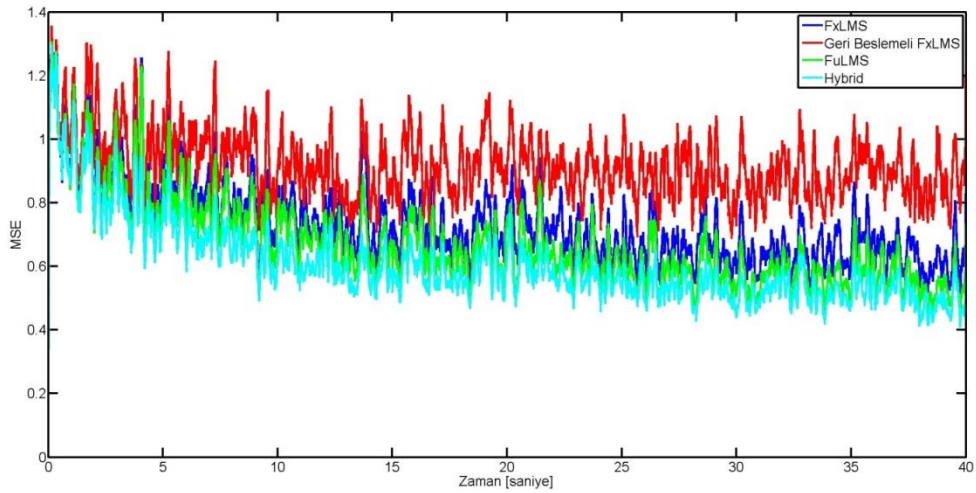
Şekil 4.31 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (FuLMS)



Şekil 4.32 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (FuLMS)

FuLMS algoritmasının geniş bant gürültülerde kestirilebilir gürültü bileşenlerinin azlığından dolayı iyi sonuç veremeyen geri beslemeli FxLMS algoritmasından daha iyi sonuç vermesi beklenen bir durumdur. İleri beslemeli FxLMS algoritmasından daha iyi sonuç vermesinin sebebi ise, daha önceki testlerde de olduğu gibi geri besleme etkisini kompanse edebilmesidir. Şekillerden de oldukça iyi görülebildiği üzere geri besleme etkisi kompanse edildiği zaman, yakınsama hızı, durağan durum hatası ve gürültü bastırma oranları açısından ciddi bir oranda iyileşme olmaktadır.

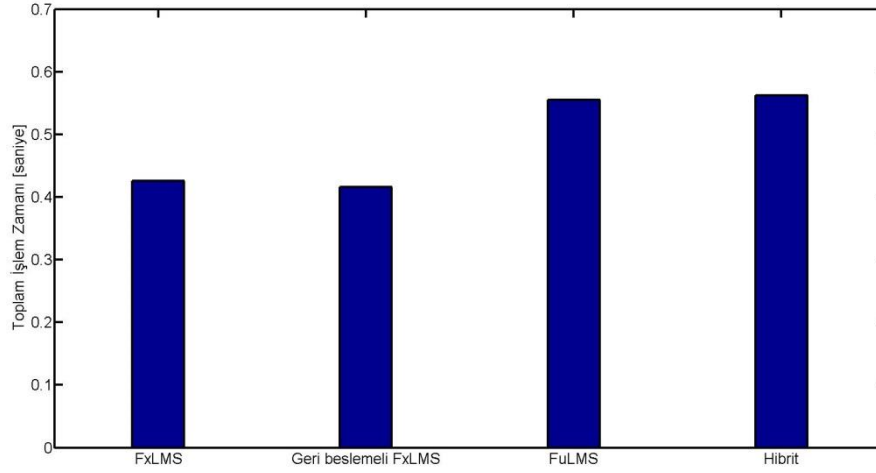
Son olarak geniş bant gürültü için yapılan testlerde elde edilen MSE değişim grafikleri aynı grafik üzerine çizdirilmiştir. MSE değişimleri grafiği şekil 4.33'te gösterildiği gibidir. Grafikten gözlemlenen sonuç daha önce elde edilen sonuçları doğrulamaktadır. Geri beslemeli FxLMS algoritması, geniş bant gürültü testlerindeki en başarısız algoritma olmuştur. FxLMS algoritması geri beslemeli FxLMS algoritmasından daha iyi sonuç verse de, geri besleme etkisini kompanse eden FuLMS algoritmasının FxLMS algoritmasından bir adım önde olduğu gözlemlenmektedir. Bu testlerden elde edilecek en önemli sonuçlardan birisi, en başarısız iki algoritmanın beraber kullanımı sonucunda en başarılı olan algoritmanın elde edilmesidir. Geri beslemeli ve ileri beslemeli FxLMS algoritmasının beraber kullanımı sonucu elde edilen hibrit algoritma geniş bant gürültü testleri için LMS tabanlı algoritmalar arasında en başarılı sonuçları veren algoritma olmuştur.



Şekil 4.33 MSE değişimleri grafiği (geniş bant gürültü) (LMS tabanlı algoritmalar)

#### 4.2.4 İşlem yükü karşılaştırmaları

Algoritmalar için test edilmesi gereken önemli performans kriterlerinden biri olan işlem yükü, algoritmaların gerçek ortama uyarlanması ile doğrudan ilişkilidir. İşlem yükü gürültü tipi ile ilişkili olmadığı için, filtre uzunluğu 64 olan filtreler ve geniş bant gürültü kullanılarak test bir kereye mahsus olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuç şekil 4.34'te gösterildiği şekildedir.



Şekil 4.34 İşlem yükü grafiği (LMS tabanlı algoritmalar)

İşlem yükü grafiğinden görüleceği üzere FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmalarının işlem yükleri birbirine çok yakın hesaplanmıştır. Aynı şekilde FuLMS ve Hibrit algoritmalarının işlem yükleri de birbirine çok yakın hesaplanmıştır. Ancak bu iki grup arasında ciddi bir fark gözlemlenmektedir. Bu fark kullanılacak olan donanımın (DSP gibi) seçimi açısından büyük önem arz etmektedir. Örneğin FxLMS algoritması için seçilmiş düşük güç tüketimine sahip bir DSP, hibrit algoritmanın ihtiyaçlarını karşılamayacak, yetersiz kalacaktır. Bu sebeplerden dolayı, çoğu durumda ileri beslemeli ve geri beslemeli FxLMS algoritmalarından daha çok avantaja sahip olan FuLMS ve hibrit algoritmalarının işlem yükü açısından dezavantaja sahip olduğu gözlemlenmiştir.

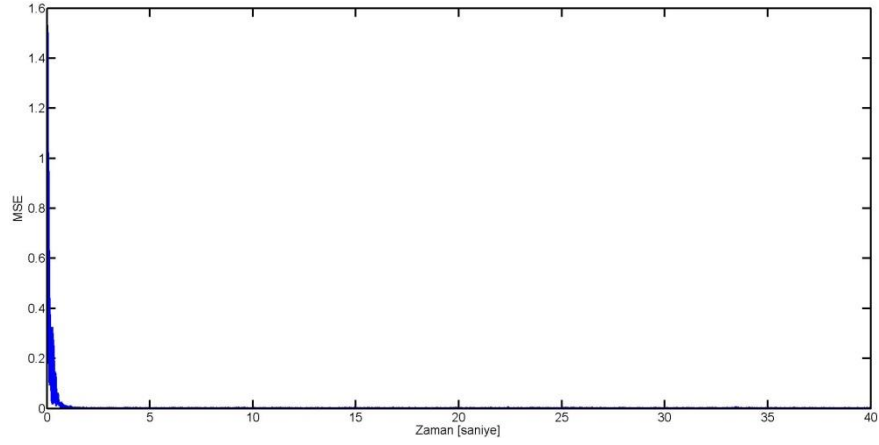
#### 4.3 RLS ve LMS Tabanlı Algoritmaların Karşılaştırılması

Önceki bölümde LMS tabanlı algoritmalar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ise LMS ve RLS tabanlı algoritmaları karşılaştırmak amacıyla, yalnızca kullandıkları adaptasyon algoritması bakımından farklılaşan FxLMS ve FxRLS algoritmaları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca RLS tabanlı algoritmalarında LMS tabanlı algoritmalar gibi geliştirilebilir olup olmadığını test etmek amacıyla FxRLS algoritması ve geri beslemeli FxRLS algoritması kendi arasında

karşılaştırılmıştır. RLS tabanlı algoritma testleri için geniş bant gürültü ve dar bant gürültü ile testlerin gerçekleştirilmesi istenen sonuçları elde etmek için yeterli olacaktır.

#### 4.3.1 Dar bant gürültü ile yapılan testler

Dar bant gürültü testlerinde önceki bölümde LMS tabanlı algoritmaların karşılaştırılmasında kullanılan simule motor gürültüsü kullanılmıştır. Dar bant gürültü testleri sonucu FxRLS algoritması için elde edilen MSE değişim grafiği şekil 4.35'te gösterildiği gibidir.

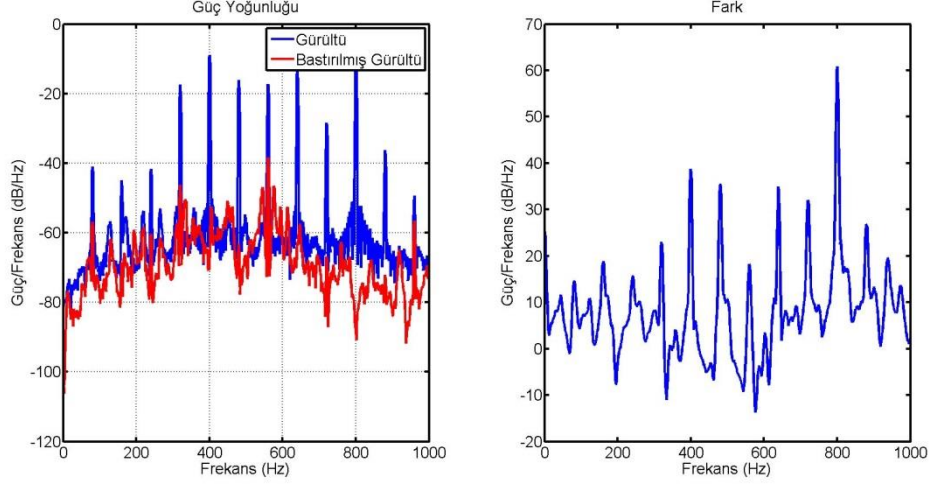


Şekil 4.35 MSE değişim grafiği (dar bant gürültü) (FxRLS)

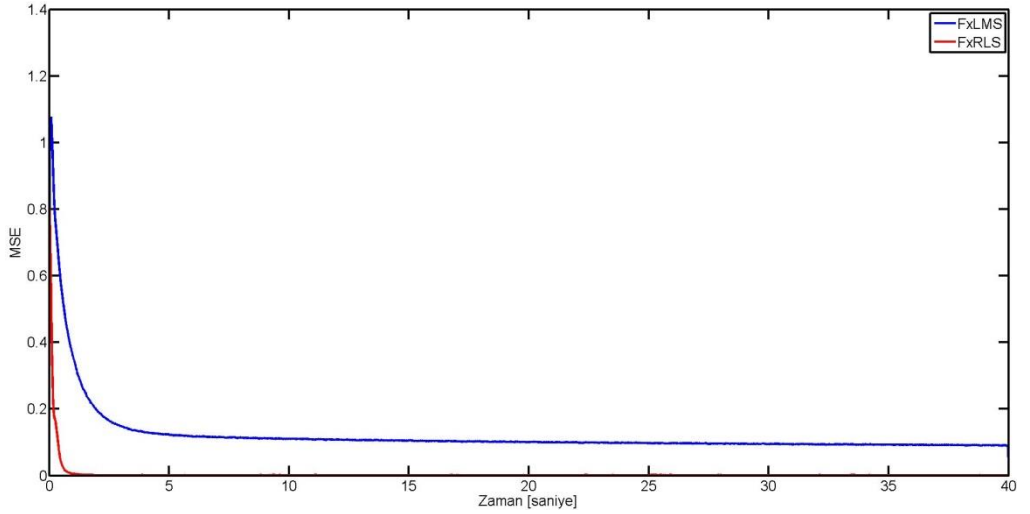
Şekil 4.35'den görüldüğü üzere FxRLS algoritması, çok hızlı bir yakınsamaya ve  $7,5514e-04$  olarak hesaplanan MMSE değerinin de gösterdiği gibi düşük bir durağan durum hatasına sahiptir. Şekil 4.36'da gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafiği incelendiğinde ise dar bant gürültüler için yüksek gürültü bastırma oranlarına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca LMS tabanlı algoritmaların gürültü bastırımı yapamadığı yüksek frekanslarda da RLS tabanlı algoritmaların gürültü bastırımı yapabildiği gözlemlenmektedir.

LMS ve RLS tabanlı algoritmaları, dar bant gürültü tipi için karşılaştırmak amacıyla FxLMS ve FxRLS algoritmalarının MSE değişim grafikleri şekil 4.37'de gösterilmiştir.

Görüldüğü üzere FxRLS algoritması hem yakınsama hızı, hem de durağan durum hatası açısından ciddi bir oranda FxLMS algoritmasından daha başarılı sonuçlar vermiştir.



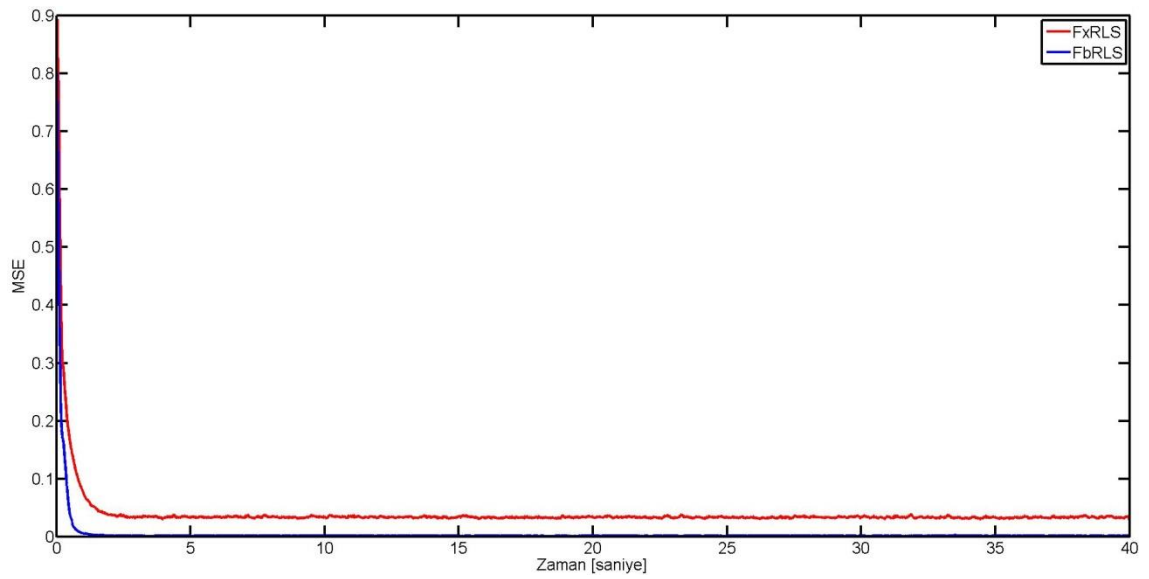
Şekil 4.36 Güç spektrum yoğunluğu (dar bant gürültü) (FxRLS)



Şekil 4.37 MSE değişimleri grafiği (dar bant gürültü) (FxLMS - FxRLS)

FxRLS algoritmasının da FxLMS algoritmasında olduğu gibi geliştirilebilir olması beklenmektedir. Örneğin yalnızca hata mikrofonu kullanarak da RLS algoritması kullanılmasına ihtiyaç duyulabilir. Bu durumda geri beslemeli FxRLS algoritmasına gerek duyulacaktır. FxRLS algoritmasının da geliştirilebilir olduğunu gözlemlenebilmesi için FxRLS algoritması, geri beslemeli FxRLS algoritması ile

karşılaştırılmıştır. Beklenen sonuç, FxRLS ve geri beslemeli FxRLS algoritmaları arasındaki farklar ile FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmaları arasındaki farkların benzerlik göstermesidir. Bir önceki bölümden de detaylı incelenebileceği gibi özet olarak geri beslemeli FxLMS algoritması, dar bant gürültü testlerinde FxLMS algoritmasından, yakınsama hızı ve durağan durum hatası kriterlerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Şekil 4.38’de gösterilen, FxRLS ve geri beslemeli FxRLS algoritmalarının MSE değişimleri grafiği incelendiğinde aynı durumun RLS algoritmaları için de geçerli olduğu gözlemlenmektedir.

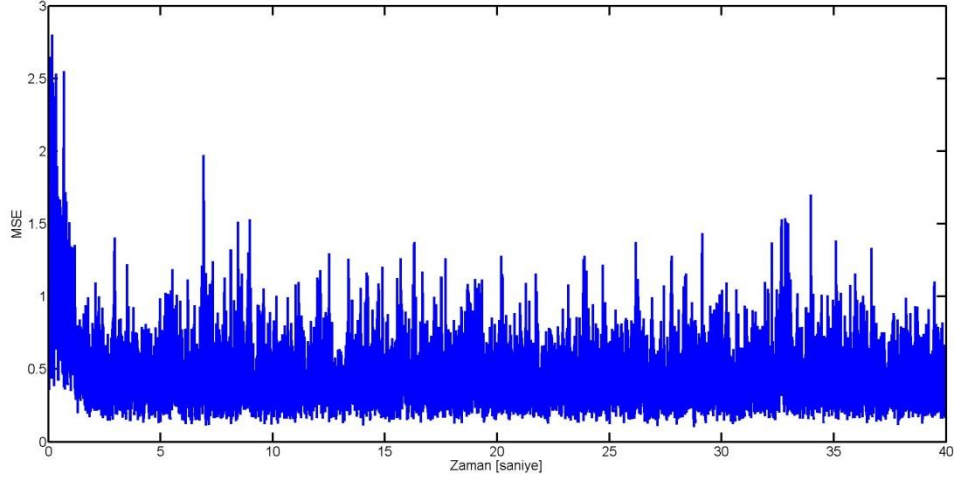


Şekil 4.38 MSE değişimleri grafiği (dar bant gürültü) (FxRLS - geri beslemeli FxRLS)

### 4.3.2 Geniş bant gürültü ile yapılan testler

FxRLS algoritmasının performansını ölçmek için önceki bölümde olduğu gibi beyaz gürültünün bir örnek fonksiyonu kullanılarak geniş bant gürültü testleri gerçekleştirilmiştir. FxRLS algoritmasına ait MSE değişim grafiği şekil 4.39’da gösterilmiştir.



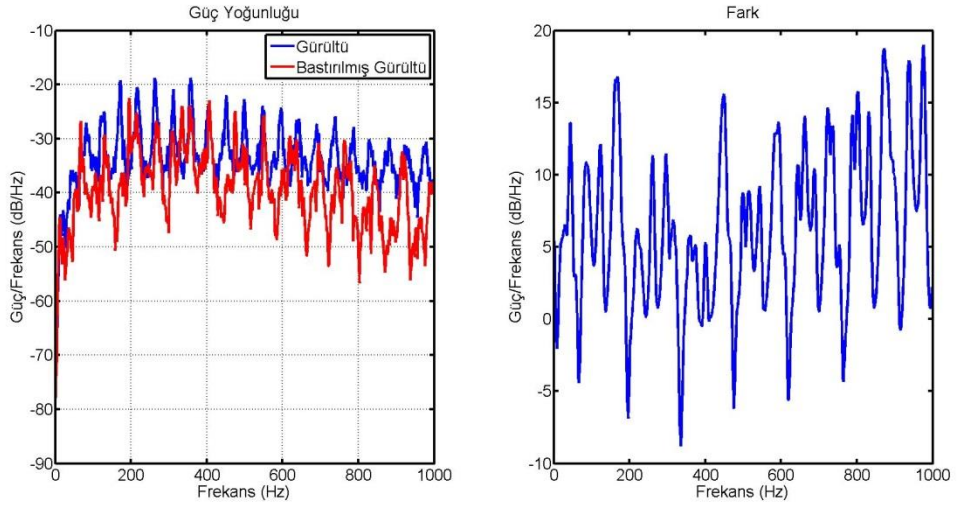


Şekil 4.39 MSE değişim grafiği (geniş bant gürültü) (FxRLS)

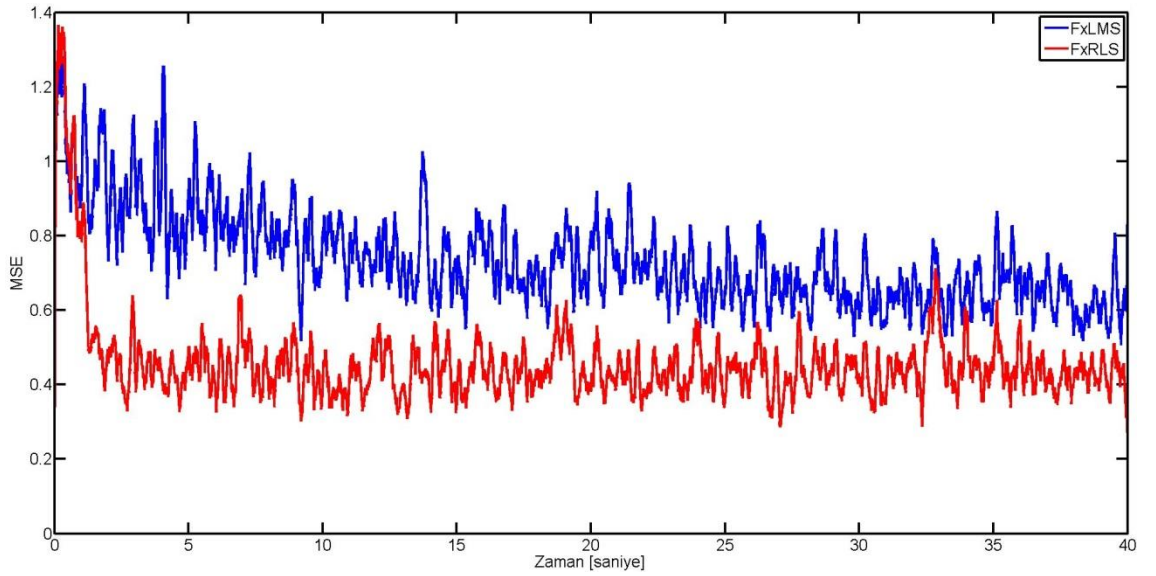
Şekil 4.39'dan görüleceği üzere geniş bant gürültü testleri için daha önce testleri yapılan algoritmalara göre çok hızlı bir yakınsama hızı ve 0,2865 olarak hesaplanan MMSE değeri ile de çok düşük bir durağan durum hatasına sahiptir. Ayrıca şekil 4.40'da gösterilen güç spektrum yoğunluğu grafiği incelendiğinde geniş bir frekans bandında yüksek gürültü bastırım oranıyla, diğer testleri yapılan algoritmalara göre çok başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir. Dar bant gürültüde olduğu gibi yüksek frekanslarda da gürültü bastırımı gözlemlenmektedir.

LMS algoritmaları ile karşılaştırmak amacıyla FxLMS algoritmasının MSE değişim grafiği ile FxRLS algoritmasının MSE değişim grafiği aynı grafik üzerine çizdirilmiştir. Çizdirilen bu grafik şekil 4.41'de gösterilmiştir. Görüleceği üzere RLS tabanlı algoritmanın performansı çok üstündür. Hatta FxRLS algoritması yalnızca LMS eşdeğeri olan FxLMS algoritmasından değil, geniş bant gürültülerde daha iyi sonuç veren hibrit veya FuLMS algoritmasından da iyi sonuçlar vermiştir. FxRLS algoritması durağan durum hatasında olduğu gibi yakınsama hızı olarak da çok başarılı bir performansa sahiptir. FxRLS algoritması LMS algoritmalarında olduğu gibi hibrit algoritma gibi genişletilip kullanılırsa daha başarılı sonuçlar vermesi de beklenmektedir.



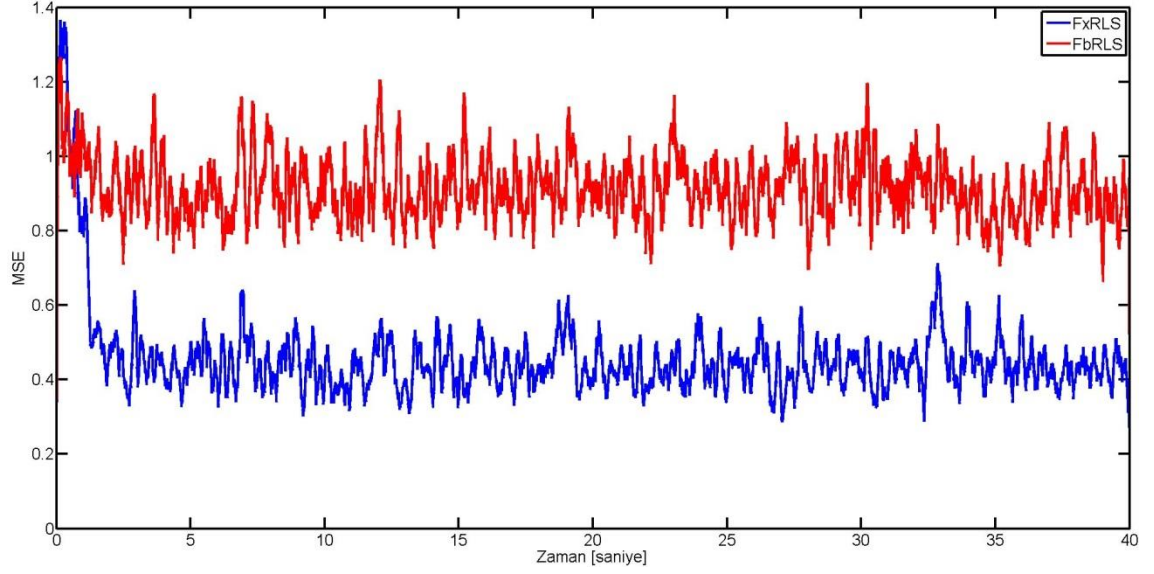


Şekil 4.40 Güç spektrum yoğunluğu (geniş bant gürültü) (FxRLS)



Şekil 4.41 MSE değişimleri grafiği (geniş bant gürültü) (FxLMS - FxRLS)

FxRLS algoritmasının dar bant gürültülerde doğrulandığı gibi, geniş bant gürültüler için de genişletilebilir olup olmadığının doğrulanması açısından geri beslemeli FxRLS algoritması içinde aynı testler uygulanmış ve şekil 4.42’de gösterilen MSE değişimleri grafiği elde edilmiştir.

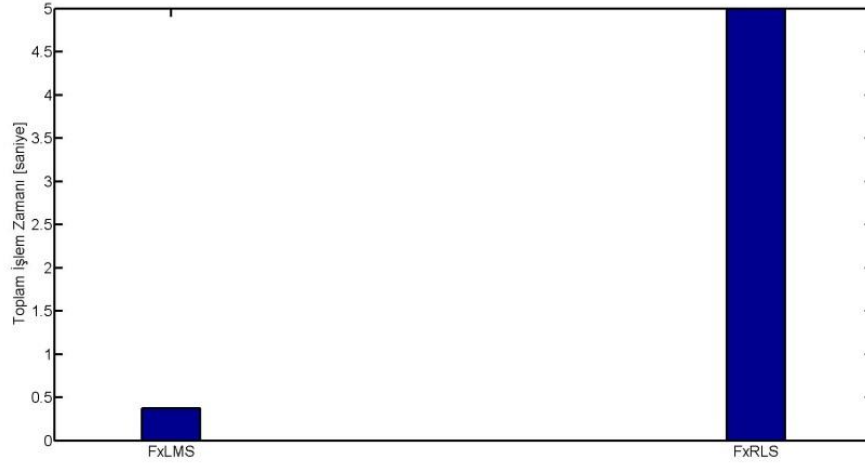


Şekil 4.42 MSE değışimleri grafiği (geniş bant gürültü) (FxRLS - geri beslemeli FxRLS)

Önceki kısımda olduğu gibi bu grafikte de ileri beslemeli FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmasında olan ilişkinin bu grafikte de gözlemlenmesi gerekmektedir. FxRLS algoritmalarında da FxLMS algoritmalarında olduğu gibi gürültünün periyodikliğinin azaldığı geniş bant gürültülerde geri beslemeli algoritmanın performansının ileri beslemeli algoritmanın performansından düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak FxRLS algoritmasının da FxLMS algoritması gibi genişletilebilir olduğu ve hibrit yapıdaki algoritmalar kullanılarak daha da üstün performanslar elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

### 4.3.3 İşlem yükü karşılaştırmaları

RLS tabanlı algoritmalar řu ana kadar incelenen bütün performans kriterleri açısından LMS tabanlı algoritmalara göre daha iyi sonuç vermişlerdir. Pratik uygulamalarda RLS tabanlı algoritmaların daha az tercih edilmesinin sebebi ise işlem yükünün LMS tabanlı algoritmalara göre çok fazla olmasıdır. Şekil 4.43'te gösterildiği gibi LMS ve RLS algoritmalarının arasında ciddi bir işlem yükü farkı vardır. Yapılan bu test esnasında filtrelerin filtre uzunluğu 16 olarak kullanılmasına rağmen ciddi bir fark gözlemlenmektedir. Bu testten farklı olarak filtre uzunluğu 64 olarak yapılan test sonucu elde edilen işlem yükü grafiği ise şekil 4.44'te gösterilmiştir.



Şekil 4.43 İşlem yükü grafiği (L = 16) (FxLMS - FxRLS)



Şekil 4.44 İşlem yükü grafiği (L = 64) (FxLMS - FxRLS)

Şekil 4.43 ve 4.44'ten görüleceği üzere filtre uzunluğu arttırıldığına FxRLS algoritmasının işlem yükü, FxLMS algoritmasının işlem yüküne göre daha fazla artış göstermiş, aradaki fark daha da artmıştır. Filtre uzunluğu arttıkça FxRLS algoritmasının gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı, imkansıza doğru gitmektedir. Literatürde FxRLS algoritmalarının genişletilmiş hallerinin (hibrit algoritma gibi) fazla kullanılmamasının sebebi de işlem yükünün fazlalığından kaynaklanmaktadır. Bu gibi durumlarda işlem yükü, gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılamayacak oranda artmakta, hazırlanan algoritmalar teoriden öteye geçememektedir.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, test edilen her bir algoritma belli gözlemlerin ve doğrulamaların yapılabilmesi için seçilmiştir. FxLMS algoritmasının test edilmesinin sebebi, en temel aktif gürültü giderimi algoritması olması ve literatürde en çok kullanılan algoritma olmasıdır. Aktif gürültü giderim algoritmalarının geri beslemeli konfigürasyonda elde edeceği sonuçların testleri açısından geri beslemeli FxLMS algoritması test edilmiştir. İki algoritmanın beraber kullanıldığı durumda elde edilebilecek sonuçları gözlemek için ise hibrit algoritma kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Filtre yapısının algoritmaya sağladığı avantajları ve dezavantajları görmek amacıyla da farklı filtre yapısında olan FuLMS algoritması ile testler gerçekleştirilmiştir. RLS adaptasyon algoritmasının da aktif gürültü giderim sistemlerindeki performanslarını gözlemek için FxRLS algoritması ile testler gerçekleştirilmiş, RLS tabanlı algoritmaların da LMS tabanlı algoritmalarda olduğu gibi modifiye edilebilir veya farklı konfigürasyonlarda kullanılabilir olduğunun gözlemlenebilmesi için de geri beslemeli FxRLS algoritması ile testler gerçekleştirilmiştir.

Algoritmaların tümü için filtre uzunluğu ve yakınsama katsayısı gibi parametrelerin seçimi büyük öneme sahiptir. Bu parametrelerin seçimi bütün performans kriterlerini doğrudan etkilemektedir. Parametreler, sistemin performansını arttıracak şekilde ayarlandığında sistemin kararsız hale geçme ihtimalini arttırır. Tez kapsamında filtre uzunluğunu ve yakınsama katsayısını arttırmanın sistemin performansını arttırdığı ancak belli bir düzeyden sonra ise sistemi kararsız hale geçirdiği, Bölüm 4.1.1 ve 4.1.2’de gözlemlenmiştir. Parametrelerin birbirleriyle de doğrudan ilişkileri olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, filtre uzunluğunun sistemin kararlı halde kalabileceği yakınsama katsayısı seçim aralığını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.

Parametrelerin seçimini, gürültü tipi ve gürültü giderimi yapılan ortam da etkilemektedir. Seçimi etkileyen etkenlerin fazlalığı sebebiyle parametreler genellikle deneme yanılma yöntemiyle belirlenmektedir. Gürültü tipi veya ortam tez çalışmasında olduğu gibi değişken değilse, en optimum değerlerin belirlenip kullanılmasında bir sakınca yoktur. Ancak değişken bir ortam ve/veya değişken bir gürültü tipi varsa bu

parametrelerin algoritma içinde adaptif olarak ayarlanması veya kararsızlığı önlemek amacıyla performanstan feragat edilmesi gerekmektedir. Yakınsama hızı yüksek olan algoritmanın en ufak değişimde salınım yapıp, tekrar toparlayamaması ve kararsız olması çok olasıdır. Sonuç olarak, aktif gürültü giderim sistemlerinin en önemli adımlarından bir tanesi algoritma parametrelerinin uygun seçilmesidir. Bütün etkenler iyi analiz edilmeli, kararlılık, performans ve işlem yükü arasındaki dengenin iyi kurulması gerekmektedir.

Aktif gürültü giderim sistemlerinin önemli parametrelerinden bir tanesi olan ikincil yol etkisi incelenmiştir. Tez kapsamında değişken olmayan bir ortam kullanıldığı için ikincil yol etkisi kestirimi bir kereye mahsus olarak Bölüm 2.2.3'te gösterildiği gibi yapılmış ve bütün simülasyonlarda bu kestirim kullanılmıştır.

Aktif gürültü giderim sistemlerinin zorlaştırıcı faktörlerinden en önemlisi geri besleme etkisidir. Geri besleme etkisinin, yakınsama hızı gibi performans kriterlerine olumsuz etkileri Bölüm 4.1.3'te gözlemlenmiştir. Geri beslemeli konfigürasyon (geri beslemeli FxLMS) kullanılarak geri besleme etkisinin önüne geçilebileceği gibi farklı filtre yapısına sahip bir algoritma olan FuLMS algoritması kullanarak da bu etkinin önüne geçilebildiği Bölüm 4.1.3'te gözlemlenmiştir.

Son olarak algoritmalar için optimum değerler belirlenmiş ve algoritmalar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. LMS tabanlı algoritmaların ileri beslemeli ve geri beslemeli olan konfigürasyonları karşılaştırıldığında, tek tonlu gürültü ile yapılan testlerde geri beslemeli algoritma ile ileri beslemeli algoritmanın birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. İleri beslemeli algoritma yalnızca yakınsama hızı bakımından daha kötü sonuç vermiştir. Dar bant gürültü ile yapılan testlerde ise geri beslemeli algoritma, bütün performans kriterleri açısından ileri beslemeli algoritmaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Geniş bant gürültü ile yapılan testlerde ise tam tersi durum gerçekleşmiş, ileri beslemeli algoritmanın, geri beslemeli algoritmaya göre bütün performans kriterleri açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yani gürültünün periyodikliği azaldıkça ve daha geniş bir frekans spektrumunda bileşene sahip oldukça geri beslemeli algoritmanın performansında düşüş gözlemlenmiştir. Bu

sebepten dolayı dar bant gürültülerde geri beslemeli algoritmaların tercih edilmesi, geniş bant gürültülerde de ileri beslemeli algoritmaların tercih edilmesi gerektiği sonucu elde edilmiştir.

Farklı filtre yapısına sahip iki ileri beslemeli algoritma olan FxLMS ve FuLMS algoritmaları karşılaştırıldığı zaman, FuLMS algoritmasının, geri besleme etkisini kompanse edebildiği için hem dar bant, hemde geniş bant gürültü tiplerinde FxLMS algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle geri besleme etkisinin yoğun olarak etkisini gösterdiği ortamlarda, geniş bant gürültüde olduğu gibi tek mikrofon kullanmak yeterli değilse, FuLMS algoritması tercih edilebilir. Ancak FuLMS algoritmasının işlem gereksiniminin, FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmalarına göre daha fazla olduğu göz ardı edilmemelidir.

Geniş bant gürültü ile yapılan testlerde, başarı oranı düşük FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmalarının beraber kullanılması sonucu, başarı oranı yüksek bir algoritma elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Hibrit algoritma kullanarak, her iki algoritmanın iyi yönlerini bir arada toplamak mümkün olmuştur. Hibrit algoritmanın işlem gereksinimi FxLMS ve geri beslemeli FxLMS algoritmasından fazla olduğundan dolayı performans olarak çok farklı sonuçlar elde edilmeyen dar bant gürültülerde tercih edilmemelidir. Ancak geniş bant gürültülerde ölçülen performansı ile işlem yükünü arttırmasına karşılık tercih edilebilecek bir algoritmadır.

RLS tabanlı algoritmalar ile yapılan testler sonucu, RLS tabanlı algoritmaların performansının LMS tabanlı algoritmalarının performanslarına göre çok üstün olduğu gözlemlenmiştir. Ancak RLS tabanlı algoritmaların işlem gereksiniminin de LMS tabanlı algoritmalara göre çok fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yani RLS tabanlı algoritmalar, test edilen bütün gürültü tipleri için başarılı bir performansa sahip olsa da gerçek zamanlı uygulamalarda gerçekleştirimi ancak çok yüksek işlem kapasiteli işlemcilerle mümkün olacaktır. Ayrıca RLS tabanlı algoritmaların LMS tabanlı algoritmalarda olduğu gibi başka yapılarda kullanılabileceği de gözlemlenmiştir.

Dar bant gürültülerde, yalnızca hata mikrofonu kullanan, geri beslemeli konfigürasyona sahip algoritmaların kullanılması yeterli olacaktır. Ancak geniş bant gürültülerde, geri beslemeli konfigürasyon yeterli olmadığı için, FxLMS gibi ileri beslemeli konfigürasyonlar tercih edilmelidir. Geri besleme etkisi sistemin performansını olumsuz etkiliyorsa, hibrit algoritma, FuLMS veya RLS tabanlı algoritmalar kullanılarak performansı artırıcı sonuçlar elde edilebilir. Ancak bu performans artırıcı sonuçlar beraberlerinde işlem yükünü de getireceği için performans – işlem yükü dengesinin iyi ayarlanması gerekmektedir. İşlem yükünün fazla olması, güçlü işlemciler kullanmayı gerektirmekte, güçlü işlemcilerin de güç tüketimleri fazla olmaktadır. Yani taşınabilir güç kaynağı kullanılacak uygulamalarda, düşük güç tüketimli işlemcilerin kullanılması gerekmekte, düşük güç tüketimli işlemcilerin de işlem kapasiteleri düşük olmaktadır. Bu sebepten dolayı, genellikle pil ile kullanılabilen kulaklık gibi mobil uygulamalarda düşük işlem gereksinimi olan algoritmalar tercih edilmelidir. Bu tarz uygulamalarda eğer ilgilenilen gürültü, dar bant gürültü ise geri beslemeli FxLMS algoritması, eğer geniş bant gürültü ise ileri beslemeli FxLMS algoritması tercih edilmelidir.

Sonuç olarak, ilgilenilecek gürültünün tipinin ve çalışılacak ortamın analizinin iyi yapılması, buna göre performans – işlem yükü dengesi en iyi algoritmanın tercih edilmesi gerekmektedir. Algoritma tercihi yapıldıktan sonra da, algoritma parametreleri, performans – kararlılık dengesini iyi kuracak şekilde belirlenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Anonymous. 2013. Web Sitesi: [www.honda.co.nz/technology/driving/anc](http://www.honda.co.nz/technology/driving/anc), Erişim Tarihi: 04.07.2013
- Aytaç, E. 2010. Analysis of FxLMS Algorithm For Active Noise Control. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, 100 p., İstanbul.
- Burgess, J.C. 1981. Active Adaptive Sound Control In A Duct: A Computer Simulation. Journal Of The Acoustical Society of America, 70; 715-726.
- Chaplin, G.B.B and Smith, R.A. 1978. The Sound of Silence, Engineering, 218; 672-673.
- Clatterbuck, D.C. 1998. An Investigation of Performance Limitations in Active Noise Reduction Headsets. Yüksek Lisans Tezi. Virginia Polytechnic Institute and State University, 145 p., Virginia.
- Conover, W.B. 1956. Fighting Noise With Noise. Noise Control, 2; 78-82.
- Elliott, S.J. and Nelson, P.A. 1993. Active Noise Control. IEEE Signal Processing Magazine, 10; 12-35.
- Elliott, S.J. 2000. Signal Processing for Active Control. Academic Press, 511 p., USA.
- Eriksson, L.J., Allie, M.C. and Greiner, R.A. 1987. The Selection and Application of an IIR Adaptive Filter for Use in Active Sound Attenuation. IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, 35(4); 433-437.
- Erkan, F. 2009. Design and Implementation of a Fixed Point Digital Active Noise Controller Headphone. Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 106 p., Gazimağusa.
- Flotte-Hernandez, O.R., Pineda-Olivares, A., Dieck-Assad, G., Avila-Ortega, A., Martinez-Chapa, S.O. and Bouchereau-Lara, F. 2008. On The Performance of Active Noise Control Fx-LMS and FbFxLMS Algorithms for Duct Network Attenuation. CERMA '08 Proceedings of the 2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference; 575-581.
- Güner, E. 2000. "Active noise control: Applications on a headset and a duct", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99 p.
- Hansen, C.H. 2001. Understanding Active Noise Cancellation. Spon Press, 154 p., London.
- Haykin, S. 2001. Adaptive Filter Theory. Prentice Hall, 936 p., USA.
- Johansson, S. 2000. Active Control of Propeller-Induced Noise in Aircraft. Kaserntykeriet AB, 214 p., Sweden.



- Kandulu, Ş. 2008. Broadband Feedforward Active Noise Cancellation. Yüksek Lisans Tezi. Doğu Akdeniz Üniversitesi, 82 p., Gazimağusa.
- Kido, K. 1975. Reduction of noise by use of additional sound sources. Proceedings of Inter-Noise '75; 647-650.
- Kuo, S.M., Panahi, I., Chung, K.M., Horner, T., Nadeski, M. and Chyan, J. 1996. Design of Active Noise Control Systems With The TMS320 Family. Texas Instruments, 162 p., USA.
- Kuo, S.M. and Morgan, D.R. 1999. Active Noise Control: A Tutorial Review. Proceedings of The IEEE, 87(6); 943-973.
- Kwong, R.H. and Johnston, E.W. 1992. A Variable Step Size LMS Algorithm. IEEE Transactions On Signal Processing, 40(7); 1633-1641.
- Lankila, A. 2008. Simulation Model for an Active Noise Control System – Development and Validation. Yüksek Lisans Tezi. Helsinki University of Technology, 60 p., Helsinki.
- Liu, L., Kuo, S.M. and Raghuathan, K.P. 2010. Active Noise Control for Motorcycle Helmet. International Journal of Information and Communication Engineering, 6(2); 102-107.
- Lopez-Caudana, E.O. 2011. Adaptive Filtering Applications. InTech, 400 p., Rijeka.
- Lyons, R.G., 2004. Understanding Digital Signal Processing. Prentice Hall, 688 p., USA
- Madisetti, V.K. and Williams, D.B. 1999. Digital Signal Processing Hand Book. Chapman & Hall, 1690 p., London.
- Möser, M. 2009. Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control. Springer, 536 p., USA.
- Lueg, P. 1936. US 2043416.
- Olson, H.F. and May, E.G. 1953. Electronic Sound Absorber. Journal of the Acoustical Society of America, 25; 1130-1136.
- Pawelczyk, M. (Guest Ed.) 2008. “Special Issue on Active Noise Control”, Advances in Acoustics and Vibration.
- Pedersen, C.J., Moller, H. and Waye, K.P. 2008. A Detailed Study of Low-Frequency Noise Complaints. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 27(1); 1-33.
- Pota, H.R. and Kelkar, A.G. 2001. Modeling and Control of Acoustic Ducts. Journal of Vibration and Acoustics, 123; 1-10

- Reddy, R.M., Panahi, I.M.S. and Briggs, R. 2011. Hybrid FxRLS-FxNLMS Adaptive Algorithm for Active Noise Control in fMRI Application. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(2); 474-480.
- Romero, A., Lopez, E., Nakano-Miyatake, M. and Perez-Meana, H. 2008. A Hybrid Active Noise Canceling Structure. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2(2); 340-346.
- Somek, B., Dadic, M. and Maletic, M. 2001. Active Noise Control in Ducts. *Automatika*, 42; 5-12.
- Tokatlı A. 2004. "Design and implementation of a DSP based active noise controller for headsets", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 100 p.
- Toochinda, V. 2001. Fundamental Limitations of ANC in One Dimensional Ducts Using 2 Sensors and 1 Actuator. PhD Thesis. University of Massachusetts Amherst, 109 p., USA.
- Widrow, B., Shur, D. and Shaffer, S. 1981. On Adaptive Inverse Control. *Proceedings of the 15th ASILOMAR Conference on Circuits, Systems and Computers*; 185-195.
- Yang, Z. and Podlech, S. 2008. Theoretical Modeling Issue in Active Noise Control for a One-Dimensional Acoustic Duct System. *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*; 1249-1254
- Zimmer, B.J., Lipshitz, S.P., Vanderkooy, J., Obasi, E.E. and Morris, K.A. 2003. An Improved Acoustic Model for Active Noise Control in a Duct. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 125(3); 382-395.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Süleyman Kerem GÖKALP

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 20.12.1989

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

### **Eğitim Durumu**

Lise : Hacı Ömer Tarman Anadolu Lisesi (2006)

Lisans : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü (2010)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik – Elektronik Mühendisliği A.B.D (Eylül 2010 – Aralık 2013)

### **Çalıştığı Kurumlar**

TR Teknoloji (2010 – 2013)

Gate Elektronik (2013 – ...)