

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UZUN HAT GÖZETLEME UYGULAMALARI İÇİN DAĞITIK AKUSTİK
ALGILAMA SİSTEM ÇÖZÜMÜ: SİNYAL MODELLEME, HEDEF TESPİTİ
VE SINIFLANDIRMA TEKNİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan MARAL

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Aralık 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/ derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151211067 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hakan Maral**'nin ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**UZUN HAT GÖZETLEME UYGULAMALARI İÇİN DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEM ÇÖZÜMÜ: SİNYAL MODELLEME, HEDEF TESPİTİ VE SINIFLANDIRMA TEKNİKLERİ**” başlıklı tezi **14.12.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Tolga Girici**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Bülent Tavlı (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga Girici
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mirbek Turduev
TED Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Hakan Maral

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UZUN HAT GÖZETLEME UYGULAMALARI İÇİN DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEM ÇÖZÜMÜ: SİNYAL MODELLEME, HEDEF TESPİTİ VE SINIFLANDIRMA TEKNİKLERİ

Hakan Maral

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tolga Girici

Tarih: Aralık 2018

Faz-OTDR tekniğine dayanan fiber optik dağıtık akustik algılama sistemi, petrol ve gaz boru hatları, elektrik hatları, demiryolu hatları, orta ila büyük ölçekli tesislerin sınırları gibi uzun doğrusal hatları izlemek için ortam koşullarından etkilenmeyen ve maliyet etkin bir çözüm sunar. Fiber optik dağıtık akustik algılama (DAS), telekomünikasyon sınıfı fiber optik kablolarını algılama ve iletim ortamı olarak kullanılabilir. Sönümlenme oranı, faz-OTDR bazlı dağıtık akustik algılama sistemlerinin tespit performansını doğrudan etkileyen ve doğal olarak ortaya çıkan sınırlayıcı bir faktördür. Tezin ilk kısmında, Rayleigh saçılımının model bazlı analizinden faydalanarak sönümlenme oranının değişken sinyal edinim senaryoları ve sistem parametrelerinin alınan sinyaller üzerindeki etkilerini incelemek amaçlanmıştır ve MATLAB ortamında bu amaca uygun bir simülasyon yazılmıştır. Simülasyonda uygulanan sinyal edinim senaryoları, tespit edilecek olan hedef aktivite kaynağının çevresinde dağıtık aktivite kaynaklarının etkileri, sürekli dalga lazer kaynağındaki merkez frekans kayması, değişen fiber optik kablo uzunlukları ve değişen ADC bit çözünürlükleri gibi dağıtık akustik algılama sistemlerinde tipik olarak gözlemlenen durumları temsil etmek üzere oluşturulmuştur. Sonuçlar, yetersiz bir sönümlenme oranının yüksek optik gürültüye sebep olarak sistem parametrelerini geliştirme çabalarının etkilerini önemli bir

şekilde kısıtladığını göstermektedir. Tezin ikinci kısmında ise fiber optik tabanlı dağıtık akustik algılama sistemlerinde gerçek zamanlı hedef tespiti için uyarlamalı güç eşikleme yaklaşımı ve 50 kilometre uzunluğundaki doğrusal bir hattın gözlemlenmesi amacıyla geliştirilen dağıtık akustik algılama sisteminde kullanılan gerçek zamanlı hedef teşhis yaklaşımı açıklanmıştır. Tespit yaklaşımı için, optik sistemin iç dinamiklerine ve optik kablunun yakınlarında yapılan fiziksel aktivitelere bağlı olarak ölçülen sinyalin genliği değiştiğinden ve genel kabul görmüş bir sinyal istatistiksel modeli olmadığından, sinyal istatistikleri toplanan verilerden doğrudan oluşturulmuştur. Toplanan verilerin sadece gürültü veya gürültülü aktivite içerdiği önceden bilinemediği için iki aşamalı istatistiksel modelleme yaklaşımı uygulanarak güç eşik değeri belirlenmiştir. Bunun için birinci ve ikinci dereceden Gaussian karışım modelleri sırasıyla denenerek en uygun olanı güç eşik değerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Ayrıca, güç eşik değerinin güncellenme yöntemi açıklanmış ve algoritma çalışma zamanları analiz edilmiştir. Son kısımda, hedef teşhisi için, evrimsel sinir ağları temelli derin öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. Farklı yapıda ve karmaşıklığıdaki sinir ağlarının teşhis performansları ve çalışma süreleri ölçülmüştür. Hedef tespit performansını azaltmadan, tespit edilen tüm hedeflerin teşhis edilebilmesi için önerilen yaklaşım açıklanmıştır. Bu yaklaşımın uygulanabilmesi için kullanılacak ağ yapısının müsaade edilebildiği en yüksek çalışma süresi, en kötü senaryo durumunda analiz edilmiştir. Bu sayede, sistemde kullanılacak en uygun ağ yapısı seçiminin hem başarımlı hem de gerçek zamanlı uygulanabilirlik kriterlerine göre yapılabilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Faz-OTDR, Sönüm oranı, Dağıtık akustik algılama, Tespit, Simülasyon, Uyarlamalı eşikleme, Tehdit tespit, Derin öğrenme, Evrimsel sinir ağları, CNN, Tehdit tespit, Tehdit teşhis, Gerçek zamanlı çalışma.

ABSTRACT

Master of Science

DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING SYSTEM FOR LINEAR ASSET MONITORING: SIGNAL MODELING, THREAT DETECTION AND CLASSIFICATION TECHNIQUES

Hakan Maral

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Tolga Girici

Date: December 2018

The fiber-optic distributed acoustic sensing system based on the Phase-OTDR technique provides a cost-effective solution for monitoring long linear assets such as oil and gas pipelines, power lines, railway lines, boundaries of medium to large-scale facilities. Fiber optic distributed acoustic detection (DAS) can use telecommunications class fiber optic cables as detection and transmission media. Extinction ratio is an inherent limiting factor that has a direct effect on the detection performance of phase-OTDR based distributed acoustics sensing systems. In the first part of the thesis, a model based analysis of Rayleigh scattering is presented to simulate the effects of extinction ratio on the received signal under varying signal acquisition scenarios and system parameters. These signal acquisition scenarios are constructed to represent typically observed cases such as multiple vibration sources cluttered around the target vibration source to be detected, continuous wave light sources with center frequency drift, varying fiber optic cable lengths and varying ADC bit resolutions. Results show that an insufficient extinction ratio can result in high optical noise floor and effectively hide the effects of elaborate system improvement efforts. The second part of the thesis adopts two main approaches: an

adaptive power thresholding approach for real time threat detection on fiber optic based distributed acoustic sensing systems, and a real time threat classification approach to be used in a distributed acoustic sensing system that is developed for monitoring linear assets with a maximum length of 50 kms is explained. Due to the lack of an approved statistical signal model, and the changes on measured signal magnitude, which result from the internal mechanism of the optical system and physical activities that occur near the fiber optic cable, signal statistics are directly generated from the captured data. Since it is not known whether the captured data contain only noise or noisy activity data, power threshold is computed by applying two step statistical model approach. In order to construct these statistical models, first and second order Gaussian mixture models are tested and the most appropriate is used for computing power threshold. Finally, the update mechanism of power thresholding is explained and the execution time of the algorithm is analyzed. A deep learning approach based on The Convolutional Neural Network (CNN) is adopted for threat classification. Accuracy of the classification and durations of execution for neural networks with varying architectures and complexity are computed. A proposed approach for classifying all the detected threats without decreasing the detection accuracy is introduced. The maximum allowable execution time for the network structure that is appropriate for the proposed approach is analyzed for the worst case scenario. Hence, the most appropriate network architecture selection can be performed based on classification accuracy and also applicability in real-time criterion.

Keywords: Phase-OTDR, Extinction ratio, Distributed acoustic sensing, Detection, Simulation, Adaptive thresholding, Threat detection, Real-time processing, Deep learning, Convolutional neural networks, CNN, Threat classification.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Tolga Girici'ye, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, hayatta olduğu süre boyunca daima destekleyen ve arkamda olan babam Orhan MARAL'a, destekleriyle her zaman yanımda olan aileme, gerek tez çalıőmalarımda gerek bilimsel çalıőmalarımda yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli arkadaşlarım sayın Dr. Metin AKTAŐ'a ve sayın Dr. Toygar AKGÜN'e ve tüm çalıőmalarım boyunca desteğini esirgemeyen en değerli dostum Derya GÖZEN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. FAZ OTDR SİSTEMLERİNİN MODEL BAZLI SİNYAL ANALİZİ	5
2.1 Amaç	5
2.2 Sinyal Modeli	5
2.3 Simülasyonlar ve Deneyler	13
2.3.1 Güç Seviyeleri, Güç Normalizasyonu ve Fiber Optik Kablo Uzunluk Kaybı	13
2.3.2 Lazer Merkez Frekans Kayması.....	14
2.3.3 Darbe Frekans Kayması: AOM ve EOM.....	14
2.3.4 Aktivite Büyüklükleri ve Dağılımları	15
2.3.5 Sönümlene Oranı (ER) Değerleri.....	15
2.3.6 ADC Bit Derinliği ve Kenar Yumuşatma (Anti-Aliasing) Filtresi	15
2.3.7 Test Edilen Fiber Hat Uzunluğu (FUT)	16
2.3.8 Laboratuar Çalışması	16
2.4 Simülasyonlar ve Deneyler	17
2.4.1 Lazer Merkez Frekans Kayması Etkileri.....	17
2.4.2 Sönümlene Oranı (ER) Değerlerinin Aktivite Tespiti Üzerine Etkileri	21
2.4.3 Fiber Hat Uzunluğunun (FUT) Aktivite Tespitine Etkileri.....	30
2.4.4 Olay Bağlaşımı.....	34
2.4.5 AOM ve EOM Karşılaştırması.....	43
2.4.6 ADC Kenar Yumuşatma (Anti-Aliasing) Filtresi Etkileri	47
2.4.7 ADC Bit Çözünürlüğü Etkileri	51
2.4.8 Laboratuar Ölçümleri	55
3. DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMLERİNDE GERÇEK ZAMANLI HEDEF TESPİTİ İÇİN UYARLAMALI GÜÇ EŞİKLEME	59
3.1 Amaç	59
3.2 Tehdit Tespit Yaklaşımı	59
3.2.1 Gaussian Karışım Modeli.....	61
3.2.2 Gerçek Zamanlı Çalışma Analizi	62
3.3 Sistem Başarımı	63

4. DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMLERİNDE GERÇEK ZAMANLI SINIFLANDIRMA ANALİZİ	71
4.1 Amaç	71
4.2 Tehdit Teşhis Yaklaşımı.....	71
4.2.1 Veri Seti Oluşturma.....	72
4.2.2 Gerçek Zaman Analizi	72
4.3 Tehdit Teşhis Yöntemi	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Faz-OTDR Sistem Mimarisi.....	6
Şekil 2.2 : Rayleigh Yansıması Gösterimi.....	7
Şekil 2.3 : Optik Darbenin Örnek Gösterimi.....	8
Şekil 2.4 : Laboratuar Deney Kurulum Şeması.....	16
Şekil 2.5 : Lazer Frekans Kayması Etkileri (ER = - 50 dB).....	18
Şekil 2.6 : Lazer Frekans Kayması Etkileri (ER = - 70 dB).....	19
Şekil 2.7 : Lazer Frekans Kayması Etkileri (ER = - 100 dB).....	20
Şekil 2.8 : Lazer Frekans Kayması Etkileri (ER = - 120 dB).....	21
Şekil 2.9 : Farklı Aktivite Seviyeleri.....	23
Şekil 2.10 : Farklı Aktivite Seviyeleri - Alçak Geçirgen Filtre-A.....	24
Şekil 2.11 : Farklı Aktivite Seviyeleri - Alçak Geçirgen Filtre-B.....	25
Şekil 2.12 : Farklı Aktivite Seviyeleri - Alçak Geçirgen Filtre-C.....	26
Şekil 2.13 : Farklı Aktivite Seviyeleri - Alçak Geçirgen Filtre-D.....	27
Şekil 2.14 : Kanal 10 - Aktivite Güç Seviyeleri.....	28
Şekil 2.15 : Kanal 3500 - Aktivite Güç Seviyeleri.....	29
Şekil 2.16 : 40 km Fiber Optik Hat Uzunluğu Sonuçları.....	31
Şekil 2.17 : 20 km Fiber Optik Hat Uzunluğu Sonuçları.....	32
Şekil 2.18 : 10 km Fiber Optik Hat Uzunluğu Sonuçları.....	33
Şekil 2.19 : 5 km Fiber Optik Hat Uzunluğu Sonuçları.....	34
Şekil 2.20 : Olay Bağlaşımı ER = -50 dB ve Kısa Süreli Lazer Dalgalanması.....	35
Şekil 2.21 : Olay Bağlaşımı ER = -70 dB ve Kısa Süreli Lazer Dalgalanması.....	36
Şekil 2.22 : Olay Bağlaşımı ER = -100 dB ve Kısa Süreli Lazer Dalgalanması.....	37
Şekil 2.23 : Olay Bağlaşımı ER = -120 dB ve Kısa Süreli Lazer Dalgalanması.....	38
Şekil 2.24 : Olay Bağlaşımı ER = -50 dB.....	39
Şekil 2.25 : Olay Bağlaşımı ER = -70 dB.....	40
Şekil 2.26 : Olay Bağlaşımı ER = -100 dB.....	41
Şekil 2.27 : Olay Bağlaşımı ER = -120 dB.....	42
Şekil 2.28 : AOM ve EOM Karşılaştırması - Sönümlenme Oranı -50 dB.....	44
Şekil 2.29 : AOM ve EOM Karşılaştırması - Sönümlenme Oranı -70 dB.....	45
Şekil 2.30 : AOM ve EOM Karşılaştırması - Sönümlenme Oranı -100 dB.....	46
Şekil 2.31 : AOM ve EOM Karşılaştırması - Sönümlenme Oranı -120 dB.....	47
Şekil 2.32 : ADC Bastırma Oranları - Sönümlenme Oranı -50 dB.....	48
Şekil 2.33 : ADC Bastırma Oranları - Sönümlenme Oranı -70 dB.....	49
Şekil 2.34 : ADC Bastırma Oranları - Sönümlenme Oranı -100 dB.....	50
Şekil 2.35 : ADC Bastırma Oranları - Sönümlenme Oranı -120 dB.....	51
Şekil 2.36 : ADC Bit Çözünürlüğü - Sönümlenme Oranı -50 dB.....	52
Şekil 2.37 : ADC Bit Çözünürlüğü - Sönümlenme Oranı -70 dB.....	53
Şekil 2.38 : ADC Bit Çözünürlüğü - Sönümlenme Oranı -100 dB.....	54
Şekil 2.39 : ADC Bit Çözünürlüğü - Sönümlenme Oranı -120 dB.....	55
Şekil 2.40 : Laboratuar Ölçümleri - Fiber Optik Kablo Uzunluğu 25 km.....	56

Şekil 2.41 : Laboratuvar Ölçümleri - Fiber Optik Kablo Uzunluğu 50 km	57
Şekil 3.1 : Algoritma - 1 F=600	64
Şekil 3.2 : Algoritma - 2 F=600	65
Şekil 3.3 : Algoritma - 1 F=1200	66
Şekil 3.4 : Algoritma - 2 F=1200	67
Şekil 3.5 : Algoritma - 1 F=2400	68
Şekil 3.6 : Algoritma - 2 F=2400	69
Şekil 4.1 : Farklı katman sayısına sahip ağ yapılarının (Çizelge 4.1) kanal başına düşen teşhis çalışma süresi.....	78



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Eşik belirleme algoritması çalışma zamanları	69
Çizelge 3.2: Tespit çizelgesi	70
Çizelge 4.1: Evrimsel sinir ağları yapıları	75
Çizelge 4.2: Teşhis doğruluk oranları	76
Çizelge 4.3: Ağ-2 için karışıklık matrisi	77



KISALTMALAR

Faz OTDR	: Faz-Optik Zaman Alanı Reflektometresi
ER	: Sönümlenme oranı
DAS	: Fiber optik dağıtık akustik algılama sistemi
EDFA	: Erbium katkılı fiber yükseltici
AOM	: Akustik-optik modülatör
EOM	: Elektro-optik modülatör
CW	: Sürekli dalga
Cir.	: Sürekli optik darbe sirkülatör
PD	: Fotodetektör
FUT	: Fiber optik kablo uzunluğu
ADC	: Analog sinyalden dijital sinyale çevirici
SNR	: Sinyal gürültü oranı

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
T_w	Darbe genişliği
T_p	Darbe tekrarlama periyodu
c_v	Pi sayısı
t	Zaman
E_0	Kompozit elektrik şiddeti
r_m	Rayleigh dağılımına uğramış sinyalin saçılma katsayısı
$f(t)$	Sürekli dalga ışık kaynağının zamanla değişen anlık frekansı
α	Fiber zayıflama sabiti
v	Grup hızı
φ_m	m saçılım merkezindeki rastgele faz
$\Pi(\cdot)$	Dikdörtgen darbe
L	Fiber optik kablonun uzunluğu.
Δ_f	Akusto-optik modülatör Frekans kaydırması
F	Çerçeve değeri



1. GİRİŞ

Tezin ilk kısmında, değişen sinyal edinim senaryoları ve sistem parametreleri altında dağıtık algılama sistemlerinin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir. Bu etkileri simüle etmek Rayleigh saçılmasını temel alan bir model analizi sunulmaktadır. Dağıtık algılama sistemlerinin en çok etkilendiği parametre sönümlenme oranıdır. Sönümlenme oranı, fiber optik kablo içerisinde engellenemeyen doğal olarak ortaya çıkan bir parametredir. Sistem performansını doğrudan etkilediği yapılan bilimsel açıklamalarla da gösterilmiştir [1]. Bu sinyal edinim senaryoları, algılanacak hedef titreşim kaynağı etrafına dağılmış çoklu titreşim kaynakları, merkez frekans kayması, değişen fiber optik kablo uzunlukları ve değişen ADC bit çözünürlükleri ile sürekli dalga ışık kaynakları gibi tipik olarak gözlemlenen durumları temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır. Sonuçlar, yetersiz bir sönümlenme oranının (ER) yüksek optik gürültüye neden olabileceğini ve ayrıntılı sistem iyileştirme çabalarının etkilerini etkili bir şekilde gizleyebildiğini göstermektedir.

Tezin ikinci kısmında, fiber optik tabanlı dağıtık akustik algılama sistemlerinde gerçek zamanlı hedef tespiti için uyarlamalı güç eşikleme yaklaşımı açıklanmıştır. Optik sistemin iç dinamiklerine ve optik kablonun yakınlarında yapılan fiziksel aktivitelere bağlı olarak ölçülen sinyalin genliği değiştirdiğinden ve genel kabul görmüş fiziksel aktivitelere bağlı değişen sinyal istatistiksel modeli olmadığından, sinyal istatistikleri toplanan verilerden doğrudan oluşturulmuştur. Toplanan verilerin sadece gürültü veya gürültülü aktivite içerdiği önceden bilinemediği için iki aşamalı istatistiksel modelleme yaklaşımı uygulanarak güç eşik değeri belirlenmiştir. Bunun için birinci ve ikinci dereceden Gaussian karışım modelleri sırasıyla denenerek en uygun olanı güç eşik değerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Ayrıca, güç eşik değerinin güncellenme yöntemi açıklanmış ve algoritma çalışma zamanları analiz edilmiştir. Tezin son kısmında, direkt algılama tabanlı faz-OTDR kullanan bir dağıtık akustik algılayıcı

cı ile tespit edilen mekanik aktivitelerin gerçek zamanlı¹ teşhisi açıklanmıştır [2]. Bunun için farklı yapılarıdaki Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN) kullanılarak sınıflandırma performansı ile çalışma zamanları karşılaştırmalı olarak ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Geliştirilen fiber optik dağıtık akustik algılama sisteminin genel mimarisi ve özellikleri hakkında özet bilgi verildikten sonra analizler için gerçek sahadan veri toplama yöntemi açıklanmıştır. Sonrasında toplanan verilerden oluşturulan veri seti kullanılarak yapılan analiz çalışmaları açıklanmış, başarımları ve zamanlama sonuçları verilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Tez üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımdaki çalışmalarda, yetersiz bir sönümlenme oranının cihaz performansını etkilediğini simüle etmek için model bazlı bir analiz üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı değişen sinyal edinim senaryolarının ve sistem parametrelerinin yardımıyla yetersiz sönümlenme oranının optik gürültüye sebep olarak tespiti zorlaştırabildiğini, bazı aktiviteleri gölgeleyebileceğini ve iyileştirme çabalarının etkilerini azaltabileceğini göstermektir. İkinci kısımdaki çalışmalarda, sistemin gerçek zamanlı hedef tespiti amacıyla kullanılabilmesi için tasarlanan bir tehdit tespit yaklaşımı açıklanmış ve gerçek zamanda çalışma başarımları analiz edilmiştir. Son kısımdaki çalışmalar, tespit edilen tehditlerin teşhis edilmesi amacıyla tasarlanan yapının ayrıntılarını sunmaktadır. Bu çalışmalarda evrişimsel sinir ağları (CNN) uygulanmış olup gerçek zaman analizi ve teşhis başarımları bu kısımda paylaşılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

İlk olarak 1970 yıllarının sonlarına doğru ortaya çıkarılan OTDR, bir fiber optik kabloya ışık titreşimleri göndermek ve aynı kablo ucunda geri yansıyan ışık yoğunluğunu ölçmeye dayanır [3, 4]. Günümüzde ise OTDR, fiber optik kablolardaki kırık noktalarının tespiti ve sinyal kaybının ölçümü amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel OTDR tutarsız ışığı kullandığı için yalnızca fiber kablo boyunca gözlemlenen geri yansıyan ışığın yoğunluk değişimlerini ölçebilir. Lazer teknolojilerindeki

¹ Gerçek zamanlı çalışma, sistemin tespit performansını azaltmadan tespit edilen tüm aktivitelerin teşhis edilebilmesi olarak kullanılmaktadır.

gelişmelerden sonra tutarlı ışık üretebilen lazer kaynakları üretilebilmiş, bu gelişmelere paralel olarak OTDR sistemleri faz hassas OTDR olarak evrilmiştir. Faz-OTDR fiber optik kablolarda doğal olarak gözlemlenen Lord Rayleigh tarafından ilk defa 1871 yılında ortaya çıkartılan ve daha sonra çeşitli bilim insanları tarafından irdelenen "Rayleigh saçılımı" denen bir fiziksel fenomenin hassas ölçümüne dayanmaktadır [5]. En basit formuyla, Rayleigh saçılımı, dağıtma merkezleri olarak da bilinen, mikro aynalar gibi davranan moleküler seviyedeki kusurlardan dolayı fiber optik kablo içinde dolaşan ışığın kısmi geri yansımaları olarak düşünülebilir. Faz hassas OTDR'da farklı dağıtım merkezlerinden gelen yansımaların girişimi sonucunda optik sinyal gücü ortaya çıkar [6-11]. Bir fiber optik kablo yakınında bulunan mekanik dalgalar, fiziksel olarak kabloyla etkileşime girerek doğal olarak gözlemlenen Rayleigh saçılım seviyelerinde dağıtım merkezlerinin konumlarının değişmesine sebep olur. Sinyal seviyelerinde küçük fakat ölçülebilir değişikliklere neden olur. Geri yansıyan ışıktaki bu dalgalanmaları algılayarak ve yorumlayarak, gömülü bir fiber optik kablo yakınında kazma veya yürüme gibi fiziksel aktiviteler tespit edilebilir [12, 13]. Uygun sinyal işleme ile sınıflandırılabilir [14]. Girişim şekli değiştikçe sonuçtaki ışık şiddeti de değişir ve bu değişim ölçülür, bu nedenle terim faz hassas OTDR'dır.

Faz-OTDR tekniğine dayanan fiber optik dağıtık akustik algılama sistemi (DAS - Distributed Acoustic Sensing), petrol ve gaz boru hatları, elektrik hatları, demiryolu hatları ve orta ila büyük ölçekli tesislerin sınırları gibi uzun doğrusal hatları izlemek için ortam koşullarından etkilenmeyen ve maliyet etkin bir çözüm sunar. Fiber optik dağıtık akustik algılama (DAS), telekomünikasyon sınıfı fiber optik kablolarını algılama ve iletim ortamı olarak kullanabilir. Optik tabanlı bir algılama sistemi olması sebebiyle elektromanyetik radyasyondan ve sinyal bozmadan etkilenmez. Bu kablolar genel olarak toprak altına gömülü olduğundan, dağıtık akustik algılama bazlı gözetleme çözümleri de dışarıdan müdahalelere karşı dayanıklıdır. Ayrıca, gün ışığı veya kızılötesi kameralar gibi sensör çözümlerinin aksine, dağıtık akustik algılama (DAS), hat boyunca güç hatlarının kurulmasını ve idame ettirilmesini gerektirmez.

Tipik faz-OTDR tasarımlarında, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, sürekli dalga ışık kaynağından sorgulama darbeleri elde etmek için akusto-optik modülatörler (AOM) ve / veya elektro-optik modülatörler (EOM) kullanılır. Sönümlenme oranı (ER), fiber optik kabloya gönderilen ışığın maksimum optik güç seviyesinin (darbe AÇIK) minimum

optik güç seviyesine oranıdır (darbe KAPALI). Bu oran, kanala lazerin sürekli dalga lazer olması sebebiyle modülatör kapalı olsa da kanala sızan ışık sebebiyle ortaya çıkmaktadır ve o sırada kanalda bulunan optik darbeyi sürekli olarak etkilemektedir. Sönümlenme oranı, faz-OTDR bazlı dağıtık akustik algılama (DAS) sistemlerinin tespit performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olan sınırlayıcı bir faktördür[1]. Ayrıca tezin ilk kısmında son zamanlarda ortaya konulan faz-OTDR sistemlerin performansını etkileyen bir husus olan lazer frekans kayması irdelenmiştir. Literatürde bir çalışma ile üç farklı lazer kaynağı kullanılarak bu etkinin sistem performansını etkilediği gösterilmiştir [15].



2. FAZ OTDR SİSTEMLERİNİN MODEL BAZLI SİNYAL ANALİZİ

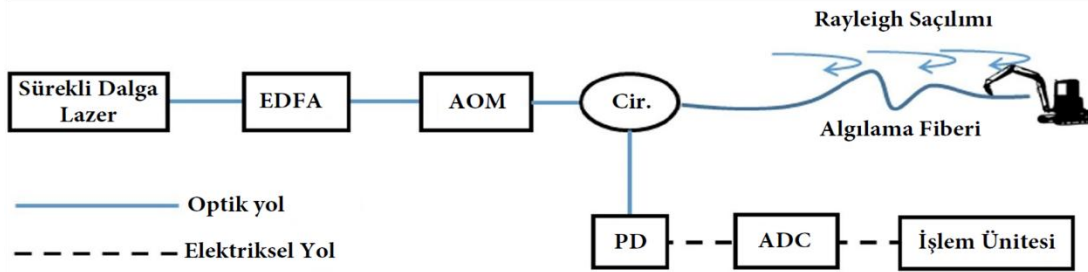
2.1 Amaç

Tezin bu kısmında, farklı sistem parametreleri ve sinyal edinim senaryoları kullanılarak dağıtık akustik algılama (DAS) sistemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için sinyal modeli üzerine çalışılmıştır. Sistem parametreleri ve sinyal edinim senaryoları simule edilerek, sönümlenme oranının, dağıtık akustik algılama sistemlerinin performansı üzerindeki etkileri ile sistem parametreleri iyileştirmelerine karşı davranışı incelemek amaçlanmıştır.

2.2 Sinyal Modeli

Bölüm 1.2’de faz-OTDR sistemlerden bahsedilmiştir. Simulasyonlarda kullanılan sistem, faza duyarlı olduğundan bu sisteme faz-OTDR denilebilir. Tipik bir faz-OTDR dağıtık akustik algılama (DAS) sistemi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu modele göre kaynak, sürekli dalga (CW) lazerdir. Lazerin çıkışı Erbium katkılı fiber yükseltici (EDFA) ile güçlendirilmiştir. Yükseltilmiş optik sinyal daha sonra bir optik darbeler oluşturan akusto-optik modülatöre (AOM) gönderilir. Akusto-optik modülatör tarafından oluşturulan optik darbe sirkülatör (Cir.) üzerinden algılama fiberine gönderilir. AOM, Şekil 2.3’te gösterildiği gibi, $T_w = 100 \text{ ns}$ darbe genişliğine ve $T_p = 0.4 \text{ ms}$ ’lik bir darbe tekrarlama periyoduna sahip olan bir elektriksel darbe treni ile beslenir. Algılayıcı fiberde seyreden optik darbe, rastgele Rayleigh saçılımına uğramaktadır. Gönderilen sürekli (CW) lazer sinyali düşük bant genişliğine sahip olduğundan geri saçılan optik sinyallerin frekansları birbirlerine çok yakındır. Bu da geri saçılan sinyalin fazına duyarlı olacak şekilde genliği değişen optik sinyale neden olur. Fiber optik kablo üzerinde etki eden (yürüme, kazma vb. gibi nedenlerden kaynaklanabilir) herhangi bir harici akustik bozukluk, geri saçılan ışıkta küçük optik faz değişikliklerine yol açar. Optik faz değişimi, fotodetektör (PD) tarafından algılanan optik ışık yoğunluğunda değişime neden olur. Fotodetektörün çıkışındaki sinyal, bir analog sinyalden dijital sinyale dönüştürücü (ADC) tarafından sayısallaştırılır ve ayrıca dijitalleştirilen sinyal işlem ünitesi tarafından işlenir. Bu sistem 10 metre çö-

zünürlüğe² sahip olan kanallardan oluşmaktadır. Bu kanallar sistemde, fiber optik kablonun sürekli bir dizi mikrofon gibi davranarak çalışmasını sağlamaktadır. Örnek olarak, 10 numaralı kanal fiber optik kablonun 100. metresini temsil etmektedir. Aynı şekilde 5000 numaralı kanal fiber optik kablonun 50. kilometresini temsil eder.



Şekil 2.1: Faz-OTDR Sistem Mimarisi

Tezin bu kısmında, doğrudan saptama yaklaşımı (herhangi bir demodülasyon olmadan doğrudan geri saçılan ışık yoğunluğu kullanılarak) ele alınmıştır; ancak aynı analiz uygun modifikasyonlar ile uyumlu tespit gibi diğer saptama yaklaşımlarına (tutarlı algılama vb.) uygulanabilir.

Daha önce bahsedildiği gibi, Faz-OTDR bazlı DAS sistemleri her iletilen optik darbe için alıcıdaki geri dönen Rayleigh geri saçılımını ölçer [16, 17]. Rayleigh saçılması, aşağıdaki özelliklere sahip doğal olarak gözlenen bir fenomendir:

- Bir fiber optik kabloya enjekte edilen optik sinyal, kablo içindeki saçılma merkezlerinden yansıdıktan sonra giriş ucunda geri alınır.
- Geri saçılan sinyalin frekansı, giriş optik sinyali ile aynıdır (elastik saçılma).
- Geri saçılan sinyal rastgele büyüklük ve faz değişikliklerine uğrar.
- Ölçülen sinyal, fotodedektöre aynı anda ulaşacak şekilde farklı saçılma merkezleri tarafından geri yansıtılan çoklu optik sinyallerin girişiminden kaynaklanır.

Bundan sonraki bölümde, açıklanan optik sistemin ayrıntılı sinyal modeli çıkartılacaktır ve bu sinyal modeli üzerinden sistem analizi yapılacaktır.

$x(t)$ fiber optik kabloya enjekte edilen sürekli dalga optik sinyalini gösterebilir,

² Işık hızı $c = 2 \times 10^8$ ve darbe genişliğinin yarısı $T_w/2 = 50$ ns ile çarpılmasıyla elde edilir.

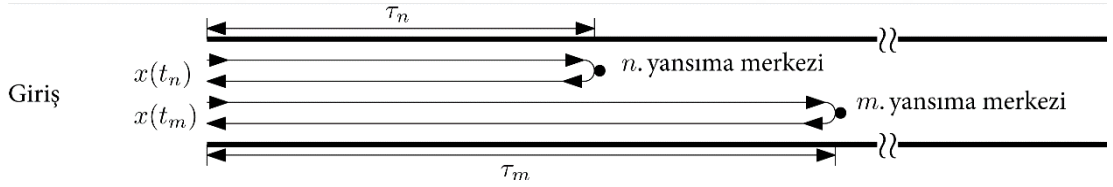
$$x(t) = E_0(t)\cos(2\pi f(t)t), \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de $E_0(t)$, kompozit elektrik şiddetini ve $f(t)$, sürekli dalga ışık kaynağının zamanla değişen anlık frekansını göstermektedir. Olası frekans kaymalarının sistem performansına etkilerini modelleyebilmek adına, ışık kaynağının merkez frekansı ilerleyen kısımlarda zamandan bağımsız olarak modellenmiştir [15, 18, 19].

m saçılım merkezi olmak üzere, $y(t, m)$, bu saçılım merkezinden geri saçılan sinyalin algılama noktasındaki (Şekil 2.1’de PD çıkışı) ifadesini gösterebilir,

$$y(t, m) = E_0(t - \tau_m)r_m\left(t - \frac{\tau_m}{2}\right)\exp(-\alpha\tau_mv)\cos(2\pi f(t - \tau_m)(t - \tau_m) + \varphi_m), \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de $r_m(t)$ m . noktası saçılım merkezindeki Rayleigh dağılımına uğramış sinyalin saçılma katsayısı, α fiber zayıflama sabiti, v optik sinyalin grup hızı ve φ_m m . saçılım merkezindeki eşit dağılıma uğramış olduğu varsayılan rastgele fazdır. $\tau_m = 2z_m/v$, z_m konumunda bulunan m . saçılma merkezinden geri saçılıma uğrayan optik sinyalin fiber optik kablo içindeki yolculuk zamanını ifade etmektedir.



Şekil 2.2: Faz-OTDR Sistem Mimarisi

Rayleigh saçılımı sinyali, fotodetektör üzerine aynı anda gelen farklı saçılma merkezlerinden yansıyan sinyallerin girişimi aracılığıyla gözlemlenebilir ve gözlemlenen sinyal optik güç olarak ifade edilebilir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, eğer $x(t_m)$ ve $x(t_n)$ farklı zamanlarda fiber optik kablodan elde edilen iki optik sinyal ise, $t_m < t_n$ olmak üzere geri saçılan sinyaller de fotodetektöre aşağıdaki koşulla aynı zamanda ulaşır.

$$t_m + \tau_m = t_n + \tau_n. \quad (2.3)$$

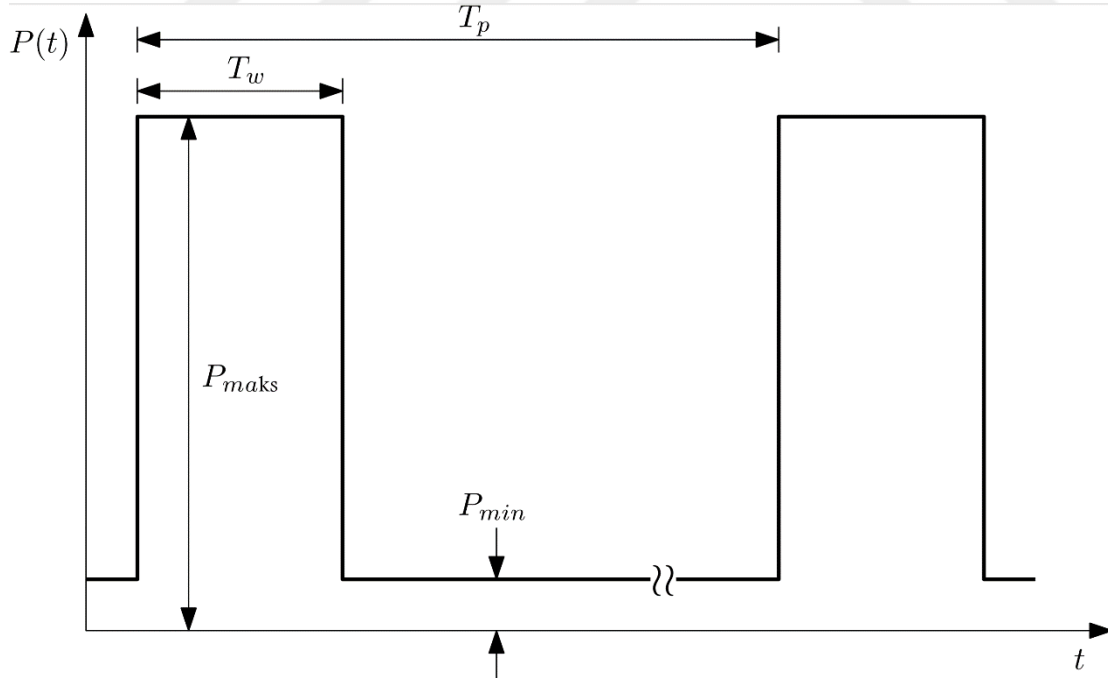
Burada $\tau_m > \tau_n$ sırasıyla m. ve n. saçılım merkezleri için fiber kablo içindeki yolculuk zamanlarını ifade etmektedir. $E_m(t)$ Denklem 2.4’de şu şekilde tanımlanır,

$$E_m(t) = E_0(t - \tau_m)r_m \left(t - \frac{\tau_m}{2}\right) \exp(-\alpha\tau_m v_g). \quad (2.4)$$

Böylece t zamanındaki fotodedektörde görülen girişim yapmış sinyal Denklem 2.5’te şu şekilde tanımlanır,

$$s(t) = \sum_{m=1}^M E_m(t) \cos(2\pi f(t - \tau_m)(t - \tau_m) + \varphi_m). \quad (2.5)$$

Burada M , Denklem 2.3’deki koşulu sağlayan t anındaki toplam saçılma merkezi sayısıdır. Faz OTDR sistemlerde, sürekli dalga ışık akusto-optik modülatörler (AOM) veya elektro-optik modülatörler (EOM) kullanılarak dikdörtgen darbeler şeklinde şekillendirir. Hem akusto-optik modülatörler (AOM) hem de elektro-optik modülatörler (EOM) Şekil 2.3’te gösterildiği gibi maksimum (AÇIK durum P_{maks}) ve minimum (KAPALI durum, P_{min}) optik gücü arasındaki oran olarak tanımlanan sonlu bir sönmüleme oranına sahiptir.



Şekil 2.3: Faz-OTDR Sistem Mimarisi

$\Pi(\cdot)$ bir dikdörtgen darbeyi belirtmesi amacıyla Denklem 2.6’da tanımlanır;

$$\Pi\left(\frac{t}{T_w}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_w \\ 0, & \text{Diğer} \end{cases}. \quad (2.6)$$

ER, optik güç sönümlenme oranını göstermesi amacıyla Denklem 2.7'de tanımlanır;

$$ER = \frac{P_{maks}}{P_{min}}, \quad (2.7)$$

$\varepsilon_m(t)$ aşağıda gösterildiği gibi Denklem 2.8'de tanımlanır;

$$\varepsilon_m(t) = \sqrt{ER} E_m(t) \quad (2.8)$$

ışık darbesi tarafından aydınlatılmayıp sürekli ışık sızıntısına maruz kalan saçılım merkezlerinden geri saçılıma uğrayan optik sinyalin elektrik alan büyüklüğünü temsil etmektedir.

Ardından $s(t)$ şu şekilde yazılabilir:

$$s(t) = \sum_{m=1}^M E_m(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) + \Delta_f)(t - \tau_m) + \varphi_m) \Pi\left(\frac{t - \tau_m}{T_w}\right) + \sum_{m=1}^M \varepsilon_m(t) \cos(2\pi f(t - \tau_m)(t - \tau_m) + \varphi_m) \left(1 - \Pi\left(\frac{t - \tau_m}{T_w}\right)\right). \quad (2.9)$$

Burada Δ_f , Akusto-optik modülatörler (AOM) tarafından sunulan merkez frekans kaymasını temsil etmektedir. Elektro-optik modülatör (EOM) etkilerini incelemek için Δ_f sifira eşitlenmelidir. Denklem 2.9 için, fiber optik kabloda herhangi bir zamanda sadece bir darbe olabileceği ve tüm tekrarların giriş ucuna geri dönmesinden sonra yeni bir darbenin gönderilebileceği koşullarını sağlayan T_p darbe tekrar oranının seçildiği varsayımı altında, tekrarlama periyodu T_p , Denklem 2.10'daki koşulu sağlayacak şekilde seçilir:

$$T_p \geq \frac{2L}{v}, \quad (2.10)$$

Burada L fiber optik kablonun uzunluğunu temsil eder.

Fotodetektörün girişi ile çıkışı arasındaki ilişki, güç hesaplama metodu olan kare kanunu ile ifade edildiğinde, Rayleigh saçılımına uğrayan sinyal Denklem 2.11'deki gibi yazılabilir:

$$I(t) = |s(t)|^2 \otimes h(t), \quad (2.11)$$

Yukarıdaki denklemde, \otimes işlemi konvolusyon operasyonunu, $h(t)$ ise fotodetektör tarafından algılanan sinyalin yüksek frekanslı kısmının filtrelenmesini temsil eden fotodetektör darbe tepkisini ifade etmektedir. Sürekli dalga ışık kaynağının, onlarca kilometreyi bulabilen fiber hat uzunluğunu kapsayabilecek hat genişliğine sahip olduğu varsayıldığında, Denklem 2.9'dan faydalanarak, $|s(t)|^2$ Denklem 2.12'deki gibi yazılır:

$$|s(t)|^2 = \left| \sum_{m=1}^M E_m(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) + \Delta_f)(t - \tau_m) + \varphi_m) \Pi\left(\frac{t - \tau_m}{T_w}\right) + \sum_{m=1}^M \varepsilon_m(t) \cos(2\pi f(t - \tau_m)(t - \tau_m) + \varphi_m) \left(1 - \Pi\left(\frac{t - \tau_m}{T_w}\right)\right) \right|^2. \quad (2.12)$$

$h(t)$ 'nin alçak geçiren filtre yapısı nedeni ile, yüksek frekanslı sinyal bileşenleri filtrelenir ve fotodetektörün çıkışı Denklem 2.13'deki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
I(t) &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M E_m^2(t) \Pi_m(t) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \varepsilon_m^2(t) (1 - \Pi_m(t)) \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=m+1}^M E_m(t) E_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n))t - 2\pi\Delta_f(\tau_m \\
&\quad - \tau_n) - \phi_{m,n}(t)) \Pi_m(t) \Pi_n(t) \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=m+1}^M \varepsilon_m(t) \varepsilon_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n))t - \phi_{m,n}(t)) (1 \\
&\quad - \Pi_m(t)) (1 - \Pi_n(t)) \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M E_m(t) \varepsilon_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) + \Delta_f - f(t - \tau_n))t - 2\pi\Delta_f\tau_m \\
&\quad - \phi_{m,n}(t)) \Pi_m(t) (1 - \Pi_n(t)) \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \varepsilon_m(t) E_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n) - \Delta_f)t + 2\pi\Delta_f\tau_n \\
&\quad - \phi_{m,n}(t)) (1 - \Pi_m(t)) \Pi_n(t).
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Denklem 2.14 koşulu altında,

$$\Pi_m(t) = \Pi\left(\frac{t - \tau_m}{T_w}\right), \tag{2.14}$$

$$\phi_{m,n}(t) = 2\pi(f(t - \tau_m)\tau_m - f(t - \tau_n)\tau_n) - \phi_m + \phi_n.$$

Denklem 2.13'nin bir ve ikinci terimi Denklem 2.15'de gösterilmiştir.

$$\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M E_m^2(t) \Pi_m(t) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \varepsilon_m^2(t) (1 - \Pi_m(t)) \tag{2.15}$$

Bu terimler DC terimlere karşılık gelir ve herhangi bir faz bağımlılığı olmadığından hedef tespiti analizi kapsamında ilgilenilmez.

Üçüncü terim Denklem 2.16'da gösterilmiş olup,

$$\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=m+1}^M E_m(t) E_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n))t - 2\pi\Delta_f(\tau_m - \tau_n) - \phi_{m,n}(t)) \Pi_m(t) \Pi_n(t) \quad (2.16)$$

aynı ışık darbesi ile aydınlatılan saçılma merkezlerinin neden olduğu girişimlere karşılık gelir ve faz-OTDR sistemleri tarafından incelenen ana sinyal kaynağını temsil eder. Darbe genişliği tipik bir faz-OTDR sistemi için yaklaşık 100 ns olduğu için, darbe içinde bulunan iki dağıtma merkezi arasındaki frekans kayması ($f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n)$) ihmal edilebilir ve Denklem 2.17'deki sadeleştirilmiş forma izin verir.

$$\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=m+1}^M E_m(t) E_n(t) \cos(2\pi\Delta_f(\tau_m - \tau_n) + \phi_{m,n}(t)) \Pi_m(t) \Pi_n(t). \quad (2.17)$$

Dördüncü terim Denklem 2.18'de gösterilmiş olup,

$$\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=m+1}^M \varepsilon_m(t) \varepsilon_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n))t - \phi_{m,n}(t)) (1 - \Pi_m(t)) (1 - \Pi_n(t)) \quad (2.18)$$

istenmeyen sürekli sızan ışık tarafından aydınlatılan saçılma merkezleri nedeniyle ortaya çıkan arka plan gürültüsüne karşılık gelir. Çarpan olarak gösterilen iki tane çevrilmiş dikdörtgen darbe, arka plan gürültüsüne neden olan saçılma merkezlerinin ışık atımı tarafından aydınlatılan bölge içinde olmadıkları sürece fiber optik kablo nun herhangi bir noktasında olabileceğini göstermektedir. Bu saçılma merkezleri arasındaki rastgele mesafelerden dolayı geri yansıyan Rayleigh saçılımları arasındaki faz farkları ihmal edilemeyecek boyutta olmaktadır. Bu dağıtma merkezlerinin keyfi yerlerinden dolayı, sadeleştirme mümkün değildir ve bu koşulun olduğu gibi simüle edilmesi gerekir.

Son olarak, beşinci ve altıncı terimler Denklem 2.19'da gösterilmiş olup,

$$\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M E_m(t) \varepsilon_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) + \Delta_f - f(t - \tau_n))t - 2\pi\Delta_f\tau_m - \phi_{m,n}(t)) \Pi_m(t) (1 - \Pi_n(t))$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \varepsilon_m(t) E_n(t) \cos(2\pi(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n) - \Delta_f)t + 2\pi\Delta_f\tau_n \\
& \quad - \phi_{m,n}(t))(1 - \Pi_m(t))\Pi_n(t), \tag{2.19}
\end{aligned}$$

darbenin içinde yer alan saçılma merkezlerinden geri yansıyan ışığın, darbe içerisinde bulunmayan saçılma merkezlerinden geri yansıyan ışık ile etkileşimini gösterir. Işık kaynağının merkez frekansı zamana bağlı olduğunda $(f(t - \tau_m) + \Delta_f - f(t - \tau_n))$ ve $(f(t - \tau_m) - f(t - \tau_n) - \Delta_f)$ ifadeleri, optik darbe içindeki titreşim kaynakları ile sızan ışık tarafından aydınlatılmış titreşim kaynakları arasında muhtemel bir bağlantı olduğunu gösterir. Tipik bir faz-OTDR tasarımında, algılanan sinyal, fotodetektörde ve Denklem 2.11'de $h(t)$ ile modellenen analog-dijital dönüştürücünün (ADC) girişinde alçak geçirgen filtrelenir. Notasyonel açıklık için, $h(t)$ 'nin etkisi yüksek frekanslı bileşenlerin filtrelenmesi olarak yansıtılmıştır. Bununla birlikte, Denklem 2.19, $s(t)$ üzerinde çalışan alçak geçirgen filtrelerin spesifik frekans karakteristiğine ve sürekli dalga ışık kaynağının frekans kayma karakteristiğine bağlı olarak, istenmeyen fazla gücün dijitalize sinyale sızabileceğini göstermektedir. EOM kullanıldığında, $\Delta_f = 0$ sağlandığını ve istenmeyen fazla gücün artarak sistem performansını azalttığını unutmamak gerekir. Ek olarak, darbe içinde bulunmayan saçılma merkezleri kablo üzerinde herhangi bir yerde olabileceğinden, sadeleştirilmiş varsayımlar yapılamayacağı ve bu durumların olduğu gibi simüle edilmesi gerektiği göz önüne alınmalıdır.

2.3 Simülasyonlar ve Deneyler

Denklem 2.13, Rayleigh saçılımı sebebiyle geri yansıyan optik sinyal gücünün modelini oluşturmayı sağlamaktadır. Denklem 2.13 simüle edilerek faz-OTDR sistem performansında sönümlenme oranının (ER) etkileri hakkında bilgi edinilebilir. Bu bölümde, simülasyonlarda kullanılan sistem parametreleri ve fiber kablo uzunluğunun yetersiz sönümlenme oranına sahip faz-OTDR sistemin sinyal kalitesi üzerine olan etkisini gözlemlemek için oluşturulan basit deney düzeneği açıklanmaktadır.

2.3.1 Güç seviyeleri, güç normalizasyonu ve fiber optik kablo uzunluk kaybı

Bildirilen tüm güç seviyeleri, zaman içinde yakalanan önceki sinyal izinden $(t - 1)$ zamanında yakalanan tüm kanallar için bir sinyal izinin çıkarılmasıyla elde edilen

zaman farklılaştırılmış sinyallerdir [13, 17]. Karşılaştırmaları daha kolay yapmak için güç seviyeleri normalize edilir. Maksimum sinyal gücünü elde etmek için ilk (en yakın) kanalda büyük bir aktivite (100 nm) uygulanır. Daha sonra tüm güç değerleri bu maksimum güç seviyesine bölünür. Tüm simülasyon için fiber kablonun kendi iç kaybı olan 0.2 dB/km olarak alınmıştır ve bir kanal uzunluğu 10 m sabit olarak alınmıştır. Sonuç olarak toplam kanal sayısı fiber hat uzunluğunun 10 metreye bölünmesiyle hesaplanır. Güç, 160 ms'lik bir zaman pencere büyüklüğü ile anlık güç değerlerinin çalışma ortalaması olarak hesaplanır.

2.3.2 Lazer merkez frekans kayması

Lazer kaynağının anlık frekansı Denklem 2.20'deki gibi ifade edilir,

$$f(t) = f_0 + f_d(t), \quad (2.20)$$

f_0 lazer kaynağının başlangıç frekansıdır (129.03226 THz) ve $f_d(t)$ t zamanındaki lazer kaynağının frekans kaymasını temsil eder. Bu uzun süreli kayma ve kısa süreli (iki darbe arası) olarak modellenabilir [15]. Bütün simülasyonlarda $f_d(t)$ Denklem 2.21'deki gibi modellenir,

$$f_d(t) = \omega t + \eta, \quad (2.21)$$

ω uzun süreli kaymayı ifade eden sabit eğimi ve η Gauss dağılımlı rastgele değişken kısa süreli kaymaları ifade eder. Bu değişkenlerin değerleri simülasyon çalışmaları aşamasında açıklanacaktır.

2.3.3 Darbe frekans kayması: AOM ve EOM

Bölüm 2.2'de bahsedildiği gibi, tipik akusto-optik modülatörler(AOM) darbe süresi içinde sürekli ışık kaynağının anlık frekansını, bir frekans kayması Δ_f ile kaydırmaktadır. Aksi belirtilmediği sürece, Δ_f bütün simülasyonlarda 200 MHz olarak alınmıştır. Denklem 2.19'a göre, frekans kaymasının sızan gürültü gücünü azaltmada olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ancak, elektro-optik modülatör (EOM) kullanım durumunda ($\Delta_f = 0$), elektro-optik modülatör kullanılan faz-OTDR sistemler için daha düşük (daha iyi) bir sönümlenme oranı (ER) değeri gerektiğini ima etmektedir.

2.3.4 Aktivite büyüklükleri ve dağılımları

Bu kısımda test edilen fiber kablo (FUT) boyunca, fiber optik saçılım merkezlerinin bulunduğu yerlerde çeşitli seviyelerde aktiviteler yapılır ve bu aktiviteler sonucu elde edilen sinyal güçleri ölçülür [12]. Bu aktiviteler her simülasyon zamanı örneği için sıfır ortalamalı Gauss dağılımına sahip rastgele değişkenlerdir. Zayıf titreşimler 1 nm 'lik standart sapmaya sahip aktiviteler olarak modellenmiştir. Güçlü titreşimler, 50 nm 'lik standart sapmaya sahip aktiviteler olarak modellenmiştir. Simüle edilen aktivitelerin maksimum standart sapması 50 nm 'dir. 5 farklı aktivite seviyesi (en zayıftan, en güçlüye) kullanılmıştır: $\mathcal{N}(0,1)$, $\mathcal{N}(0,5)$, $\mathcal{N}(0,10)$, $\mathcal{N}(0,25)$, ve $\mathcal{N}(0,50)$. Fiber optik kablonun gömülü bulunduğu toprağın sönümlenme etkisini modellemek için, ardışık izler alçak geçiren filtre tarafından filtrelenmiştir (zaman alanında). Filtreye ait f_{pass} ve f_{stop} değerleri kullanıldıkları yerlerde açıklanacaktır.

2.3.5 Sönümlenme oranı (ER) değerleri

Rafta hazır akusto-optik modülatörler ile elde edilebilen tipik sönümlenme oranı (ER) değerleri $[-50\text{ dB}, -70\text{ dB}]$ aralığındadır. Bununla birlikte, daha düşük (daha iyi) sönümlenme oranı değerlerini elde etmek için ileri teknikler literatürde bulunabilir [1]. Simülasyonlar çeşitli sönümlenme oranı değerlerine göre gerçekleştirilmiştir ve her bir simülasyon ile ilgili sönümlenme oranı değeri not edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan sönümlenme oranı değerlerinin tamamı: -50 dB , -70 dB , -100 dB , -120 dB ve Inf olarak ifade edilen ideal senaryodur.

2.3.6 ADC bit derinliği ve kenar yumuşatma (Anti-Aliasing) filtresi

Fotodedektör tarafından tespit edilen optik sinyal, olay tespiti ve sınıflandırması için işlenmeden önce bir ADC tarafından sayısallaştırılır. ADC'nin bit derinliğinin sayısallaştırılmış sinyalin kalitesi üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Rafta hazır olarak kullanılan ADC üniteleri, 16 ila 24 bit çözünürlüğe sahip olup genelde 2 bit gürültü ile çözünürlük kaybı sağlar ve 14 ila 22 bit gürültü/serbest bit çözünürlüğü sağlar.

ADC ünitesinin kenar yumuşatma (anti-aliasing) filtresi dikkate alınması gereken bir diğer faktördür. Tipik olarak, fotodedektörün çıkışındaki analog sinyal, sayısallaştırılmadan önce gürültüyü azaltmak için alçak geçiren bir filtreden geçirilir. Bu sinyale, ADC'nin girişinde bir kenar yumuşatma filtresi uygulanır. Bu alçak geçiren filtrelerin özelliklerine bağlı olarak, olası çakışan bir geçiş bölgesine karşılık gelen

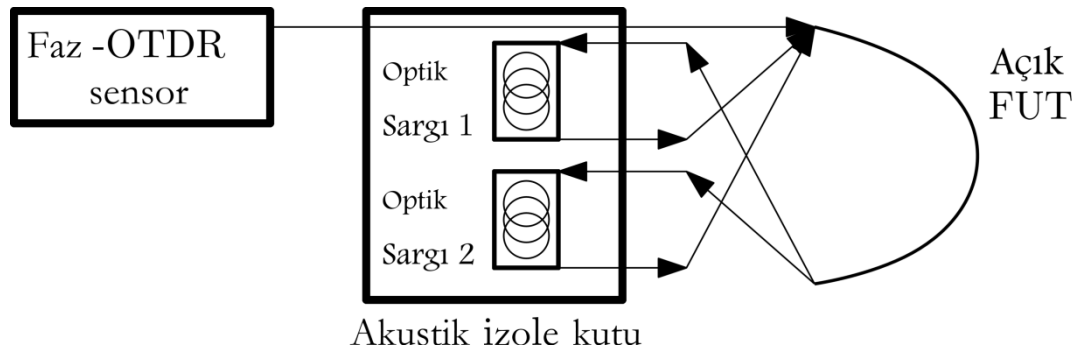
belirli orta frekans bileşenleri sayısallaştırılmış sinyale karışabilir. Simüle edilen bit derinlikleri ve frekans özellikleri ilgili olduğu kısımda not edilmiştir.

2.3.7 Test edilen fiber hat uzunluğu (FUT)

Simülasyonlar dört farklı fiber optik kablo uzunluğu (FUT) (5 km, 10 km, 20 km ve 40 km) için gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda amaçlanan, daha uzun fiber optik kablo (FUT) kullanıldığında sönümlenme oranının (ER) kötüleşen etkisini göstermektir. Sorgulayıcının darbe uzunluğu sabit olduğu için darbe uzunluğuna yerleştirilmiş olan kanal sorgulama ile ilgili ışık gücü sabittir [1]. Bununla birlikte, ideal uzunluktaki akusto-optik modülatör (AOM) / elektro-optik modülatör (EOM) davranışı (sonlu sönümlenme oranı) nedeniyle tam kablo uzunluğu boyunca paketlenen toplam sızdırmaz ışık gücü, kablo uzunluğu arttıkça artar. Bir başka deyişle, tam kablo uzunluğu arttıkça aktif bölgeye denk gelen darbe uzunluğunun tam kablo uzunluğuna oranı azalacaktır.

2.3.8 Laboratuvar çalışması

Laboratuvar ölçümleri Şekil 2.4'de gösterilen fiber optik kablo uzunluğuna dayalı kurulumdan elde edilmiştir. Her bir gecikme hattı 25 km uzunluğunda olup toplam fiber optik kablo (FUT) uzunluğu 50 km'dir. Sorgulama darbeleri, sönümlenme oranı (ER) değeri -65 dB olan bir akusto-optik modülatör (AOM) kullanılarak elde edilir. Her bir fiber optik sargı 25 km uzunluğundadır ve her iki fiber optik sargı akustik olarak yalıtılmış kutunun içinde bulunmaktadır. Fiber optik sargılar arasındaki bağlantı uzunluğu 30 metredir.

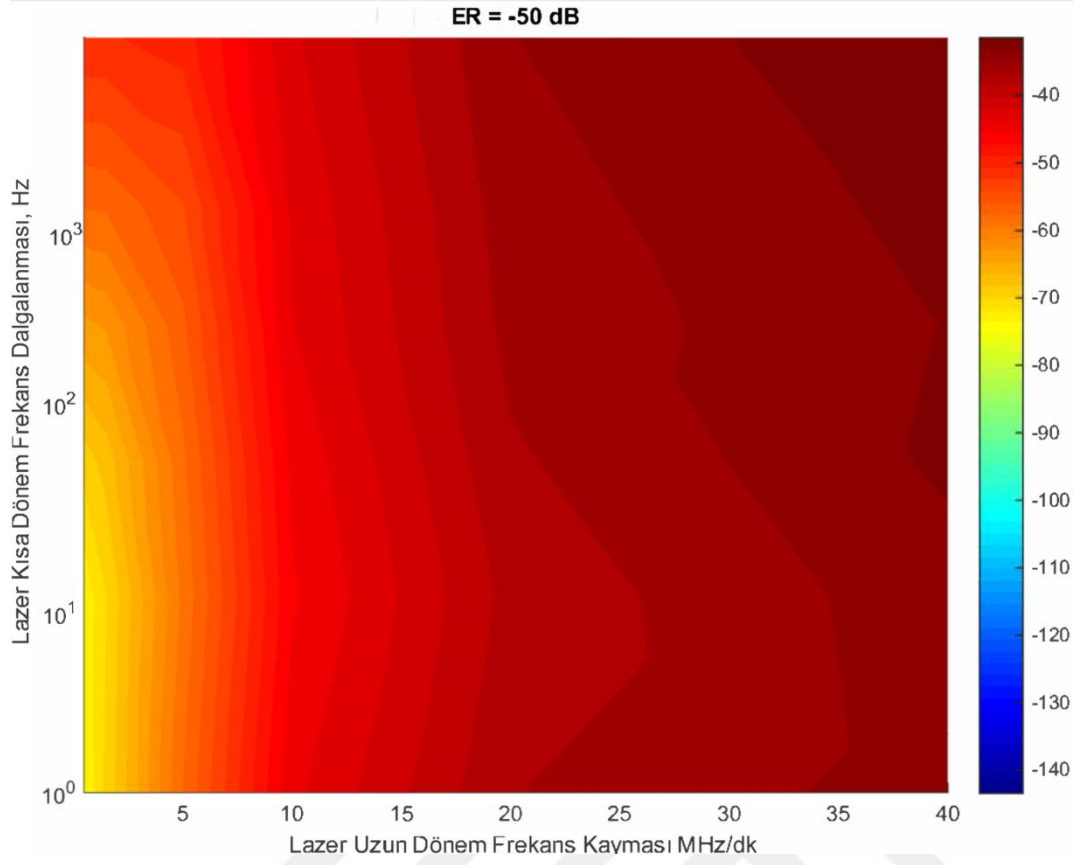


Şekil 2.4: Faz-OTDR Sistem Mimarisi

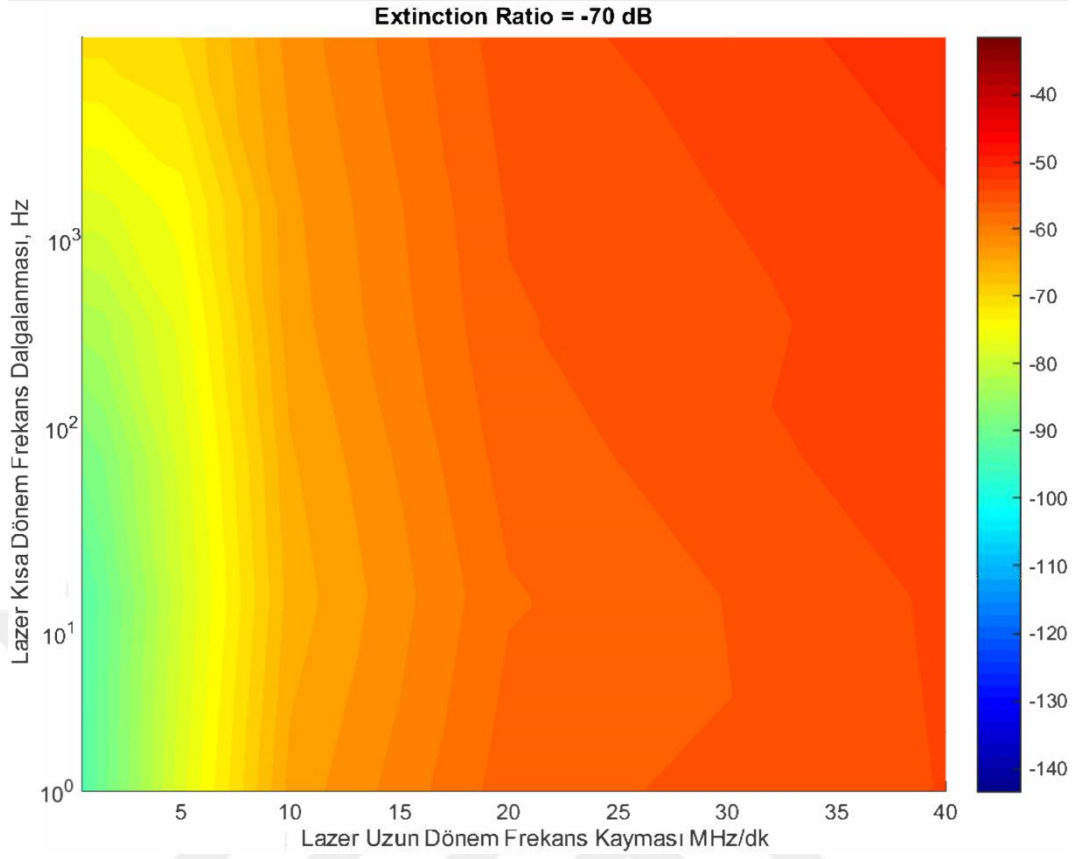
2.4 Simülasyonlar ve Deneyler

2.4.1 Lazer merkez frekans kayması etkileri

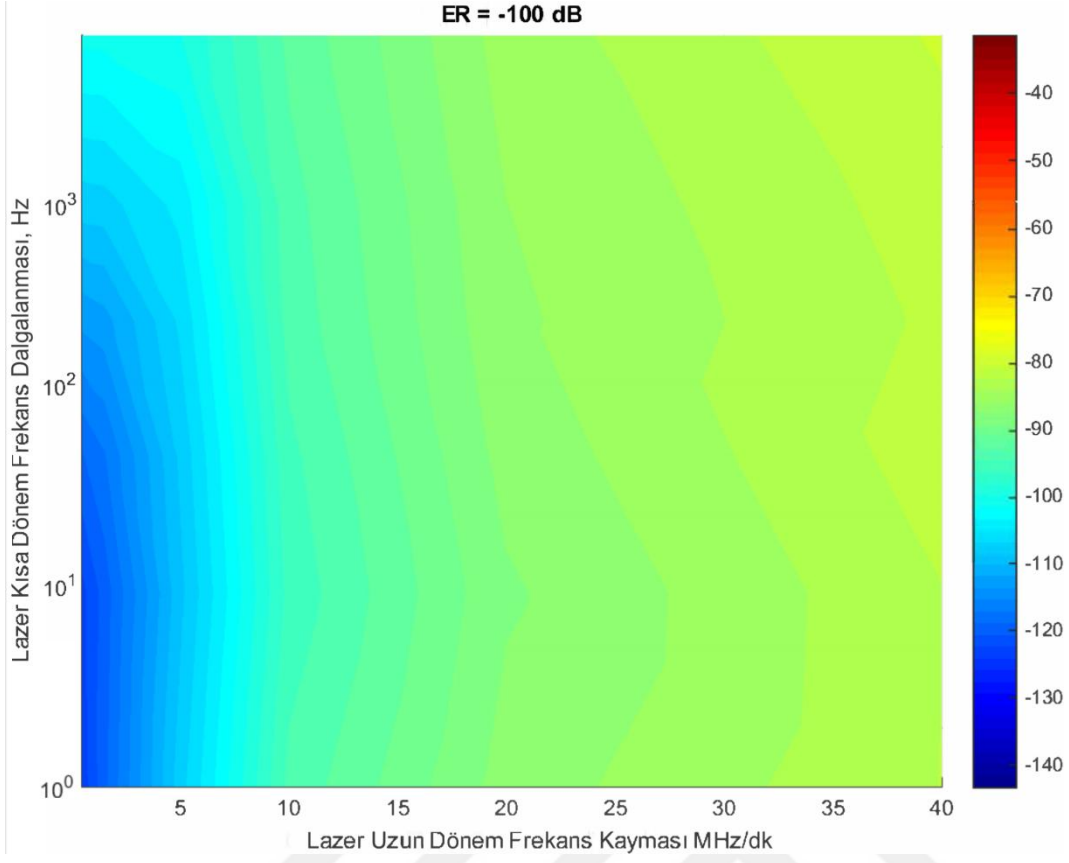
Fiber optik kablo ile etkileşime giren herhangi bir titreşim kaynağı olmadığında, çeşitli sönümlenme oranı (ER) değerleri için alınan sinyalin optik gücüne, lazer kaynağının uzun süreli frekans kayması ve kısa süreli (iki ardışık darbe arası) dalgalanmaların etkileri analiz edilmiştir. Yani alınan sinyal sadece gürültü içermektedir ve herhangi bir aktivite bulunmamaktadır. Simülasyon sonuçları Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 incelendiği zaman, lazer kaynağındaki kararsızlığın, sönümlenme oranı yetersiz olduğunda sistem performansını daha şiddetli bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Sönümlenme oranı iyileştiği Şekil 2.7 ($ER = -100 \text{ dB}$) ve Şekil 2.8 ($ER = -120 \text{ dB}$) incelendiği zaman, gürültü seviyesinin -90 dB seviyelerine düştüğünü ve daha küçük aktivite seviyesine sahip aktivitelerin (yürüme gibi) gürültü seviyesinde kaybolmayarak tespit edilebilirliği artmaktadır. Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8 aynı zamanda kısa süreli frekans dalgalanmasının sistem performansı üzerinde daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



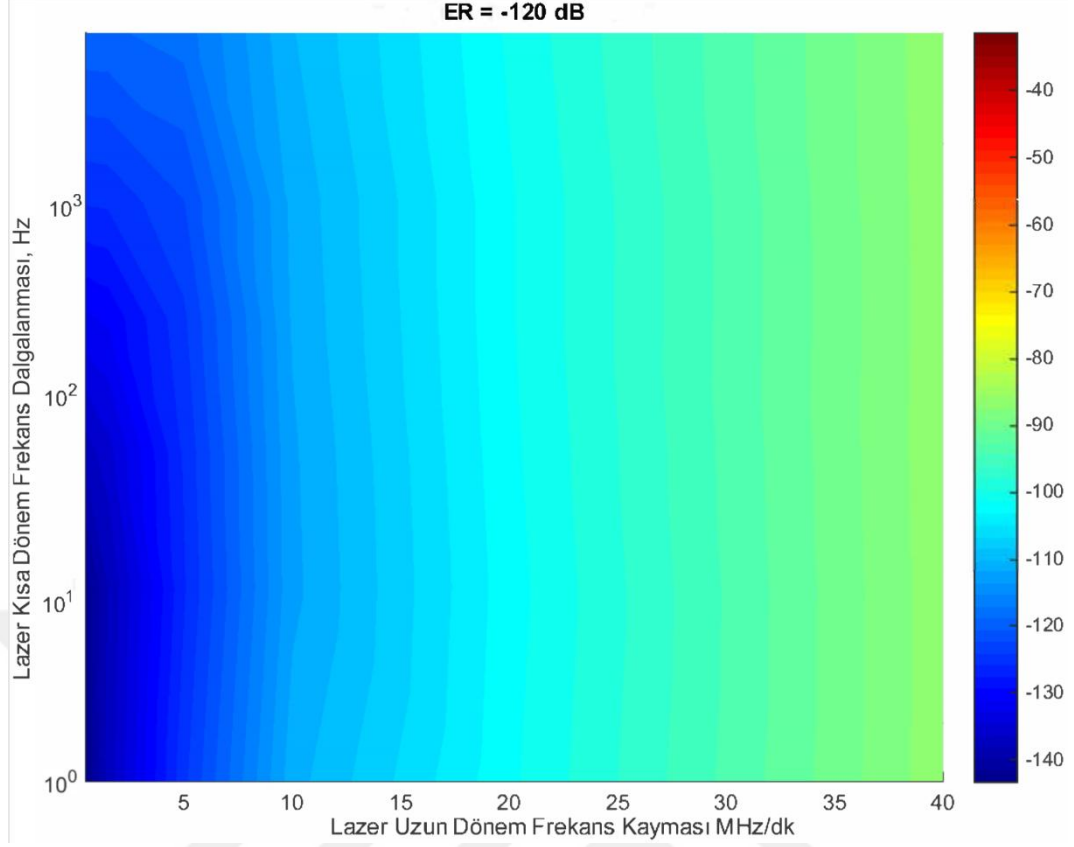
Şekil 2.5: Sönümleme Oranı (ER) -50 dB için kanal 10'daki optik gücü gösteren, lazer kaynağının uzun dönem frekans kayması, kısa süreli frekans dalgalanması grafiği.



Şekil 2.6: Sönümleme Oranı (ER) -70 dB için kanal 10'daki optik gücü gösteren, lazer kaynağının uzun dönem frekans kayması, kısa süreli frekans dalgalanması grafiği.



Şekil 2.7: Sönümlenme Oranı (ER) -100 dB için kanal 10'daki optik gücü gösteren, lazer kaynağının uzun dönem frekans kayması, kısa süreli frekans dalgalanması grafiği.



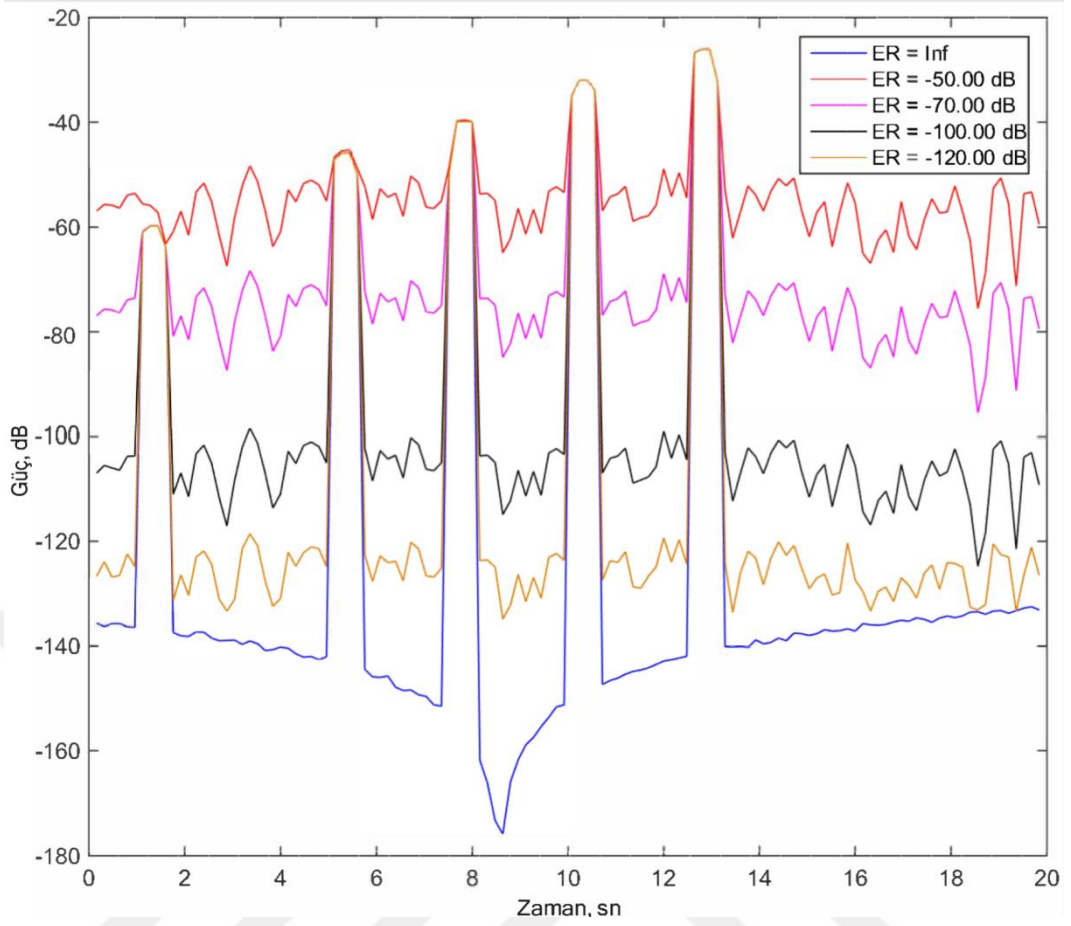
Şekil 2.8: Sönümlenme Oranı (ER) -120 dB için kanal $10'$ daki optik gücü gösteren, lazer kaynağının uzun dönem frekans kayması, kısa süreli frekans dalgalanması grafiği.

2.4.2 Sönümlenme oranı (ER) değerlerinin aktivite tespiti üzerine etkileri

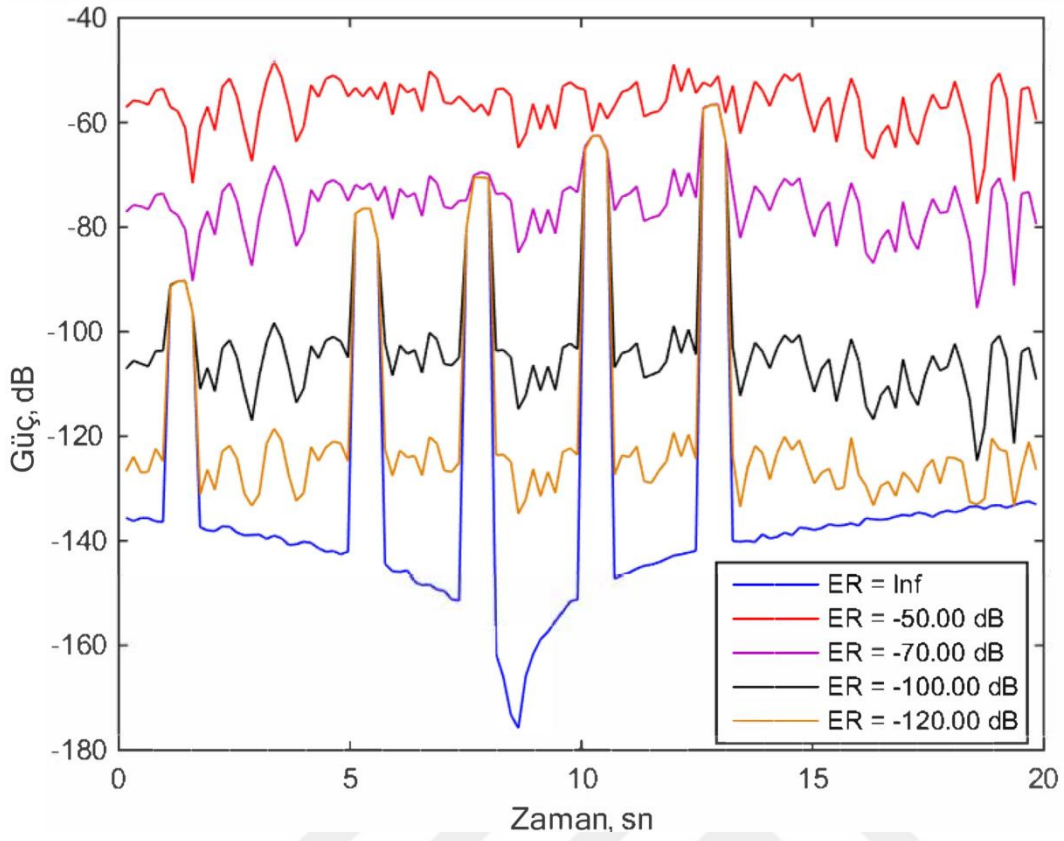
Şekil 2.9 sönümlenme oranının aktivite tespit performansına olan etkilerini göstermektedir. Bu deneyde beş farklı büyüklükte aktivite kanal $10'$ da farklı zamanlarda simüle edilmiştir. İlk aktivite, $[1.0 \text{ sn} - 1.5 \text{ sn}]$ zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,1)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. İkinci aktivite, $[5.0 \text{ sn} - 5.5 \text{ sn}]$ zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,5)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Üçüncü aktivite, $[7.5 \text{ sn} - 8.0 \text{ sn}]$ zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,10)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Dördüncü aktivite, $[10.0 \text{ sn} - 10.5 \text{ sn}]$ zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,25)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Son aktivite, $[12.5 \text{ sn} - 13.0 \text{ sn}]$ zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,50)$ seviyesinde saçılım

merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Bu aktiviteler zaman alanında alçak geçirgen filtreden geçirilmemiştir. Şekil 2.9, $ER = Inf$ (mavi renk), fiber optik kabloda sızıntı bulunmayan ideal duruma karşılık gelir. $ER = Inf$ durumu için, tüm aktiviteler yüksek sinyal gücü seviyesi ile algılanabilir. Öte yandan $ER = -50 \text{ dB}$ (kırmızı) olduğunda, 1 nm ve 5 nm seviyelerindeki aktiviteler tespit edilemez ve 50 nm gibi yüksek seviyedeki aktivitelerin Sinyal-Gürültü oranı (SNR) büyük ölçüde azalır. Sönümlenme oranının iyileştiği deneylerde ($ER = -70 \text{ dB}$ ve üzeri) arka plan-daki gürültü seviyesinin azalması sebebiyle olaylar daha kolay tespit edilebilir. Bu duruma örnek olarak $[1.0 \text{ sn} - 1.5 \text{ sn}]$ saniye aralığındaki ilk aktivite (1 nm); $ER = -50 \text{ dB}$ iken aktiviteye gürültü seviyesinin üzerinde olmadığı için görünmezken, $ER = -120 \text{ dB}$ (sarı) iken aynı aktivitenin sinyal gücü yaklaşık 60 dB seviyelerindedir.

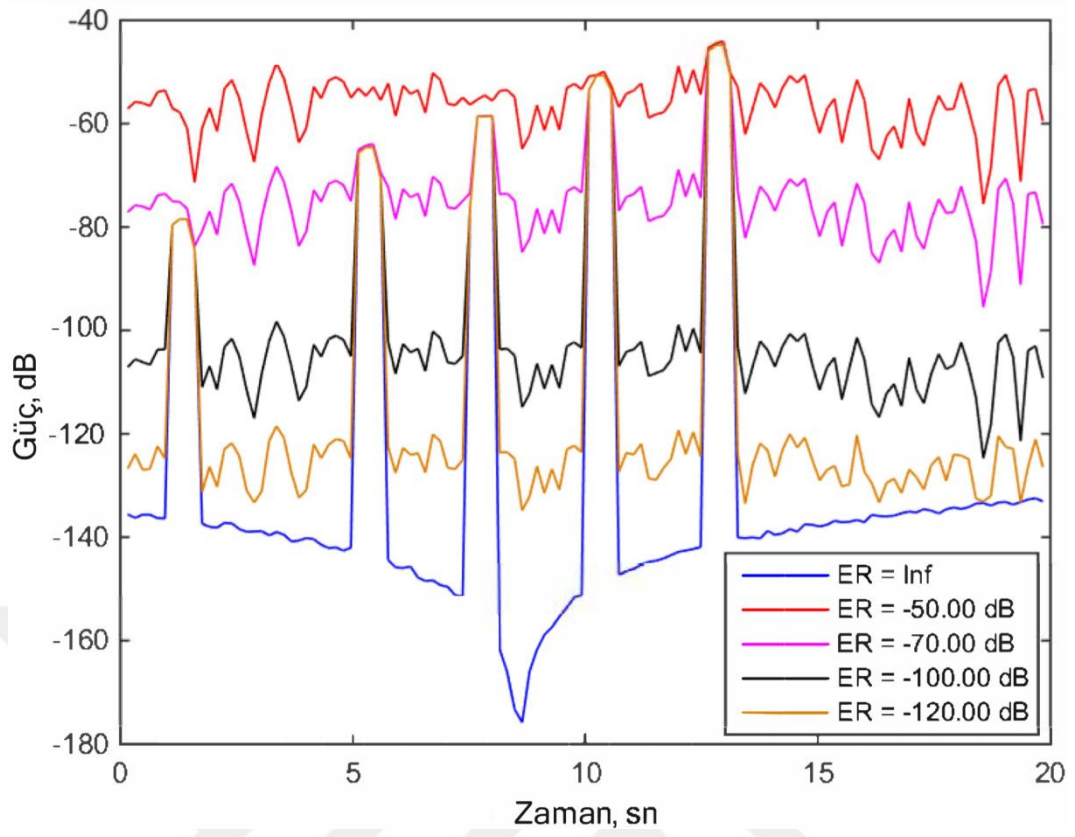
Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13, saçılma merkezi konumlarına uygulanan aktivitelere, farklı frekans değerlerine sahip zaman alanında alçak geçirgen filtreler uygulanarak elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Daha düşük kesim frekansına ($f_{pass} = 0.05\pi \text{ Hz}$, $f_{stop} = 0.10\pi \text{ Hz}$ ve $f_{pass} = 0.25\pi \text{ Hz}$, $f_{stop} = 0.30\pi \text{ Hz}$) sahip (Şekil 2.10 ve Şekil 2.11), düşük geçirgen filtreler, saçılım merkezlerinin konumları daha yavaş değişikliklere sebep olmaktadır. Saçılım merkezlerinin konumlarını daha fazla değiştirecek etkiye sahip aktiviteler daha yüksek kesim frekanslarına sahip (Şekil 2.12 ve Şekil 2.13), $f_{pass} = 0.50\pi \text{ Hz}$, $f_{stop} = 0.55\pi \text{ Hz}$ ve $f_{pass} = 0.80\pi \text{ Hz}$, $f_{stop} = 0.85\pi \text{ Hz}$ frekans aralığındadır. Bu sebeple saçılma merkezlerini daha çok hareket ettirdiği için, oluşturulan etkinin saptanması daha kolay olacaktır.



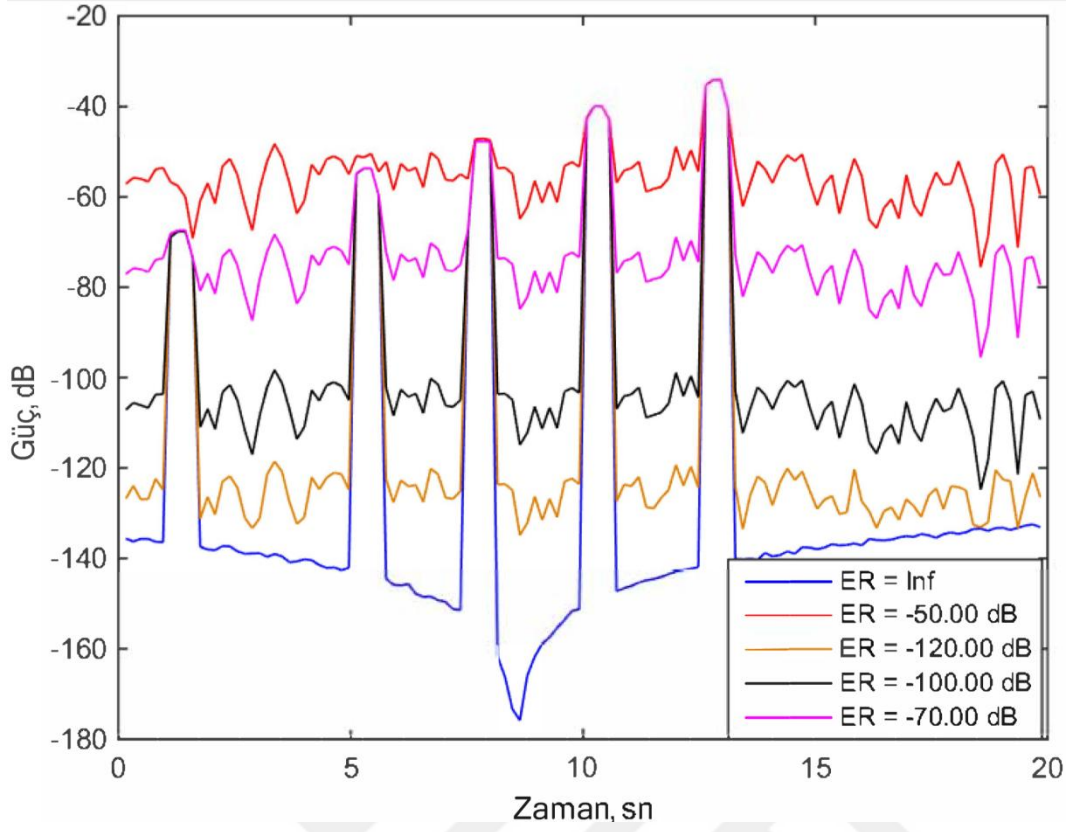
Şekil 2.9: Çeşitli sönmüleme oranları (ER) altında, kanal 10'daki farklı seviyelerde titreşim olayları [soldan sağa doğru 1, 5, 10, 25 ve 50 nm] için elde edilen optik sinyal gücü.



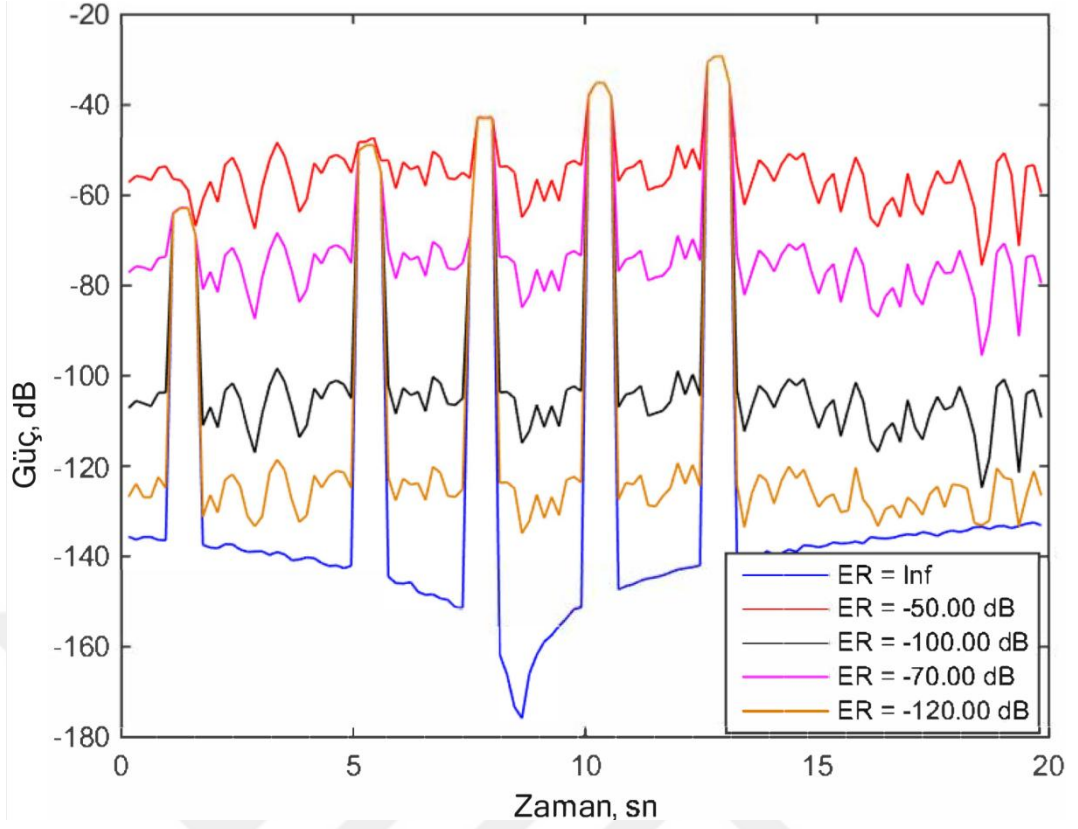
Şekil 2.10: Çeşitli sönümlenme oranları (ER) altında, kanal 10'daki farklı seviyelerde titreşim olayları [soldan sağa doğru 1, 5, 10, 25 ve 50 nm] için elde edilen optik sinyal gücü. Uygulanan alçak geçirgen filtrenin karakteristiği $f_{pass} = 0.05\pi$ Hz, $f_{stop} = 0.10\pi$ Hz'dir.



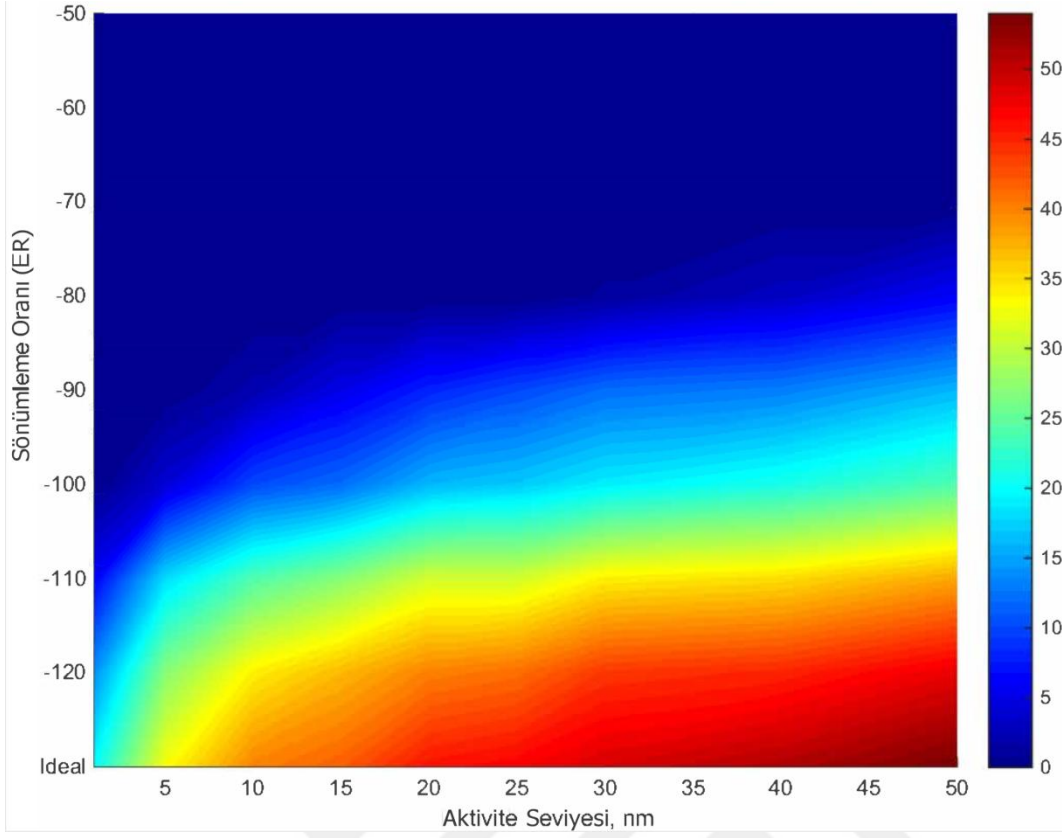
Şekil 2.11: Çeşitli sönümlenme oranları (ER) altında, kanal 10'daki farklı seviyelerde titreşim olayları [soldan sağa doğru 1, 5, 10, 25 ve 50 nm] için elde edilen optik sinyal gücü. Uygulanan alçak geçirgen filtrenin karakteristiği $f_{pass} = 0.25\pi$ Hz, $f_{stop} = 0.30\pi$ Hz'dir.



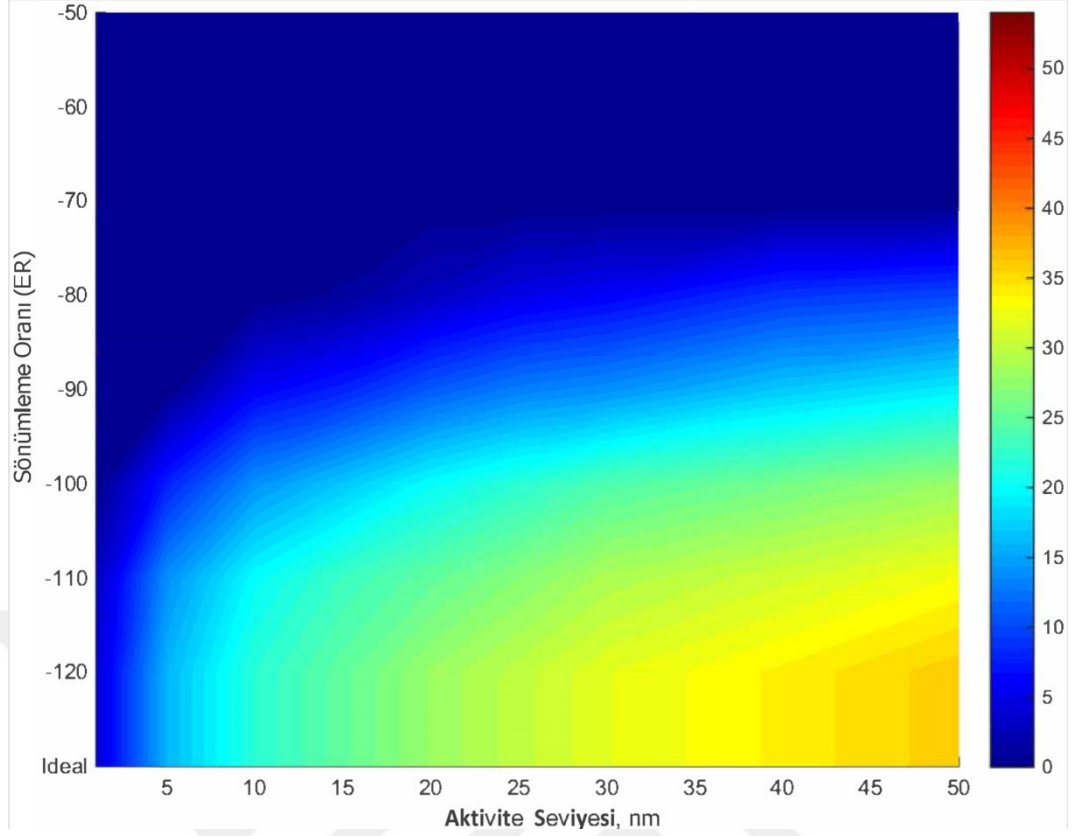
Şekil 2.12: Çeşitli sönümlenme oranları (ER) altında, kanal 10'daki farklı seviyelerde titreşim olayları [soldan sağa doğru 1, 5, 10, 25 ve 50 nm] için elde edilen optik sinyal gücü. Uygulanan alçak geçiren filtrenin karakteristiği $f_{pass} = 0.50\pi$ Hz, $f_{stop} = 0.55\pi$ Hz'dir.



Şekil 2.13: Çeşitli sönümlenme oranları (ER) altında, kanal 10'daki farklı seviyelerde titreşim olayları [soldan sağa doğru 1, 5, 10, 25 ve 50 nm] için elde edilen optik sinyal gücü. Uygulanan alçak geçiren filtrenin karakteristiği $f_{pass} = 0.80\pi$ Hz, $f_{stop} = 0.85\pi$ Hz'dir.



Şekil 2.14: Kanal 10'daki farklı sönümlenme oranları (ER) ve aktivite seviyeleri için alınan optik sinyal gücü.

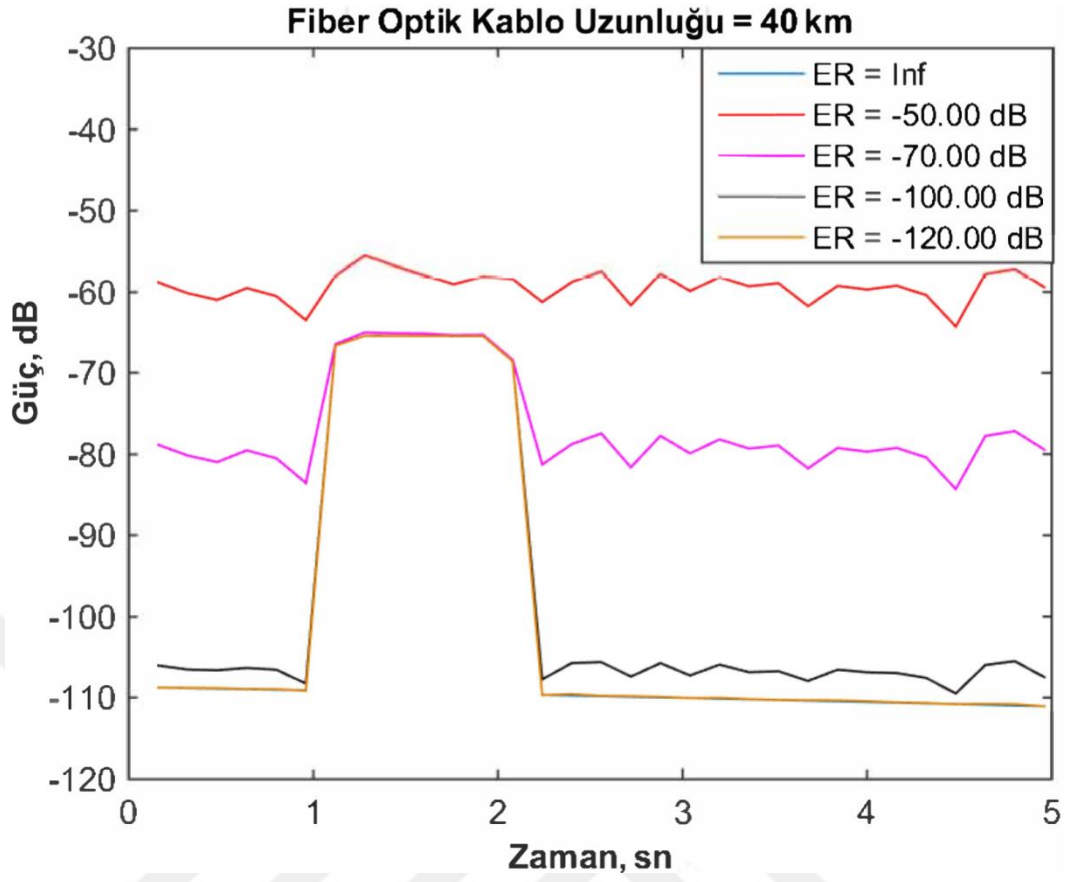


Şekil 2.15: Kanal 3500'daki farklı sönümlenme oranları (ER) ve aktivite seviyeleri için alınan optik sinyal gücü.

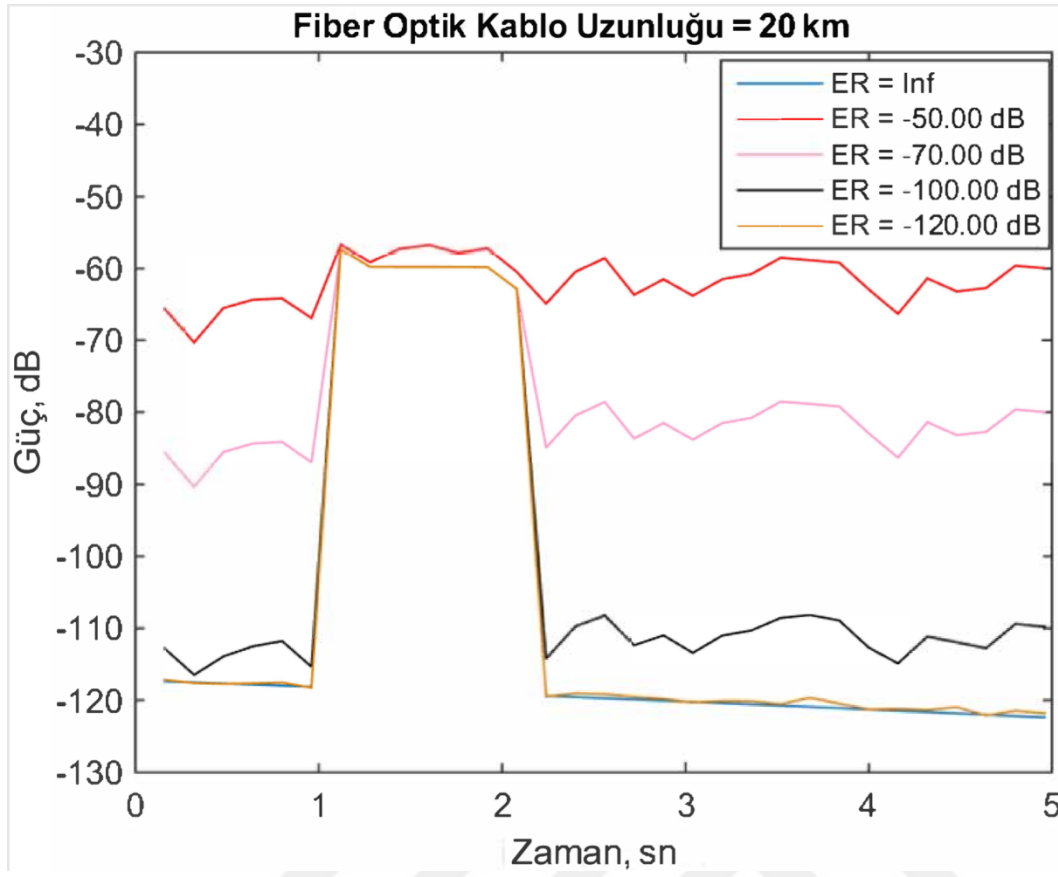
Fiber optik kablo üzerindeki iki farklı kanal (10. ve 3500.) seçilmiştir. Kanallar seçilirken ilk kanalları temsil eden 10. kanal ve son kanalları temsil etmesi için 3500. kanal seçilmiştir. Farklı sönümlenme oranları ve aktivite seviyeleri için bu kanalların alınan sinyal gücü incelenmiştir. 10. kanal için Şekil 2.14 ve 3500. kanal için Şekil 2.15 ısı haritaları elde edilmiştir. Mavi renk ile görülen 0 dB 'lik sinyal gücü, uygulanan aktivitenin tespit edilemediği duruma karşılık gelir, yani aktivite sinyali gücü, arka plan gürültüsünden daha düşüktür. Isı haritaları, sinyal gücü seviyesi, aktivite seviyesi arttıkça ve sönümlenme oranı değeri azaldıkça (iyileştikçe) arttığını gösterir. Isı haritası karakteristiği kanal 10 ve kanal 3500 için aynıdır, tek fark fiber optik kablo kaybı sebebiyle yüksek kanalda (kanal 3500) sinyal gücünün azaltılmasıdır. Bu simülasyondan çıkartılan sonuç, "aktivitelerin tespit edilmesi için, ya aktivite seviyeleri artırılmalı ya da düşük (daha iyi) sönümlenme oranına sahip sistem tasarlanmalıdır" şeklindedir.

2.4.3 Fiber hat uzunluğunun (FUT) aktivite tespitine etkileri

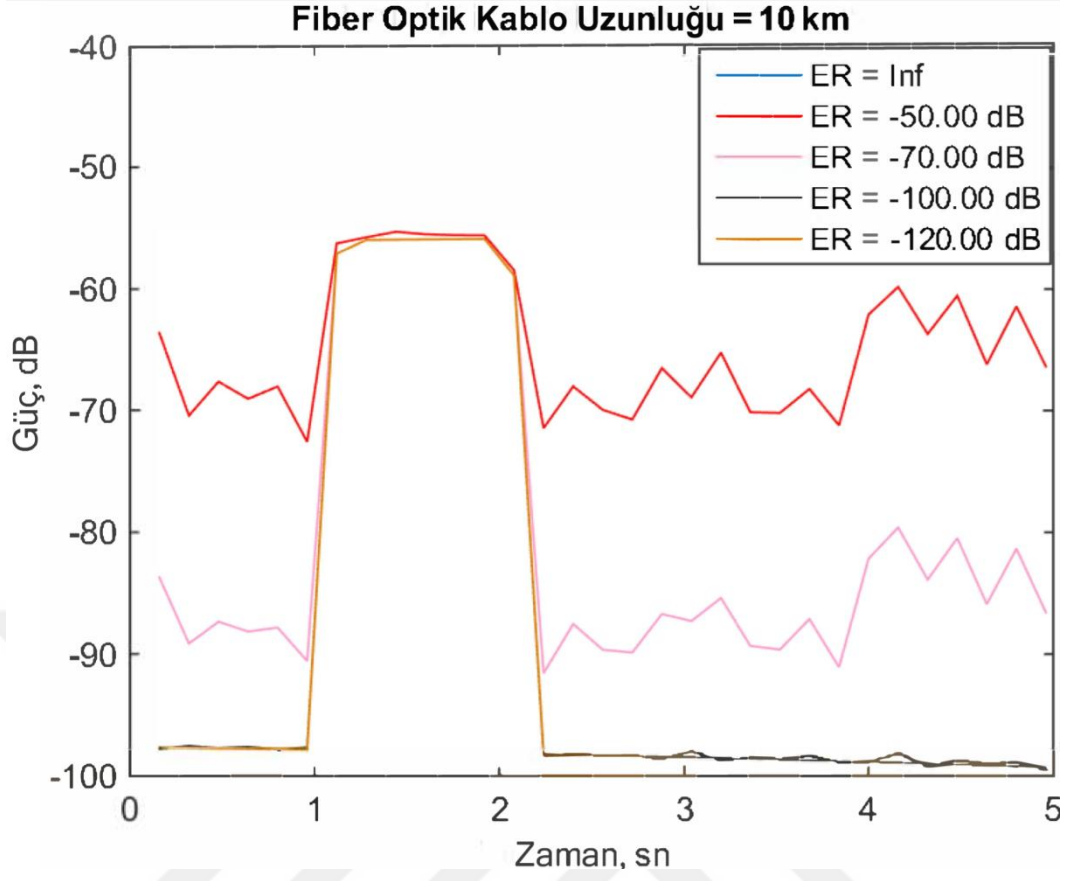
Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18 ve Şekil 2.19, fiber optik kablo boyu uzunluğunun aktivite tespit performansına olan etkisini göstermektedir. Dört farklı (5 km, 10 km, 20 km ve 40 km) fiber optik kablo uzunluğu için simülasyonlar yapılmıştır. Simüle edilen aktivite senaryosu, [1.0 sn - 2.0 sn] zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,10)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle elde edilmiştir. Farklı sönümlenme oranı değerleri [$ER = -50$ dB, $ER = -70$ dB, $ER = -100$ dB, $ER = -120$ dB, $ER = Inf$] için aynı aktivite senaryosu farklı fiber optik kablo uzunlukları ile simüle edilmiştir. Şekil 2.19 ve Şekil 2.18 incelenirse, 5 km ve 10 km fiber optik kablo uzunluklarında, tüm sönümlenme oranı değerleri için uygulanan aktivitenin tespiti (farklı sinyal gücü ile) yapılabilmektedir. Şekil 2.17 ve Şekil 2.16 incelendiği zaman, sönümlenme oranı -50 dB (kırmızı) uygulanan aktiviteyi tespit edememiştir ve diğer sönümlenme oranlarına karşılık gelen sinyal güçleri ise Şekil 19 ve Şekil 18'deki sinyal gücü seviyelerine göre düşük kalmıştır. Bu sonuçlar ile görüldüğü üzere fiber optik kablo uzadıkça aktivite tespiti zorlaşmaktadır [1]. Bunun nedeni, artan fiber optik kablo uzunluğu ile birlikte kablo içindeki sızan ışık optik gücünün artmasıdır. Buradan çıkartılan sonuç, algılama sisteminin uzun fiber hatlar boyunca kullanılacak olması durumunda sistem tasarımında sönümlenme oranı değeri olabildiğince düşük optik komponentlerin seçilmesinin önemidir.



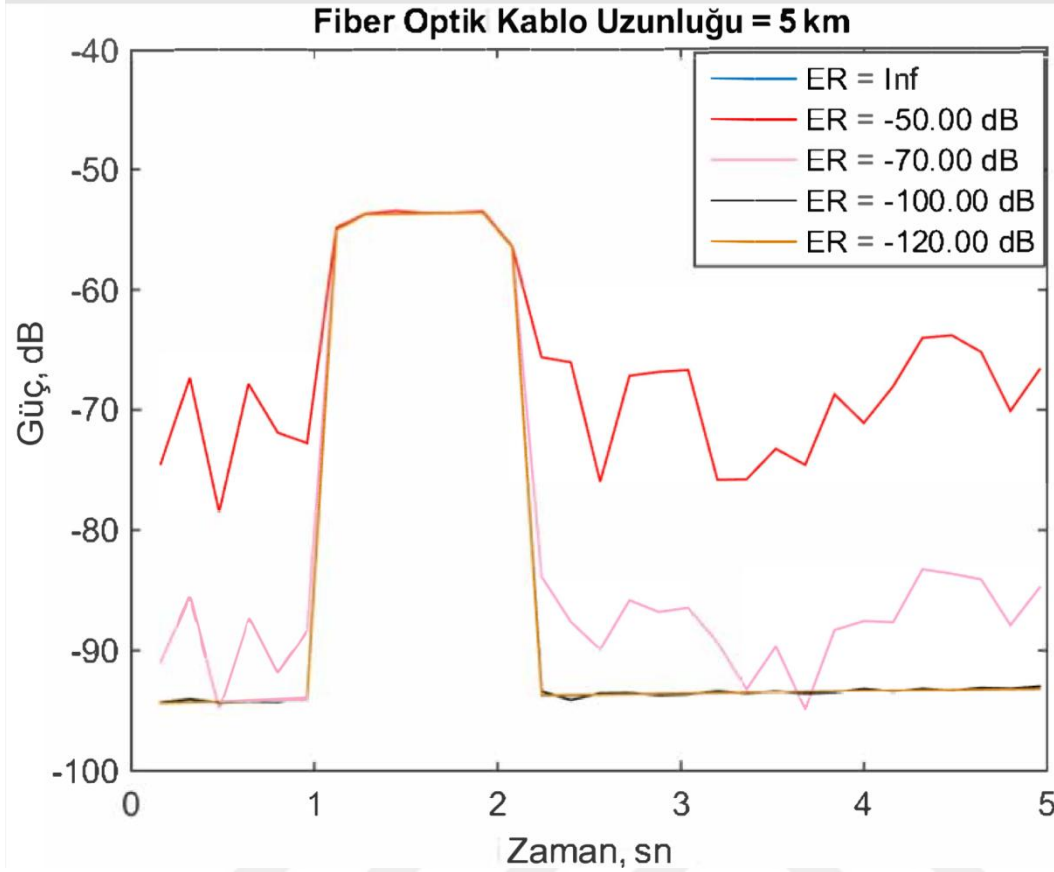
Şekil 2.16: Fiber optik kablo 40 km iken kanal 10'da gerçekleşen titreşim olaylarının farklı sönümlenme oranlarına (ER) karşılık gelen optik sinyal gücü değeri grafiği.



Şekil 2.17: Fiber optik kablo 20 *km* iken kanal 10'da gerçekleşen titreşim olaylarının farklı sönümlenme oranlarına (ER) karşılık gelen optik sinyal gücü değeri grafiği.



Şekil 2.18: Fiber optik kablo 10 km iken kanal 10'da gerçekleşen titreşim olaylarının farklı sönmüleme oranlarına (ER) karşılık gelen optik sinyal gücü değeri grafiği.



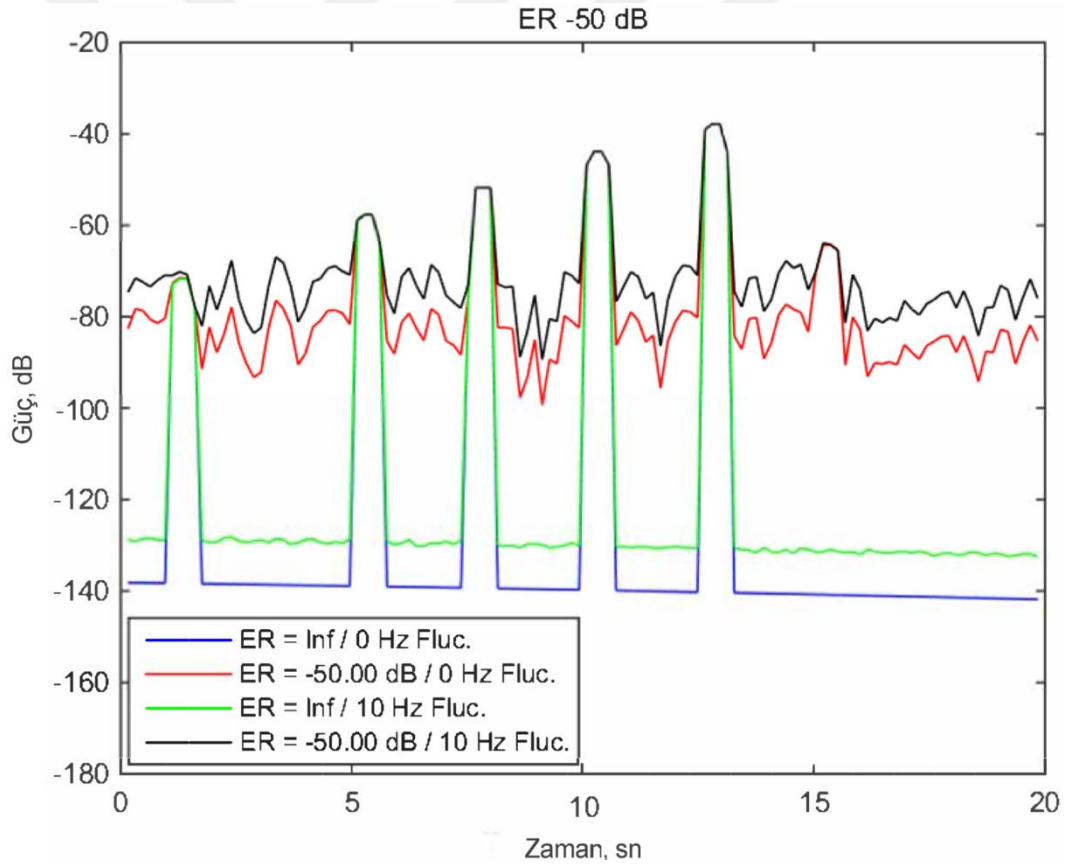
Şekil 2.19: Fiber optik kablo 5 km iken kanal 10'da gerçekleşen titreşim olaylarının farklı sönmüleme oranlarına (ER) karşılık gelen optik sinyal gücü değeri grafiği.

2.4.4 Olay bağlaşımı

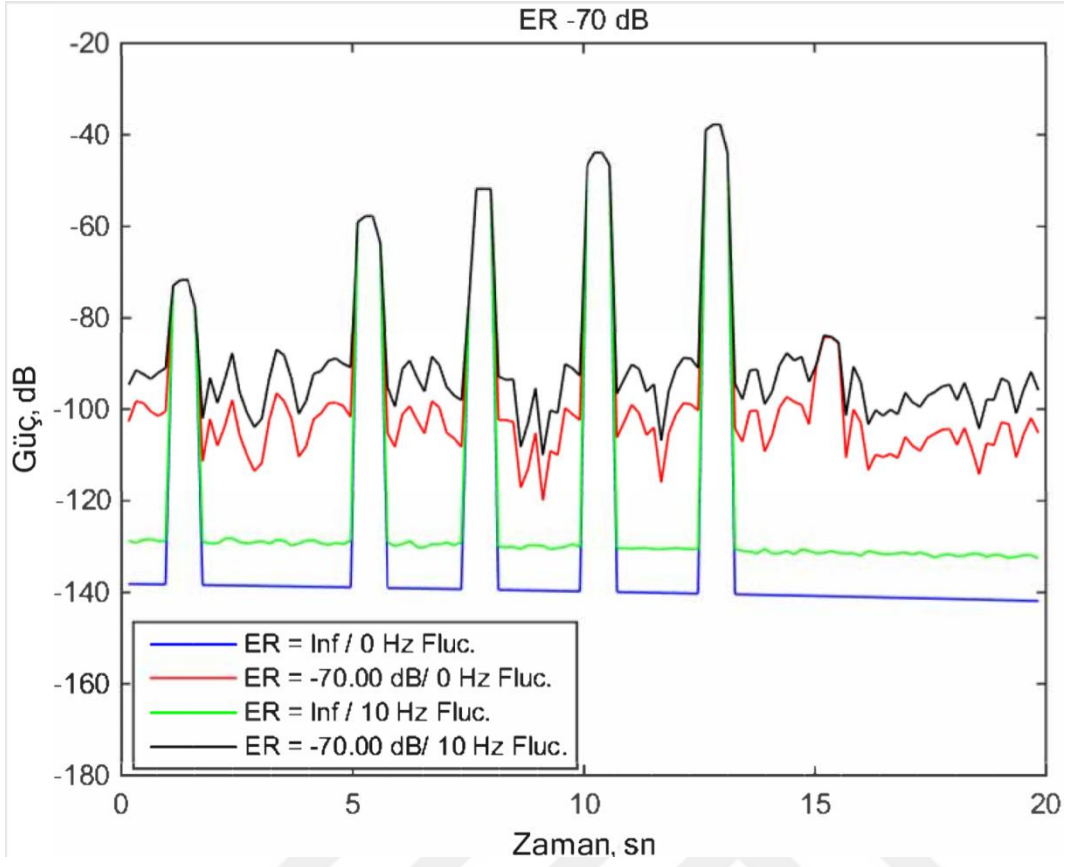
Limitli sönmüleme oranı durumunda sızan ışık nedeniyle, asıl aktivitenin yapıldığı yerdeki saçılma noktaları ile bu noktadan çok uzaklarda oluşan herhangi bir aktivite fotodetektör üzerinde etkileşime girebilmektedir. Denklem 2.19'da bu etkiler matematiksel olarak gösterilmiştir. Bu deneyde orta kanallardan olan 1000. kanal simüle edilmiştir. İlk aktivite, [1.0 sn - 1.5 sn] zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,1)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. İkinci aktivite, [5.0 sn - 5.5 sn] zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,5)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Üçüncü aktivite, [7.5 sn - 8.0 sn] zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,10)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Dördüncü aktivite, [10.0 sn - 10.5 sn] zaman penceresi içinde seviye olarak

nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,25)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Son aktivite, $[12.5 \text{ sn} - 13.0 \text{ sn}]$ zaman penceresi içinde seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,50)$ seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle simüle edilir. Deney iki senaryoda yapılmıştır.

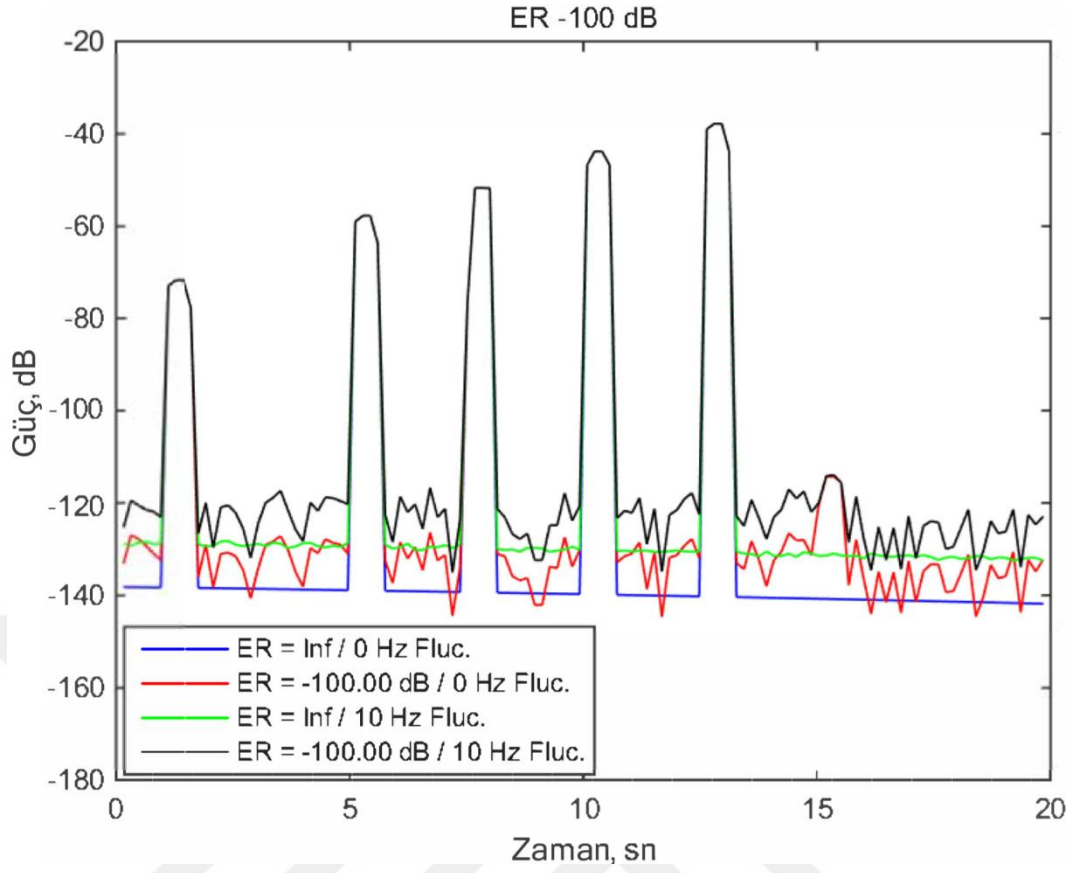
Sonuçlar, Şekil 2.20, Şekil 2.21, Şekil 2.22, Şekil 2.23, Şekil 2.24, Şekil 2.25, Şekil 2.26 ve Şekil 2.27'de gösterilmiştir. Mavi: ideal sönmleme oranı (Inf) altında uzun dönem frekans kaymasını ($1.5 \text{ MHz} / \text{dk}$), yeşil: ideal sönmleme oranı (Inf) altında uzun dönem frekans kaymasını ve kısa dönem lazer frekans dalgalanmasını (10 Hz), kırmızı: değişen sönmleme oranı altında uzun dönem frekans kaymasını ($1.5 \text{ MHz} / \text{dk}$) ve siyah: değişen sönmleme oranı altında uzun dönem frekans kaymasını ve kısa dönem lazer frekans dalgalanmasını (10 Hz) göstermektedir.



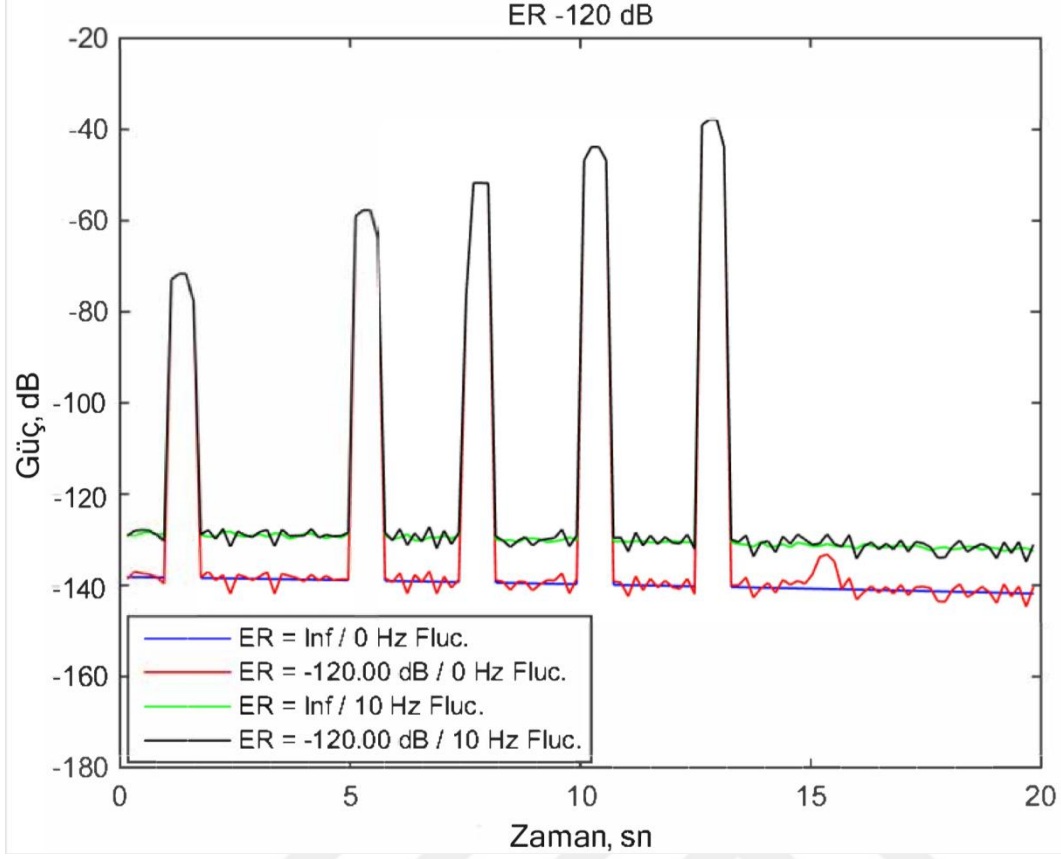
Şekil 2.20: $ER = -50 \text{ dB}$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki $[15.0 \text{ sn} - 15.5 \text{ sn}]$ zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.



Şekil 2.21: $ER = -70dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [15.0 sn - 15.5 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.

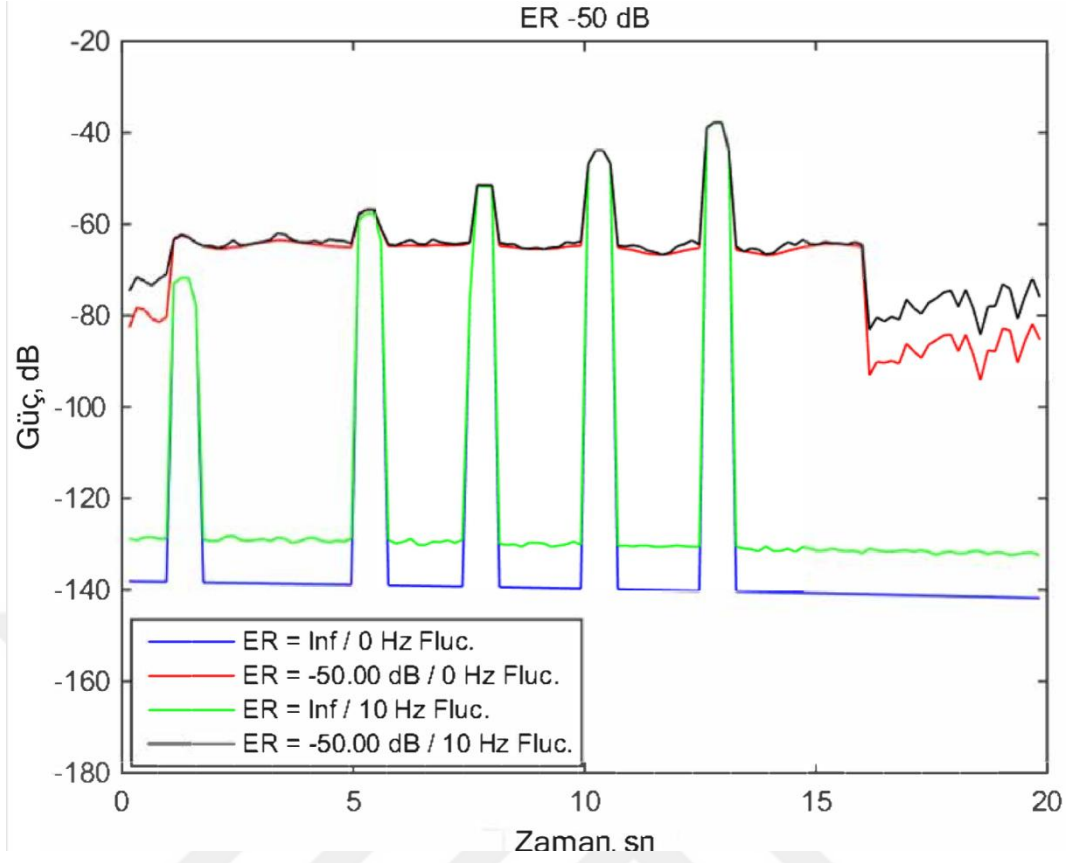


Şekil 2.22: $ER = -100dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [15.0 sn - 15.5 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.

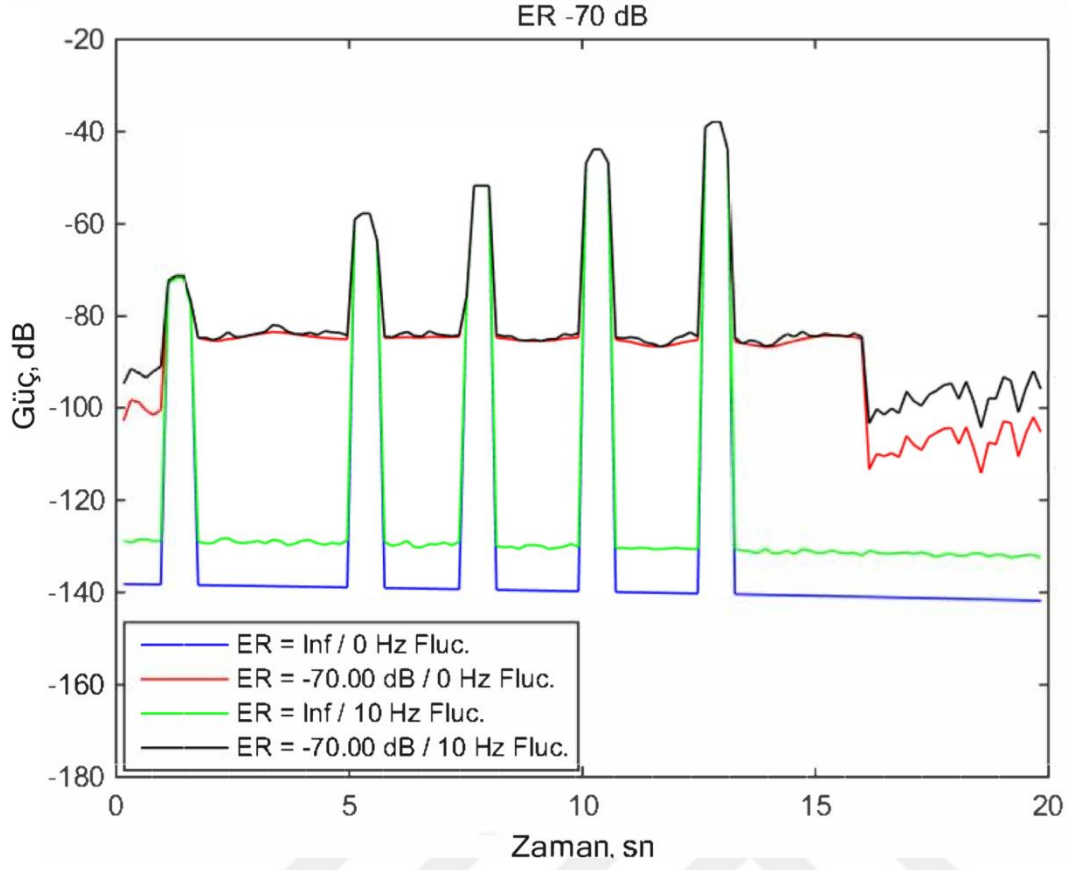


Şekil 2.23: $ER = -120dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [15.0 sn - 15.5 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.

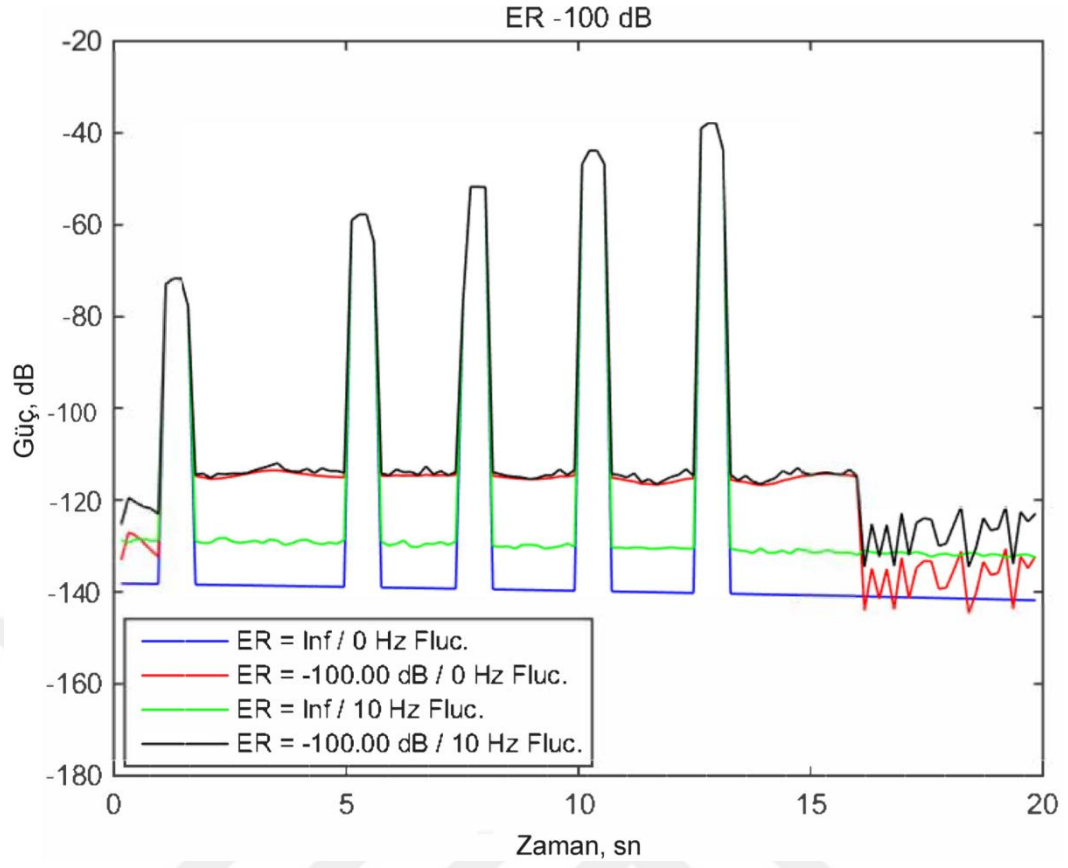
İlk senaryo, aktivite yapılan 1000. kanalın yakın komşuluğundaki 100 kanalda (1100. kanal - 1200. kanal arasındaki) [15.0 sn - 15.5 sn] zaman penceresi içinde eş zamanlı ve seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,50)$ seviyesinde aktivite yapılmıştır. Şekil 2.20, Şekil 2.21, Şekil 2.22 ve Şekil 2.23 incelendiğinde zaman aralıkları bilinen 5 farklı aktiviteye ek olarak, yakın komşuluklarda [15.0 sn - 15.5 sn] zaman penceresinde yapılan $\mathcal{N}(0,50)$ seviyesinde aktivitenin yanlış tespiti (false alarm) sebep olduğu gözlemlenmektedir.



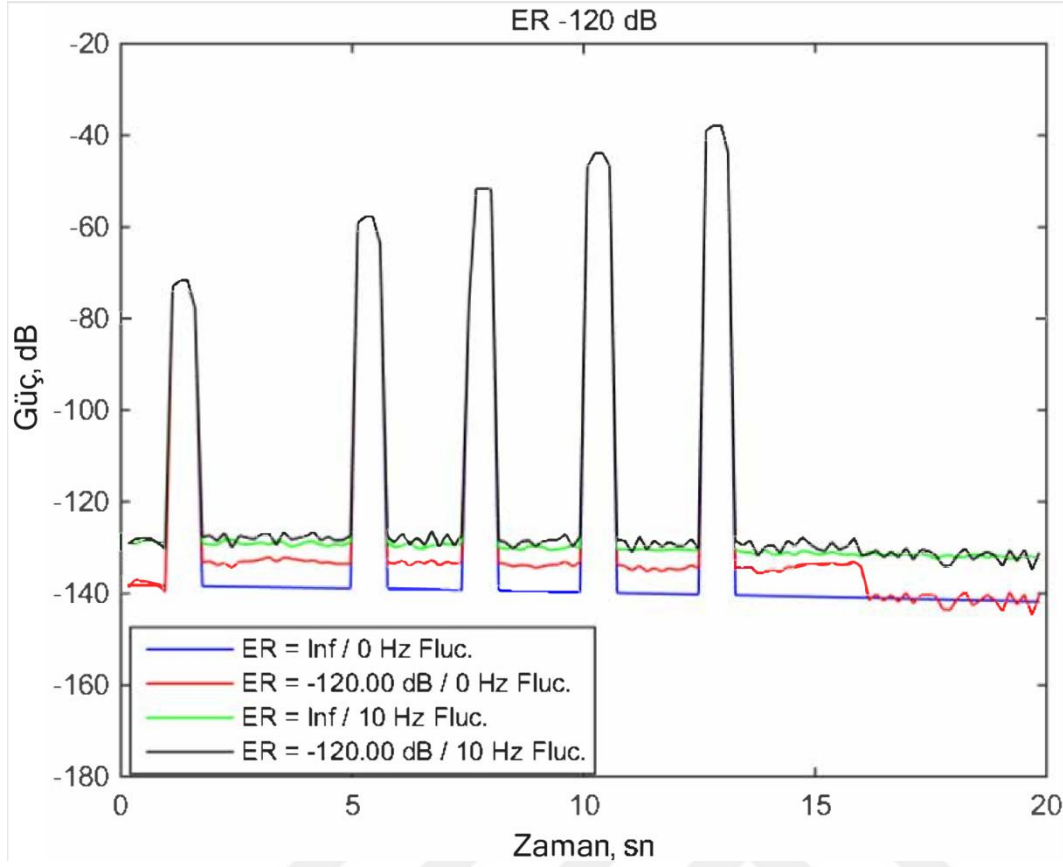
Şekil 2.24: $ER = -50dB$ ve $ER = Inf$ sönümlenme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [1.0 sn - 15.0 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.



Şekil 2.25: $ER = -70dB$ ve $ER = Inf$ sönümlenme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [1.0 sn - 15.0 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.



Şekil 2.26: $ER = -100dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [1.0 sn - 15.0 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.

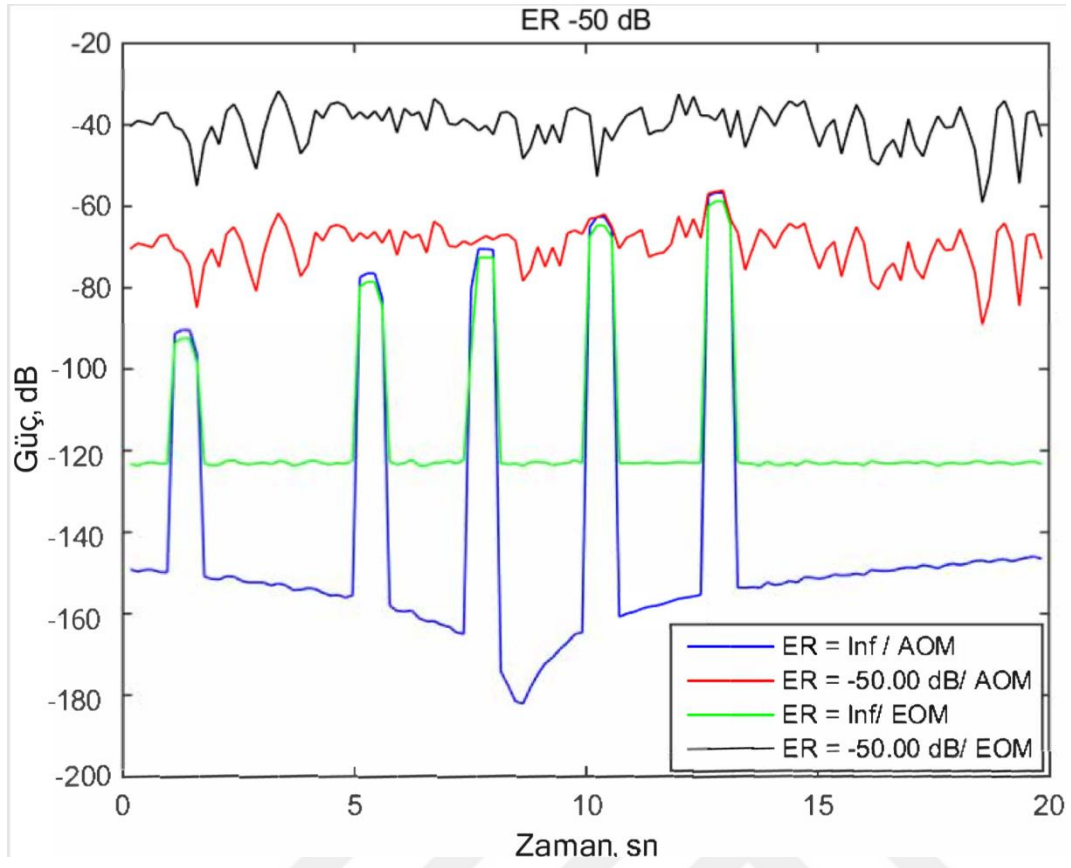


Şekil 2.27: $ER = -120dB$ ve $ER = Inf$ sönümlenme oranları için, kanal 1000 üzerindeki aktivite seviyeleri ve optik sinyal güç değerlerine komşu kanallardaki [1.0 sn - 15.0 sn] zaman penceresinde aktivite yapılmıştır.

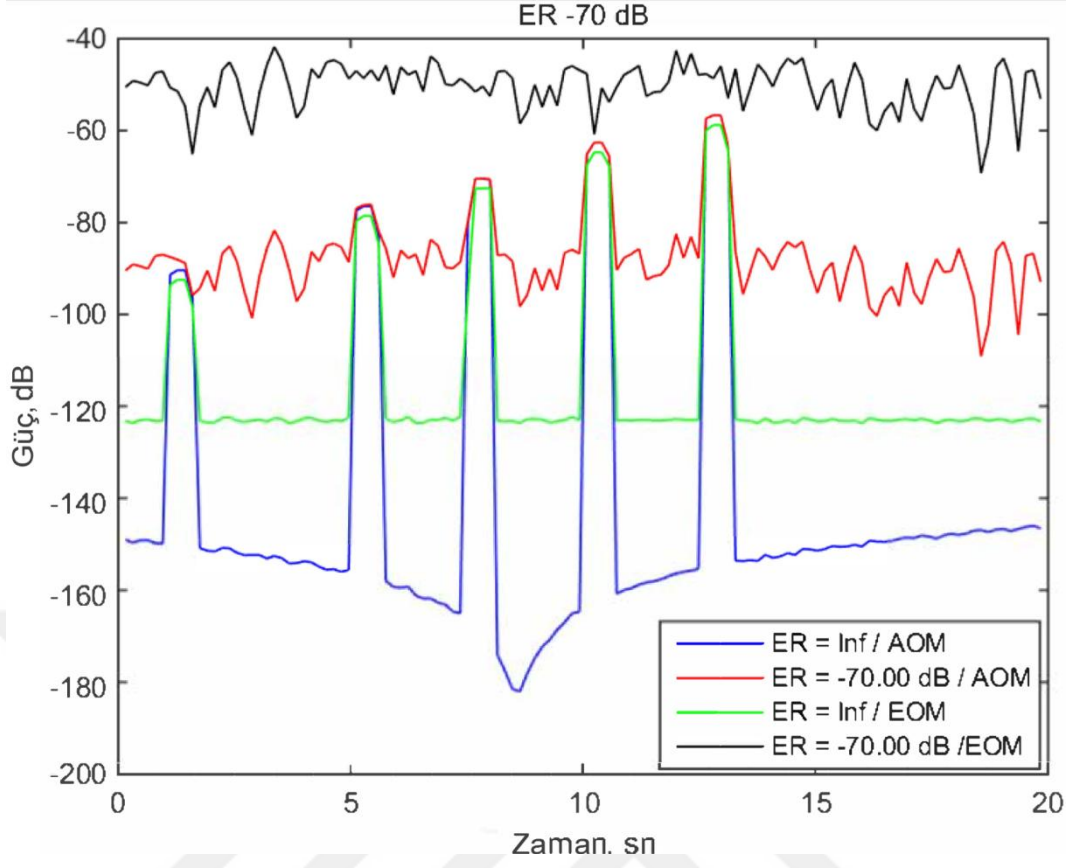
İkinci senaryo, aktivite yapılan 1000. kanalın yakın komşuluğundaki 100 kanalda (1100. kanal - 1200. kanal arasındaki) [1.0 sn - 15.0 sn] zaman penceresi içinde eş zamanlı ve seviye olarak nanometre ölçeğinde Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,50)$ seviyesinde aktivite yapılmıştır. Şekil 2.24, Şekil 2.25, Şekil 2.26 ve Şekil 2.27 incelendiğinde zaman aralıkları bilinen 5 farklı aktiviteye ek olarak, yakın komşuluklarda [1.0 sn - 15.0 sn] zaman penceresinde yapılan $\mathcal{N}(0,50)$ seviyesinde aktivite sebebiyle sönümlenme oranı $-50 dB$ iken ilk yapılan aktivite görünmez hale gelmiştir. Bu durum aktivitenin tespit edilemediğini göstermektedir. Diğer sönümlenme oranları olan $-70 dB$, $-100 dB$ ve $-120 dB$ için aktivitelerin güç seviyelerinde azalma olmuştur.

2.4.5 AOM ve EOM karşılaştırması

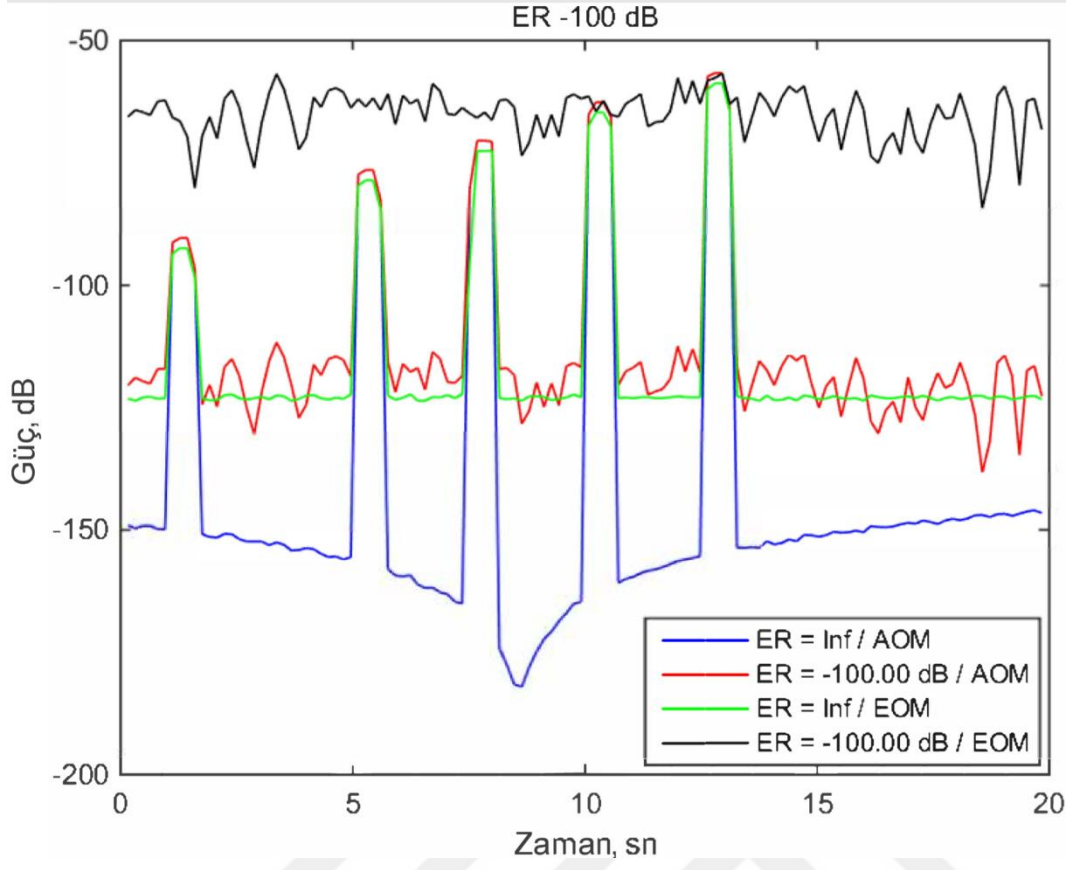
Bu kısımda Bölüm 3.3.3'te açıklanan AOM ve EOM durumu incelenmiştir. AOM durumu için optik darbe ve optik sızıntı içinde 200 MHz lazer kayması ve EOM durumu herhangi bir frekans kayması söz konusu değildir. Şekil 2.28, Şekil 2.29, Şekil 2.30 ve Şekil 2.31 AOM ve EOM senaryolarının değişken aktivite büyüklükleri ve sönmüleme oranı (ER) değerleri için aktivite tespit performanslarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Simüle edilen senaryolar Gauss dağılımı $\mathcal{N}(0,1)$, $\mathcal{N}(0,5)$, $\mathcal{N}(0,10)$, $\mathcal{N}(0,25)$ ve $\mathcal{N}(0,50)$, seviyesinde saçılım merkezlerinin rastgele değişmesiyle oluşmaktadır ve ölçü birimi nanometredir. Sönmüleme oranının (ER) ideal olduğu durum olan $ER = Inf$ durumunu, AOM (mavi) ve EOM (yeşil) izler tüm grafiklerde en iyi aktivite sinyal gücü seviyesini dB cinsinden göstermektedir. AOM (kırmızı) ve EOM (siyah) izleri ise Şekil 2.28 ($ER = -50$ dB), Şekil 2.29 ($ER = -70$ dB), Şekil 2.30 ($ER = -100$ dB) ve Şekil 2.31 ($ER = -120$ dB) için sinyal gücü seviyelerini göstermektedir. Bölüm 2.3.3'te açıklandığı gibi, herhangi bir sönmüleme oranı (ER) değeri için AOM daha düşük gürültü seviyesine ve daha iyi algılama performansına sahiptir. AOM $ER = -70$ dB değerinden başlayarak tüm aktiviteleri tespit etmektedir. Ancak EOM, orta ve güçlü aktivite seviyelerini ($\mathcal{N}(0,10)$, $\mathcal{N}(0,25)$ ve $\mathcal{N}(0,50)$) $ER = -120$ dB değeri itibariyle tespit edebilmektedir.



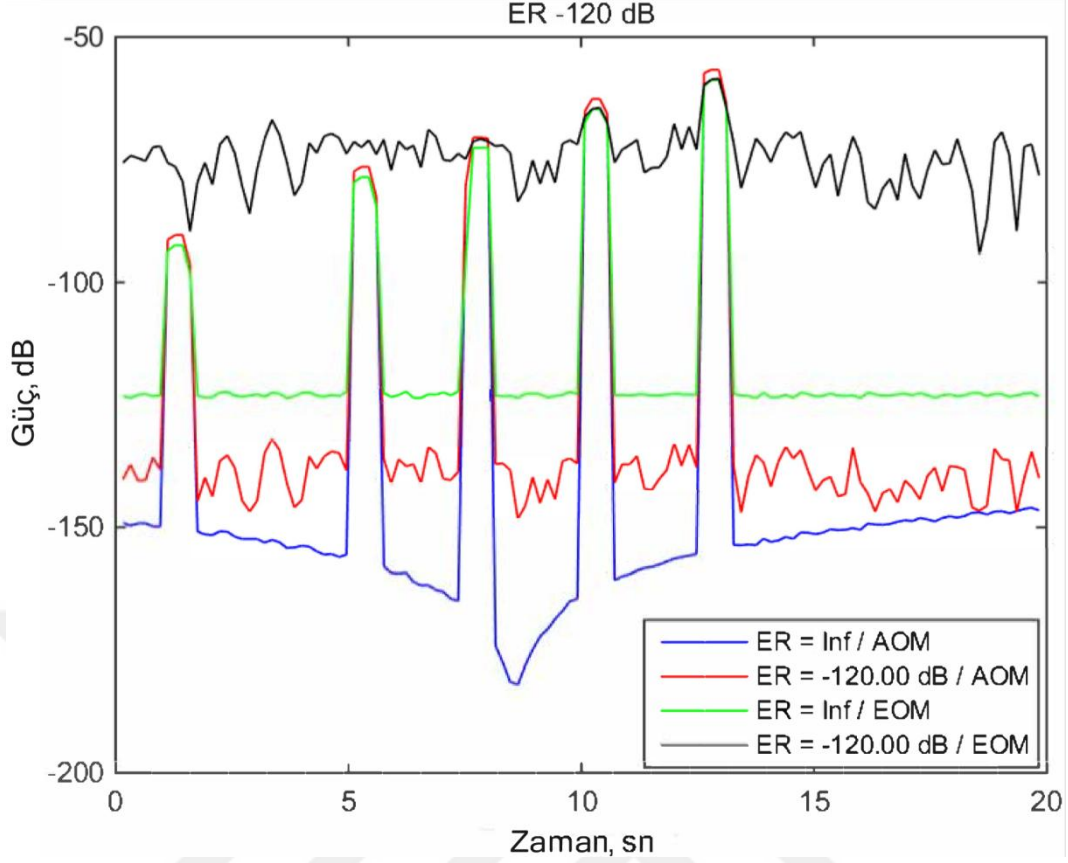
Şekil 2.28: $ER = -50dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 10 üzerindeki titreşim olayları ve optik sinyal güç değerleri grafiği.



Şekil 2.29: $ER = -50dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 10 üzerindeki titreşim olayları ve optik sinyal güç değerleri grafiği.



Şekil 2.30: $ER = -50dB$ ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, kanal 10 üzerindeki titreşim olayları ve optik sinyal güç değerleri grafiği.

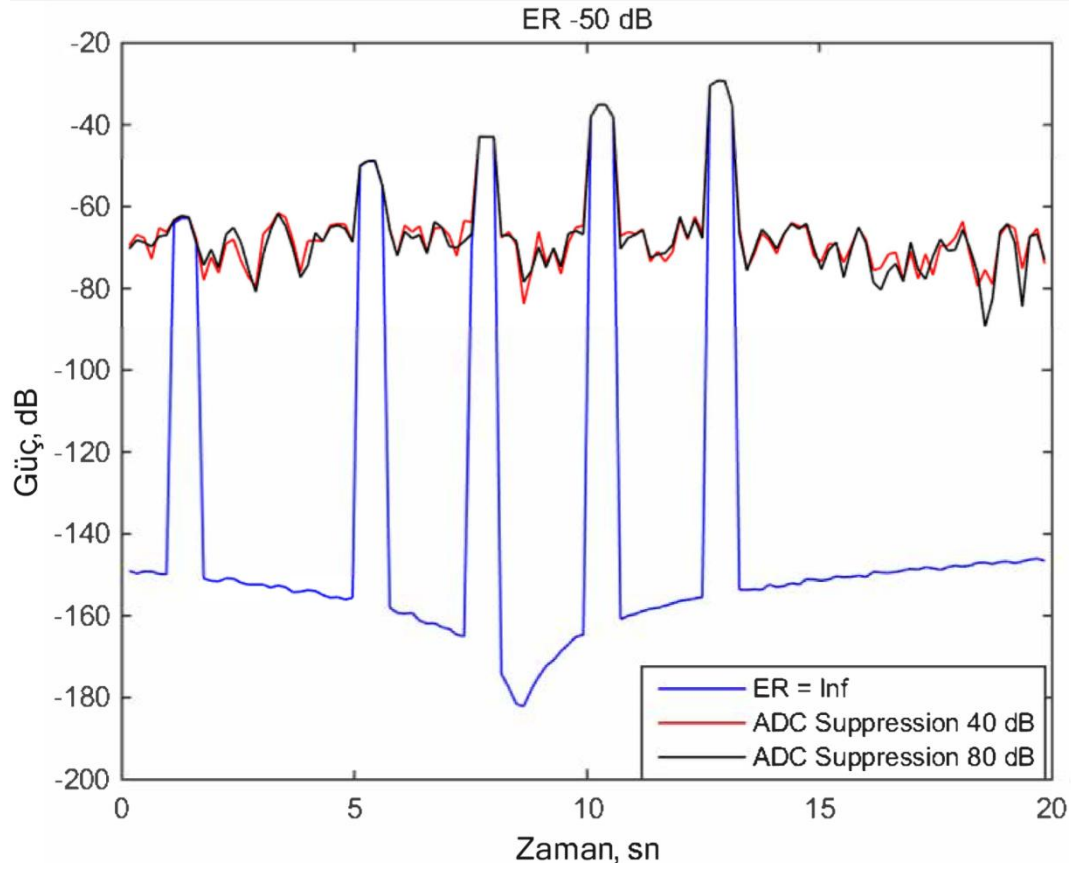


Şekil 2.31: $ER = -50dB$ ve $ER = Inf$ sönümlenme oranları için, kanal 10 üzerindeki titreşim olayları ve optik sinyal güç değerleri grafiği.

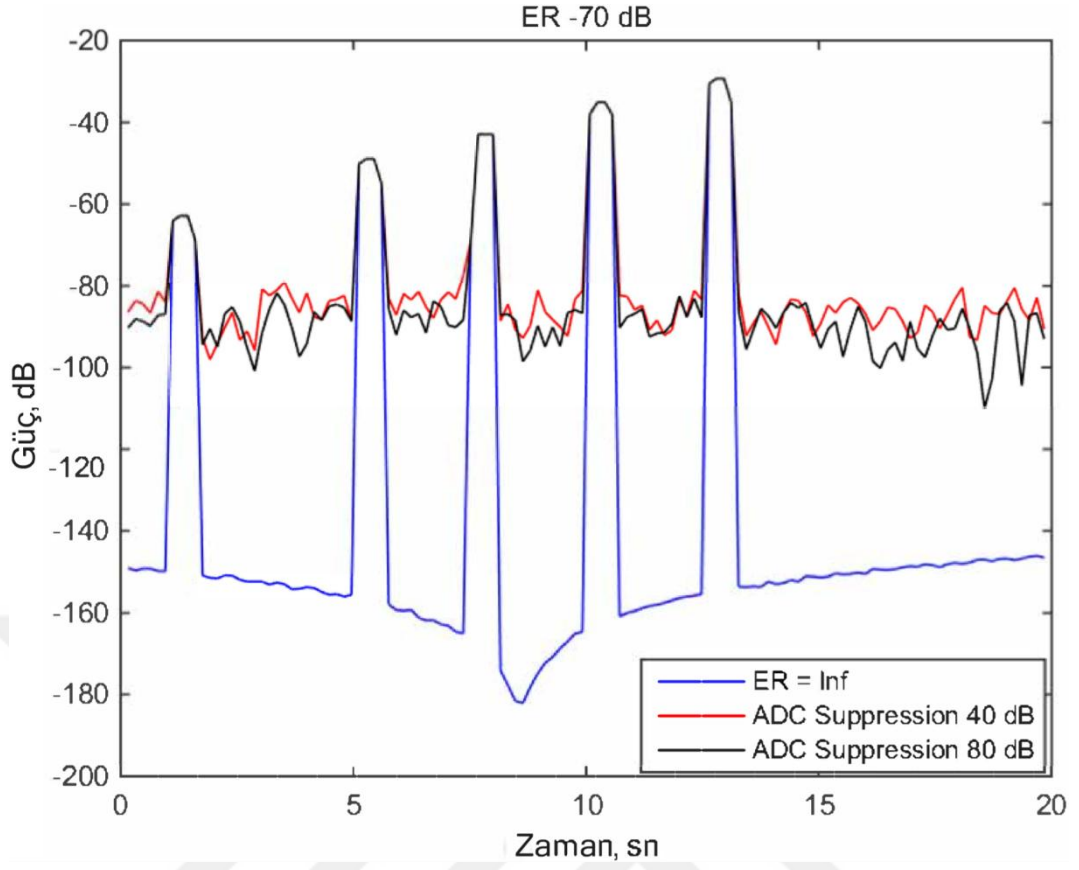
2.4.6 ADC kenar yumuşatma (Anti-Aliasing) filtresi etkileri

Şekil 2.32, Şekil 2.33, Şekil 2.34 ve Şekil 2.35, gürültü bileşenlerinin orta frekans bantlarında uygun şekilde bastırılmasının etkisini göstermektedir. Simüle edilen aktivite seviyeleri $\mathcal{N}(0,1)$, $\mathcal{N}(0,5)$, $\mathcal{N}(0,10)$, $\mathcal{N}(0,25)$ ve $\mathcal{N}(0,50)$ olarak saçılma merkezleri konumunu Gauss dağılımı ile rastgele değiştirir. Alınan sinyal ADC girişinde, $f_{pass} = 0.8\pi$ ve $f_{stop} = 0.85\pi$ ile karakterize edilen alçak geçiren bir filtreden geçirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2.32, Şekil 2.33, Şekil 2.34 ve Şekil 2.35 için tüm grafiklerde, mavi iz, ideal sönümlenme oranı iken sinyal güç seviyelerini (dB) gösterir ve karşılaştırma için referans değer olarak işlev görür. Kırmızı ve siyah izler, sırasıyla $-40 dB$ ve $-80 dB$ 'lik ADC bastırma oranları için sinyal gücü seviyelerini gösterir. Sönümlenme oranı $-50 dB$ için, uygun düşük geçişli geçiş görünürlüğü yoktur. Bununla birlikte sönümlenme oranı, $-70 dB$ ile başlayarak, orta ila yüksek bant frekanslı bileşenlerin daha iyi bastırılması sonucu, tüm aktiviteler tespit edilmeye başlar. Sönümlenme oranı, $-100 dB$ ve $-120 dB$ için, siyah iz ($-80 dB$ ADC bastır-

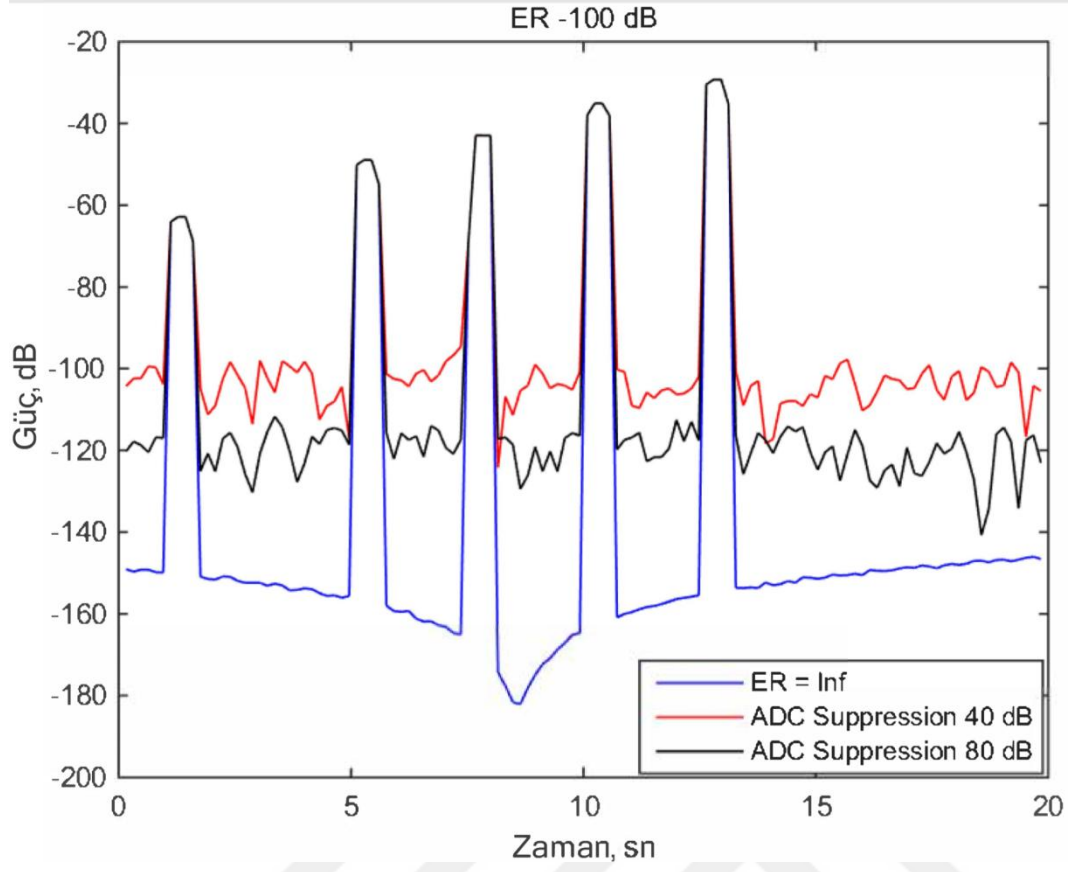
ma), kırmızı iz (-40 dB ADC bastırma) ile karşılaştırıldığında, -80 dB ADC bastırması daha düşük bir gürültü seviyesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



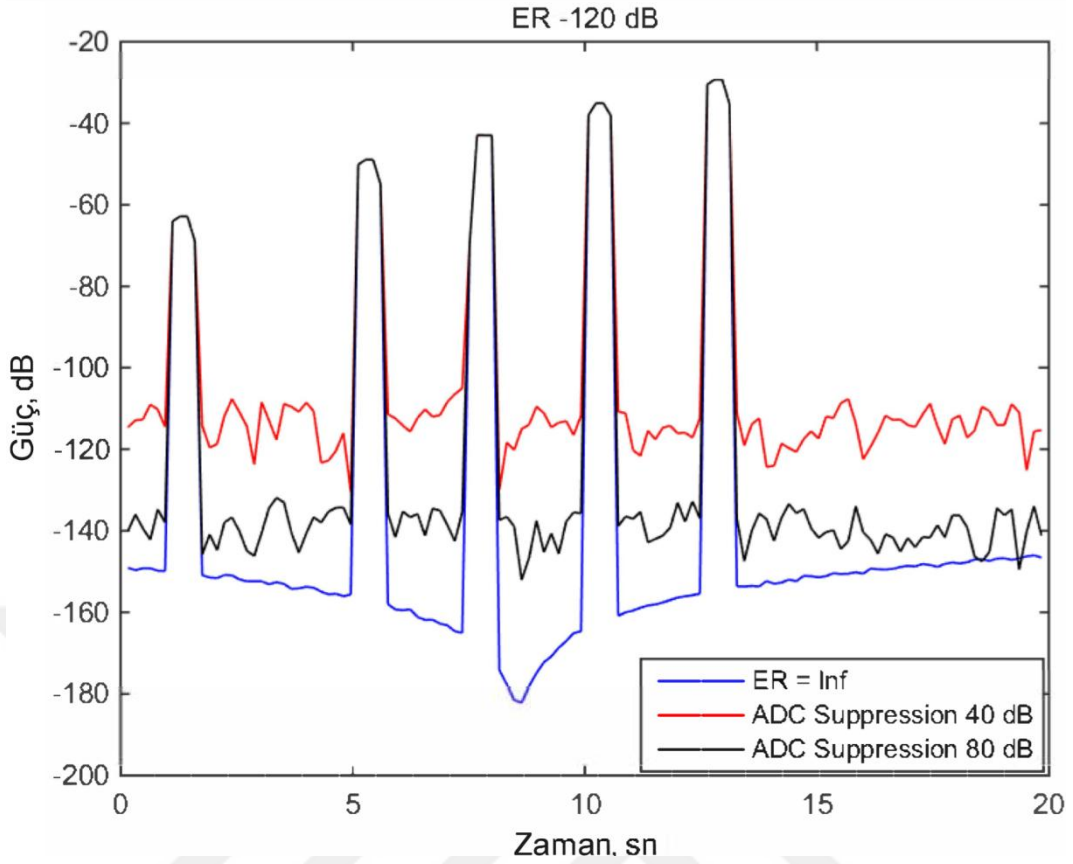
Şekil 2.32: Kanal 10'daki farklı aktivite seviyelerinin ADC bastırma oranları (-80 dB ve -40 dB) ve $ER = -50$ dB ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, optik sinyal güç değerleri.



Şekil 2.33: Kanal 10'daki farklı aktivite seviyelerinin ADC bastırma oranları ($-80\ dB$ ve $-40\ dB$) ve $ER = -70\ dB$ ve $ER = Inf$ sönümlenme oranları için, optik sinyal güç değerleri.



Şekil 2.34: Kanal 10'daki farklı aktivite seviyelerinin ADC bastırma oranları (-80 dB ve -40 dB) ve $ER = -100$ dB ve $ER = Inf$ sönümlenme oranları için, optik sinyal güç değerleri.



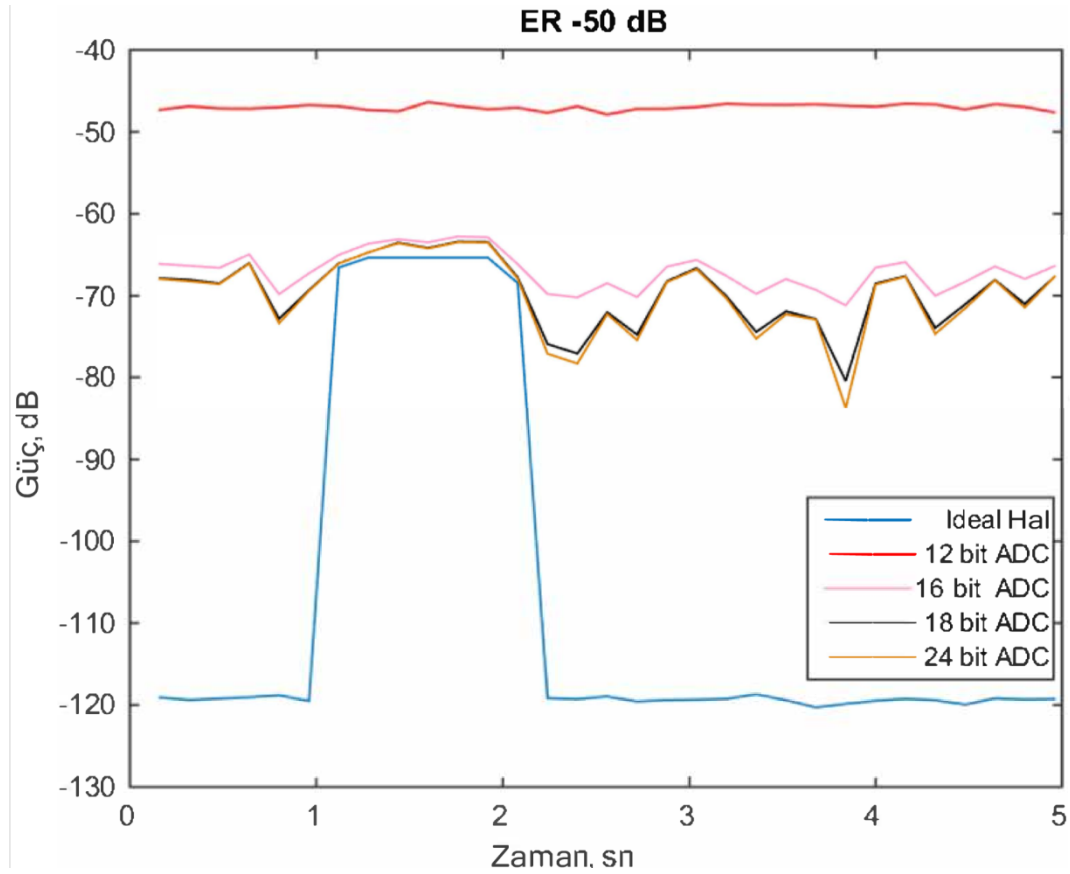
Şekil 2.35: Kanal 10'daki farklı aktivite seviyelerinin ADC bastırma oranları (-80 dB ve -40 dB) ve $ER = -120$ dB ve $ER = Inf$ sönmleme oranları için, optik sinyal güç değerleri.

2.4.7 ADC bit çözünürlüğü etkileri

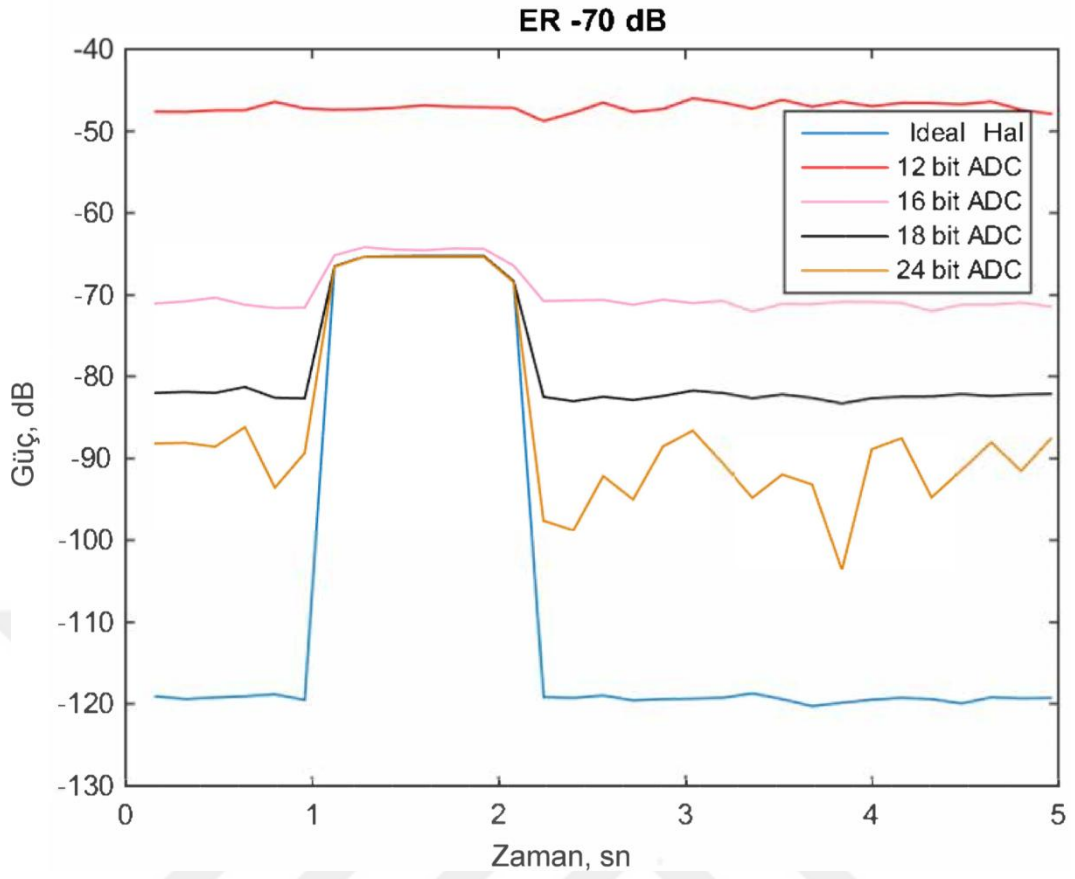
Bu kısımda, Bölüm 2.3.6'da açıklanan bit derinliğinin sinyalin kalitesine etkisi incelenmiştir. Fotodedektörün çıkışındaki analog sinyalinin, farklı ADC bit çözünürlükleri (12, 16, 18, 24 bit) ile örnekleme durumu simüle edilmiştir. Gürültü / serbest bit çözünürlüğü, belirtilen bit çözünürlüklerinden 2 bit çözünürlük farkı sebebiyle, sırasıyla 10, 14, 16 ve 22 bit olarak belirlenir. Şekil 2.36, Şekil 2.37, Şekil 2.38 ve Şekil 2.39, ortaya çıkan sayısallaştırılmış güç seviyelerini göstermektedir. Simüle edilen aktivite $\mathcal{N}(0,10)$ olarak saçılma merkezleri konumunu Gauss dağılımı ile rastgele değiştirilerek oluşturulmuştur ve $[1.0 sn, 2.0 sn]$ zaman aralığında sürekli olarak 10 numaralı kanalda uygulanmıştır.

Grafikler incelendiğinde, 12-bit çözünürlüklü ADC, tüm sönmleme oranı değerleri için ortaya çıkan optik güç değişimlerini tamamen yakalayamazken, sonsuz sönmleme oranına sahip ideal bir ADC, etkin sönmleme oranı değerini dikkate almadan

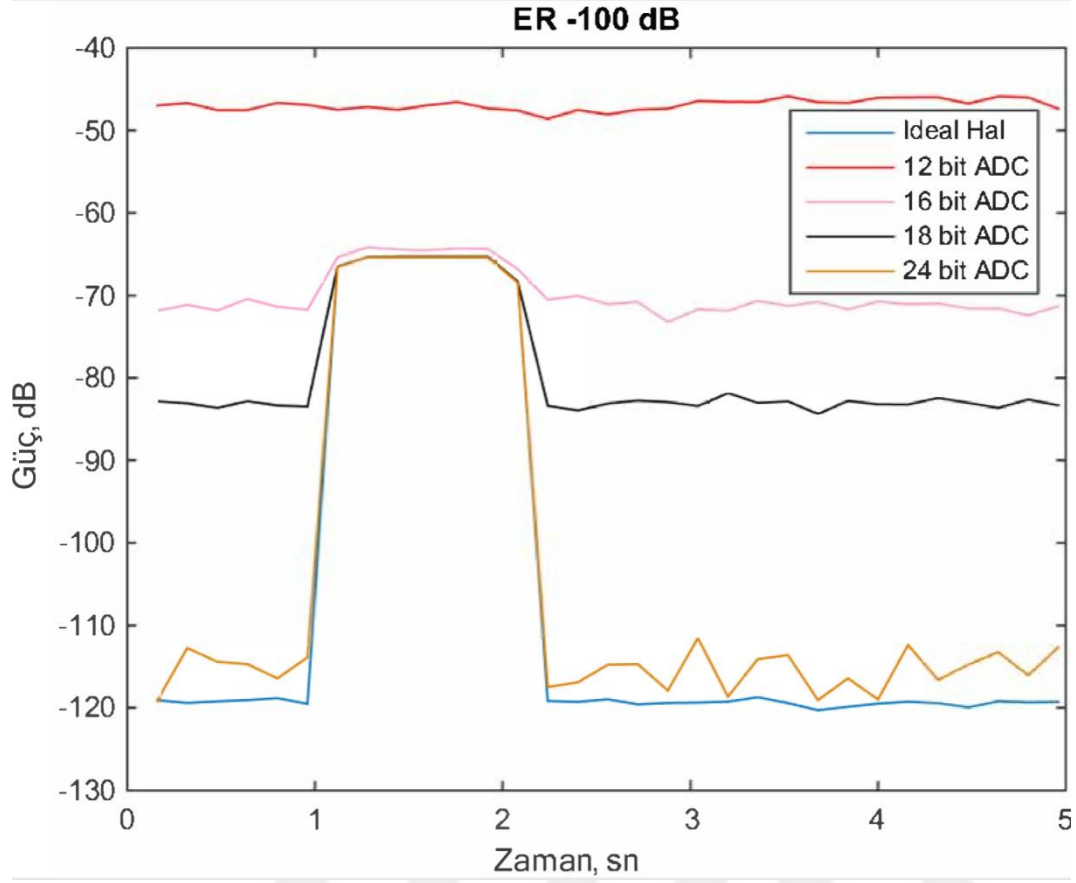
simüle edilmiş olayı yakalamaktadır. Sönümlenme oranı değeri en az -70 dB ise, 16-bitlik ADC, simüle edilmiş olayı yakalayabilir; ancak Şekil 2.37, Şekil 2.38, Şekil 2.39 karşılaştırılarak görülebileceği gibi daha iyi sönümlenme oranı değeri (-100 ve -120 dB) kadar görülür bir sinyal gücü seviyesine ulaşamamıştır. Aynı sonuç, daha yüksek sinyal görünürlüğüne sahip 18 bit ADC için de geçerlidir. Bununla birlikte, 24-bit ADC, sönümlenme oranının en az -70 dB olması durumunda aktivite görülebilir seviyededir. Şekil 2.36, Şekil 2.37, Şekil 2.38 ve Şekil 2.39’da görüldüğü gibi 24 bit çözünürlüğe sahip ADC ünitesi tek başına sinyal gücünü iyileştirememektedir. Sönümlenme oranı iyileştikçe daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.



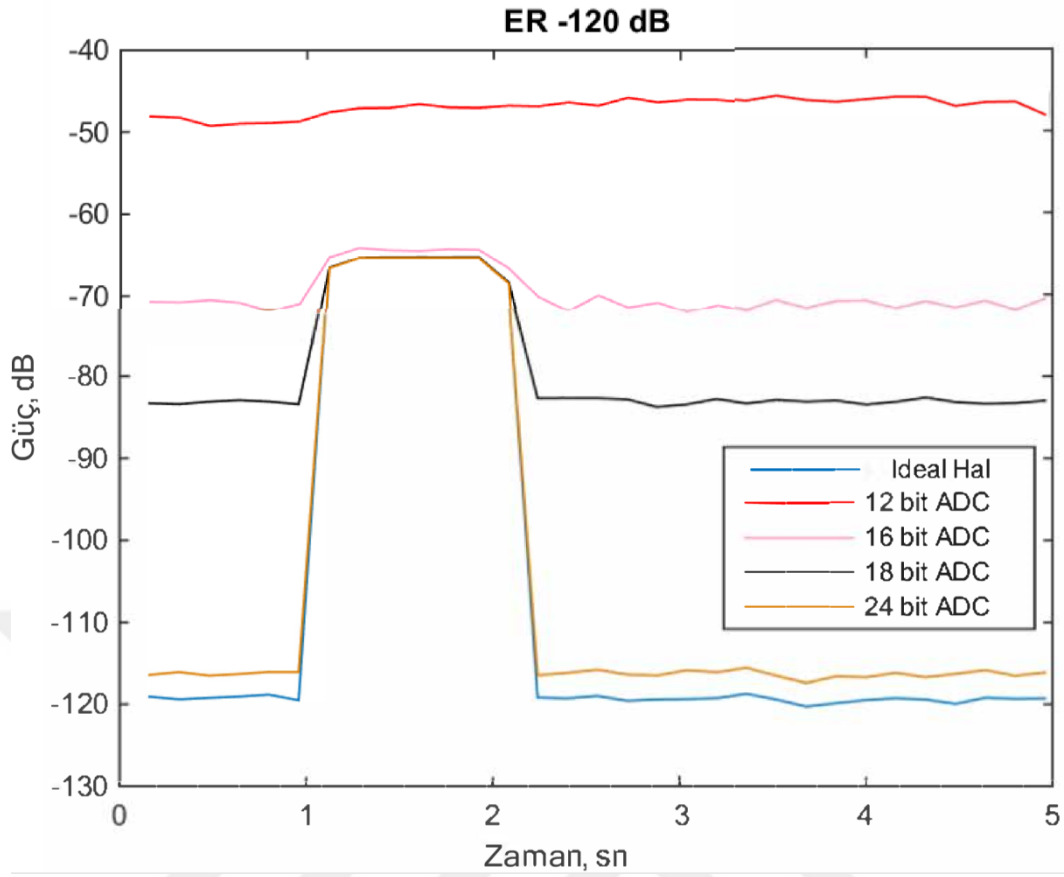
Şekil 2.36: $ER = -50$ dB ve $ER = Inf$ değerleri altında, kanal 10 üzerindeki aktivitenin farklı ADC bit çözünürlüklerine karşılık gelen, optik sinyal gücü değerleri.



Şekil 2.37: $ER = -70 \text{ dB}$ ve $ER = Inf$ değerleri altında, kanal 10 üzerindeki aktivitenin farklı ADC bit çözünürlüklerine karşılık gelen, optik sinyal gücü değerleri.



Şekil 2.38: $ER = -100 \text{ dB}$ ve $ER = Inf$ değerleri altında, kanal 10 üzerindeki aktivitenin farklı ADC bit çözünürlüklerine karşılık gelen, optik sinyal gücü değerleri.

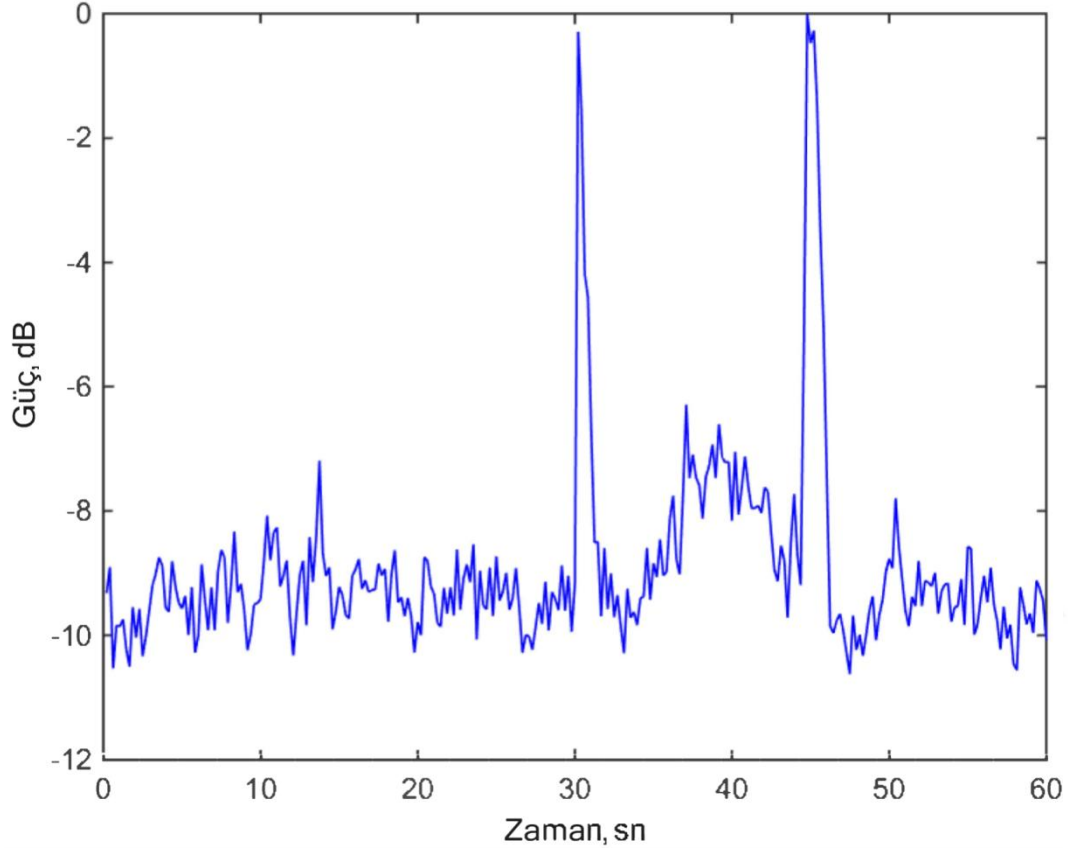


Şekil 2.39: $ER = -120 \text{ dB}$ ve $ER = Inf$ değerleri altında, kanal 10 üzerindeki aktivitenin farklı ADC bit çözünürlüklerine karşılık gelen, optik sinyal gücü değerleri.

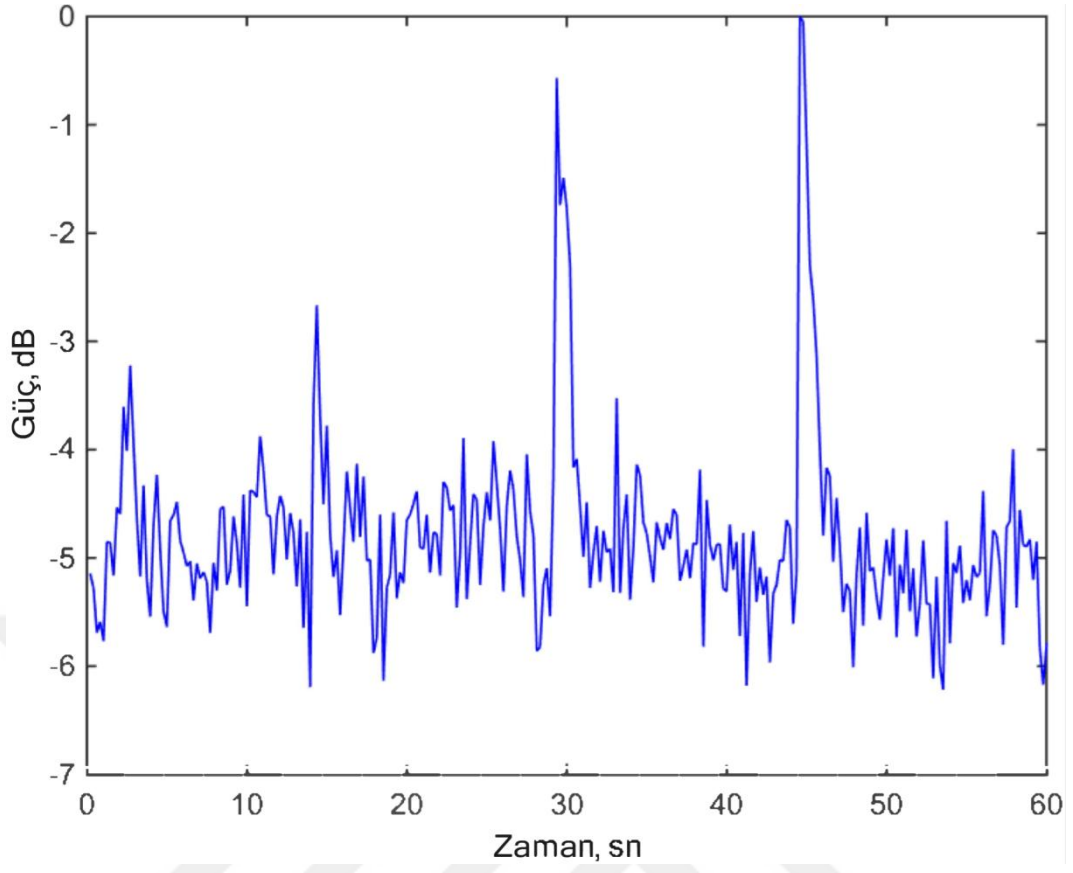
2.4.8 Laboratuvar ölçümleri

Şekil 2.40 ve Şekil 2.41, Bölüm 2.3.8'de açıklanan kurulum ile yürütülen bazı laboratuvar ölçümlerini göstermektedir. Bu ölçümlerin amacı, yetersiz sönümleme oranının alınan sinyal gücü kalitesi üzerindeki olumsuz etkisini ortaya koymaktır. İlk ölçümde, iki parçalı fiber sargılarından birisi (25 km), kurulumdan çıkarılır ve test edilen fiberin açıktaki fiber optik kablo parçasına, 15. saniye, 30. saniye ve 45. saniyede büyüyen genlikte üç farklı aktivite yapılmıştır. Elde edilen güç-zaman grafiği Şekil 2.40'da gösterilmiştir. İkinci ölçümde (tüm sistem parametrelerini aynı tutarken, ilk önce sağa doğru yürütülen), çıkartılan fiber sargı (25 km) tekrar sisteme bağlanır (toplam test edilen fiber hat uzunluğunu 25 km'den 50 km'ye çıkarır). Test edilen fiberin açıktaki fiber optik kablo, 15. sn, 30. sn ve 45. sn zamanlarında ilk deneyde kullanılan aynı aktiviteler yapılmıştır. Elde edilen güç-zaman grafiği Şekil 2.41'de gösterilmiştir. Her iki ölçümde de, 2480 kanal numarası için güç-zaman grafikleri

kaydedilmiştir. Şekil 2.40 ve Şekil 2.41'in karşılaştırılmasıyla, 25 km uzunluğundaki test edilen fiber hat ile elde edilen etkili sinyal gücü, 50 km uzunluğunda test edilen fiber hat ile elde edilen sinyal gücü seviyesinin yaklaşık iki katı kadardır. Bölüm 2.4.3'te yapılan fiber sonuçları ile uygunluk göstermektedir. Fiber optik kablo uzunluğu arttıkça ölçülen sinyallerin zayıfladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.40: Laboratuvar ortamında 25km uzunluğundaki fiber optik kablo (FUT) ile 2480 kanalındaki titreşim olayları için optik sinyal güç grafiği.



Şekil 2.41: Laboratuvar ortamında 50km uzunluğundaki fiber optik kablo (FUT) ile 2480 kanalındaki titreşim olayları için optik sinyal güç grafiği



3. DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMLERİNDE GERÇEK ZAMANLI HEDEF TESPİTİ İÇİN UYARLAMALI GÜÇ EŞİKLEME

3.1 Amaç

Bu kısımda, sistemin gerçek zamanlı hedef tespiti amacıyla kullanılabilmesi için güç eşikleme yaklaşımı temel alınmış ve ölçülen sinyallerdeki olası farklılaşmaların tespit başarımına etkisini azaltmak için eşikleme değeri, uyarlamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sinyallerin karakteristiği, optik sistemdeki gürültülerden ve çevresel şartlardan (sıcaklık, uygulanan aktivite... vb.) etkilendiği için sabit bir istatistiksel model varsayımı yapılmamıştır. Bunun yerine, ölçüm yapılan her bir nokta bağımsız olarak değerlendirilerek belirli bir zaman çerçevesinde toplanan verilerden istatistiksel model çıkartılmış ve bu model zamanla güncellenmiştir. Önerilen yaklaşımın çalışma zaman analizi yapılmış, doğru ve hatalı tespit başarımları ayrıntılı olarak çalışılmıştır.

3.2 Tehdit Tespit Yaklaşımı

Dağıtık akustik algılama sisteminin temel amacı, kablo yakınlarında dış etmenlere bağlı herhangi bir mekanik hareket olup olmadığının tespit edilmesi ve mekanik hareketin kablonun hangi noktasında olduğunun belirlenmesidir [5]. Bunun için ölçülen sinyal $x(t) = e(t) + w(t)$ şeklinde ifade edilebilir. Burada $e(t)$, dış etmenlere göre oluşan Rayleigh geri saçılımını ifade ederken $w(t)$, optik sistemdeki ve fiber optik kablodaki istenmeyen etkilerden (kablo deformasyonları, lazer kaynağındaki faz kayması, termal gürültü) [22] dolayı doğal olarak gözlemlenen ve önlenemeyen geri saçılımları ifade etmektedir. Ölçülen sinyal, $f_s = C/T_p$ Hz ($C \in \mathcal{R}^+$) frekansında örneklenmektedir. Burada T_p optik darbenin tekrarlama periyodunu göstermektedir. Bu durumda fiber optik kablo üzerindeki $d_c = c\vartheta/f_s$ ($1 \leq c \leq C$) noktalarındaki Rayleigh geri saçılım sinyalleri elde edilmekte ve

$$x[c, m] = x[mC + c] = x(t)|_{t=(mC+c)/f_s}$$

$$= e[c, m] + w[c, m], \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki gibi ifade edilebilmektedir. Burada $c \in \mathcal{Z}^+$ fiber optik kablo üzerindeki ölçüm yapılan noktaları, m ise sayısal zaman indeksini ifade etmektedir. Bu ifadeden anlaşılacağı gibi, fiber optik tabanlı dağıtık akustik algılama sisteminde elde edilen sinyal, \mathcal{C} adet farklı noktadaki algılayıcılardan alınan sinyal olarak ifade edilebilmektedir.

Kablo yakınında gerçekleşen ve tehdit olarak değerlendirilecek mekanik hareketlerin tespit edilmesinde ilk aşama, ölçülen sinyaldeki dış etmenlere bağlı oluşan Rayleigh yansımaları ile sistemin iç dinamiklerinden kaynaklı Rayleigh yansımalarının (arka plan gürültüsü) ayrıştırılmasıdır.

Rayleigh geri yansımalarının doğası gereği dış etmenler olmadan oluşan yansıma sinyallerinin kısa zaman aralıkları içinde fazla değişmediği varsayılmıştır,

$$\sum_{m=0}^{N-1} (e[c, m+1] - e[c, m])^2 \gg \sum_{m=0}^{N-1} (w[c, m+1] - w[c, m])^2. \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de N , sinyal gücünün hesaplanması için kullanılan zamandaki örnek sayısını göstermektedir. Bu varsayım, arka plan gürültüsünün sinyalden arındırılması için literatürdeki çalışmalarda kullanılan, art arda gönderilen ışık darbelerinden elde edilen sinyallerin farklarının alınması yönteminin temelini oluşturur [2]. [23]'de yapılan çalışmada, her bir darbeye alınan sinyallerin farklarını zaman ekseninde almak yerine zaman-frekans ekseninde almanın arka plan gürültüsünün bastırılmasında daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Dış etmenlere bağlı olarak oluşan Rayleigh geri yansımalarının sinyal güçlerinin iç dinamiklere göre oluşan sinyalin gücüne oranla fazla olması varsayımına (Denklem 3.2) dayanarak dış olayların tespiti için güç eşikleme yönteminin kullanılması benimsenmiştir. Daha net olarak, sistemden alınan Rayleigh geri yansıma sinyali gücünün, gürültü gücünden belirli miktar fazlası olması durumunda dış olayın var olduğuna karar verilmektedir. Bu karar mekanizması,

$$\mathcal{D} = \begin{cases} 1, & p_x > p_n + \Gamma \\ 0, & p_x \leq p_n + \Gamma \end{cases} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'deki gibi ifade edilebilir. Burada p_x ve p_n , sırasıyla ölçülen Rayleigh geri yansımalarının sinyal gücünü ve gürültü tabanını göstermektedir ve kullanıcı tanımlı güç ofset değeri, Γ olarak belirtilmiştir. Bu ifadede, $\mathcal{D} = 1$ olması tehdidin tespit edildiğini ifade etmektedir. Tehdit tespiti için uygulanan sinyal ön işleme yöntemleri ve gürültü tabanının belirlenmesi ile ilgili ayrıntılar için [2]'deki çalışma incelenmelidir.

3.2.1 Gaussian karışım modeli

Hedef tespitin düzgün yapılabilmesi için, (24)'de gösterilen güç eşik değerinin ($p_n + \Gamma$), doğru olarak bulunması önemli olmaktadır. Lazer kaynağının faz kayması ve fiber optik kablo karakteristikleri ile toprak tipi, ortam sıcaklığı gibi çevresel etmenler, gürültü tabanının (p_n) zaman ve mekânsal olarak değişmesine sebep olabilmektedir. Hedef tespitin başarılı şekilde (yüksek doğru tespit ve düşük hatalı tespit) yapılabilmesi için gürültü eşiğinin, sahadan toplanan sinyallere göre belirlenmesi ve belirli zamanlarda güncellenmesi gerekmektedir.

Gerçek zamanlı çalışan sistemden toplanan verilerin içeriği önceden bilinmeyeceği için, toplanan verilerden gürültü eşiğinin belirlenmesi aşamasında, iki senaryo dikkate alınmalıdır. Bunlardan ilki, toplanan verinin sadece gürültü ($w(t)$) barındırması, ikincisi ise toplanan verinin önceden bilinmeyen belirli zamanlarında sadece gürültü, diğer zamanlarında gürültü ve sinyalin birlikte bulunmasıdır. Geliştirilecek güç eşik değerinin belirlenmesi yaklaşımı, iki senaryodaki veriler için de kullanılabilir olmalıdır. Bunun sağlanması için bu kısımda, tekli ve ikili Gaussian karışım modellerinin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım önerilmiştir.

Önerilen yaklaşımda, belirli bir zaman çerçevesinde toplanan verilerin işlenmesi ile elde edilen sinyal güç dağılımlarına, hem tek bir Gaussian modeli hem de ikili Gaussian karışım modeli uydurması uygulanmıştır. Belirli zaman çerçevesinde ölçülen sinyal güç dağılımları, $\mathbf{P} = [p_x(1), p_x(2), \dots, p_x(F)]$ olarak ifade edildiğinde, Gaussian model uydurmaları,

$$\{\hat{\mu}_0, \hat{\sigma}_0\} = \arg \min_{\{\mu_0, \sigma_0\}} |\text{hist}(\mathbf{P}) - \mathcal{N}(\mu_0, \sigma_0)|^2, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
& \{\hat{\mu}_1, \hat{\sigma}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2, \hat{\alpha}, \hat{\beta}\} \\
& = \arg \min_{\{\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \alpha, \beta\}} |hist(\mathbf{P}) \\
& \quad - (\alpha \mathcal{N}(\mu_1, \sigma_1) + \beta \mathcal{N}(\mu_2, \sigma_2))|^2
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'teki gibi yazılabilir. Burada, $hist(\mathbf{P})$, sinyal güç dağılımının histogramını göstermekte, (μ_i, σ_i) , i 'nci Gaussian modelinin ortalama değeri ve standart değerini ifade etmektedir. Denklem 3.5'deki $0 \leq \alpha \leq 1$ ve $0 \leq \beta \leq 1$ parametreleri, toplamları 1 olmak üzere girişim oranlarını göstermektedir. Aslında, Denklem 3.4'deki model, kullanılan sinyal güç dağılımının, sadece gürültü içermesi durumunda, Denklem 3.5 ise aktivite ve gürültü içermesi durumunda kullanılması uygun olacaktır. Fakat toplanan verilerin hangi karakteristiği içerdiği önceden bilinmediğinden, bu iki modelden hangisinin eşik belirlemede kullanılacağı eldeki veriye göre belirlenmelidir. Bunun için, her iki modelin model uydurma hataları karşılaştırılarak bir seçim yapılmıştır. Eldeki sinyal güç dağılımına en düşük hata ile uydurula-bilen modelin seçimi,

$$\mathcal{M} = \begin{cases} 1, & |hist(\mathbf{P}) - (\hat{\alpha} \mathcal{N}(\hat{\mu}_1, \hat{\sigma}_1) + \hat{\beta} \mathcal{N}(\hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2))|^2 \\ & > |hist(\mathbf{P}) - \mathcal{N}(\hat{\mu}_0, \hat{\sigma}_0)|^2 \\ 2, & \text{aksidurumda} \end{cases} \tag{3.6}$$

Denklem 3.6'daki gibi yapılmaktadır. Burada $\mathcal{M} = 1$ durumunda, sinyal güç dağılımının sadece gürültü içerdiği değerlendirilmektedir. $\mathcal{M} = 2$ olması durumunda ise sinyal güç dağılımının hem gürültü hem de aktiviteyi içerdiği değerlendirilmektedir. Hedef tespiti için güç eşik değerinin bu iki durumda nasıl hesaplanacağı ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

3.2.2 Gerçek zamanlı çalışma analizi

Önerilen gürültü tabanı güncellemesi, toplanan verilerden hesaplanan F adet sinyal güç değerinin istatistiksel analizi sonucu yapılmaktadır. Bu durum, hesaplanan gürültü tabanının gecikmeli olarak sisteme yansıtılmasını gerektirmektedir. Bir başka deyişle, hesaplanan gürültü tabanı, yeni bir gürültü tabanı hesaplanıncaya kadar sistemde kullanılmaktadır. Gürültü tabanı güncelleme zamanı, toplanan verinin büyüklüğüne ve kullanılan fiber optik kablo uzunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Bunun için \mathcal{C} , toplam kanal sayısı³ olmak üzere $F \times \mathcal{C}$ boyutunda bir dairesel tampon bellek alanı oluşturulmuştur. İlk başta boş olan bu tampon bellek, her gelen yeni veriden hesaplanan sinyal güç değerleri ile doldurulmaya başlanmıştır. Tampon bellek dolduğunda, belleğin bir kopyası alınarak yukarıda açıklanan yöntemlerle gürültü tabanı hesaplanması için kullanılmaktadır. Hesaplamalar yapılırken, yeni bir veri geldiğinde sinyal güç değeri dairesel formatta tampon belleğe yazılmaktadır. Gürültü tabanı kestirim algoritması tamamlandığında, tampon belleğin o anki yedeği alınarak yeni gürültü tabanının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Böylece, arada herhangi bir zaman boşluğu yaratmadan, gürültü tabanı güncellemesi yapılabilmektedir.

3.3 Sistem Başarımı

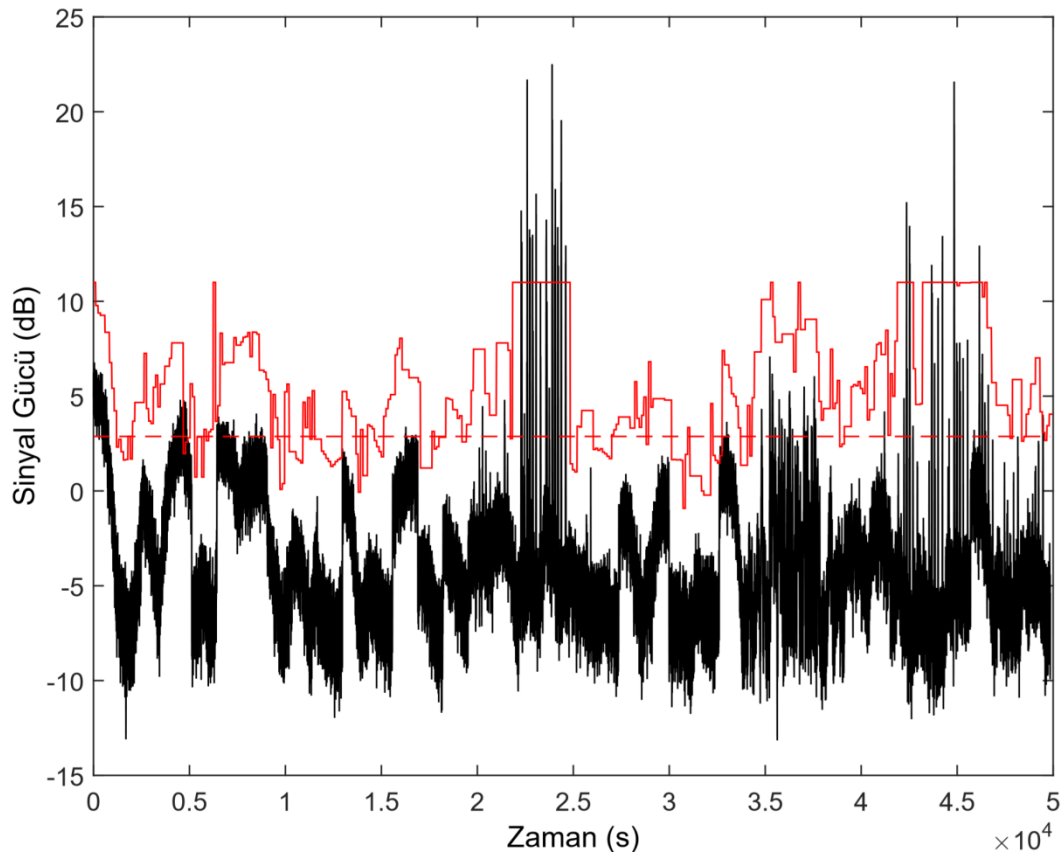
Önerilen uyarlamalı güç eşikleme yaklaşımının tehdit tespit başarımı, toprağın 1 metre altına yerleştirilmiş 50 kilometrelik fiber optik kablodan toplanan gerçek saha verileri üzerinde test edilmiştir. Veri toplama sırasında farklı kanallarda farklı türde aktiviteler (yürüme, kazma, araç hareketi) yapılmıştır. Saha şartlarındaki güvenlik durumundan dolayı, uzun zamanlı kayıtlar alınamadığından, önerilen yöntemin testi için farklı kanallardan toplanan veriler ard arda eklenerek yaklaşık iki buçuk saatlik bir veri kaydı oluşturulmuştur. Aşağıda belirtilen testler, oluşturulan bu kayıt üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Kayıtlı verilerden, farklı sinyal ön işleme algoritmaları⁴ kullanılarak sinyal güç dağılımları hesaplanmıştır. Farklı algoritmalarla elde edilen sinyal güç dağılımları ve farklı çerçeve değerleri (F) için bu sinyal güç dağılımları kullanılarak hesaplanan güç eşik değerleri Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekillerde, sinyal güç dağılımı, siyah tek parça, uyarlamalı güç eşik değeri, kırmızı tek parça ve kullanıcı tarafından belirlenen ve zamanla değiştirilmeyen güç eşik değeri kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Hesaplamalarda istenen hatalı tespit oranı $p_f = 2.41 \times 10^{-6}$, istenen doğru tespit oranı $p_d = 0.85$, kullanıcı tanımlı öteleme değeri $\Gamma = 3$ dB ve sistem genelinde kullanılan en büyük gürültü tabanı Ψ , Algoritma-1 için 8 dB, Algoritma-2 için -80 dB olarak seçilmiştir.

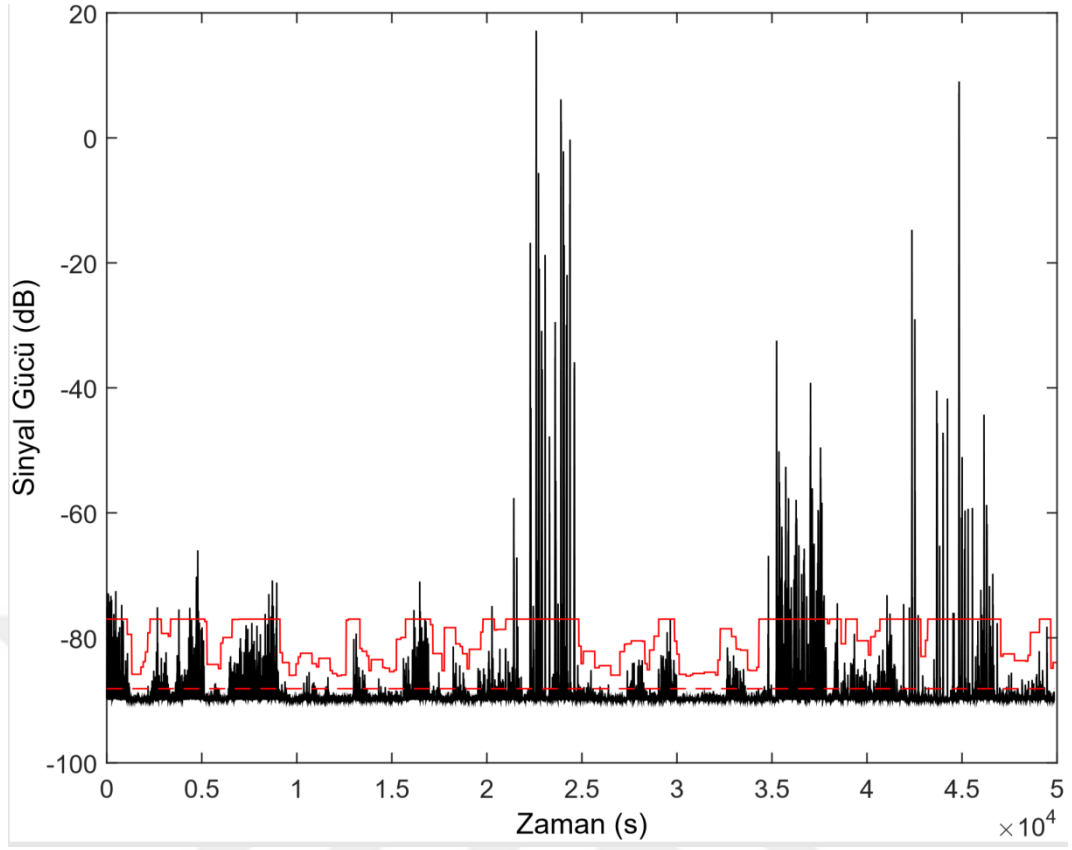
³ Kablo boyunca her 10 metre uzunluk bir kanala karşılık gelmektedir.

⁴ Kullanılan ön işleme algoritmalarının ayrıntılarına değinilmemiştir. İlgilenenlere, [2] makalesini incelemeleri önerilir.

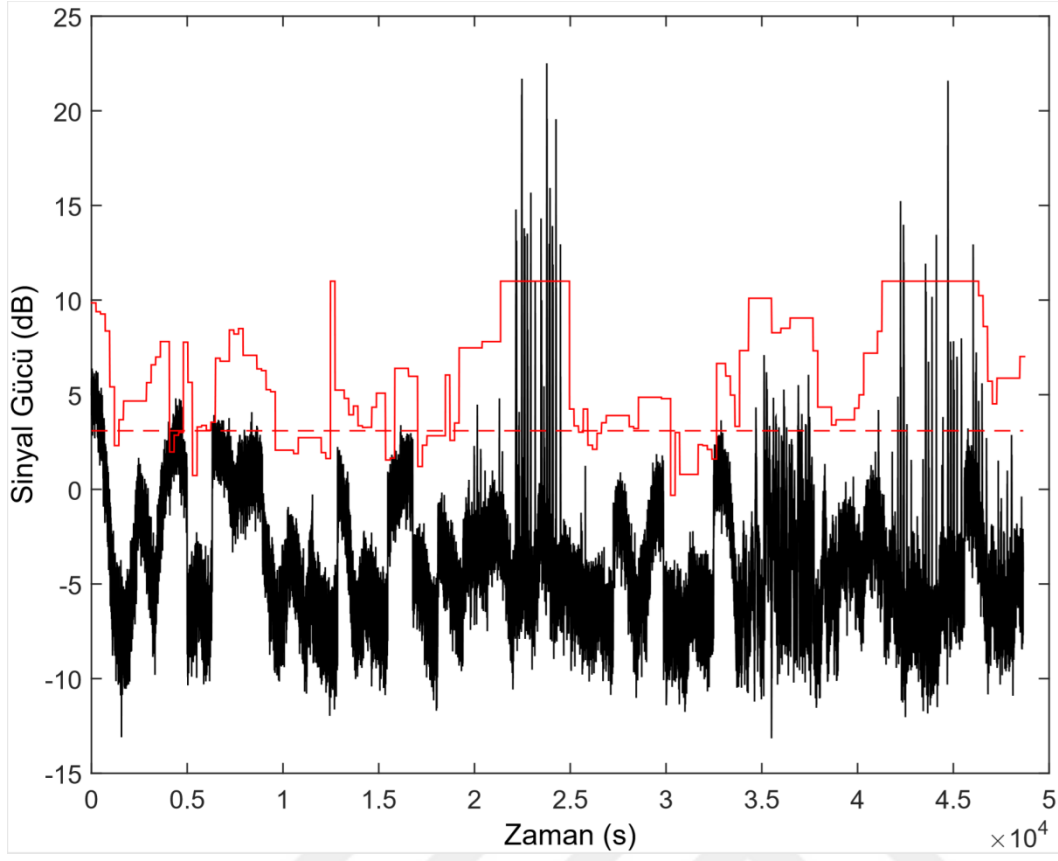
Hedef tespit başarımı, doğru ve hatalı tespit oranları üzerinden ölçülmüştür. Bunun için, toplanan verilerin ilgili zamanları, aktivitenin olduğu ve olmadığı bölgeler şeklinde belirlenmiştir. Aktivitenin olmadığı zaman dilimlerinde, belirlenen güç eşik değerini geçen güçte sinyal olması durumu, hatalı tespit olarak değerlendirilmiştir. Doğru tespit ise, aktivitenin olduğu zaman dilimlerinde, belirlenen güç eşik değerini geçen güçte sinyal olması olarak değerlendirilmiştir. Farklı algoritmalar ve farklı çerçeve değerlerinde (F) elde edilen tespit başarımları, Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Bu çizelgedeki "1" değeri, aktivitenin tespit edilebildiğini, "0" ise aktivitenin tespit edilemediğini göstermektedir.



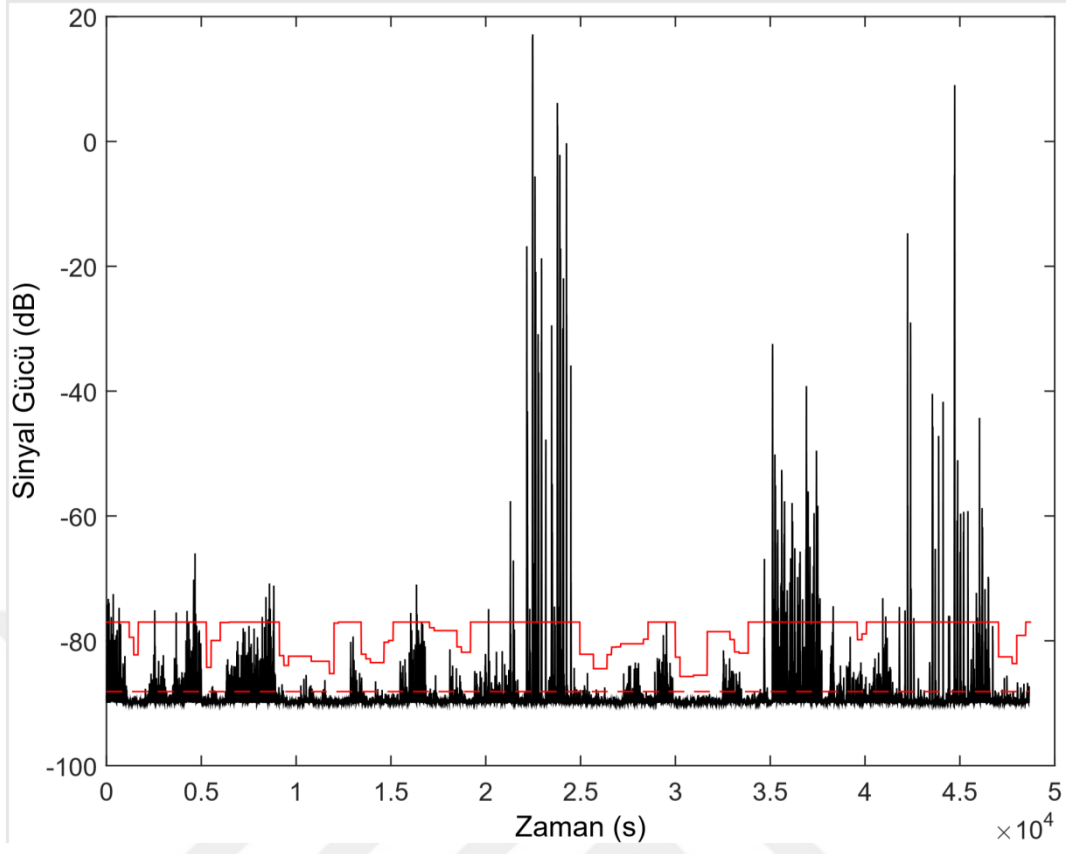
Şekil 3.1: Algoritma-1 için $F = 600$ durumunda hesaplanan güç eşik değerleri.



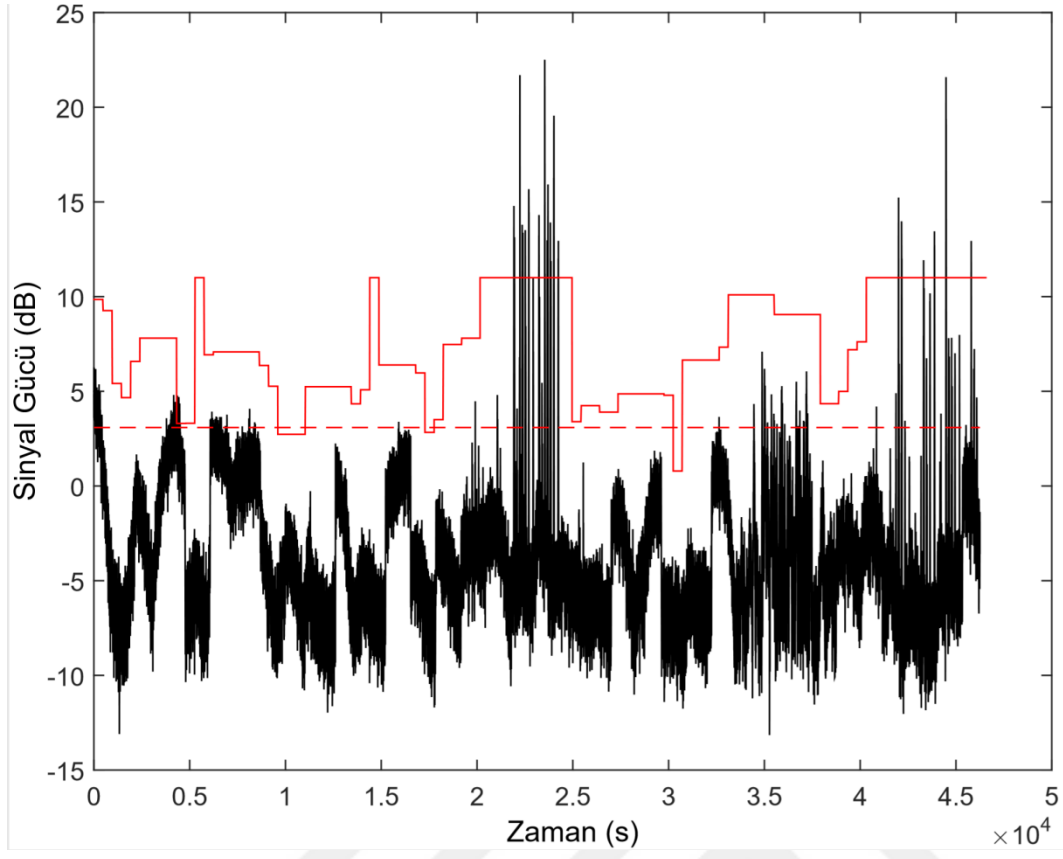
Şekil 3.2: Algoritma-2 için $F = 600$ durumunda hesaplanan güç eşik değerleri.



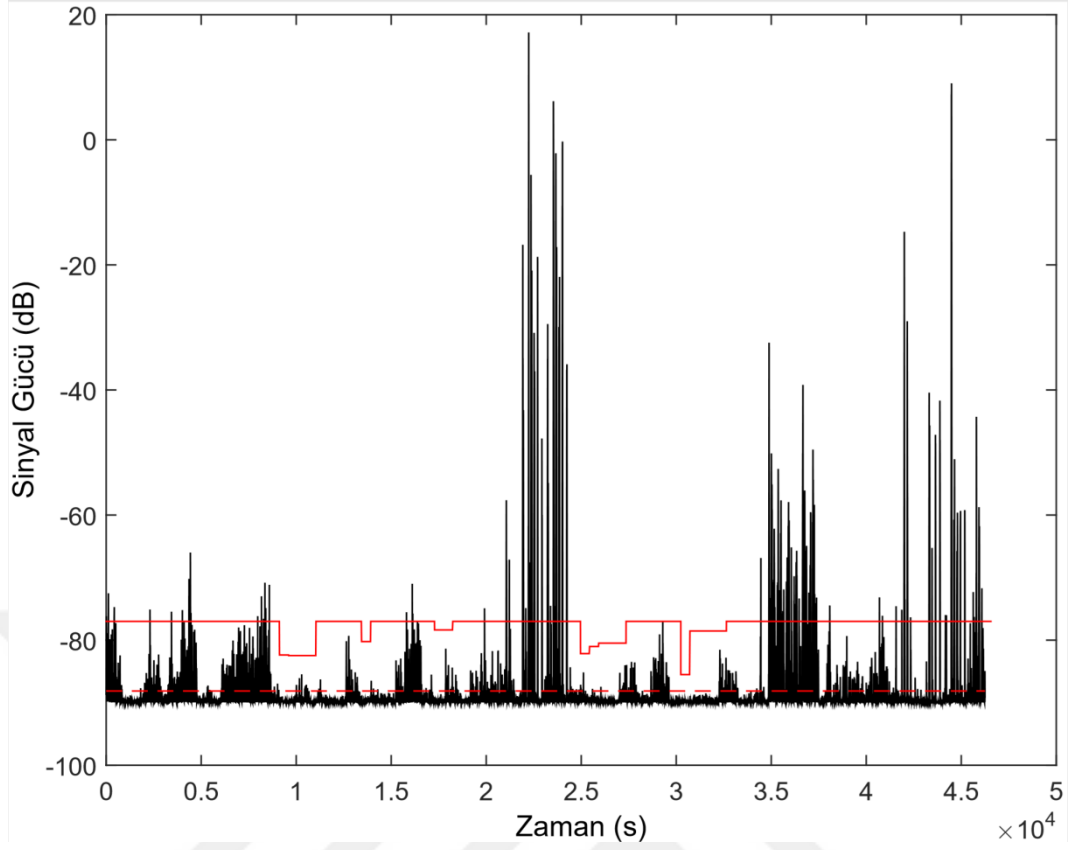
Şekil 3.3: Algoritma-1 için $F = 1200$ durumunda hesaplanan güç eşik değerleri.



Şekil 3.4: Algoritma-2 için $F = 1200$ durumunda hesaplanan güç eşik değerleri.



Şekil 3.5: Algoritma-1 için $F = 2400$ durumunda hesaplanan güç eşik değerleri.



Şekil 3.6: Algoritma-2 için $F = 2400$ durumunda hesaplanan güç eşik değerleri.

Farklı çerçeve değerleri (F) için tüm kanallara uygulanan uyarlamalı güç eşik belirleme algoritmasının çalışma zamanları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgeden görülebildiği gibi, uyarlamalı güç eşikleme algoritmasının çalışma süreleri, tampon belleğe yazma süresinden daha düşük kalmaktadır. Bu durum, güç eşik değerinin yeteri kadar hızlı güncellenebileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.1: Eşik belirleme algoritması çalışma zamanları.

	$F = 600$ (120 s)	$F = 1200$ (240 s)	$F = 2400$ (480 s)
Çalışma Zamanı (s)	71.52	72.82	101.99

Çizelge 3.2: Tespit çizelgesi

Zaman İndeksi/Şekil	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
	ALG-1 (F = 600)	ALG-2 (F = 600)	ALG-1 (F = 1200)	ALG-2 (F = 1200)	ALG-1 (F = 2400)	ALG-2 (F = 2400)
0-1500	0	1	0	1	0	0
2000-5500	1	1	1	1	1	1
6000-9500	0	1	0	1	0	1
12750-13750	0	0	0	0	0	0
15500-17000	0	1	0	1	0	0
18000-19200	0	0	0	0	0	1
21000-25000	1	1	1	1	1	1
27500-30000	0	0	0	0	0	0
32500-33750	0	0	0	0	0	0
34500-38000	0	1	0	1	0	1
38200-47000	1	1	1	1	1	1

4. DAĞITIK AKUSTİK ALGILAMA SİSTEMLERİNDE GERÇEK ZAMANLI SINIFLANDIRMA ANALIZI

4.1 Amaç

Bu kısımda, 50 kilometre uzunluğundaki doğrusal fiber optik hattın gözlemlenmesi amacıyla geliştirilen dağıtık akustik algılama sisteminde kullanılan gerçek zamanlı hedef teşhis yaklaşımı sunulmuştur. Hedef teşhisi için, evrimsel sinir ağları temelli derin öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. Farklı yapıda ve karmaşıklığındaki sinir ağlarının teşhis performansları ve çalışma süreleri ölçülmüştür. Hedef tespit performansını azaltmadan, tespit edilen tüm hedeflerin teşhis edilebilmesi için önerilen yaklaşım açıklanmıştır. Bu yaklaşımın uygulanabilmesi için kullanılacak ağ yapısının müsaade edilebilir en yüksek çalışma süresi, en kötü senaryo durumunda analiz edilmiştir. Bu sayede, sistemde kullanılacak en uygun ağ yapısı seçiminin hem başarımlı hem de gerçek zamanlı uygulanabilirlik kriterlerine göre yapılabilmesi sağlanmıştır.

4.2 Tehdit Teşhis Yaklaşımı

Gerçek saha verisi toplamak için, toprağın 1 metre altına gömülü olan yaklaşık 50 km uzunluğundaki fiber optik kablo kullanılmıştır. Bu kablonun çeşitli bölgelerinde kabloya farklı uzaklıklarda, çeşitli fiziksel aktiviteler yapılmış ve sistemden alınan sinyaller kayıt edilmiştir. Sonrasında, uzun zamanlı toplanan verilerden tehdit teşhisinin yapılabilmesi için veri seti oluşturulmuştur.

Dağıtık akustik algılama sisteminde, tespit edilmesi istenen tehditler, toprağa gömülmüş fiber optik kablonun dışından gelen mekanik titreşimlerdir. Bu titreşimler, ortam sıcaklığı, toprak yapısı, lazer frekansındaki sapma gibi birçok parametreye bağlı olarak değişen Rayleigh geri yansımaları şeklinde ölçülmektedir. Ölçülen sinyallerin modellenmesi için kabul görmüş kesin bir yaklaşım literatürde bulunmamaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı, tespit edilen olayların teşhis edilmesinde, model tabanlı yaklaşımlar başarılı sonuçlar vermemektedir. Bunun yerine, başarımlı yüksek

bir sınıflandırma yapabilmek için son zamanlarda kullanımı yoğun şekilde artan ve karmaşık sinyallerdeki örüntüleri başarılı bir şekilde çıkartabilen Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN) temelli Derin Öğrenme yaklaşımı tercih edilmiştir.

Tehdit teşhisi için izlenen yöntemin ayrıntıları aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

4.2.1 Veri seti oluşturma

Tehdit teşhisinin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için, eğitimde kullanılan veri setinin doğru şekilde oluşturulması kritik öneme sahiptir. Maalesef, dağıtık akustik algılama sistemleri için ortak kabul görmüş, açık bir veri seti mevcut değildir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında kullanılan veri seti, gerçek saha şartlarında, geliştirilen prototip sistem kullanılarak toplanan verilerden üretilmiştir. Veri seti üretimi için izlenen yöntem, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Mevcut saha şartları gözetilerek, dört farklı türde aktivite için veri toplanmıştır. Bu aktiviteler, "Araç hareketi", "Yürüme/Koşma", "Kazma" ve "Rögar Aktivitesi"⁵ olarak belirlenmiştir. Söz konusu aktivitelere ait eğitim veri setinin oluşturulması aşamasındaki etiketleme iş yükünün azaltılabilmesi amacıyla, bir anda sadece tek bir aktivite türü olan kayıtlar alınmıştır. Kayıtlı veriler, belirlenen hedef tespit algoritmalarından [2] geçirilerek, aktivitelerin yapıldığı zaman dilimleri tespit edilmiştir. Sonrasında, hedefin tespit edildiği anın öncesindeki ve sonrasındaki belirli bir süreyi içeren zaman penceresindeki ham verilerin kısa süreli Fourier Dönüşümleri veri seti olarak kaydedilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan zaman penceresi, toplam beş⁶ saniye olarak belirlenmiştir. Bu işlem, hedefin tespit edildiği her bir zaman için tekrarlanarak tüm aktiviteler için veri seti kümeleri oluşturulmuştur.

4.2.2 Gerçek zaman analizi

Sistemin tespit performansını azaltmadan (tespit edilebilen hiç bir hedefi kaçırmadan), tespit edilen tüm aktivitelerin teşhis edilebilmesi, tespit ve teşhis algoritmalarının toplam çalışma sürelerinin, algoritmalarda kullanılacak verilerin toplanma süreleri ile sınırlı olmasını gerektirmektedir. Bölüm 2.2’de bahsedildiği gibi, Şekil 2.1’de

⁵ Sahada fiber optik kablo, rögarların içinden geçmekte ve rögarların yakınlarındaki aktiviteler, ölçülebilir seviyede sinyal üretmektedir.

⁶ Hedef tespit edilen anın 2.5 saniye öncesi ve 2.5 saniye sonrası olmak üzere

gösterilen prototip optik sorgulama sistemi, 100 ns'lik optik darbeleri, 1920 Hz frekansında göndermekte ve her bir sorgulamada toplam 5150 kanaldan veri toplanmaktadır. Hedef tespiti için ardarda gönderilen 400 adet optik darbeden elde edilen sinyallerin güç değerleri belirli bir eşik değeri ile karşılaştırılmaktadır [2]. Bu durumda, tüm kanallar için hedef tespit ve teşhis algoritmaların toplam çalışma süresi en fazla, $400/1920 \approx 0.208$ saniye olmaktadır. Hedef tespit algoritmasının ortalama çalışma süresi⁷ 50 ms olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, hedef teşhis algoritması, yaklaşık 150 ms içerisinde tamamlanmalıdır.

Hedef teşhis algoritması, hedefin tespit edilmesinden sonra devreye girdiğinden, teşhis algoritmasının çalıştırılacağı toplam kanal sayısı zamanla değişebilmektedir. Bu nedenle gerçek zamanlı çalışma analizinin, en kötü senaryoda yapılması uygun olacaktır. En kötü senaryo, tüm kanallarda (bizim durumumuzda 5150) ve tüm zamanlarda, hedefin tespit edilmesi durumudur. Her bir kanal bağımsız birer sensör olarak ele alındığında, en kötü senaryo durumunda kanal başına teşhis algoritmasının çalışma süresi $29.13 \mu s (= 150 \text{ ms}/5150)$ olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Rafta hazır ürün olarak tedarik edilerek kullanılacak bir bilgisayar yapısında, bu değer elde edilebilmesi pek mümkün görünmediğinden, hedef tespit edilen kanalların gruplanarak işlenmesi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde, ilk önce hedef tespit edilen kanallardaki 5 saniyelik veriler (sinyal güç değerinin eşik değerini geçtiği anın 2.5 saniye öncesi ve 2.5 saniye sonrası) bir tampon belleğe yazılmaktadır. Daha sonra, bu kanallardan en fazla N tanesi için teşhis algoritması çalıştırılmaktadır. Tampon bellekte N 'den fazla kanal bulunması durumunda diğer kanallar için teşhis algoritması bir sonraki periyotta yapılmaktadır. Bu döngü, tamponda işlenmemiş (teşhis algoritmasına sokulmamış) hiç bir kanal kalmayınca kadar devam etmektedir. Buradaki kritik nokta, tampon belleğin belirli bir sürede boşaltılabileceğinin garanti lenmesidir. Bir başka deyişle, tespit algoritması tampon belleğe yazma, teşhis algoritması ise tampon bellekten okuma olarak değerlendirildiğinde, okuma hızının yazma hızından düşük olmaması gerekmektedir. Bu durum, ya okuma hızının artırılması ya da yazma hızının düşürülmesi ile gerçekleştirilebilir. En kötü senaryodaki hedef tespit edilebilecek kanal sayısının çokluğu düşünüldüğünde, yazma hızının düşürülmesi daha uygulanabilir. Teşhis algoritması, hedef tespitinin yapıldığı anın 2.5

⁷ Belirtilen süreler, algoritmaların Intel Core i7 3.40 GHz CPU ve 32 GB of RAM yapılanmasında GTX-1080 GPU üzerinde koşut olarak ölçülmüştür.

saniye sonrasındaki verileri de kullandığından, belirli bir kanalda hedef tespit edilip tampon belleğe yazıldıktan sonra 2.5 saniye boyunca ilgili kanal için başka bir yazma işleminin yapılmasına gerek yoktur. Bu yaklaşımda, en kötü senaryo durumunda tampon belleğin boşaltılabileceğinin garantilenmesi için, olası en küçük N sayısı, $N > \frac{MP}{T}$ olarak bulunabilir. Burada M , toplam kanal sayısını, T , teşhis algoritmasında hedef tespitinin yapıldığı andan sonra kullanılan zaman çerçevesini ve P , teşhis algoritmasının tamamlanması gereken süreyi belirtmektedir. Bu durumda, herhangi bir kanalda tespit edilen aktivitenin teşhisi, en fazla $T + \frac{M}{N}P$ saniye gecikmeli olarak yapılabilmektedir. $M = 5150$, $T = 2.5$ s ve $P = 150$ ms olarak alındığında en küçük N değeri 309, en fazla gecikme ise beş saniye olarak bulunmaktadır.

4.3 Tehdit Teşhis Yöntemi

Bölüm 4.2.2’de bulunan değerlerin, belirli bir teşhis doğruluk oranı ile sağlanabilmesi için farklı yapıdaki CNN mimarileri denenmiş ve teşhis doğruluk oranları ve çalışma süreleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizler sonucu, gerçek zamanlı çalışma kriterlerini sağlayan en uygun (başarımı en yüksek) ağ yapısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Kullanılan Evrişimli Sinir Ağı mimarileri, farklı sayıda evrişimsel katmandan oluşmaktadır. Tüm mimarilerde son katman tam bağlantılıdır ve bu katmanın çıktısında, sistemde teşhis edilmesi istenen olay tiplerinin sayısı kadar sınıfa dağıtılmış olasılık değerleri elde edilir. Bütün evrişimsel katmanlardan sonra Doğrultulmuş Lineer Unite (Rectified Linear Unit, RELU) aktivasyonu kullanılmıştır. Her bir evrişimsel katmandan sonra Batch Normalization bloğu kullanılmıştır. Kullanılan mimarilerdeki evrişimsel katmanlardaki filtre boyutları, filtre sayıları, stride ve maksimum havuzlama (max pooling) değerleri ve toplam parametre sayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir. "Ağ-x" olarak isimlendirilen ağ yapılarındaki x değeri, ağ yapısındaki evrişimsel katman sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.1: Evrişimsel sinir ağları yapıları

	Filtre Boyut	Filtre Sayısı	Stride	Max Pool	Parametre
Ağ-1	3 × 3	8	1	2	38652
Ağ-2	3 × 3	16	1	2	20668
Ağ-3	3 × 3	32	1	1	44604
Ağ-4	3 × 3	64	1	1	101692
Ağ-5	3 × 3	128	1	1	252732
Ağ-6	3 × 3	256	1	2	471868
Ağ-7	3 × 3	512	1	1	1730364

Farklı ağ yapıları için, değişik türdeki aktivitelerin teşhis doğruluk oranları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Doğruluk değerlerinin hesaplanmasında, eğitim veri seti dışında tutulan ve aynı yöntemle farklı zamanlardaki kayıtlardan oluşturulan test veri setleri kullanılmıştır. Çizelgedeki "Ortalama" doğruluk oranları, herbir sınıfın doğruluk oranlarının ilgili sınıfdaki toplam veri setine göre ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanmıştır. Çizelgeden görülebildiği gibi tüm ağ yapılarında "Kazma" ve "Rögar" aktiviteleri çoğunlukla yüksek doğrulukla bulunabilmektedir. Ayrıca, ağ yapısının daha karmaşık olarak kullanılmasının test doğruluk oranlarını her zaman artırmadığı, Çizelge 4.2’de Ağ-7 yağısının test doğruluk oranının en küçük olmasından anlaşılabilir. Bu durum, yapay sinir ağ yapılarındaki aşırı uyum (overfitting) problemi ile açıklanabilir.

Çizelge 4.2: Teşhis doğruluk oranları

	Araba	Kazma	Yürüme	Rögar	Ortalama
Ağ-1	96.51	100.00	92.38	96.34	96.10
Ağ-2	97.12	100.00	95.99	100.00	97.17
Ağ-3	90.56	100.00	97.19	98.37	91.68
Ağ-4	97.00	100.00	96.79	100.00	97.14
Ağ-5	93.85	100.00	91.18	99.19	93.88
Ağ-6	93.17	95.65	94.59	100.00	93.67
Ağ-7	84.22	100.00	92.79	98.78	85.91

Ortalama doğruluk oranı en büyük olan Ağ-2 yapısına ait karışıklık matrisi Çizelge 4.3'te verilmiştir. Test veri setindeki her bir aktiviteye ait toplam veri sayısı, çizelgenin "Toplam" kolonunda belirtilmiştir. Verilerin toplandığı saha şartları tüm aktivitelerin toplanmasına aynı oranda müsait olmadığından veri setlerinin büyüklükleri farklılık göstermektedir. Karışıklık matrisine göre "Araba" sınıfı en çok "Yürüme" aktivitesi ile karıştırılırken, "Yürüme" aktivitesi en çok "Rögar" aktivitesi ile karıştırılmaktadır. "Kazma" ve "Rögar" aktiviteleri ise herhangi bir sınıf ile karıştırılmadan doğru olarak teşhis edilebilmektedir.

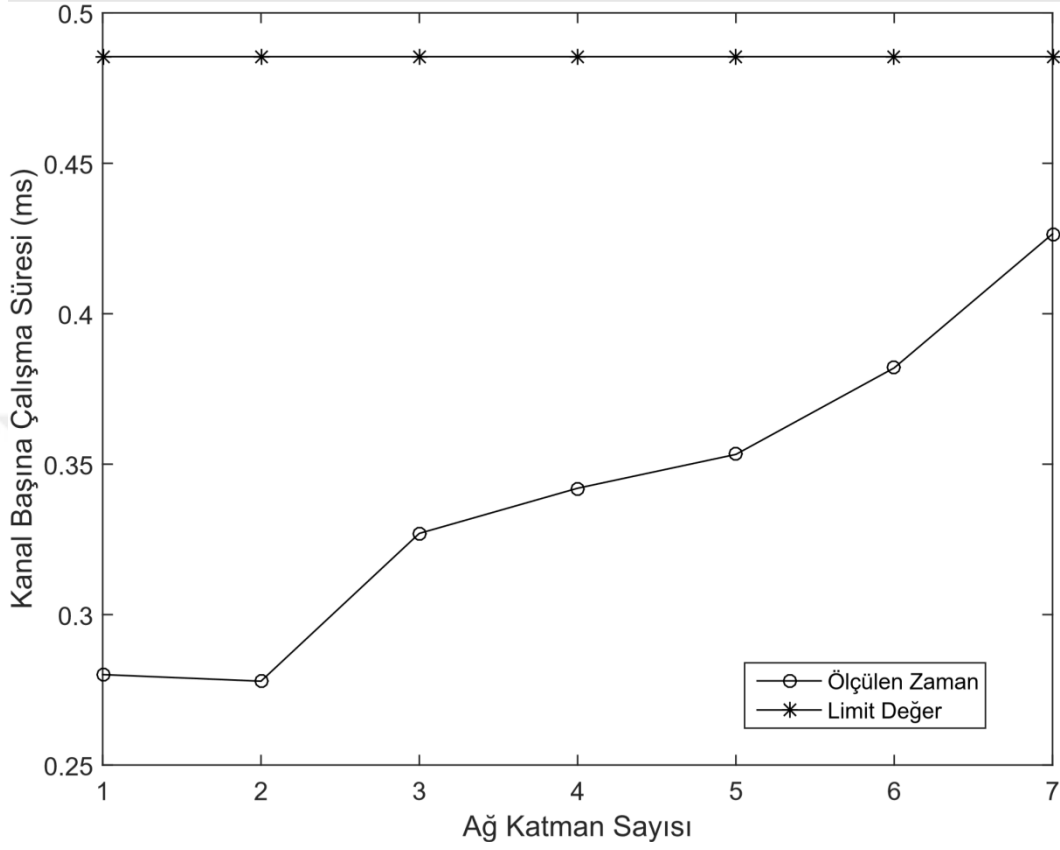
Çizelge 4.3: Ağ-2 için karışıklık matrisi

Tür	Araba	Kazma	Yürüme	Rögar	Toplam
Araba	3982	0	94	24	4100
Kazma	0	23	0	0	23
Yürüme	1	3	479	16	499
Rögar	0	0	0	246	246

Son analiz olarak, farklı ağ yapıları kullanılarak gerçekleştirilen teşhisin çalışma süreleri ölçülmüştür. Teşhis algoritması, hedef tespit edildikten sonra devreye girdiğinden, teşhis algoritmasının çalışma süresi, toplam kaç kanalda hedef tespit edildiğine göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, farklı ağ yapılarının çalışma süreleri, kanal başına çalışma süresi olarak ölçülmüştür. Ağ yapıları, GTX-1080 GPU'su üzerinde 309'lük yığınlar⁸ şeklinde çalıştırılmış ve toplam çalışma süresi 309 kanala bölünerek kanal başına çalışma süresi olarak Şekil 4.1'de "Ölçülen Değer" olarak gösterilmiştir. Burada "Limit Değer" olarak ifade edilen değer, 4.2.2'de yapılan analiz sonucu, teşhisin gerçek zamanlı çalışması için mücadele edilebilir en büyük çalışma süresini ifade etmektedir. Çalışma süreleri bu değer altında kalan ağ yapıları, tüm kanallardan tüm zamanlarda hedef tespitinin yapıldığı en kötü senaryoda güvenli bir şekilde gerçek zamanlı olarak çalışabilecektir. Aksi durumda, hedef tespit performansında azalma veya tespit edilen her hedefin teşhis edilememesi sonucunu doğurabilecektir. Fakat bu ağ yapıları, her kanalda aktivitenin olmadığı durumlarda (sistemin gerçek çalışma aşamasında beklenen durum), tespit performansını azaltmadan veya teşhis edilemeyen hedef bırakmadan da kullanılabilirler. Şekil 4.1'den görülebildiği kadarıyla en karmaşık ağ olan "Ağ-7" nin çalışma süresi bile mücadele edilebilir çalışma süresinin altında kalmaktadır. Bu nedenle, önerilen teşhis yaklaşımı, daha karmaşık ağların da teşhis için kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum,

⁸ Bölüm 4.2.2'de en kötü senaryoya göre yapılan analiz sonucu aynı anda çalıştırılması gereken en küçük kanal sayısı 309 olarak bulunmuştur

teşhis edilmek istenen hedef türünün ihtiyaçlara göre artması durumunda sistemin geliştirilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1: Farklı katman sayısına sahip ağ yapılarının (Çizelge 6) kanal başına düşen teşhis çalışma süresi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezin ilk kısmı olan Bölüm 2’de, değişen sistem parametreleri altında alınan sinyale sönümlenme oranının etkilerini simüle etmek için Rayleigh saçılımını temel alan bir model analizi sunulmuştur. Sistem parametreleri olarak lazer frekans kayması, sönümlenme oranının doğrudan aktivite tespiti üzerine etkileri, fiber hat uzunluğunun aktivite tespitine etkisi, olay bağlaşımının sinyal gücüne etkileri, AOM ve EOM karşılaştırması, ADC kenar yumuşatması filtresi etkileri, ADC bit çözünürlüğü etkileri ve laboratuvar ölçümleri incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, sönümlenme oranının sistemin algılama performansına doğrudan bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bölüm 2.4’de tüm simülasyon sonuçları yer almaktadır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, sistem parametrelerin iyileştirilmesi ile sinyal gücünde iyileşmeler sağlanırken, yetersiz bir sönümlenme oranı sebebiyle bu iyileştirmeler yetersiz kalmaktadır. Ek olarak, simülasyon sonuçlarından gözlemlenen bir diğer husus, sönümlenme oranının iyileştirilmesi, sistem parametrelerindeki değişimlere karşı sistemi daha dirençli hale getirdiği ve sinyal gücü olumsuz etkilense de sistemin tespit kabiliyetinin devam ettiği söylenebilir.

Tezin ikinci kısmında, tehdit tespit yaklaşımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında Gaussian Karışım Modeli uygulanıp bu modelin gerçek zamanlı çalışma analizi yapılmıştır. Çizelge 3.2 ve Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 incelendiğinde, Algoritma-1 (Şekil 3.1, Şekil 3.3, Şekil 3.5), sadece yüksek sinyal gücüne sahip olan aktivitelerin tespiti yapılabilmektedir. Algoritma-2 (Şekil 3.2, Şekil 3.4, Şekil 3.6) yüksek sinyal gücüne sahip aktiviteler yanında düşük sinyal gücüne sahip aktivitelerin de tespiti yapılabilmektedir. Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6, kullanıcı tabanlı verilen sabit eşik değeri, kayıtlı tüm veri kullanılarak önerilen güç eşikleme yöntemi ile hesaplanan eşik değerini ifade etmektedir. Sabit güç eşikleme ve uyarlamalı güç eşikleme yöntemleri karşılaştırıldığı zaman, sabit güç eşikleme, yüksek tespit oranına sahipken çok fazla sayıda hatalı tespite neden olmaktadır. Bunun yanında, uyarlamalı güç eşikleme, çerçeve değeri (F) düştükçe tespit oranı artmakta ve sabit güç eşikleme durumuna nispeten çok daha az hatalı tespite neden olmaktadır. Çizelge 3.1 incelendiği zaman,

eşik belirleme algoritmalarının sisteme uygun gerçek zamanlı çalıştığı ve geriye oldukça fazla zaman bütçesi bıraktığı gözlemlenmektedir.

Tezin son kısmında, tespit edilen aktivitelerin teşhis edilmesi yani sınıflandırılması ile ilgili yaklaşım anlatılmıştır. Sisteme uygulanabilirliği hakkında bu yaklaşımın gerçek zaman analizi yapıp sistem uyumluluğu tartışılmıştır. Teşhis için evrimsel sinir ağları kullanılmış, ağ yapısının derinleşmesi gerçek zamanlı çalışması kriteri de göz önünde bulundurularak derin ağ yapıları incelenmiştir. Çizelge 4.1'de evrimsel sinir ağları yapıları gösterilmiştir. Gerçek zaman analizi sonucu Şekil 4.1'de verilmiştir. İncelendiğimiz zaman Çizelge 4.1'deki Ağ-7 yapısının dahi gerçek zamanlı çalışma sınırları içinde olduğunu ve ağ yapısının karmaşıklaşmaya müsait olduğu gözlemlenmektedir. Ağ yapılarının başarımlarını incelediğimiz zaman (Çizelge-4.2), bütün ağ yapılarının Ağ-7 hariç yüzde 90 üzerinde çıkmıştır. Ağ-7 başarımının diğerlerine göre kompleks olmasına rağmen düşük çıkmasının sebebinin ezberleme (overfitting) olduğu düşünülmektedir. Çizelge 4.2 incelendiği zaman "Kazma" ve "Rögar" aktivitelerinin yüksek oranda doğru tespit edildiği gözlemlenmiştir. Ağ-2'nin ise en yüksek ağırlıklı ortalamaya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Karışıklık Matrisi (Çizelge 4.3) incelendiğinde "Araba" aktivitesinin en çok "Yürüme" ile karıştığını, "Yürüme" aktivitesinin "Rögar" aktivitesiyle karıştığı gözlemlenmiştir. Gerek ağ yapısının derinleştirilebilmesi, gerek ise 4 farklı sınıfı %97,17 gibi başarımla ayırabilmesi sebebiyle yapılan çalışma genişlemeye müsaittir.

KAYNAKLAR

- [1] **Baker, C., Vanus, B., Wuilpart, M., Chen, L., and Bao, X.**, “Enhancement of optical pulse extinction-ratio using the nonlinear kerr effect for phase-otdr,” *Optics Express* 24, 19424–19434 (2016).
- [2] **M. Aktas, T. Akgün, M. U. Demircin, D. Büyükaydin, T. Kartaloglu, F. Uyar, C. Kanbak and İ. T. Özdür**, “Threat Detection for Distributed Acoustic Sensing”, *Uluslararası Bilgisayar Mühendisleri Konferansı*, Oct. 2016.
- [3] **Barnoski, M. K., Rourke, M. D., Jensen, S. M., and Melville, R. T.**, “Optical time domain reflectometer,” *Applied Optics* 16, 2375–2379 (1977).
- [4] **Barnoski, M. K. and Jensene, S. M.**, “Fiber waveguides - novel technique for investigating attenuation characteristics,” *Applied Optics* 15, 2112–2115 (1976).
- [5] **Hill, D.**, “Distributed acoustic sensing (das): Theory and applications,” in [Frontiers in Optics 2015], *Frontiers in Optics 2015, FTh4E.1*, Optical Society of America (2015).
- [6] **Juarez, J. C., Maier, E. W., Choi, K. N., and Taylor, H. F.**, “Distributed fiberoptic intrusion sensor system,” *J. Lightw. Technol.* 23, 2081–2087 (2005).
- [7] **Juarez, J. C. and Taylor, H. F.**, “Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters,” *Applied Optics* 46, 1968–1971 (2007).
- [8] **Qin, Z., Chen, L., and Bao, X.**, “Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor,” *IEEE Photonic Tech. Lett.* 24, 542–544 (2012).
- [9] **Koyamada, Y., Imahama, M., Kubota, K., and Hogari, K.**, “Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurement resolution over long range using coherent otdr,” *J. Lightw. Technol.* 27, 1142–1146 (2009).
- [10] **J. Park, H. F. Taylor**, “Fiber Optic Intrusion Sensor using Coherent Optical Time Domain Reflectometer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, 2003.
- [11] **Y. Lu, T. Zhu, L. Chen, and X. Bao**, “Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR,” *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 22, pp., 3243–3249, (2010).
- [12] **Makarenko, A. V.**, “Deep learning algorithms for signal recognition in long perimeter monitoring distributed fiber optic sensors,” *IEEE 26th Int. Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*, 1–11 (2016).

- [13] **Aktas M., Akgun T., Demircin M.U., and Buyukaydin D.**, “Deeplearning based multi-thread classification for phase-otdr fiber optic distributed acoustic sensing applications,” in [Fiber Optic Sensors and Applications XIV], Proc. SPIE 10208(2017).
- [14] **M.Aktas, T.Akgün, M.U Demircin and D.Büyükaydin**, "Dağıtık Akustik Algılama Sistemlerinde Derin Öğrenme Tabanlı Tehdit Teşhisi", IEEE 25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Mayıs 2017.
- [15] **Zhirnov, A., Fedorov, A., Stepanov, K., Nesterov, E., Karasik, V., Svelto, C., and Pnev, A.**, “Effects of laser frequency drift in phase-sensitive optical time-domain reflectometry fiber sensors,” ArXiv e-prints (Apr. 2016).
- [16] **Liokumovich, L.B., Ushakov, N.A.,Kotov,O.I.,Bisyarin,M.A.,andHartog, A. H.**, “Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: Signal model under static fiber conditions,” Journal of Lightwave Technology 33(17), 3660–3671 (2015).
- [17] **Shi, Y., Feng, H., and Zeng, Z.**, “A long distance phase-sensitive optical time domain reflectometer with simple structure and high location accuracy,” Sensors 15, 21957–21970 (2015).
- [18] **Zhong, X., Zhang, C., Li, L., Liang, S., Li, Q., Lu, Q., Ding, X., and Q, Q. C.**, “Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor,” Applied Optics 53(21), 4645–5460 (2014).
- [19] **Zhu, F., Zhang, X., Xia, L., Guo, Z., and Zhang, Y.**, “Active compensation method for light source frequency drifting in phase-otdr sensing system,” IEEE Photonics Technology Letters 27(24), 2523–2526 (2015).
- [20] **Goodman, J. W.**, [Statistical Optics], Wiley-Interscience, New York (1985).
- [21] **Udd, E. and Spillman, W. B.**, [Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists], Wiley, Hoboken, NJ, second ed. (2011).
- [22] **Gregory R. Osche**, “Optical Detection Theroy for Laser Applications,” Wiley-Interscience, 2002.
- [23] **Y. Muanenda, C. J. Oton, S. Faralli and F. Di Pasquale**, “A Cost-Effective Distributed Acoustic Sensor Using a Commercial Off-the-Shelf DFB Laser and Direct Detection Phase-OTDR,” in IEEE Photonics Journal, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, Feb. 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : HAKAN MARAL
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.08.1993 - BOLU
E-posta : hmaral@aselsan.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Tam Burslu Yük. Lis. Öğr.
2017-	ASELSAN A.Ş.	Sistem Tasarım Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce, Almanca

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Metin Aktas, Hakan Maral and Toygar Akgun**, 2018. A Model-based Analysis of Extinction Ratio Effects on Phase-OTDR Distributed Acoustic Sensing System Performance, SPIE Photonics West, San Francisco, Amerika.
- **Hakan Maral, Metin Aktas and Toygar Akgun**, 2018. Real Time Classification Analysis in Distributed Acoustic Sensing Systems, 2018. IEEE 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, İzmir, Türkiye.
- **Hakan Maral, Metin Aktas and Toygar Akgun**, 2018. Adaptive Power Thresholding for Real Time Threat Detection in Distributed Acoustic Sensing Systems, 2018. IEEE 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, İzmir, Türkiye.
- **Metin Aktas, Hakan Maral and Toygar Akgun**, 2018. Analysis of Optical Fading In Phase-OTDR Distributed Acoustic Sensing Systems: The Effects of Fading in Threat Detection, SPIE Remote Sensing, Berlin, Almanya.