

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE
ÇOK YOLLU KANAL İÇİN İÇ MEKÂN KONUMLANDIRMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Müh. Abdullah ÇAVDAR

OCAK 2019
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE
ÇOK YOLLU KANAL İÇİN İÇ MEKAN KONUMLANDIRMASI**

Abdullah ÇAVDAR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 01 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 01 / 2019

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kadir TÜRK

Trabzon 2019

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Abdullah ÇAVDAR tarafından hazırlanan**

**GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE
ÇOK YOLLU KANAL İÇİN İÇ MEKAN KONUMLANDIRMASI**

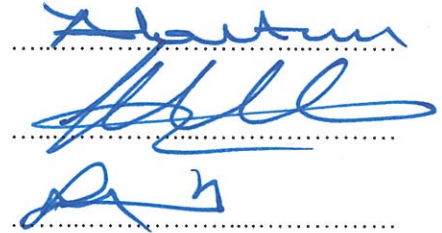
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03/ 01 /2019 gün ve 1785 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Yunus AKALTUN

Üye : Doç. Dr. Kadir TÜRK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Görünür ışık haberleşmesi temelli iç mekân konumlandırma sistemleri, son zamanlarda popüler bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bu sistemlerde, genellikle mevcut aydınlatma sistemlerinde kullanılan ve anahtarlama hızı oldukça yüksek olan LED lambalar tercih edilmektedir. Bu tezin amacı, iç mekânlarda kullanımı uygun olmayan küresel konumlandırma sistemleri yerine görünür ışık haberleşmesi temelli sistemlerin kullanılarak konumlandırma işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktır.

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, optik kablosuz kanallarda RSS-temelli konumlandırma sistemleri incelenmiştir. Bu sistemlerde meydana gelen çok yollu yansıma problemini çözmek için bu sistemi temel alan yeni teknikler ve yaklaşımlar önerilmiştir. Önerilen yeni teknikler kullanılarak iç mekân konumlandırmasındaki hatalar azaltılmış ve önemli ölçüde başarımlar elde edilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı üstlenen ve değerli desteğini esirgemeyerek bana rehberlik eden danışman hocam sayın Doç. Dr. Kadir TÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Son olarak bana her an ve her anlamda destek olan annem Hatem ÇAVDAR'a, babam Ali ÇAVDAR'a ve ablam Emine ÇAVDAR'a teşekkür eder ve şükranlarımı sunarım.

Abdullah ÇAVDAR

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Görünür Işık Haberleşmesinde Çok Yollu Kanal İçin İç Mekân Konumlandırması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Kadir TÜRK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

21/01/2019

Abdullah ÇAVDAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş ve Konunun Kapsamı	1
1.2. Bu Alanda Yapılmış Çalışmalar	3
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	8
1.4. GPS.....	9
1.5. İç Mekân Konumlandırma Teknolojileri.....	10
1.6. Görünür Işık Haberleşmesi.....	12
1.6.1. VLC Sistemlerine Genel Bakış	14
1.6.2. VLC Sistemlerinde Kullanılan Vericiler	14
1.6.3. VLC Sistemlerinde Kullanılan Alıcılar	15
1.6.4. VLC Sistemlerinde Haberleşme Modları	16
1.6.5. VLC Sistem Modeli.....	17
1.6.6. VLC Modülasyon Metotları	19
1.6.7. OOK Modülasyonu	20
1.7. IPS Teknikleri ve VLC-Temelli IPS'ler.....	22
1.8. VLC-Temelli IPS'lerin Sınıflandırılması	23
1.8.1. VLC-Temelli IPS'lerde Kullanılan Matematiksel Metotlar.....	23
1.8.1.1. Yakınlık Algoritması	23
1.8.1.2. Üçgenleştirme Metodu	24
1.8.1.2.1. AOA	24
1.8.1.2.2. TOA.....	25

1.8.1.2.3. TDOA.....	26
1.8.1.2.4. RSS.....	27
1.8.1.3. Parmak İzi Yöntemi.....	28
1.8.2. VLC-Temelli IPS’lerde Kullanılan Sensör Yardımlı Metotlar	28
1.8.3. VLC-Temelli IPS’lerde Kullanılan Optimizasyon Metotları	29
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	30
2.1. İç Mekânlarda Optik Kablosuz Bir Kanalin Modellenmesi	30
2.1.1. MMC Kanal Modeli ve Tasarım Algoritması	31
2.1.1.1. Oda ve Diğer Yansıma Yüzeylerinin Modellenmesi.....	31
2.1.1.2. Odanın Koordinat Sisteminin Tanımlanması	32
2.1.1.3. Kaynak ve Yansıtıcıların Modellenmesi	32
2.1.1.4. Optik Güç Katkılarının Hesaplanması.....	33
2.1.1.5. Işınlardan Üretilmesi ve Yönlerinin Belirlenmesi	34
2.1.1.6. Işınlardan Etki Noktasının Bulunması	36
2.1.1.7. MMC Kanal Modeli Algoritması	38
2.2. İç Mekân Konumlandırma Sistemi Senaryosu	39
2.2.1. Fiziksel Parametreler	39
2.2.2. Fiziksel Kanal Erişim Modeli.....	41
2.2.3. Gürültü Modeli ve Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise ratio, SNR) Analizi	41
2.2.4. Sistem Kurulumu.....	43
2.3. Konumlandırma Sistemleri.....	45
2.3.1. RSS-Temelli IPS	45
2.3.1.1. RSS tabanlı Uzaklık Tahmini Analizi	46
2.3.2. TAF-yardımlı RSS-Temelli IPS	48
2.3.3. YSA-temelli IPS	50
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
3.1. Dürtü Tepkileri Benzetim Sonuçları.....	53
3.2. Konumlandırma Sistemlerinin Hata Grafikleri	56
3.2.1. RSS-temelli IPS’nin Benzetimi	56
3.2.2. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS’nin Benzetimi	60
3.2.3. YSA-yardımlı IPS’nin Benzetimi.....	63
3.2.4. Konumlandırma Sistemlerinin Karşılaştırılması	67

4.	SONUÇLAR.....	69
5.	KAYNAKLAR.....	71

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE
ÇOK YOLLU KANAL İÇİN İÇ MEKÂN KONUMLANDIRMASI

Abdullah ÇAVDAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Kadir TÜRK
2019, 75 sayfa

Görünür ışık haberleşmesinde, haberleşme kanalında meydana gelen çok yollu yansımalar, RSS-temelli iç mekân konumlandırma sistemleri için önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında, çok yollu yansımaların konumlandırma hassasiyeti üzerindeki bozucu etkileri ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, türev alıcı yardımcı RSS-temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi ile yapay sinir ağı yardımcı bir iç mekân konumlandırma sistemi önerilmiştir.

Türev alıcı filtre yardımcı RSS-temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi ile optik sinyal üzerindeki çok yollu yansımaların etkisi ortadan kaldırılarak konumlandırma hataları azaltılmış ve milimetrik seviyelere indirgenmiştir. Yapay sinir ağı yardımcı iç mekân konumlandırma sistemi ile gerçekleştirilen bir konumlandırma tahmininde de başarı oranı çok yüksek olarak tespit edilmiştir. Ancak, bu yöntem kanal bilgilerine ve farklı ortamlar için daha önceden test edilen giriş-çıkış haritalarına ihtiyaç duymaktadır.

Tezde, bir iç mekân konumlandırma sistemi senaryosu düşünülmüş ve tüm benzetim çalışmaları bu senaryoya göre gerçekleştirilmiştir. Bunun için tezin ikinci kısmında, kablosuz optik bir kanalın modelleme aşamalarına yer verilmiş ve önerilen konumlandırma tekniklerinin de sistem tasarımı yapılmıştır. Tezin üçüncü bölümünde ise optik kanalın dürtü tepkileri incelenmiş ve konumlandırma sistemlerinin benzetimleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise önerilen sistemler, konumlandırma hataları yönünden incelenmiş, değerlendirilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Görünür Işık Haberleşmesi, Çok Yollu Yansımalar, Türev Alıcı Filtre RSS, Dürtü Tepkisi, İç Mekân Konumlandırması, Yapay Sinir Ağları

Master Thesis

SUMMARY

INDOOR POSITIONING FOR MULTIPATH CHANNEL
IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS

Abdullah ÇAVDAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir TURK

2019, 75 pages

The multipath reflections in visible light communication pose a significant problem for RSS-based indoor positioning systems. In this thesis, effects of the multipath reflections on indoor positioning systems have been tried to be eliminated. For this purpose, a differentiator filter-assisted RSS-based indoor positioning system and an artificial neural network-assisted indoor positioning system have been proposed.

Thanks to the differentiator filter-assisted RSS-based indoor positioning system, the distortions of the multipath reflections on the optical signal have been eliminated, so the positioning errors have been decreased and reduced to the millimetric order. At the same time, the positioning estimation performed by the artificial neural network assisted indoor positioning system has been found to demonstrate a great performance as with the former system. However, this method requires channel information along with previously tested input-output maps for different environments.

In this thesis, an indoor positioning system scenario was considered and all simulation studies were performed according to this scenario. In the second part of the thesis, the modeling stages of a wireless optical channel have been introduced and the system designs of the proposed positioning techniques have been realized. Last but not least, the proposed systems have been examined, evaluated and compared with each other in terms of the positioning errors.

Key Words: Visible Light Communications, Multipath Reflections, Differentiator Filter RSS, Impulse Response, Indoor Positioning, Artificial Neural Networks

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Görünür ışık haberleşme sisteminin blok diyagramı	14
Şekil 1.2. Görünür ışık haberleşmesi iç mekân senaryosu [59].	17
Şekil 1.3. IM/DD'li bir VLC kanalının blok diyagramı.....	18
Şekil 1.4. IM/DD 'li bir VLC Kanalının Modellenmesi.....	19
Şekil 1.5. NRZ-OOK tekniğinde gönderilen dalga biçimi ($\gamma=0.5$).....	21
Şekil 1.6. RZ-OOK tekniğinde gönderilen dalga biçimi ($\gamma=0.5$).....	21
Şekil 1.7. AOA yöntemine göre konum tespiti	25
Şekil 1.8. Trilaterasyon işlemine göre konum bulma	26
Şekil 1.9. TDOA Konumlandırma Tekniği.....	27
Şekil 2.1. Odanın koordinat sistemi	32
Şekil 2.2. Rastgele bir ışının koordinat düzlemi	35
Şekil 2.3. Düşünülen fiziksel ortam senaryosu	40
Şekil 2.4. Fiziksel kanal erişim modeli	41
Şekil 2.5. İç mekan konumlandırma sistemi kurulumu şeması.....	44
Şekil 2.6. RSS-temelli IPS'nin genel şeması	46
Şekil 2.7. TAF-yardımlı RSS-temelli bir IPS'nin genel şeması	49
Şekil 2.8. YSA-temelli IPS'nin konumlandırma tahmini	51
Şekil 3.1. Odanın farklı bölümlerinin gösterilmesi.....	53
Şekil 3.2. İç mekanlarda kablosuz optik kanalın dürtü tepkileri.....	53
Şekil 3.3. [0.2, 0.3, 0.8] alıcı koordinatı için dürtü tepkisi bileşenlerinin grafikleri	55
Şekil 3.4. LOS ve NLOS katkılarının gösterilmesi.....	56
Şekil 3.5. RSS-temelli IPS'de konumlandırma hataları.....	58
Şekil 3.6. RSS-temelli IPS'deki konumlandırma hatalarının dağılımı	58
Şekil 3.7. Farklı oda bölgeleri için RSS-temelli IPS'deki hataların dağılımı	59
Şekil 3.8. RSS-temelli IPS'de Hataların Kümülatif Dağılımı	59
Şekil 3.9. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'nin konumlandırma hataları	61
Şekil 3.10. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'deki hataların dağılımı	62
Şekil 3.11. Farklı bölgelerde TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'nin hata dağılımı.....	62
Şekil 3.12. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'de hataların kümülatif dağılımı.....	63
Şekil 3.13. YSA-yardımlı IPS'nin konumlandırma hataları	65

Şekil 3.14. YSA-yardımlı IPS'deki konumlandırma hatalarının dağılımı.....	65
Şekil 3.15. Farklı oda bölgeleri için YSA-yardımlı IPS'nin hata dağılımı.....	66
Şekil 3.16. YSA-yardımlı IPS'de konumlandırma hatalarının kümülatif dağılımı ...	66



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Kablosuz iç mekân konumlandırma sistemlerinin karşılaştırılması	11
Tablo 1.2. VLC-temelli IPS, RF-tabanlı-IPS ve cihazsız IPS'nin karşılaştırılması...	23
Tablo 2.1. Oda yüzeylerinin birim vektörleri.....	37
Tablo 2.2. Fiziksel Parametreler	40
Tablo 2.3. Gürültü Modeli Parametreleri	42
Tablo 2.4. Sistem Kurulum Parametreleri.....	44
Tablo 2.5. LED ID- konum haritası	46
Tablo 2.6. YSA Ağ Özellikleri	51
Tablo 3.1. Konumlandırma sistemleri performans tablosu.....	67

SEMBOLLER DİZİNİ

ADC	Analog-Digital Convertor
AOA	Angle of Arrival
AP	Access Point
AWGN	Adaptive White Gaussian Noise
BFSK	Binary Frequency Shift Keying
CAP	Carrier-less Amplitude and Phase
CDMMC	Combined Deterministic and Modified Monte Carlo
CRB	Cramer-Rao Bound
CSK	Colour Shift Keying
EKF	Extended Kalman Filter
FM	Frequency Modulation
FOV	Field of View
GPS	Global Positioning System
ID	Identification Number
IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection
IPS	Indoor Positioning Systems
IR	Infrared
LBS	Location-based Systems
LED	Light Emitting Diode
LLS	Linear Least Squares
LOS	Line of Sight
LS	Least Squares
MMC	Modified Monte Carlo
NLOS	Non-line of Sight
NRZ-OOK	Non-retuned to Zero On-Off Keying
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK	On-Off Keying
PD	Foto-diode
PDF	Possibility Density Function
PF	Particle Filter

PPM	Pulse Position Modulation
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RGB	Red, Green,Blue
RLS	Received Light Strength
RMSE	Root Mean Square Error
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RZ-NRZ	Returned-to-Zero On Off Keying
SNR	Signal to Noise Ratio
TAF	Türev Alıcı Filtre
TDM	Time Division Multiplexing
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
UWB	Ultra Wide Band
VLC	Visible Light Communications
Wi-fi	Wireless Fidelity
YSA	Yapay Sinir Ağı
P_t	Gönderilen optik güç
P_r	Alınan optik güç
$T_s(\psi)$	Optik filtrenin geçirgenlik fonksiyonu
$g(\psi)$	Alıcının optik yoğunlaştırıcı kazancı
Ψ_{con}	Alıcının FOV'u
d	LED ve alıcı yüzeyi arasındaki uzaklık
m_l	Lambertyan yayının derecesi
$\phi_{1/2}$	LED'in yarı aydınlıktaki güç açısı
$H(0)$	Kanalın DC kazancı
$H_d(0)$	Doğrudan görüş hattı üzerindeki kanal DC kazancı
$H_{yan}(0)$	Yansımali yol üzerindeki kanal DC kazancı
T_b	Bit periyodu
γ	Duty cycle
(x_0, y_0)	Mobil cihazın koordinatları
(x_1, y_1)	Baz istasyonunun koordinatları

$P_{ışın}$	Işığın taşıdığı güç
t_{mak}	Maksimum benzetim zamanı
P_S	Kaynaktan yayılan toplam optik güç
dP_S	$d\Omega$ katı açısı içerisinde yayılan optik güç
n	Lambertyan mod sayısı ışıma paterninin yönlülüğü
\hat{n}_S	Kaynağın normali
\hat{n}_R	Alıcının normali
θ	Kaynağın normali (\hat{n}_S) ile alıcıya gelen ışığın yönü arasındaki açı
ψ	Alıcının normali (\hat{n}_R) ile kaynaktan gelen ışığın yönü arasındaki açı
c	Işık hızı
$h(t)$	Optik kanalın dürtü tepkisi
$d\Omega$	A_R alıcı alanının karşılık geldiği katı açısı
$rect(.)$	Dikdörtgen fonksiyonu
α	z eksenini ve ışın vektörü arasındaki açı
β	xy düzlemi ve x eksenini ile ışın vektörünün izdüşümü arasındaki açı
xy	Noktasal kaynakların yüzey düzlemi
R_x	Yerel ve oda koordinatları arasında x eksenini için dönüşüm matrisi
R_y	Yerel ve oda koordinatları arasında y eksenini için dönüşüm matrisi
R_z	Yerel ve oda koordinatları arasında z eksenini için dönüşüm matrisi
x_{oda}	Noktasal kaynağın oda koordinatlarına göre x bileşeni
y_{oda}	Noktasal kaynağın oda koordinatlarına göre y bileşeni
z_{oda}	Noktasal kaynağın oda koordinatlarına göre z bileşeni
x_{yerel}	Noktasal kaynağın yerel koordinatlara göre x bileşeni
y_{yerel}	Noktasal kaynağın yerel koordinatlara göre y bileşeni
z_{yerel}	Noktasal kaynağın yerel koordinatlara göre z bileşeni
\hat{d}_{yerel}	Yerel koordinat sistemindeki bir birim vektör
\hat{d}_{oda}	Odanın koordinat sistemindeki bir birim vektör
$r_{etki_noktası}$	Etki noktasının konum vektörü
r_{kaynak}	Işığın üretildiği noktasal kaynağın konum vektörü
$\hat{n}_{ışın}$	Noktasal kaynaktan üretilen ışığın yönünü gösteren vektör
$\hat{n}_{yüzey}$	Kontrol edilen yüzeye dik olan birim vektör
$\hat{n}_{ışın}$	Işın vektörü

$N_{ışın}$	LED ışık kaynağından yayılacak ışın sayısı
A_R	Alıcının yüzey alanı
t_{sim}	Simülasyon zamanı
N_r	Kabul edilen yansıma sayısı
$\rho_{yüzey}$	Etki noktasının bulunduğu yüzeyin yansıma katsayısı
γ	Alıcı duyarlılığı
P_{rec}	Tüm LED lambalarından alınan güç
I_{bg}	Arka plan akımı
q	Elektronik yük
B	Eşdeğer gürültü bant genişliği
T_K	Mutlak sıcaklık
G	Açık döngü gerilim kazancı
k	Boltzman sabiti
η	Birim alandaki foto-detektörün sabit kapasitans değeri
Γ	FET kanal gürültü faktörü
g_m	FET transkondüktans değeri
$(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$	Kestirilmiş alıcı koordinatları
\tilde{P}_{LOS}	LOS güç bileşeni

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş ve Konunun Kapsamı

Bina içi haberleşme altyapısına dayanan iç mekân konumlandırma tekniği, son zamanlarda oldukça dikkat çeken bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bu teknik, çok geniş bir uygulama alanına sahip olmasının yanı sıra piyasada da yoğun talep görmektedir. Ayrıca, iç mekân tabanlı hizmetlere artan ticari ilgi, iç mekân konumlandırma tekniğinin gelişimini de teşvik etmiştir [1]. Büyük müzeler ve alışveriş merkezlerinde, kullanıcılar konum bilgisini elde etmek, çıkışı ya da asansörü hızlı bir şekilde bulabilmek için iç mekân konumlandırma sistemlerinden (indoor positioning systems, IPS) yararlanabilirler. Bazı diğer uygulamalarla birleştirildiğinde, iç mekân konumlandırma teknolojisi, kullanıcılarına konum tabanlı servisler (location-based systems, LBS) ve reklamlar sağlamak için kullanılabilir.

Kablosuz olarak gönderilen bir sinyal, farklı fiziksel ortamlarda farklı özellikler gösterir. Dış ortamlarda, sinyal açık ve erişilebilir bir uzay boyunca yayıldığından dolayı genellikle az bir zayıflama gösterirken; kapalı bir ortamda ise insanların hareketleri ve bina içerisindeki nesnelerin varlığından dolayı çeşitli olumsuz etkilere maruz kalabilmektedir. Dış ortam senaryoları için, Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System, GPS), LBS'ler arasında en çok bilinen sistemdir [2]. GPS, dış mekânlarda konum bulma, seyrüsefer ve çevre trafik yoğunluğunu görüntüleme gibi birçok tatmin edici hizmetleri kullanıcılarına sunar. Fakat GPS'in konumlandırma hassasiyeti, iç mekân senaryoları için kabul edilemez ölçüde büyük olan birkaç metre mertebesinde yer almaktadır [3]. Aynı zamanda GPS uydularından gelen sinyaller bina iç yapısındaki katı maddeler tarafından şiddetli bir şekilde zayıflatılır [4]. Tüm bu nedenlerle, dış mekân konumlandırma teknolojisi, iç mekânlardaki gereksinimleri karşılayamaz. IPS'leri daha kolay bir şekilde gerçekleştirmek için daha ileri konumlandırma teknikleri kullanılmalıdır.

Yapılan bir araştırmaya [5] göre şu ana kadar, radyo frekans tanımlaması (radio frequency identification, RFID) [6, 7], ultra geniş bant (ultra wide band, UWB) [8], wireless fidelity (wi-fi) [9, 10], bluetooth [11] ve parmak izi (fingerprinting) [12] gibi çeşitli iç mekân konumlandırma teknolojileri önerilmiştir. Bu teknolojilerin kullanılabilmesi için genellikle bir wi-fi erişim noktası (access point, AP), kızılötesi

(infrared, IR) veya bluetooth verici donanımının kurulmasına gerek duyulmaktadır. Bu gereksinimler; kurulum, bakım ve yönetim maliyetlerinde önemli bir artışa neden olmaktadır [13].

Yüksek iletim kapasiteleri nedeniyle, optik kablosuz ağlar modern bilgi teknolojimizde önemli bir rol oynamaktadır [14]. Şu anda, ışık yayan diyotları (light emitting diode, LED) kullanan görünür ışık haberleşmesi (visible light communication, VLC), kablosuz iletişimde popüler bir konu haline gelmiştir. Yeşil ışık teknolojisinin bir türü olan beyaz-LED aydınlatma teknolojisi, yüksek ışık verimi (110lm / W'a kadar), uzun servis ömrü (50000 saate kadar) ve hızlı tepki süresi (10MHz'e kadar) avantajları sayesinde yeni nesil iç mekân aydınlatması olarak kabul edilir. Daha eski aydınlatma teknolojilerinden farklı olarak LED, insan gözü tarafından algılanamayacak şekilde çok hızlı olarak ışık yoğunluk seviyelerine anahtarlama yapabilir. Bu nedenle, sayısal veriler yayılan ışıkta çeşitli şekillerde kodlanabilir. Bu da LED'lerin aydınlatmanın yanı sıra haberleşmede de kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Bu teknoloji sayesinde ekonomik ve verimli bir şekilde aydınlanma sağlanmış ve aynı zamanda yüksek hızlarda görünür ışık haberleşmesi yapılmasına da imkân tanınmıştır [15, 16].

İç mekân konumlandırma tekniği, VLC'nin önemli bir uygulaması olarak kullanılabilir. Belirli bir konum için farklı ışık kaynaklarından alınan ışık şiddetleri farklı olacaktır. Işık şiddeti, ticari kullanıma hazır cihazlara (örneğin akıllı telefon, akıllı gözlük ve akıllı saat) yerleştirilen ışık sensörleri tarafından kolayca tespit edilebilir. Aynı zamanda kapalı bir mekânda ışık şiddeti günün her saatinde aynıdır ve değişmez. Bu nedenlerle, ışık kaynağından alınan ışık şiddetine (received light strength, RLS) göre, bir kullanıcı kendi konumunu bulabilir [13].

Bu tez kapsamında; öncelikle genel bilgiler kısmında görünür ışık haberleşmesi temelli iç mekan konumlandırma sistemleri (visible light communication based indoor positioning systems, VLC-temelli IPS) konusunda yapılan literatür çalışmalarına yer verilecek. Daha sonra tezin amacı ve kapsamından bahsedilerek, VLC, VLC-temelli IPS'ler ve bu sistemlerin karakteristik özellikleri ve kanal modelleri hakkında genel ve teorik bilgilere yer verilecektir. Yapılan çalışmalar bölümünde ise öncelikle Değiştirilmiş Monte Carlo (Modified Monte Carlo, MMC) yöntemini kullanarak optik kablosuz bir kanal modeli yapılacaktır. Daha sonra ilk olarak alınan sinyal gücü (received signal strength, RSS) temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi (RSS-temelli IPS) senaryosu düşünülecek ve bu senaryo kapsamında iç mekân konumlandırması yapılarak sistemin

performansı incelenecektir. İkinci olarak türev alıcı filtre yardımcı RSS iç mekân konumlandırma sistemi (TAF-yardımlı RSS-temelli IPS) adında farklı bir metot geliştirilecek ve bu metotla yapılan konumlandırma işlemlerindeki başarımlar incelenecektir. Son olarak ise yapay sinir ağı temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi (YSA-temelli IPS) üzerindeki konumlandırma performansı araştırılacaktır.

1.2. Bu Alanda Yapılmış Çalışmalar

VLC-temelli IPS'ler konusunda yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğundaki temel amaç, görünür ışık sistemlerini kullanarak konumu bilinmeyen bir alıcının konumunu en az hatayla ve uygun bir kurulum maliyetiyle bulabilmektir. Bunun için radyo-frekans temelli iç mekân konumlandırma sistemlerinde (RF-temelli IPS) daha önceden kullanılan teknikler VLC-temelli IPS'ler için de kullanılmış ve konumlandırma performansları araştırılmıştır. Konumlandırma yapabilmek için çeşitli matematiksel teknikler, sensör yardımcı teknikler, optimizasyon teknikleri ve bazı hibrit teknikler kullanılabilir.

Bir fotodiyot alıcısında RSS bilgisine göre LED vericilerine olan uzaklıkların tespit edildiği bir sistem, RSS-temelli IPS olarak adlandırılır. Literatürde VLC-temelli sistemlerde RSS bilgisini kullanarak konumlandırma yapabilen birçok sistem önerilmiştir. [17]'de VLC'yi kullanan yeni bir IPS modeli öne sürülmüştür. Önerilen bu sistemde doğrudan algılamalı yoğunluk modülasyonu (intensity modulation / direct detection, IM/DD) ve taşıyıcı ayırımı (carrier allocation) metotları kullanılmıştır. Alıcının konumunu hesaplamak için eş zamanlı üç farklı kanaldan bilgi gönderimi yapılmıştır. Önerilen sistemin karakteristikleri deneysel sonuçları da baz alarak simülasyon boyunca incelenmiş ve uygulanabilirliği test edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hiç ayarlama yapılmadan kestirilen konumların ortalama hatası 141.1 cm iken, normalleştirme metotları kullanılarak ve gerekli kalibrasyon ayarları uygulandığında ise 2.4 cm'e kadar azalmıştır. [18]'de çoklu optik algılayıcılar kullanan bir IPS modeli öne sürülmüş ve konumlandırma tekniği olarak ise alınan sinyal gücü göstergesi (received signal strength indicator, RSSI) tekniği kullanılmıştır. [19]'daki yazarlar bir ışık sensörü, bir yükselteç ve bir bataryadan oluşan küçük bir ışık sensörlü devre kiti geliştirmişler ve bir ses girişi aracılığıyla da ışık sensörlü devre kitini mobil telefona bağlamışlardır. Bu sistemde alıcı olarak ışık sensörleri kullanılmıştır ve farklı çalışma ortamlarında sistem test edilmiştir. 0.4 m'ye varan bir

doğruluğa ulaşılmıştır. [20]'de LED vericileri arasında eş-zamanlamaya gerek duymayan bir VLC-temelli IPS modeli geliştirilmiş ve benzetim çalışmaları sonucunda 5.9 cm hassasiyetle hedef alıcının konumu tespit edilmiştir. [21]'de VLC-temelli IPS'lerin teorik olarak doğruluğunu analiz etmek için Cramer-Rao bandı (Cramer-Rao bound, CRB) tekniği kullanılmıştır. 4.78 cm'lik sınırlı bir hassasiyetin elde edilebildiği görülmüştür. Farklı parametrelerin CRB'ye olan etkileri detaylı bir şekilde tartışılmıştır. [22]'de çok yönlü yansımaların etkisini ortadan kaldırmak için VLC-temelli bir konumlandırma sisteminde dikgen frekans bölümlü çoklama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) tekniği uygulanmıştır. Çoklu taşıyıcı kullanan bir modülasyon tekniği olarak OFDM ile tek-taşıyıcılı bir modülasyon tekniği olan IM/DD karşılaştırılmış ve OFDM tekniğinin konumlandırma hassasiyetinin daha iyi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca alt-taşıyıcı sayılarının konumlandırmaya olan etkisi tartışılmıştır. [4]'deki yazarlar çok-yönlü yansımaların RSS-temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Dürtü tepkilerini hesaplayabilmek için Birleştirilmiş Deterministik ve Değiştirilmiş Monte Carlo (Combined Deterministic and Modified Monte Carlo, CDMMC) metodunu kullanmışlardır. Konumlandırma hatalarını azaltmak için de bazı kalibrasyon metotları geliştirmişlerdir. Tüm bu işlemler sonucunda öne sürülen konumlandırma sisteminin hassasiyeti 0.558m olarak bulunmuştur. [23]'de RSSI-temelli bir sistemin konumlandırma performansı üzerinde dağınık ışık yansımalarının etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada dağınık yansımaların konumlandırma hatası üzerinde önemli ölçüde bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. [24]'deki yazarlar eğik alıcı açısının konumlandırmaya olan etkisini incelemişler ve bu çalışma kapsamında hata-telafili bir model tasarlamışlardır. Simülasyon ve deney sonucunda hata sırasıyla 0.7424cm ve 1.6226cm olarak bulunmuştur. [25]'deki yazarlar bir IPS modeli tasarlamışlar ve 0.5 mm hassasiyetinde bir sonuca ulaşmışlardır. Bu çalışma ile verici gücünün artırılmasının gürültü toleransını arttırdığı tespit edilmiş ve alıcının yüksekliğinin algoritmanın performansını etkilemediği görülmüştür.

Sinyalin vericiden alıcıya ulaşma zamanını kullanarak uzaklık tespiti yapmaya çalışan IPS'ler, geliş zamanı (time of arrival, TOA) ve geliş zamanı farkı (time difference of arrival, TDOA) tekniklerini kullanmaktadır. [26]'da beyaz LED'leri kullanan bir iç mekân konumlandırma sistemi analiz edilmiştir. LED'ler tarafından gönderilen modüle edilmiş sinyaller TOA-temelli bir sistemde uzaklık tahmini için kullanılmıştır. Kestirim doğruluğuna ilişkin teorik sınırlar, yoğunluğa göre modüle edilmiş sinüzoidal sinyaller için

Cramer-Rao sınırının türetilmesiyle hesaplanmıştır. [27]'de LED'leri kullanan bir optik kablosuz konumlandırma sistemi öne sürülmüş ve benzetim çalışmalarıyla sonuçları gösterilmiştir. Her bir LED lambasına bir frekans adresi atanmış ve LED tarafından yayılan ışıkta gönderim yapılmıştır. Faz farklılıklarından yararlanarak TDOA konumlandırma algoritması uygulanmıştır. Önerilen konumlandırma metodu bilgisayarda yapılan benzetimle değerlendirilmiş ve 5m x 5m x 3m boyutlarındaki bir odada konumlandırma hassasiyeti 1 cm'den az bulunmuştur. [28] çalışmasında cihazın konumunu tespit etmek için pilot sinyallerin TDOA bilgileri kullanılmıştır. [29]'da iki LED'den oluşan IM/DD kullanan TDOA-temelli bir sistem önerilmiştir. Bu sistemde ölçüm algoritması olarak faz bilgileri değil, tepeden tepeye genlik ölçümleri baz alınmıştır.

Her bir konum için RSS bilgilerinin ve sinyal karakteristiklerinin daha önceden kaydedildiği bir sistem düşünülün. Daha sonradan her hangi bir konum için yapılan RSS ölçümünde çıkan sonuçlar, daha önceden kaydedilen sinyal ölçümleriyle karşılaştırılın ve aralarında benzerlikler kurularak alıcının konumu tahmin edilmeye çalışılın. İşte böyle bir sistem literatürde parmak izi tekniği (fingerprinting) olarak anılmaktadır. [30]'de her biri farklı bir adrese sahip LED lambalarının sinyal gönderdiği bir sistem düşünülmüş ve sıfıra dönüşlü olmayan açık-kapalı anahtarlama (non-retuned to zero on-off keying, NRZ-OOK) modülasyonu kullanılarak sinyaller modüle edilmiştir. Bu sisteme göre mobil cihaz, sinyali alır ve cihazın koordinatları, alınan sinyal ile daha önceden belirlenen adresler arasında ilinti oluşturularak tahmin edilir. Konumlandırma hassasiyeti 4.38 cm civarında bulunmuştur. [31] çalışmasında vericilerde LED'lere gönderilmeden önce akım veya gerilim sürekli dalgalarla modüle edilmiştir. LED lambalar vasıtasıyla sinüzoidal dalgadaki değişimler ışık yoğunluğundaki değişimler şekline dönüştürülür. Daha sonra alıcı, alınan güç spektral yoğunluğunu hesaplar, metrik olarak her bir modüle edici frekansın gücünü ortaya çıkarır ve çevrimdışı durumda doğrulanan bir parmak izi haritanın parametreleriyle bağlantı kurar. [32] çalışmasında ise sönmüleme oranı dağılımı uygulanmış ve vericinin konum bilgisini modüle etmek için NRZ-OOK tekniği kullanılmıştır.

Vericilerden gönderilen sinyalin geliş açısını kullanarak alıcının konumunu bulmaya çalışan konumlandırma sistemleri geliş açısı (angle of arrival, AOA) tekniğini kullanır. [33]'de gelen ışığın AOA bilgisinden yararlanarak farksal foto-akım algılamasını kolaylaştırmak için üç adet fotodiyottan oluşan bir foto-algılayıcısı kullanılmıştır. Optik AOA tekniğini kullanan konumlandırma sisteminin RSS'e göre avantajları gösterilmiş ve bu teknikler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Öne sürülen optik AOA tekniğinin üç

boyutlu bir konumlandırma sisteminde ortalama 5 cm civarında bir hassasiyete ulaştığı gösterilmiştir. [34]'de sabit fark alıcı bir foto-sensör, IPS'de konum tespiti için kullanılmıştır. Foto-sensör, üzerine gelen ışığın geliş açısıyla orantılı olarak bir foto-akımı üretir. Fark alıcı foto-sensörler, farklı foto-akımlarını kullanarak, iki ayrı LED'den gelen sinyallerin AOA bilgisini tahmin edebilirler. Daha sonra mobil cihazın konumunu belirlemek için üçgenleştirme (triangulation) teknolojisi kullanılabilir. Böyle bir sistemde doğruluk yaklaşık olarak 4 cm civarında bulunmuştur.

IPS'lerde konumlandırma yaparken sadece matematiksel metotlar yeterli gelmeyebilir. Mobil cihazlar üzerinde bulunan bazı sensörlerden yararlanarak konumlandırma işleminin daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanabilir. [35] çalışmasında bir iç mekan navigasyon sistemi öne sürülmüştür. Bu sistem herhangi bir konumu tam olarak bulabilmek ve gidilecek yönü tespit edebilmek için LED ışıklarını ve geomanyetik bir sensörü kullanır. Geomanyetik sensör, rota bilgisini elde etmek için kullanılır. Bu sistem ses navigasyonu sağlayabilir ve doğal olarak üç aşamaya ayrılabilir. Bu sistemin konum tespiti hassasiyeti yaklaşık olarak 1-2 m civarında ölçülmüştür. [36] çalışmasında ele alınan konumlandırma sisteminde bir alıcının hızlanmasını ölçmek için ivmeölçer sensöründen yararlanılmış ve daha sonra bu ölçümler alıcının yönünü belirlemek için kullanılmıştır. RSS ve ivmeölçer sensörünün ölçümleri, alıcının konumunu tahmin edebilen kapalı bir ifade oluşturmak için kullanılabilir. Bu arada ivmeölçer sensörünün kullanılması, bir vericinin ışınma açısının (irradiance angle) alıcıdaki geliş açısına eşit olması gibi daha önceden kabul edilen bazı varsayımları ortadan kaldırır. Bu yüzden alıcının yerden yüksekliği bilgisine gerek yoktur. Simülasyon ortamında hassasiyet 0.5m civarında ölçülmüştür. [37]'de ivmeölçer sensörü ve çoklu optik algılayıcılar kullanılmış ve mobil bir cihazın konumunu tahmin edebilmek için üçgenleştirme teknolojisinden yararlanılmıştır. [38]'deki yazarlar, bazı avantajlara sahip bir sistem geliştirmişlerdir. Örneğin; alıcı hareketli olabilir ve yüksekliği bilinmeyebilir ve alıcının normali ile vericinin normalinin aynı hizada olmasına gerek yoktur. Böyle bir sistemin kurulması için en az üç adet eğik optik alıcı ve bir ivme sensörü gereklidir. Aynı LED'den farklı ışık yoğunluklarını alabilmek için optik alıcıların farklı açılarda eğilmesi gerekir. Alınan ışık yoğunlukları ve alıcının yönüne göre, üçgenleştirme teknolojisi uygulanarak, mobil cihazın konumu elde edilebilir. Yapılan deneyler sonucunda dört optik alıcıya sahip bir algılayıcının ortalama hızı 1.3m/s olduğu zaman, 6cm'den daha az bir konumlandırma hassasiyetine ulaşılmıştır. [39]'daki yazarlar düşük güç gerektiren

uygulamalar için bir mobil cihazın ışık sensörü kullanarak sinyalleri nasıl demodüle edilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca ikili frekans kaydırmalı anahtarlama (binary frequency shift keying, BFSK) modülasyonu kullanılarak veri hızı önemli ölçüde arttırılmıştır. [40] çalışmasında aynı düzlem üzerine yerleştirilmiş iki görüntü sensörü kullanılarak bir konumlandırma sistemi tasarlanmıştır. Görüntü sensörleri üzerindeki lensleri kullanarak tüm LED'lerden gelen sinyalleri alırlar ve LED'ler ile bilinmeyen bir konum arasındaki uzaklığı hesaplamak için geometrik ilişkileri kullanırlar. Bu çalışmada yazarlar konumu tespit etmek için sırasıyla en küçük kareler (least squares, LS) tahmin metodu ve vektör tahmin metodunu uygulamışlardır. Birkaç cm hassasiyetinde bir sonuca ulaşılmıştır.

IPS'lerde konumlandırma hassasiyetini arttırmak için uygulanan bazı optimizasyon metotları da bulunmaktadır. [41]'de oluşturulan konumlandırma sisteminde parçacık filtresi (particle filter, PF) kullanılmıştır. [42]'de geliştirilmiş bir yay modeli (spring model), işbirlikçi VLC-temelli IPS'ler için kullanılmıştır.

Farklı konumlandırma metotları bir arada kullanılarak IPS'ler için yeni hibrit metotlar oluşturulabilir. [43]'de mobil cihazın konum bilgisini tahmin etmek için tek bir verici ile çoklu optik algılayıcılar kullanılmıştır. Tek bir verici kullanıldığı için bu çalışmada hücreler arası girişim problemi ihmal edilmiştir. Bu sistemde 2 boyutlu konumlandırma aşamasında AOA tekniği kullanılırken, 3 boyutlu konumlandırmada ise RSS tekniği kullanılmıştır. Konumlandırma hatası 6 cm'den az bulunmuştur. [44]'de çoklu foto-diyot algılayıcısından oluşan bir alıcı senaryosu düşünülmüştür. Simülasyon sonucunda konumlandırma hatası 2 mm olarak, deneysel ortamda ise 4 cm olarak bulunmuştur. [45]'de yapılan çalışmada ise AOA-RSS hibrit konumlandırma algoritmasını kullanan bir iç mekân konumlandırma sisteminde genişletilmiş kalman filtresi (extended kalman filter, EKF) ve PF teknolojileri bir arada kullanılmıştır.

VLC-temelli IPS'lerin benzetimi yapılırken, çok yönlü yansımaların hesaba katıldığı bir optik kablosuz kanal modelinin oluşturulması gerekmektedir. İlk olarak [46, 47] çalışmalarında Barry tarafından deterministik bir kanal modeli önerilmiştir. Bu modele göre bir oda, öncelikle çok küçük birim yansıtıcı yüzeylere ayrılır ve daha sonra ise doğrudan görüş ve yansımalarından gelen dürtü tepkisi katkıları toplanarak kapalı bir ortamdaki optik kablosuz bir kanalın dürtü tepkisi hesaplanır. Bu metot, matematiksel sonuçlara dayalı olduğu için gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Ancak tekrarlamalı işlemler yaptığı için de önemli ölçüde hesaplama zamanına ihtiyaç duyar. Bunun için,

benzetim çalışmalarında bu modeli kullanmak pek pratik olmayacaktır. Monte Carlo ışın izleme yaklaşımı (MC) [48] ise hesaplama zamanını azaltan bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu metoda göre bir kaynaktan eşit optik güce sahip çok sayıda ışının yayıldığı düşünülür. Her bir ışının gittiği yollar izlenerek, alıcının hangi ışınları alıp hangilerini almadığına bakılır. Sonuçta alıcı tarafından saptanan ışınlar toplanarak dürtü tepkisi bulunmuş olur. Bu metoda göre ışınlar yansıtıcı bir yüzeye çarptığı zaman bu etki noktasından aynı olasılık yoğunluk fonksiyonuna (possibility density function, PDF) sahip ve gücü azalmış yeni ışınlar üretilir. Işınlardan yönü ise lambertyan ışın profiline (lambertian intensity profile) kullanan bir PDF'ye göre bulunur. Bu metot etkili bir metottur ancak üretilen ışınların çok az bir kısmı foto-diyoda ulaştığı için çok fazla sayıda ışının üretilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için [49, 50] çalışmasında her bir ışını bir kere kullanmak yerine birkaç kere kullanmaya imkân sağlayan Değiştirilmiş Monte Carlo (modified Monte Carlo, MMC) adında yeni bir metot öne sürülmüştür. Bu metot daha az ışına gereksinim duyduğu için daha hızlıdır. Bu metoda göre ışının her bir yansıma sürecinde alıcıya katkı sağladığı düşünülür. Ayrıca bu tez kapsamında da kullanılan kanal modeli yaklaşımıdır. [51] çalışmasında ise MMC ve deterministik modellerin her ikisi birleştirilerek, optik kablosuz kanalların dürtü tepkilerini simüle etmek için Birleştirilmiş Deterministik ve Değiştirilmiş Monte Carlo Metodu (combined deterministic and modified monte carlo, CDMMC) adında yeni bir kanal modeli ortaya atılmıştır. Bu sayede her iki metodun avantajlarını da kullanmak mümkün olmuştur.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Kablosuz optik kanallarda özellikle iç mekânlar için çok yönlü yansımalar büyük sorun teşkil etmekte ve iç mekân konumlandırma hassasiyetinin azalmasına neden olmaktadır. Odanın köşe kısımlarında yansımaların etkisi oldukça yüksek, kenar kısımlarında ise nispeten daha azdır. Odanın iç kesimlerine gidildiğinde ise yansımalarından gelen sinyallerin enerjisi giderek azalır ve odanın tam ortasında bu etki ortadan kaybolur. Eğer RSS-temelli bir IPS geliştirilmek isteniyorsa bu yansımaların bozucu etkisi ortadan kaldırılmalı ve konum tahmini için doğrudan görüş hattından (line of sight, LOS) gelen sinyal şiddeti elde edilebilmelidir. Eğer bu sorun ortadan kaldırılmazsa odanın köşe ve

kenar kısımlarına yaklaşıldığında yansımalarından dolayı büyük konumlandırma hataları meydana gelecektir.

Literatürde yapılan birçok çalışmada LOS'un olduğu kanallarda, konumlandırma performansının analizinde çok yollu yansımalar hesaba katılmamıştır. Oysaki gönderilen sinyal gerçekte duvarlardan, tavandan, zeminden sekerek çok yollu yansımaya uğramaktadır. Burada verici, geniş hüzmeli bir LED kaynağıdır. Sonlu görüş alanı (field of view-FOV) olan alıcı ise oda yüzeylerinden yansıyan fotonları yakalamaktadır. Alıcıda alınan sinyal şiddeti, LOS'dan ve çok yollu yansımalarından gelen sinyal şiddetlerinin toplamı olacaktır. Konumlandırma işlemi esnasında alıcının vericilere olan uzaklıkları bulunurken LOS formülüne göre işlem yapılır. Bu nedenle alıcı tarafından alınan sinyal şiddeti değeri, çok yollu yansımaları da içerdiğinden dolayı LOS formülüne göre yapılan uzaklık hesaplarında hata olacak ve bu da konumlandırma hatasına sebebiyet verecektir. [4] makalesinde tek taşıyıcılı IM/DD metodu kullanan bir sistemde çok yollu yansımaların konumlandırma performansına olan etkisi incelenmiş ve bu problemin çözümüne dair birtakım kalibrasyon teknikleri önerilmiş ancak somut genel-geçer bir yöntem yer verilmemiştir. Kanal modeli olarak çok yollu yansımaların hesaba katıldığı CDMMC kanal modeli kullanılmıştır. [22]'de ise OFDM tekniği uygulanarak VLC-temelli bir IPS'de çok yollu yansımaların etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır ve [4] çalışmasına göre birtakım başarımlar elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılacak çalışmada ise türev alıcılı filtre yardımcı yeni bir RSS-temelli sistem geliştirilerek, çok yollu yansımaların LOS'dan gelen sinyal üzerinde oluşturduğu bozucu etkiler ortadan kaldırılacaktır. Bu sayede odanın her yerinde daha yüksek hassasiyette konum tespitleri yapılabilecektir. Aynı zamanda buna ek olarak yapay sinir ağı yardımcı bir konumlandırma sistemi tasarlanarak başarımları incelenecektir. Tüm geliştirilen yöntemler neticesinde RSS-temelli bir IPS sisteminde çok yollu yansımaların konum tespiti üzerindeki bozucu etkileri ortadan kaldırılacaktır.

1.4. GPS

GPS, kullanıcılarına konumlandırma, seyrüsefer ve zamanlama gibi hizmetleri sunan ABD menşeli bir konumlandırma sistemidir [52]. Tüm bu görevleri yerine getirebilmek için uzay boşluğunda 24 aktif uydu hizmet vermektedir. Bu uydular şu anki GPS uydu konumunu ve zamanını verecek şekilde yeryüzüne tek yönlü sinyaller göndermektedirler.

Bu sistem, uzay segmenti, kontrol segmenti ve kullanıcı segmenti olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır [52]. Uzay ve kontrol segmentleri, ABD Hava Kuvvetleri tarafından geliştirilmekte, sürdürülmekte ve işletilmektedir [52]. GPS sisteminin çalışma mantığı şu şekildedir:

- GPS uyduları; konumlarını, durumlarını ve mevcut t_1 zamanını içeren radyo sinyallerini üreterek yeryüzüne doğru gönderirler. Bu uydular, üzerinde yerleşik olarak bulunan atomik saatler sayesinde mevcut zamanı çok hassas bir şekilde belirlemektedirler.
- GPS radyo sinyalleri, ışık hızında (c) uzayda yayılır ve çok kısa bir sürede yeryüzüne ulaşırlar.
- Bir GPS cihazı da gelen bu radyo sinyallerini alır ve sinyalin t_2 geliş zamanını bir kenara kaydeder. Daha sonra ise görüş açısında bulunan uydulara olan uzaklığını hesaplamak için bu geliş zamanını kullanır. Bir GPS cihazı, herhangi bir uyduya olan uzaklığını hesaplamak için (1.1) ile verilen uzaklık formülünü kullanır.

$$d = c \times (t_2 - t_1) \quad (1.1)$$

Burada d , GPS cihazının uyduya olan uzaklığını ifade eder. c ise radyo sinyalinin yayılma hızı olup bu değer ışık hızına eşdeğerdir. t_1 zamanı, radyo sinyalinin gönderildiği zamanı, t_2 zamanı ise sinyalin cihaza ulaşma zamanını göstermektedir. $t_2 - t_1$ zamanı ise sinyalin uydudan cihaza ulaşması için havada kaldığı süreyi ifade etmektedir.

- GPS cihazı en az dört uydunun kendisine olan uzaklığını biliyorsa, bazı geometrik işlemler yaparak dünya üzerindeki konumunu üç boyutlu olarak bulabilir.

1.5. İç Mekân Konumlandırma Teknolojileri

İç mekân konumlandırma sistemlerini tasarlamak için bu zamana kadar çok sayıda kablosuz teknoloji kullanılmıştır. Kendine özgü karakteristikleri olan bu konumlandırma teknolojilerinin birbirlerine göre birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

İç mekân konumlandırma teknolojisi, pazar talebini daha iyi karşılamak için hızla gelişme göstermiştir. Konumlandırma uygulamalarının gereksinimlerini göz önüne alarak,

konumlandırmayı gerçekleştirmek için belirli bir teknolojinin seçilmesi gerekmektedir. İç mekânlarda konumlandırma yapılırken, ağırlıklı olarak frekans modülasyonu (frequency modulation, FM), hücresele ağlar (cellular network), zig-bee, wi-fi, kızılötesi, ultrason, bluetooth, RFID ve UWB gibi tekniklerin kullanıldığı görülmektedir [13]. Tüm bu teknolojiler, IPS ile ilgili diğer birçok araştırma makalesinde tartışılmıştır. Bu nedenle, onlar tekrardan ele alınmayacak, ancak bu teknolojinin kullanılmasına yardımcı olan tekniklerin sistem performansları, avantajları ve kısıtlarını göstermek için daha detaylı bir tablo sunulacaktır. Literatürde kullanılan tüm bu iç mekân konumlandırma teknolojileri karşılaştırılarak, avantajları ve dezavantajları Tablo 1.1’de özetlenmiştir [13]. Farklı teknolojilerin farklı iletim aralıklarına, farklı hassasiyetlere, farklı ölçeklenebilirliklere, farklı maliyetlere ve farklı güç tüketimine sahip olduğu bu tablodan görülmektedir.

Tablo 1.1. Kablosuz iç mekân konumlandırma sistemlerinin karşılaştırılması

Sistem	Uzaklık	Doğruluk	Ölçeklenebilirlik	Maliyet	Güç tüketimi	Avantajlar	Kısıtlar
GPS	16km	6-20m	Düşük	Yüksek	Yüksek	Tüm dünyayı kapsar	Pahalı kurulum maliyeti, sadece dış mekânlar için uygun olması
FM	100km	2-4m	Düşük	Düşük	Düşük	Nesnelere karşı daha az duyarlı	Kısa mesafelerde az da olsa sinyal değişikliklerinin meydana gelmesi
Hücresele Ağlar	80km	2.5-20m	Düşük	Orta	Yüksek	Geniş kapsama alanı	Düşük hassasiyet
Zig-Bee	30-60m	1-10m	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük maliyet ve güç tüketimi	Düşük hassasiyet, düşük veri hızı
Wi-Fi	35m	1-5m	Orta	Orta	Yüksek	Düşük maliyet	Parmak izi yöntemi kullanıldığında çevreye karşı duyarlılık ve yüksek kurulum maliyeti

Tablo 1.1 'in devamı

Kızılötesi	Birkaç metre	1-2m	Düşük	Orta	Düşük	Düşük güç tüketimi	Kısa mesafeler için uygun olması, extra donanıma ihtiyaç duyulması
Ultrason	Onlarca metre	0.01-1m	Düşük	Orta	Düşük	İyi doğruluk oranı	Çevreye karşı duyarlı olması, extra donanıma ihtiyaç duyulması
Bluetooth	10m	1-5m	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük maliyet ve güç tüketimi	Kapsama alanının sınırlı olması, kullanıcı hareketliliğindeki kısıtlamalar
UWB	Birkaç metre	0.01-1m	Düşük	Yüksek	Düşük	İyi doğruluk oranı	Kapsama alanının sınırlı olması, yüksek maliyet
RFID	1m	1m	Orta	Düşük	Düşük	Düşük maliyet ve güç tüketimi	Tepki zamanının yüksek olması, kullanıcı hareketliliğindeki kısıtlamalar

1.6. Görünür Işık Haberleşmesi

Kablosuz erişimde kullanılan en yaygın ve en gelişmiş teknoloji RF teknolojisidir. Fakat günümüzde RF frekans spektrumu giderek kalabalıklaşmaktadır. Önümüzdeki yıllar içerisinde, kablosuz erişim için hızla büyüyen talep karşısında, mevcut RF bant genişliği gereksinimleri karşılayamayabilir. Bu nedenle, araştırmacılar diğer çözümleri aramaya başlamışlardır. Neyse ki, mevcut aydınlatma cihazlarını kullanan VLC sistemleri, özellikle iç mekân haberleşmesinde, RF tabanlı iletişime alternatif olarak sunulan ve ümit vadeden yöntemlerden biri olarak görülmektedir [53].

LED'lerin kullanımındaki hızlı artış, VLC için eşsiz bir fırsat sağlamıştır. Düşük maliyet, daha yüksek kullanım ömrü ve enerji tasarrufu avantajlarıyla, LED'lerin eski aydınlatma teknolojilerinin yerini alması ve gelecek nesil aydınlatma cihazları olması beklenmektedir. 2030 yılına kadar LED'lerin tüm aydınlatma sistemlerinin yaklaşık %75'ini kapsayacağı tahmin edilmektedir [13, 54]. Yeni LED'ler, insan gözüyle algılanamayacak derecede çok hızlı bir şekilde farklı ışık yoğunluğu seviyelerine geçebilir.

Böylelikle, haberleşmeyi gerçekleştirmek için veriler yayılan ışıktaki kodlanabilir. Bu da LED'lerin hem aydınlatma hem de haberleşme amacıyla kullanılmasını sağlar. Ayrıca beyaz-LED lambaları, yüksek hızlı tepki özelliklerini kullanarak, aydınlatmanın yanında aynı anda bilgi de gönderebilir.

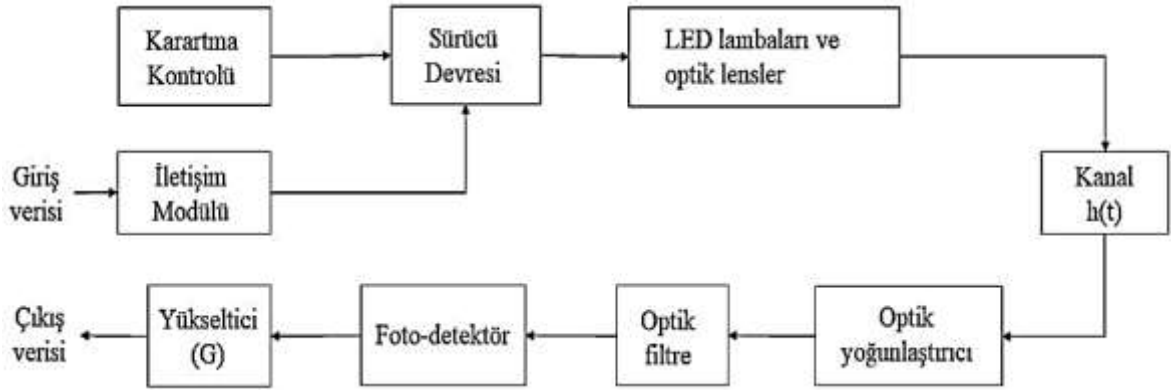
Diğer kablosuz iletişim teknolojileriyle karşılaştırıldığında, VLC önemli bir iletişim aracıdır ve aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- **Maliyet Verimliliği:** VLC, haberleşebilmek için mevcut aydınlatma altyapısını kullanır. Bu da bu tür sistemlerin birkaç ek cihazla mevcut sistem üzerine kurulabileceği anlamına gelmektedir. Diğer bir deyişle, bu sistemlerde maliyet daha düşüktür.
- **Geniş Bant Genişliği:** VLC'nin spektrumu 385 ile 800 THz arasındadır. Yani VLC'nin olası veri taşıma kapasitesi, spektrumun RF kısmından binlerce kez daha büyüktür [54]. Artan kalabalık RF spektrumu göz önüne alındığında, frekans spektrumunu verimli hale getirebilmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Yine de, mevcut RF spektrumu, artan kablosuz erişim talebini karşılamak için yetersiz kalmaktadır. Geniş bant genişliğine sahip VLC, yüksek kapasiteli mobil veri ağları tasarlamak için de RF tabanlı iletişim sistemleri yerine kullanılabilir.
- **Enerji Verimliliği:** LED'ler en az %75 daha az elektrik enerjisi tüketir ve akkor aydınlatmaya göre 25 kat daha uzun ömürlüdür [55]. LED'lerin enerjisinin çoğu aydınlatma için kullanılır. Bu nedenle VLC sistemi enerji tasarrufludur.
- **İletişim Güvenliği:** Görünür ışık, nesnelere ve duvarların çoğuna nüfuz edemez. Bu sayede alıcı ve verici arasındaki kablosuz bağlantılar gizli tutulabilir. Bu da dahili bir kablosuz iletişim güvenliğinin sağlandığı anlamına gelmektedir.

VLC'nin potansiyel uygulama alanları, [53] makalesindeki yazarlar tarafından belirtilmiştir. Öncelikli olarak bir iç mekân konumlandırma teknolojisi olarak kullanılan VLC, ayrıca konut sakinlerine internet erişimi sağlamak ve akıllı evleri gerçekleştirmek için de kullanılabilir. İstenilen bilgiye hızlıca ulaşmak için alışveriş merkezlerinde veya müzelerde kullanılabilir. VLC'nin güvenliği nedeniyle, muhtemelen askeri uygulamalarda da kullanılabileceği düşünülmektedir. Yazarlar, VLC'nin dış ortamlarda ve su altı ortamlarında da kullanılabileceğini belirtmektedir. Bu tez kapsamında ise esas olarak VLC'nin bir uygulama alanı olarak iç mekân konumlandırma sistemleri ele alınacaktır.

1.6.1. VLC Sistemlerine Genel Bakış

Bir VLC sisteminin blok diyagramı şekil 1.1’de gösterilmektedir. Akkor ve gaz-boşaltmalı lambalarda hassas karartma işlemi yapmak zordur. Halbuki, LED’ler kullanılarak hassas karartma seviyesi tam olarak kontrol edilebilmektedir. Çünkü LED’lerin anahtar açıp kapama işlemi süresince tepki zamanları oldukça kısadır (10 ns nin birkaç katı seviyesinde). Bu yüzden oldukça yüksek frekanslarda sürücü akımı modüle edilerek, insan gözü tarafından algılanamayacak derecede LED’lerin açık kapalı konumlar arasında anahtarlama yapabilmesi mümkün olabilmektedir. Bundan dolayı, bir LED’den yayılan ışık, tekrarlamalı yüksek frekanslı ve düşük ortalamalı güce sahip bir darbe dizisi formunda olacaktır. Bir LED tarafından yayılan ortalama ışınma akısı, karartma sinyalinin göreceli olarak genişliğiyle doğru orantılıdır. Uygulama ve güvenlik gereksinimlerine bağlı olarak, verici olarak bir LED veya yarıiletken bir lazer kullanılabilir. Eğer bir uygulama, VLC sistemlerinde olduğu gibi aydınlatma ve haberleşme amaçlı olarak kullanılacaksa LED tercih edilir. Aydınlanma gereksinimi olarak tipik bir ofis ortamı için aydınlanmanın 200-1000 lx arasında olması gerekmektedir [56].



Şekil 1.1. Görünür ışık haberleşme sisteminin blok diyagramı

1.6.2. VLC Sistemlerinde Kullanılan Vericiler

Bir görünür ışık haberleşme sisteminde verici olarak LED armatürler kullanılır. Bir LED armatürü; bir LED lamba, balast, muhafaza ve diğer bileşenlerden oluşan bir aydınlatma ünitesidir. LED lamba (aynı zamanda LED ampul olarak ta adlandırılır), bir veya daha fazla LED içerebilir. Lamba ayrıca parlaklığını kontrol etmek için şekil 1.1’de

gösterildiği gibi LED'ler üzerinden geçen akımı kontrol eden bir sürücü devresi de içerir. İletişim yapabilmek için bir LED armatür kullanıldığında, yayılan ışığın kullanımı yoluyla verileri modüle edebilmek için sürücü devresi değiştirilir. Örneğin, basit bir OOK modülasyonunda, "0" ve "1" veri biti, iki ayrı ışık yoğunluğu seviyesi seçilerek iletilebilir.

LED armatürlerinin birincil amacı olan aydınlatmanın iletişim amaçlı kullanım nedeniyle etkilenmemesi gerekmektedir. Bu problem, VLC sistemleri için çok önemli bir tasarım gerekliliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, LED armatürlerin nasıl tasarlandığına bağlı olarak VLC sisteminin performansı da etkilenmektedir.

Beyaz ışık, hem iç mekân hem de dış mekân uygulamalarında en yaygın kullanılan aydınlatma şeklidir. Bunun nedeni, nesnelerin beyaz ışık altında görülen renklerinin doğal ışık altında görülen renklerine çok benzemesidir. Katı hal aydınlatmada, beyaz ışık aşağıdaki iki yoldan biriyle üretilir.

- Fosforlu Mavi LED Yöntemi: Beyaz ışık, sarı fosfor kaplaması olan mavi bir LED kullanılarak üretilir. Mavi ışık sarı kaplamadan geçerken, bu birleşim sonucunda beyaz ışık ortaya çıkar. Fosfor tabakasının kalınlığı değiştirilerek beyaz ışığın farklı çeşitleri (renk sıcaklıkları) elde edilebilir.
- RGB Birleşim Yöntemi: Beyaz ışık; kırmızı, yeşil ve mavi ışığın karıştırılmasıyla üretilir. Bu yöntemde, fosforlu mavi LED yöntemini kullanmaya kıyasla LED armatürlerin maliyetini arttıran üç ayrı LED kullanılmaktadır. Uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle, fosforlu mavi LED yöntemi, beyaz LED tasarımı için daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak iletişim açısından, fosfor kaplaması LED'lerin anahtarlama hızı birkaç mhz ile sınırlı kalmaktadır. Bu sınırlamayı en aza indirmek için çeşitli çözümler önerilmiştir. Öte yandan, RGB (red,green,blue) birleşimi, üç farklı renk dalga boyu LED'leri kullanarak verileri modüle ettiği için renk kaydırmalı anahtarlama tekniğini (colour shift keying, CSK) kullanmaya elverişlidir ve haberleşme için tercih edilebilir [13].

1.6.3. VLC Sistemlerinde Kullanılan Alıcılar

Bir LED armatürü tarafından gönderilen sinyali almak için foto-detektör ve görüntü sensörü olmak üzere iki tip VLC alıcısı kullanılabilir:

- Foto-detektör: Foto-diyot veya görüntü oluşturmayan alıcı (non-imaging receiver) olarak ta adlandırılır. Foto-detektör, alınan ışığı akıma dönüştüren bir yarı iletken

aygıttır. Mevcut ticari foto-detektörler, alınan görülebilir ışığı, 10 MHz'in birkaç katı hızında kolayca örnekledebilirler.

- Görüntü sensörü: Kamera sensörü de denmektedir. Bu sensörler, mobil cihazların çoğunda videoları veya görüntüleri yakalamaya yarayan sensörler olup, günümüzdeki akıllı telefonların birçoğunda bulunmaktadır. Bu sensörlerin kullanımı sayesinde mobil cihazlar kolayca mevcut VLC alıcılara dönüştürülebilir. Bir görüntü sensörü, entegre bir devre üzerine bir matris içinde düzenlenmiş birçok foto-detektörden oluşmaktadır. Bununla birlikte, bir görüntü sensörünün yüksek çözünürlüklü fotoğrafçılığı sağlamak için üzerindeki foto-detektörlerin sayısının çok yüksek olması gerekmektedir ve bu da bu sensörler için bir tasarım sınırlaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sınırlama, kamera sensörü tarafından yakalanabilen saniyedeki kare sayısını (frame per second, fps) önemli ölçüde azaltmaktadır. Örneğin, akıllı telefonlarda yaygın olarak kullanılan kamera sensörlerinin fps hızı 40'tan fazla değildir. Bu da kamera sensörünün görünür ışık haberleşmesinde çok düşük veri hızı sağlayabileceği anlamına gelir.

1.6.4. VLC Sistemlerinde Haberleşme Modları

Görünür ışık haberleşmesi verici altyapısı-cihaz haberleşmesi ve cihaz-cihaz haberleşmesi olarak iki modda sınıflandırılabilir [57].

Bir odayı aydınlatmak için LED armatürlerin kullanıldığı bir iç mekân senaryosu şekil 1.2' de verilmiştir. Bu durumda, LED armatürler oda içerisindeki çeşitli cihazlara veri gönderebilirler. LED'ler, girişimi azaltmak ve alıcı cihazlara koordineli şekilde çok noktalı iletişimi sağlamak için kendi aralarında da bir koordinasyon yapabilirler. Son kullanıcı cihazlarında LED'lerin kullanılması, kullanıcılarda göze çarpan bir rahatsızlığa yol açabileceğinden dolayı bu cihazlardan up-link iletiminin elde edilmesi zordur. Böyle durumlarda, up-link iletimi için RF veya kızılötesi haberleşmesi kullanılabilir. İç mekân senaryolarında olduğu gibi dış mekânlarda da LED'ler çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Trafik lambalarının yanı sıra sokak lambalarında da kullanılan LED'ler, yayalara ve araç içerisindeki kullanıcılara internet erişimi sağlamak için kullanılabilir.

Görünür ışık haberleşmesi, mobil cihazlar içerisindeki çok yönlü kamera sensörü sayesinde, yakın alandaki cihazdan cihaza yapılan haberleşmelerde de kullanılabilir.

Burada, bir akıllı telefonun ekranındaki LED pikselleri başka bir akıllı telefonun kamera sensörüne veri iletmek için kullanılabilir. Yüksek verimli kodların tasarımındaki son gelişmelerle birlikte, bu tür ekran-kamera akışının çok yüksek bir veri hacmine ulaştığı görülmüştür [57]. Ayrıca başka bir cihaz-cihaz haberleşmesine örnek olarak yolda giden arabalar ile diğer araçlar VLC teknolojisini kullanarak aralarında geçici bir ağ oluşturmak suretiyle birbirleriyle iletişim kurabilirler.



Şekil 1.2. Görünür ışık haberleşmesi iç mekân senaryosu [57].

1.6.5. VLC Sistem Modeli

VLC sistemlerinde verici tarafından gönderilen P_t optik gücü bilindiğinde alıcı tarafından alınan P_r optik gücünü bulmak için (1.2) denkleminde yararlanılır.

$$P_r = P_t \frac{(m_l + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), \quad 0 \leq \psi \leq \psi_{con} \quad (1.2)$$

Burada ψ , alıcı yüzeyiyle normal ekseninin yaptığı açı olup geliş açısı olarak isimlendirilir. $T_s(\psi)$, optik filtrenin geçirgenlik fonksiyonunu; $g(\psi)$, alıcının optik yoğunlaştırıcı kazancını; ψ_{con} , alıcının görüş alanı açısını (Field of View, FOV); d ise LED ve alıcı yüzeyi arasındaki uzaklığı ifade eder. m_l ise Lambertyan yayılım derecesi olup (1.3) denklemindeki gibi ifade edilir.

$$m_l = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (1.3)$$

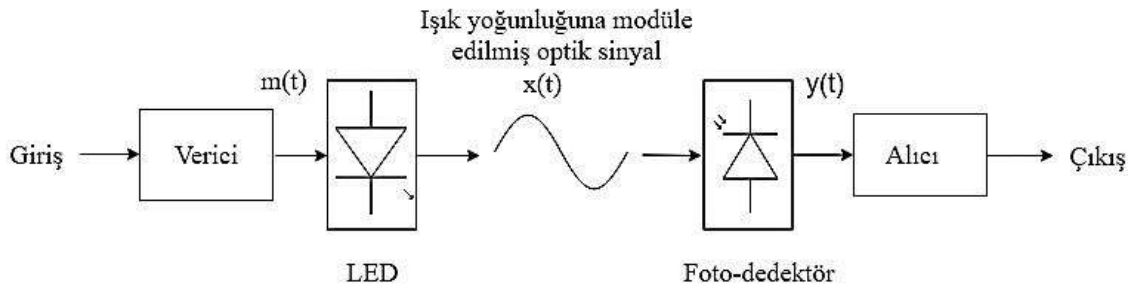
Burada $\phi_{1/2}$, LED'in yarı aydınlıktaki güç açısıdır. Alıcının optik yoğunlaştırıcı kazancı $g(\psi)$ ise (1.4) denklemi ile verilmektedir.

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_{con}}, & 0 \leq \psi \leq \psi_{con} \\ 0, & 0 \geq \psi_{con} \end{cases} \quad (1.4)$$

Burada n , kırılma indisidir.

İç mekân görünür ışık haberleşmesi için kanalı doğru bir şekilde modellemek önemlidir ve bunun için bu zamana kadar birkaç kanal modeli girişimde bulunulmuştur. Literatür özeti kısmında bu kanal modeli çalışmalarına yer verilmiştir. Şimdi bu bölümde sadece genel olarak bir görünür ışık kanalının nasıl modellenebileceğinden bahsedilecektir.

IM/DD, düşük maliyet ve karmaşıklığı nedeniyle optik kablosuz sistemlerin uygulanması için kullanılan bir yöntemdir [47, 58]. Bu yöntemde bir optik kaynağın sürücü akımı, modüle edici bir $m(t)$ sinyali ile modüle edilir ve çıkışında optik kaynağın $x(t)$ ışık yoğunluğuna dönüştürülür. Alıcı olarak ise bir foto-detektör kullanır. Foto-detektör, gelen optik sinyalin dalga boyunun on binlerce katı uzunluğundaki bir sinyali toplayarak, tepki olarak çıkışında bir $y(t)$ foto-akımı üretir. Bu foto-akımı, alıcının üzerine gelen anlık optik güçle doğru orantılıdır. Şekil 1.3'te bir IM/DD haberleşme kanalının blok diyagramı gösterilmektedir.

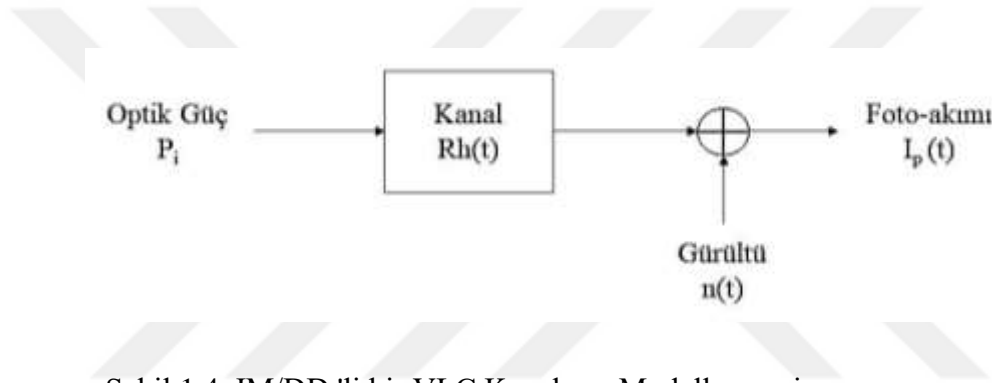


Şekil 1.3. IM/DD'li bir VLC kanalının blok diyagramı

Şekil 1.4 ise IM/DD'li bir VLC kanalının genel kanal modelini göstermektedir. Görünür ışık kanalı, bir doğrusal toplanabilir beyaz gaussian gürültü (adaptive white gaussian noise, AWGN) kanalı olarak modellenenebilir ve (1.5) formülüyle ifade edilebilir.

$$I_p(t) = RP_t(t) * h(t) + n(t) \quad (1.5)$$

Burada; $P_t(t)$, anlık gönderilen optik güç; $h(t)$, kanal dürtü tepkisi; $n(t)$, sinyal-bağımsız toplamalı gürültü (signal-independent additive noise); * sembolü ise katlama (convolution) işlemini ifade etmektedir. Zaman ortalamalı gönderilen optik güç ise (1.6) eşitliğine göre ifade edilebilir.



Şekil 1.4. IM/DD 'li bir VLC Kanalının Modellenmesi

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_i(t) dt \quad P_i(t) > 0 \quad (1.6)$$

$$P_r = \sum^{N_{LEDS}} \left\{ P_t H_d(0) + \int_{Yansımalar} P_t dH_{yan}(0) \right\} \quad (1.7)$$

Ortalama alınan optik güç $P_r = H(0)P_t$ olacaktır. $H(0)$ kanalın DC kazancı olarak ifade edilir. Duvardan yansımalar göz önüne alındığında, alınan güç (P_r), doğrudan görüş hattı üzerindeki $H_d(0)$ kanal DC kazancı ile $H_{yan}(0)$ yansımalı yol üzerindeki kanal DC kazancının toplamından (1.7) denklemindeki gibi elde edilir [59].

1.6.6. VLC Modülasyon Metotları

LED'lerin hem aydınlatma hem de haberleşme amacıyla kullanılmasının mümkün

olduğu konusundan daha önce bahsedilmişti. LED'leri anahtarlamak için kullanılan bir sinyali modüle etmek amacıyla uygun bir modülasyon metodunun kullanılması gerekmektedir. Bu da VLC için modülasyon yönteminin sadece veri hızını değil, aynı zamanda aydınlatma talebini de karşılaması gerektiği anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle, VLC sistemlerinde düşünülmesi gereken iki problem vardır: Bunlar karartma kontrolü (dimming control) ve ışık titreşmesi (flicker) kontrolüdür. Işık yoğunluğunun dalgalandığı bir ortamda uzun süre kaldığımızda gözümüze zarar verdiği bilinmektedir. Bu da modülasyon metodunun ışık titreşmesi sorununu desteklemesi ve çözmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

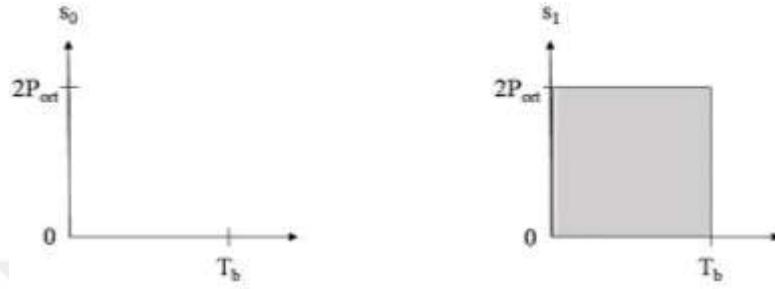
RF'in bir alternatifi olarak kullanılabilen VLC, RF'e göre bazı farklılıklara sahiptir. Örneğin; faz veya genlik modülasyonu metodu VLC için uygun değildir. Ayrıca VLC'deki modülasyon metodu, ışık dalgasının yoğunluğunu değiştirerek bilgiyi kodlamaktadır. VLC için öne sürülen birçok modülasyon metodu bulunmaktadır ve bunların birçoğu VLC-temelli IPS'ler için de kullanılabilir. aç-kapa anahtarlama (on-off Keying, OOK), darbe konum modülasyonu (pulse position modulation, PPM), dikgen frekans bölüşümlü çoklama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), renk kaydırmalı anahtarlama (color shift keying, CSK), taşıyıcısız genlik ve faz modülasyonu (carrier-less amplitude and phase, CAP), VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon türleridir [13]. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada kullanılan modülasyon türü OOK modülasyonu olup burada sadece bu modülasyon türüne yer verilecektir.

1.6.7. OOK Modülasyonu

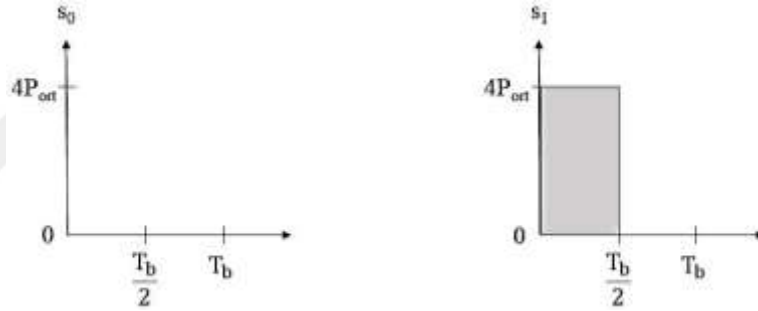
Bu modülasyon türü, VLC sistemlerinde kullanılan ve IM/DD teknolojisi için öne sürülen en basit modülasyon tekniğidir. 1 ve 0 veri bitlerini iletmek için LED'i açıp kapatarak veriyi modüle etmektedir. 1 biti, bit periyodunun (T_b) tamamını veya bir kısmını kullanan bir optik darbe sinyaliyle temsil edilir. 0 biti ise bir optik darbe sinyalinin olmadığını gösterir. Hem sıfıra-dönüştü (return-to-zero, RZ) hem de sıfıra-dönmeyen (non-return-to-zero, NRZ) teknikleri uygulanabilir. NRZ tekniğinde, bir bit periyoduna eşit süreli bir darbe sinyali 1 bitini temsil ederken, RZ tekniğinde ise bir bit periyodunun tamamında değil sadece bir kısmını içeren süre aralığında darbe sinyali gönderilir. Şekil 1.5 ve şekil 1.6'da ortalama gönderilen gücün P_{ort} olduğu bir sistemde, görev çevrimi (duty cycle) $\gamma=0.5$ olan OOK-NRZ ve OOK-RZ tekniklerinin nasıl temsil edileceği sırasıyla

gösterilmiştir. Bundan dolayı bir OOK-NRZ tekniğinin zarfı denklem (1.8) ile ifade edilebilir.

$$p(t) = \begin{cases} 2P_{ort} & t \in [0, T_b) \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (1.8)$$



Şekil 1.5. NRZ-OOK tekniğinde gönderilen dalga biçimi ($\gamma=0.5$)



Şekil 1.6. RZ-OOK tekniğinde gönderilen dalga biçimi ($\gamma=0.5$)

Bu modülasyon türünün uygulanması kolay olduğundan dolayı kablosuz haberleşmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu teknik ile hem karartma kontrolü düzgün bir şekilde yapılamamakta hem de yüksek veri hızlarına ulaşamamaktadır. [60]'de yapılan çalışmada yazarlar NRZ-OOK modülasyon metodunu baz alarak pratikte yüksek hızlara ulaşmak ve az karmaşıklığa sahip bir uygulama yapabilmek için analog ön-denkleştirici ve son-denkleştirici tasarlamışlar ve bunu fosforlu beyaz LED için kullanmışlardır. Bunun sonucunda da gerçek-zamanlı bir VLC haberleşme hattında 550 Mbit/s hıza ulaşmışlardır. Bu tez kapsamında da kullanılması düşünülen modülasyon tekniği NRZ-OOK tekniğidir.

1.7. IPS Teknikleri ve VLC-Temelli IPS'ler

RF'in karakteristiğine göre, RF-tabanlı IPS'nin RF duyarlı alanda kullanılmaya uygun olmadığını görüyoruz. RF-tabanlı IPS'nin bant genişliği, artan kablosuz erişim talebini karşılamak için sınırlıdır ve çok azdır.

Cihazsız IPS, iç mekânlarda bir insanı tespit etmek ve bulmak için insan vücudunun alınan sinyal gücünün şeklini nasıl değiştirdiğini analiz eder. Herhangi bir cihaz kullanmadan insan vücudunu tespit etmek ve izlemek için kızılötesi, UWB radar, ultrason, Wi-Fi, kablosuz sensörler, RFID ve FM kullanılabilir. Belirli bir akıllı telefon veya etiket tabanlı bir cihaza ihtiyaç duyan cihaz-tabanlı IPS ile karşılaştırıldığında, cihazsız-IPS çevre müdahalelerine ve dinamiklerine karşı daha savunmasızdır. Cihazsız IPS, insanları algılamak ve konumlarını bulmak için kablosuz sinyaller üzerindeki insan etkisine güvendiğinden dolayı çevresel değişiklikler, cihazsız-IPS'nin tatmin edici performans göstermesini etkileyebilir ve bu nedenle böyle sistemler için yeniden kalibrasyon gerekebilir[13].

VLC kullanan konumlandırma sistemleri, VLC'nin önemli bir uygulaması olarak son zamanlarda çok dikkat çeken bir uygulama alanı haline gelmiştir. VLC-temelli IPS'lerin diğer konumlandırma sistemlerine göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [13].

- 1) VLC-temelli IPS'ler, RF sinyalleriyle bir girişim oluşturmadığından dolayı, hastaneler ve uçaklar gibi RF duyarlı ortamlarda kullanılabilirler [13].
- 2) LED'ler, alıcı tarafta daha hassas geliş açısı (AOA) bilgisi sağlayan dar bir ışın genişliğine (beamwidth) sahiptirler [61].
- 3) VLC, çok yönlü girişimden daha az etkilenir. Çünkü iç mekânlarda görünür ışığın birincil enerjisi doğrudan görüş hattı üzerinde yoğunluk gösterir [13].
- 4) VLC-temelli konumlandırma sistemleri, çok az bir değişiklik uygulanmış mevcut aydınlatma sistemlerini kullanmaları nedeniyle ucuz bir şekilde kurulabilir [13].
- 5) Görünür ışık temelli konumlandırmanın kesinliği, geleneksel konumlandırmadan daha yüksektir. Örneğin; yapılan bir araştırmada LED armatürlerin sayısının, tipik bir bina içerisinde wi-fi'den on kat daha fazla olduğunu göstermektedir [19], bu da daha yüksek doğruluğa katkıda bulunmaktadır.

VLC-temelli-IPS, RF-tabanlı-IPS ve cihazsız-IPS'nin ayrıntılı karşılaştırması Tablo 1.2' de verilmiştir.

Tablo 1.2. VLC-temelli IPS, RF-tabanlı-IPS ve cihazsız IPS'nin karşılaştırılması

Sistem	RF-duyarlılığı	Bozunum	Maliyet	Karmaşıklık	Bant-genişliği	Haberleşme Güvenliği	Uygulama Senaryoları
VLC-temelli-IPS	Hayır	Düşük	Düşük	Düşük	Geniş	Yüksek	Residanslar, alışveriş merkezleri, hastaneler, müzeler, maden ocakları
RF-temelli-IPS	Evet	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Orta	Rezidanslar, alışveriş merkezleri, müzeler
Cihazsız-IPS	Evet	Yüksek	Düşük	Düşük	Orta	Orta	Büyük depolar ve mağazalar, izinsiz giriş tespiti ve takip etme

1.8. VLC-Temelli IPS'lerin Sınıflandırılması

VLC-temelli iç mekân konumlandırma sistemleri üzerine yapılan çalışmalar 3 başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar: matematiksel metotlar, sensör yardımcı metotlar ve optimizasyon yöntemleri şeklindedir.

1.8.1. VLC-Temelli IPS'lerde Kullanılan Matematiksel Metotlar

Bu bölümde VLC-temelli iç mekân konumlandırma sistemlerinde kullanılan matematiksel metotlar hakkında bilgi verilecektir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalar ışığında matematiksel metotları yakınlık (proximity), üçgenleştirme (triangulation) ve parmak izi (fingerprint) yöntemi olmak üzere 3 başlık altında toplamak doğru olacaktır.

1.8.1.1. Yakınlık Algoritması

En basit konumlandırma metodu olarak karşımıza çıkar. Bu metotta, bilinen bir verici istasyonuna veya bir erişim noktasına olan uzaklıklar baz alınarak alıcı hakkında

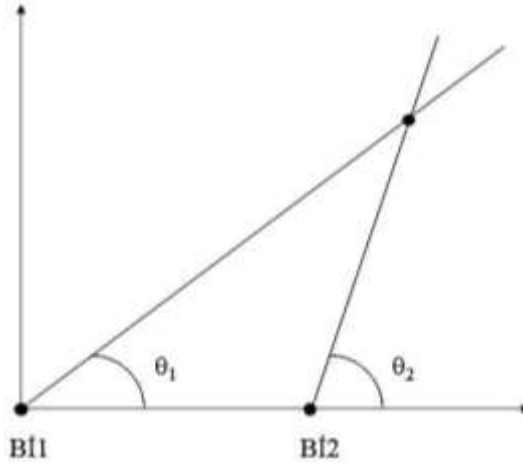
göreceli konum bilgileri elde edilebilir. Detaylı olarak anlatmak gerekirse, bir radyo işaret algılayıcısı (beacon), çevrede bir mobil aygıtın olduğunu saptarsa, bu algılayıcının mobil aygıtla eş-konumlu olduğu düşünülecektir. Eğer birden fazla algılayıcı bu mobil aygıtı tespit ederse, sinyali daha güçlü olan algılayıcıya göre mobil aygıtın konumu elde edilecektir. Çünkü işaret gücünün uzaklıkla doğru orantılı olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda radyo işaret algılayıcılarının sayısı arttıkça konumlandırma hassasiyeti de artmaktadır.

1.8.1.2. Üçgenleştirme Metodu

Üçgenleştirme metodu, bir mobil aygıtın konumunu kestirebilmek için üçgenlerin geometrik özelliklerini kullanır. Sabit bilinen ölçüm noktalarına olan uzaklıkların ölçülmesiyle veya alınan sinyal açısının tespit edilmesiyle işe başlanır. Daha sonra ise üçgenlerin geometrik özelliklerini kullanarak, aygıtın konumu bulunur. Konum kestiriminde kullanılan farklı metotlara göre üçgenleştirme metodunu 4 sınıfa ayırabiliriz: AOA, TOA, TDOA ve RSS. Bu metotlar aşağıda sırasıyla açıklanacaktır.

1.8.1.2.1. AOA

Baz istasyonu ve mobil aygıt arasındaki açığa göre konumlandırma işlemini gerçekleştirir. Konumlandırma prensibi şu şekildedir: Baz istasyonlarından farklı yönlerde ve farklı açılarda alıcıya ulaşan kablosuz sinyaller kesiştirilerek, alıcının konumu tespit edilir. AOA metodunda en az iki baz istasyonu gerekmektedir. Eğer iki veya daha fazla geliş açısı tespit edilirse, geometrik özellikler kullanılarak birden fazla çizginin kesişimini hesaplamak mümkün olacaktır. Kesişim işlemi sonucunda bulunan nokta da mobil aygıtın konumunu verecektir. Şekil 1.7’de AOA yönteminde konumlandırma işleminin nasıl yapılacağı gösterilmektedir. Kablosuz sinyalin azimut çizgisi ile Bİ1 ve Bİ2 olarak adlandırılan baz istasyonları arasındaki geliş açılarının θ_1 ve θ_2 olduğu düşünülmektedir. Mobil cihazın koordinatı (x_0, y_0) ; baz istasyonunun koordinatı da (x_i, y_i) olarak ifade edildiğinde (1.9) ile yazılan formülün sağlanması gerekmektedir.



Şekil 1.7. AOA yöntemine göre konum tespiti

$$\tan \theta_i = (y_i - y_0)/(x_i - x_0), \quad i = 1,2 \quad (1.9)$$

AOA dış ortama çok duyarlıdır ve konumlandırma doğruluğu TOA'dan daha düşüktür. Aksi takdirde, mobil cihaz ile baz istasyonu arasındaki mesafe arttığında AOA'nın konumlandırma hassasiyeti azalacaktır. Bu arada AOA metodu maliyeti artıran ek donanımlara da ihtiyaç duymaktadır.

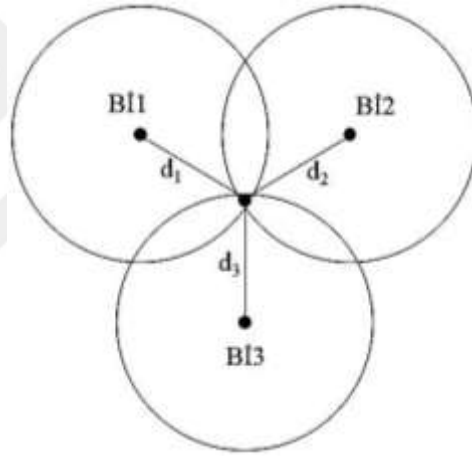
1.8.1.2.2. TOA

Gerçek ortamda mobil cihaz ile her bir baz istasyonu arasındaki mesafe aynı değildir. Bu yüzden mobil cihaz ve civardaki bir baz istasyonu arasındaki uzaklık, sinyalin mobil cihazdan baz istasyonuna ulaşma zamanına göre ölçülür. 2 boyutlu bir düzlemde, bir nesne ile üç doğrusal olmayan referans noktası arasındaki uzaklık biliniyorsa, hedefin konumu bulunabilir.

Mobil bir cihaz ile i . baz istasyonu arasındaki iletim zamanının t_i olduğu ve iletim hızının da v olduğu düşünülün. O halde mobil cihaz ile baz istasyonu arasındaki d_i uzaklığı, $v * t_i$ işlemiyle bulunabilir. Mobil cihaz ve baz istasyonunun koordinatlarının sırasıyla (x_0, y_0) ve (x_i, y_i) olduğu düşünülürse (1.10) eşitliği ile verilen formül türetilebilir.

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = d_i^2, \quad i = 1,2,3 \dots \quad (1.10)$$

Burada n saptanan baz istasyonlarının sayısıdır ve bu sayının en az üç olması gerekmektedir. TOA yönteminde üç adet baz istasyonunun tespit edildiği düşünülün. Bu durumda öncelikle üç adet çember çizilir. Bu çemberlerin merkezleri farklı baz istasyonlarının konumlarını, yarıçapları ise cihaz ile her bir baz istasyonu arasındaki d_i ($i=1,2,3$) uzaklığını temsil eder. İdeal durumda, üç farklı çember tek bir noktada kesişecektir ve bu nokta hedef noktasının uzamsal konumunu bize verecektir. Üç adet çember denkleminin çözülmesi işlemi “trilaterasyon” işlemi olarak adlandırılır. Şekil 1.8’de TOA temelli bir konumlandırmada trilaterasyon işleminin nasıl yapılacağı gösterilmiştir. Bu metot, verici ve alıcının tam olarak eşzamanlı olmasını gerektirir. Konumlandırma sonucu, donanıma büyük ölçüde bağımlıdır ve bu da kurulum maliyetini belirgin ölçüde arttırabilir.



Şekil 1.8. Trilaterasyon işlemine göre konum bulma

1.8.1.2.3. TDOA

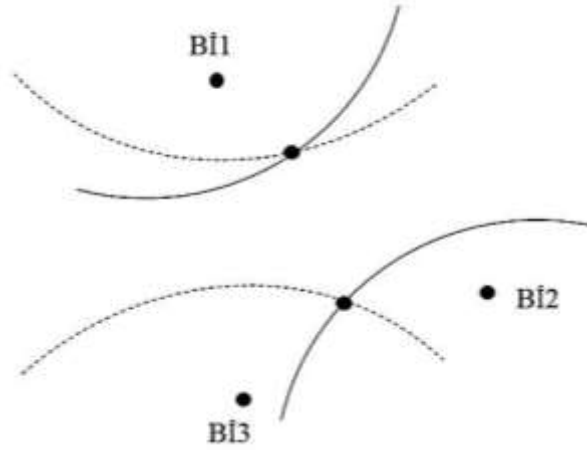
TDOA, TOA yöntemini iyileştirmek için ortaya atılan bir metottur. Bu metot sadece baz istasyonları arasında bir eş-zamanlamayı gerektirir. TOA yöntemi gibi hedef ve baz istasyonları arasında bir eş-zamanlamaya gerek duymaz. Bu yöntem, mobil cihaz ve baz istasyonları arasındaki sinyal iletiminde meydana gelen zaman farklarını ölçer ve bunu iletim hızıyla çarparak uzaklığa dönüştürür. Daha sonra hiperbolik konumlandırma metodu kullanılarak mobil bir cihazın konumu elde edilir. Şekil 1.9’da gösterildiği gibi B1 ve B2 baz istasyonları arasındaki uzaklık farkı (1.11) formülüyle bulunabilir. Mobil cihaz, odak noktası iki baz istasyonu olan ve odak uzaklığı da d_{12} olan bir hiperbol üzerinde yer

almalıdır. Bu arada, odak noktaları Bİ1 ve Bİ3, odak uzaklığı da d_{13} olan başka bir hiperbol da çizilebilir. Bu iki hiperbolün kesişimi mobil cihazın konumunu verir. Mobil cihaz ve baz istasyonunun koordinatları sırasıyla (x_0, y_0) ve (x_1, y_1) olduğu düşünülürse (1.12) ile verilen ifade türetilebilir.

$$d_{12} = v * (t_1 - t_2) \quad (1.11)$$

$$d_{1i} = \left(\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \right)^2, i = 2,3 \quad (1.12)$$

(1.12) eşitliği, hiperbolün iki kesişim noktasına göre iki çözüm sonucu verir. Bu sonuçları uygulamaya koyduğunuz zaman, hangi sonuç gerçek dünyadaki koordinatları ifade ediyorsa mobil cihazın konumunun o koordinatlar olduğu söylenir. TOA ile karşılaştırıldığında çevresel etkenlerden daha az etkilendiği söylenebilir. Bu yüzden, TDOA yöntemi ile daha yüksek bir konumlandırma hassasiyeti sağlanmaktadır.



Şekil 1.9. TDOA Konumlandırma Tekniği

1.8.1.2.4. RSS

RSS, yayılan sinyal gücündeki zayıflama özelliğini kullanarak mobil cihaz ve baz istasyonu arasındaki uzaklığı tahmin etmeye yarayan alternatif bir yaklaşımdır. Uzaklığın artmasıyla sinyal gücü azalır. Sinyal gücündeki azalma miktarına bakılarak uzaklık elde edilebilir. Vericilerin koordinatlarının alıcı tarafından bilindiği bir senaryoda, TOA tekniğinde olduğu gibi eğer en az 3 adet uzaklık bilgisi elde edilebilirse (1.10) formülüne

göre çember denklemleri yazılarak trilaterasyon işlemi uygulanır ve alıcının konumu bulunmuş olur. Şekil 1.8’de trilaterasyon işleminin nasıl yapılacağı gösterilmiştir. RSS yöntemi bu tez kapsamında kullanılacak olan metot olup, VLC sistemlerinde konumlandırma yapılırken bu metodun nasıl kullanılacağı ve uygulanabileceği yapılan çalışmalar kısmında ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

1.8.1.3. Parmak İzi Yöntemi

Parmak izi yöntemi, konuma bağlı olarak sinyallerin karakteristiğinin veya özelliğinin çıkarılması işlemine dayanır. Çoğu zamanlarda parmak izi yöntemi RSS’in bir türü olarak düşünülür. Farklı alanlarda sinyallerin özelliklerinin de farklı olduğu varsayılır. Parmak izi yöntemi, belli bir konuma karşılık gelen ölçüm farklarını kullanarak bir sonuca ulaşmaya çalışır.

Parmak izi yönteminin iki tipi vardır: radyo haritalandırmasına dayalı parmak izi konumlandırması, haritalandırma gerektirmeyen parmak izi konumlandırması. Haritaya dayalı parmak izi konumlandırması iki evreden oluşur: çevrimdışı ve çevrimiçi evreleri. Çevrimdışı evresinde, kapalı bir mekânda öncelikle bir saha araştırması yapılır ve bir radyo haritası oluşturulur. Çevrimiçi evresinde de farklı vericilerden gelen sinyal şiddetleri gözlemlenir ve daha önceden oluşturulan radyo haritasına dayanılarak hedefin konumunu tespit edebilen bir konumlandırma tekniği kullanılır. Fakat, ışıқта meydana gelen kırılma ve yansıma gibi fiziksel etkiler RSS’i etkileyebilir. Bu da ölçüm sonuçlarında hassasiyetin düşük olmasına neden olabilir. Haritalandırma gerektirmeyen parmak izi yöntemi de haritalandırmanın sebep olduğu karmaşıklığı azaltabilen başka bir parmak izi yöntemi olarak karşımıza çıkar. Bu tez kapsamında parmak izi yöntemi ile yapay sinir ağları temelli bir konumlandırma sistemi, yapılan çalışmalar kısmında ele alınacaktır.

1.8.2. VLC-Temelli IPS’lerde Kullanılan Sensör Yardımlı Metotlar

Bir iç mekân konumlandırma sisteminde yüksek hassasiyetli sonuçlar elde etmek gereklidir. Bu amaca ulaşmak için de konumlandırmaya yardımcı olabilmesi için birçok sensör kullanılabilir. Kullanılan sensörler, akıllı telefonlar gibi bir mobil cihaza gömülü olabilirler ve bu sensörlerin çoğu da VLC-temelli IPS’lerde kullanılmaya uygundur. Genel olarak kullanılan sensörleri 4 farklı gruba ayırabiliriz. Bunlar: görüntü sensörü, ivme

sensörü, ışık sensörü ve çoklu optik algılayıcılardır. Daha iyi bir konumlandırma performansı için kullanılan bu sensörler ile ilgili çalışmalar bölüm 1.2’de verilmiş olup, yapılan tez çalışması konusunun dışında kaldığından dolayı burada ayrıntılı olarak yer verilmeyecektir.

1.8.3. VLC-Temelli IPS’lerde Kullanılan Optimizasyon Metotları

Matematiksel ve sensör yardımcı metotlar dışında literatürde konumlandırma performansını arttıran optimizasyon metotları adı altında başka metotlara da yer verilmiştir. Başka konularda veya konumlandırma ortamlarında kullanılan bazı metotlar, VLC-temelli IPS’lere uygun olarak değiştirilmiştir. Daha iyi bir hassasiyet sağlayan ve takip edilebilirliği geliştiren konumlandırma optimizasyon metotları olarak literatürde süzgeçleme tekniği (filtering technic), yay modeli tekniği (spring model) ve normalizasyon yöntemi olmak üzere bazı çalışmalar yapılmıştır. Bununla ilgili yapılan çalışmalara bölüm 1.2’de değinilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde öncelikle benzetim çalışmalarında kullanılması için VLC-temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi senaryosu oluşturulacak ve iç mekânlarda optik kablosuz kanallar için çok yollu yansımaların hesaba katıldığı bir kanal modeli tasarlanacaktır. Bu amaçla Değiştirilmiş Monte Carlo (Modified Monte Carlo, MMC) kanal modelinden [49] yararlanılacaktır. Daha sonra oluşturulan senaryo üzerinde üç farklı konumlandırma sisteminin modelleme aşamaları ve konumlandırma algoritmaları anlatılacaktır. Bu sistemler: RSS-temelli iç mekân konumlandırma sistemi (RSS-temelli IPS), türev alıcı filtre yardımcı iç mekân konumlandırma sistemi (TAF-yardımlı IPS) ve yapay sinir ağı yardımcı iç mekân konumlandırma sistemi (YSA-yardımlı IPS)'dir. Bu tez kapsamında ele alınan VLC-temelli IPS'lerin her biri için bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları yapılacak, bu benzetim çalışmalarının sonuçlarına ise 3.bölümde yer verilecektir.

2.1. İç Mekânlarda Optik Kablosuz Bir Kanalin Modellenmesi

Kapalı boş bir odada herhangi bir LED vericisinin herhangi bir noktadaki dürtü tepkisini gerçeğe en yakın bir şekilde hesaplayabilmek için çok yollu yansımaların hesaba katıldığı bir kanal modeline ihtiyaç vardır. Bunun için bu tez kapsamında benzetim çalışmalarında hızlı sonuçlar vermesi açısından Barry tarafından öne sürülen deterministik modele[46] alternatif olarak MMC kanal modelinin [49] kullanılması uygun görülmüştür. MMC modeli, iç mekânlarda optik kablosuz kanallarda dürtü tepkilerini hesaplamaya yarayan bir kanal modelidir. İç mekânlarda MMC kanal modeline göre optik kablosuz bir kanalın nasıl modellenebileceği aşağıda başlıklar altında ayrıntılı olarak ele alınmış olup, burada belirtilen tasarım algoritmalarına göre de MMC kanal modeli, benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere bilgisayar ortamında modellenmiştir. Tüm bu modellemeleri yapabilmek için deterministik [46], MMC [50], CDMMC [51] kanal modellerini anlatan ilgili çalışmalardan yararlanılmıştır.

2.1.1. MMC Kanal Modeli ve Tasarım Algoritması

Bu kanal modeli, temelde bir ışın izleme metodudur [50]. Öncelikle optik bir kaynaktan üç boyutlu bir uzayda farklı yönlerde ve farklı açılarda yayılım gösteren birçok ışının üretilmesi gerekmektedir. Bu ışınların rastgele değil de bir yayılım profiline veya açısal optik yoğunluk fonksiyonuna göre dağıldığı düşünülür. MMC metodu kullanılarak yapılan bir kanal modelinde, bir ışın bir yansıtıcı yüzeye (duvar, tavan gibi...) çarptığı zaman, ışın ve yüzeyin etki noktasında yeni bir noktasal kaynak oluşturulur ve bu noktasal kaynaktan da yeni bir ışın üretilir. Işının havada kalma süresi (t), maksimum benzetim zamanına (t_{mak}) ulaşana kadar bu süreç devam ettirilir.

Her bir yansımadan sonra ışının gücü, çarptığı engelin yansıma katsayısı oranında azaltılır. Her bir ışın ile ilgili iki değişken parametre bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, ışının üretilmesinden sonra geçen zaman (t), ikincisi ise ışının taşıdığı güçtür ($P_{\text{ışın}}$).

Bir ışın bir engele çarptığı zaman sadece yeni bir ışın üretilmez aynı zamanda bu noktadaki noktasal kaynağın alıcı üzerinde oluşturduğu yansıyan güç katkısı da hesaplanır. Elbette ki, yeni bir ışın üretilmeden önce hesaplanan optik kaynağın alıcı üzerindeki doğrudan katkısının da bu yansıyan güç katkısına eklenmesi gerekmektedir.

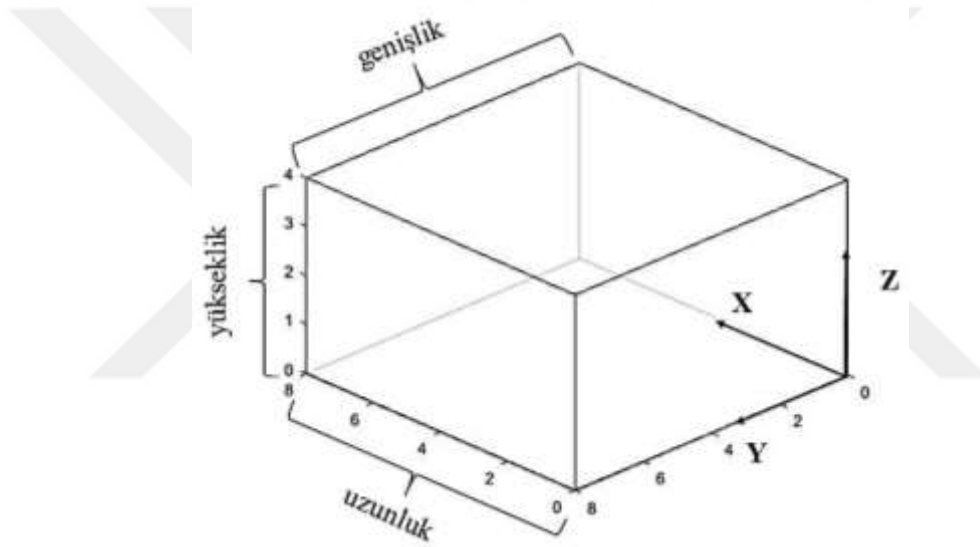
Şimdi ise kanalın modelleme aşamaları ve her bir işlem basamağında kullanılan denklemler bundan sonraki başlıklar altında ele alınacaktır.

2.1.1.1. Oda ve Diğer Yansıma Yüzeylerinin Modellenmesi

Genel olarak bir oda, her biri diğer dördüne dik olan altı yansıtıcı yüzeyden oluşmaktadır. Odadaki diğer mobilyalar ve yansıtıcı yüzeyler, birbirine dik olan yüzeylere sahip kutular olarak modellenebilir. Ancak bu tez kapsamında kullanılan kanal yapısı algoritmasında (MMC) odanın içinde; duvarlar, tavan ve zeminden başka yansıma yüzeyleri olmadığını ve bu yüzeylerin birbirlerine dik oldukları düşünülmüştür. Aynı zamanda benzetim çalışması boyunca herhangi bir yüzeyin yansıma katsayısının da sabit olduğu kabul edilmiştir. Yani monokromatik bir kaynak kullanıldığı varsayılmıştır. Bu yüzden bir dalga boyu için belirli bir yüzeyin yansıma katsayısının değişmeden kaldığı söylenebilir. Bu çalışma kapsamında her bir LED vericisinin dalga boyu 420nm olarak seçilmiştir.

2.1.1.2. Odanın Koordinat Sisteminin Tanımlanması

Oda içerisindeki konumların belirlenmesine yardımcı olması açısından bir koordinat sisteminin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.1’de koordinat sisteminin orijin bölgesinin nereye konumlandırıldığı tam olarak görülmektedir. Ayrıca odanın uzunluğu, genişliği ve yüksekliği de bu şekil kapsamında gösterilmiştir. Pozitif x yönünde odanın en uzağındaki duvar “kuzey duvarı”, tam zıt yönündeki duvar ise “güney duvarı” olarak isimlendirilir. En sağdaki duvar “doğu duvarı” , en soldaki duvar ise batı duvarı olarak adlandırılır. Duvarlar dışında bir de tavan ve zemin bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Odanın koordinat sistemi

2.1.1.3. Kaynak ve Yansıtıcıların Modellenmesi

Bu kanal modeli algoritmasında kullanılan kaynaklar, noktasal kaynak olarak düşünülmelidir. Noktasal kaynak, lazer emitöründen çıkan ışın demetinin bir yüzeye çarpması sonucunda üretilebilir. Işın demetinin yarıçapı küçük olduğundan dolayı, bu ışın demetinin yüzeye bulunduğu etki alanı, noktasal bir kaynak olarak kabul edilebilir. Genelde, LED kaynakları noktasal kaynak değildirler ve sonlu bir etki alanına sahiptirler. Fakat evlerde akkor telli lambalar yerine kullanılan daha küçük LED kaynakları için, bu sonlu etki alanı ihmal edilir ve bu LED lambalar, noktasal kaynak olarak düşünülebilir [51].

Bir noktasal kaynağın radyan çıkış gücünün açısal dağılımı en iyi olarak tek eksen simetrisine sahip bir genelleştirilmiş Lambertyan modeliyle (extended Lambertian model) (2.1)'deki gibi ifade edilebilir [61].

$$dP_S(\Omega) = \frac{n+1}{2\pi} P_S \cos^n(\theta) d\Omega \quad (2.1)$$

Burada P_S , kaynaktan yayılan toplam optik gücü; dP_S ise $d\Omega$ katı açısı içerisinde yayılan optik gücü ifade eder. Lambertyan mod sayısı olan n ise ışın paterninin yönlülüğünü tanımlar. $n > 0$ için n 'nin yüksek değerleri ışın paterninin daha sivri olduğunu gösterir.

MMC metodunu kullanarak yapılan bir kanal modelinde, bir ışın bir yansıtıcı yüzeye çarptığı zaman, ışın ve yüzeyin etki noktasında bir noktasal kaynak üretilir. Bu kaynak, yüzeyden gelen ışının yansımalarını modellemek için kullanılır. Yansımalar hem düzgün yansıma hem de dağınık yansıma bileşenlerini içerebilir. Fakat boya, ahşap panel, kumaş ve sıva gibi yaygın kullanılan maddelerden yapılan yansımalar çoğunlukla dağınıktır. Bu kanal modeli kapsamında da yansımaların tamamen dağınık olduğu kabul edilmiştir.

2.1.1.4. Optik Güç Katkılarının Hesaplanması

Optik güç, ya sistemin alıcısı ya da herhangi bir yansıtıcı yüzey üzerindeki küçük bir eleman tarafından alınabilir. Eğer bu güç eleman üzerinden alınmıyorsa, eleman optik gücü aldıktan sonra noktasal bir kaynak gibi davranır. Noktasal kaynaktan yayılan güç, eleman tarafından alınan güç ile yüzeyin yansıma katsayısının çarpılması ile bulunur.

Bir kaynak ve alıcı arasında doğrudan görüş hattı olduğu zaman, alınan optik güç ve zaman ilişkisini gösteren dürtü tepkisi fonksiyonu (2.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$h(t) \approx \frac{n+1}{2\pi} P_S \cos^n(\theta) d\Omega T_s(\psi) g(\psi) \text{rect}\left(\frac{\varphi}{FOV}\right) \delta\left(t - \frac{d}{c}\right) \quad (2.2)$$

Burada; n , kaynağın Lambertyan mode sayısıdır. P_S , kaynaktan yayılan güçtür. θ açısı, kaynağın normali (\hat{n}_S) ile alıcıya gönderilen ışının yönü arasındaki açıdır. ψ açısı alıcının normali (\hat{n}_R) ile kaynaktan gelen ışının yönü arasındaki açıdır. FOV alıcının görüş

alanı açısını ifade eder ve alıcı sadece ψ açısı FOV'dan daha az olduğu zaman üzerine gelen ışığı algılayabilir. d , kaynak ve alıcı arasındaki uzaklıktır. c ışık hızını ifade eder. $T_S(\psi)$, alıcı üzerindeki optik filtrenin geçirgenlik fonksiyonudur. $g(\psi)$ ise alıcının birleşik parabolik katkı kazancısıdır. $d\Omega$, A_R alıcı alanının karşılık geldiği katı açıdır ve (2.3)'deki gibi tanımlanmaktadır. $rect(\cdot)$ ise (2.4)'deki gibi tanımlanan bir dikdörtgen fonksiyonudur.

$$d\Omega \approx \cos(\psi) A_R/d^2, \quad A_R \ll d^2 \quad (2.3)$$

$$rect(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1 \\ 0, & |x| > 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

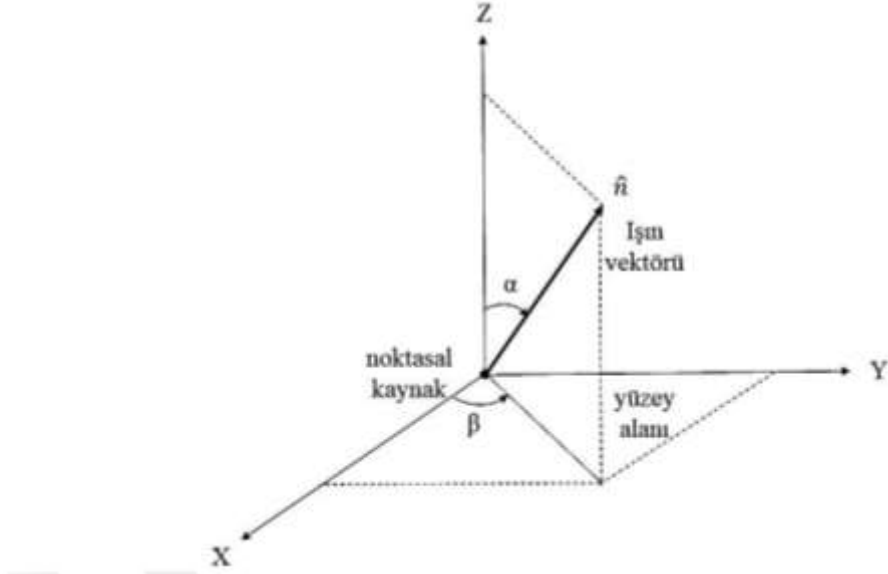
2.1.1.5. Işınlardan Üretilmesi ve Yönlerinin Belirlenmesi

Bu metotta ışınlar kaynaklardan olasılıksal olarak üretilirler ve buradaki amaç şekil 2.2'deki gibi rastgele olarak üretilen bir ışın için koordinat sistemini temsil eden bir rastgele birim vektörü elde etmektir. Bir başka deyişle MMC metodundaki temel problem, (2.5) denklemi ile ifade edilen olasılık yoğunluk fonksiyonuna (probability density function, PDF) göre farklı yönlerde ve açılarda rastgele ışınları üretebilmektir. Bu formül, (2.1)'deki genelleştirilmiş Lambertyan ışınsal dağılım profilini takip eden bir PDF'dir.

$$f(\alpha, \beta) = \frac{n+1}{2\pi} \cos^n(\alpha) \quad (2.5)$$

Burada α , şekil 2.2'de gösterildiği gibi z eksenine ve ışın vektörü arasındaki açıdır. β , xy düzlemi ve x eksenine ile ışın vektörünün izdüşümü arasındaki açıdır. n , lambertyan derecesidir. Şekil 2.2'ye göre orijin noktası, noktasal kaynağın merkezini gösterir. xy düzlemi ise noktasal kaynakların yüzey düzlemini temsil eder. (2.5)'te verilen formüle göre bu fonksiyonun β değişkeninden bağımsız olduğu görülür.

Üretilen rastgele birim vektörün x,y,z bileşen değerlerini elde etmek için öncelikle $[0, 1]$ aralığında bir-biçim dağılıma sahip iki rasgele değişken (U,V) üretilir. Daha sonra x,y,z bileşen değerleri (2.6), (2.7) ve (2.8) ile verilen denklemler vasıtasıyla elde edilir [51].



Şekil 2.2. Rastgele bir ışının koordinat düzlemi

$$z = \sqrt[n+1]{u} \quad (2.6)$$

$$x = \sqrt{1 - z^2} \cos(2\pi v) \quad (2.7)$$

$$y = \sqrt{1 - z^2} \sin(2\pi v) \quad (2.8)$$

Burada her birim vektör, yansıtıcı elemanlardan yayılan bir ışının yönünü göstermektedir. Bu bileşenler, elemanların yüzeyi olarak xy düzlemini seçen bir koordinat sistemini temel alır. Oysaki elemanlar odanın herhangi bir yüzeyine ait olabildiklerinden dolayı, bu koordinatlar oda koordinatlarıyla aynı değildir. Işının hareket yolunu belirlemek için bu yerel koordinatların oda koordinatlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem birim vektörlerin yönlerinin uygun dönüşüm matrisleri ile daha önceden çarpılmasını gerekli kılmaktadır. Dönüşüm matrisleri (2.9), (2.10) ve (2.11)'deki gibi tanımlanır [51].

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & \sin(\theta_x) \\ 0 & -\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & \sin(\theta_z) & 0 \\ -\sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Yerel koordinat sistemindeki bir birim vektör $\hat{d}_{yerel} = [x_{yerel} \ y_{yerel} \ z_{yerel}]^T$ olarak gösterilirse, bu birim vektör oda koordinatlarına (2.12) denklemi kullanılarak dönüştürülebilir [51].

$$\hat{d}_{oda} = \begin{bmatrix} x_{oda} \\ y_{oda} \\ z_{oda} \end{bmatrix} = R_x R_y R_z \hat{d}_{yerel} \quad (2.12)$$

2.1.1.6. Işının Etki Noktasının Bulunması

Bu bölümde amaç, etki noktasının koordinatlarının bulunmasıdır. Etki noktası, herhangi bir yansıtıcı yüzey üzerinde bulunabilir. Bir ışının yüzeye bulunduğu nokta olan etki noktası bulunurken şöyle bir prosedür yürütülür. İlk olarak etki noktasının kuzey veya güney duvarlarından biri üzerinde olup olmadığına bakılır. Eğer bu duvarlar üzerinde değilse, batı ve doğu duvarları için kontrol etmeye devam edilir. Bunlar üzerinde de değilse o zaman tavan veya zemin üzerinde olup olmadığına bakılır. Bu prosedür, oda içerisinde duvarlar, zemin ve tavadan başka farklı yüzeyler varsa bunlar için de uygulanabilir. Bu tez kapsamında odanın boş olduğu düşünülmektedir.

İlk olarak kuzey duvarı için bir kontrolün nasıl yapıldığına bakalım. Işının üretildiği noktasal kaynağın konum vektörünü bildiğimizi düşünürsek, etki noktasının konum vektörünü (2.13)'te verilen formüle göre elde edebiliriz.

$$r_{etki_noktası} = r_{kaynak} + k\hat{n}_{ışın} \quad (2.13)$$

Burada;

$r_{etki_noktası}$: Etki noktasının konum vektörü

r_{kaynak} : Işımların üretildiği noktasal kaynağın konum vektörü

$\hat{n}_{ışın}$: Noktasal kaynaktan üretilen ışının yönünü gösteren vektör

k : Noktasal kaynak ve etki noktası arasındaki uzaklık

$\hat{n}_{yüzey}$ vektörü, kontrol edilen yüzeye dik olan birim vektörü ifade eder. Tüm oda yüzeyleri için birim vektörler ise Tablo 2.1’de verilmiştir. Kuzey duvarıyla ilgilendiğimizi düşünürsek yüzey vektörü, $\hat{n}_{yüzey} = (1\hat{i}, 0\hat{j}, 0\hat{k})$ şeklinde olacaktır. Işın vektörü ise $\hat{n}_{ışın} = (x_{ışın}\hat{i}, y_{ışın}\hat{j}, z_{ışın}\hat{k})$ şeklinde ifade edilen bir vektörü temsil eder. Işın vektörü ve yüzey vektörünün noktasal çarpımı ise (2.14)’teki denklem sisteminin çözümü ile ifade edilir [51].

$$\begin{aligned} \hat{n}_{ışın} \cdot \hat{n}_{yüzey} &= |\hat{n}_{ışın}| |\hat{n}_{yüzey}| \cos(\psi) \\ x_{ışın} &= 1 \times 1 \times \frac{d}{k} \\ k &= \frac{d}{x_{ışın}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Burada; d , test edilecek olan duvardan noktasal kaynağa olan dikey uzaklığı ifade eder. Bu uzaklık bilgisi, noktasal kaynağın konumu ve oda uzunluğu kullanılarak elde edilebilir. Daha sonra (2.13)’teki formül uygulanır ve elde edilen koordinatların kuzey duvarının sınırları içerisinde olup olmadığına bakılır. Eğer bu sınırlar içerisinde değilse, benzer prosedür izlenerek, bir sonraki duvar için kontroller yapılır ve bu süreç tüm yüzeyler için bu şekilde devam eder.

Tablo 2.1. Oda yüzeylerinin birim vektörleri

Oda Yüzeyleri	Birim vektörler
Kuzey duvarı	$(1\hat{i}, 0\hat{j}, 0\hat{k})$
Güney duvarı	$(-1\hat{i}, 0\hat{j}, 0\hat{k})$
Batı duvarı	$(0\hat{i}, 1\hat{j}, 0\hat{k})$
Doğu duvarı	$(0\hat{i}, -1\hat{j}, 0\hat{k})$
Tavan	$(0\hat{i}, 0\hat{j}, 1\hat{k})$
Zemin	$(0\hat{i}, 0\hat{j}, -1\hat{k})$

2.1.1.7. MMC Kanal Modeli Algoritması

MMC kanal modeli algoritması aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Gerekli başlangıç simülasyon parametreleri belirlenir. LED ışık kaynağının gücü (P_s), LED ışık kaynağından yayılacak ışın sayısı ($N_{ışın}$), alıcı ve verici koordinatları, alıcının yüzey alanı (A_R), alıcının görüş alanı açısı (FOV), simülasyon zamanı (t_{sim}), kabul edilen yansıma sayısı (N_r), $T_S(\psi)$ alıcının optik filtre geçirgenliği, $g(\psi)$ alıcının birleşik parabolik katkı kazancı gibi parametreler belirlenir.
2. Bir LED ışık kaynağı ile bir foto-diyot alıcısının buldukları yüzeyler dikkate alınarak normal birim vektörleri bulunur.
3. Olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak genelleştirilmiş Lambertyan modelini kullanan bir kaynaktan açısal olarak farklı yönlerde rastgele dağılan $N_{ışın}$ adet ışın üretilir.
4. Her bir ışının taşıdığı optik güç $P_{ışın} = P_s / N_{ışın}$ formülüne göre hesaplanır.
5. LED kaynağından çıkan $P_{ışın}$ gücündeki bir ışının foto-diyot alıcısı üzerinde oluşturduğu LOS katkısı (2.2)'de verilen formüle göre hesaplanır. Işının kaynaktan alıcıya ulaşması için geçen zaman $t_{kaynak_alıcı} = d_{kaynak_alıcı} / c$ formülüyle bulunur. Burda, $d_{kaynak_alıcı}$, LED kaynağı ile foto-diyot arasındaki uzaklığı, c ise ışık hızını ifade eder.
6. Bir yüzeye çarpana kadar ışın yayılmaya devam eder. Işın ile yüzeyin buluştuğu nokta olan etki noktasının koordinatları hesaplanır. Işının kaynaktan etki noktasına ulaşması için geçen zaman, $t_{kaynak_etkinoktası} = d_{kaynak_etkinoktası} / c$ formülüyle bulunur. $d_{kaynak_etkinoktası}$, kaynak ile etki noktası arasındaki uzaklıktır.
7. Etki noktasına çarpan ışının gücü, yansıma yüzeyinin yansıma katsayısıyla orantılı olarak azaltılır. Işının yeni gücü $P_{ışın} = P_{gelen_ışın} \times \rho_{yüzey}$ formülüne göre hesaplanır. $P_{gelen_ışın}$, kaynaktan etki noktasına gelen ışının gücüdür. $\rho_{yüzey}$ ise etki noktasının bulunduğu yüzeyin yansıma katsayısıdır.
8. Etki noktasından çıkan $P_{ışın}$ gücüne sahip bir ışının foto-diyot alıcısında oluşturduğu LOS katkısı hesaplanır. Etki noktasından foto-diyot alıcısına ışının ulaşma zamanı ise $t_{etkinoktası_alıcı} = d_{etkinoktası_alıcı} / c$ formülüne göre bulunur. $d_{etkinoktası_alıcı}$, etki noktası ile foto-diyot alıcısı arasındaki uzaklıktır.

9. Işının LED ışık kaynağında üretilmesinden alıcıya ulaşmasına kadar geçen toplam zaman $t_{\text{toplam}} = t_{\text{kaynak_etkinoktası}} + t_{\text{etkinoktası_alıcı}}$ formülü kullanılarak bulunur. Bunun için t_{toplam} zamanındaki tüm tepkiler, dürtü tepkisi fonksiyonuna eklenir. Bu da mevcut ışın demetinin 1. yansımasının toplam dürtü tepkisine olan katkısını bize verir.
10. Bu etki noktasından daha sonra Lambertyan modelini kullanan bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre açısal olarak farklı yönde dağılan ve $P_{\text{ışın}} = P_{\text{gelen_ışın}} \times \rho_{\text{yüzey}}$ gücünde yeni bir ışın daha üretilir.
11. Bir yüzeye çarpma kadar bu ışın yayılır. Işın ile yüzeyin bulunduğu nokta olan etki noktasının koordinatları hesaplanır. Işının kaynaktan etki noktasına ulaşması için geçen zaman $t_{\text{etkinoktası1_etkinoktası2}} = d_{\text{etkinoktası1_etkinoktası2}} / c$ formülüyle bulunur. $d_{\text{etkinoktası1_etkinoktası2}}$, iki etki noktası arasındaki uzaklıktır.
12. İkinci ve daha üst yansımaların toplam dürtü tepkisine olan katkısını bulmak için de 7-11 arasındaki işlem basamakları tekrar edilerek benzer işlemler yapılır.

2.2. İç Mekân Konumlandırma Sistemi Senaryosu

2.2.1. Fiziksel Parametreler

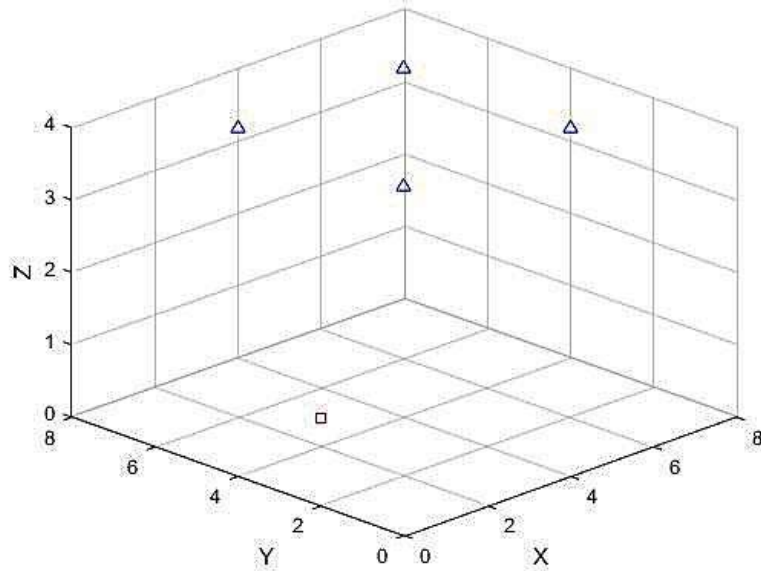
Bu tez kapsamında yapılacak olan tüm benzetim çalışmalarında düşünülen fiziksel ortam Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Verici olarak LED lambalar, alıcı olarak ise foto-diyot kullanılmıştır. Bu senaryoya göre 8x8x4 metre boyutlarında tamamen boş bir oda düşünülmüştür. Odanın 4 duvar, 1 tavan ve 1 zemin olmak üzere her biri diğer dördüne dik olan 6 yansıtıcı yüzeye sahip olduğu varsayılmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan kaynaklar, noktasal kaynak olarak düşünülür. LED'lerin her biri bir monokromatik kaynak olarak varsayılarak yayılan ışınların dalga boyu 420nm olarak kabul edilmiştir. Odanın tavanına her biri 10W güce sahip 4 farklı LED vericisi yerleştirilmiş ve bu vericilerin koordinatları sırasıyla metre cinsinden (2,2,4), (2,6,4), (6,2,4) ve (6,6,4) olarak seçilmiştir. Vericilerin yüzleri aşağı doğru baktığından dolayı azimuth açısının 0° , yükseklik açısının -90° olduğu söylenebilir. Alıcının (foto-detektör) ise yerden 0.8 metre yukarıda olduğu varsayılmıştır. Buna göre alıcının odanın zemininden 0.8 metre yukarıda bir düzlem üzerinde bulunduğu söylenebilir. Alıcı düz bir zeminde yukarı doğru baktığından dolayı azimuth açısı 0° , yükseklik açısı ise 90° 'dir.

Alıcının yüzey alanı $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, görüş alanı açısı (FOV) ise 70° olarak seçilmiştir. Tüm fiziksel parametreler Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Fiziksel Parametreler

Fiziksel özellikler	Değer
Oda boyutları	(8 x 8 x 4) metre
Kullanılan verici	4 adet monokromatik LED
Kullanılan alıcı	foto-diyot
LED dalga boyu	420nm
LED gücü	10W
Yansımaya katsayıları	$\rho_{\text{duvar}}=0.66$ $\rho_{\text{tavan}}=0.35$ $\rho_{\text{taban}}=0.60$
Verici koordinatları	(2,2,4), (2,6,4), (6,2,4), (6,6,4) metre
Alıcı koordinatları	(x=0.1:0.1:8, y=0.1:0.1:8, 0.8) metre
Verici açıları	azimuth: 0° , yükseklik: -90°
Alıcı açıları	azimut: 0° , yükseklik: 90°
Alıcı yüzey alanı	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
FOV	70°



Şekil 2.3. Düşünülen fiziksel ortam senaryosu

2.2.2. Fiziksel Kanal Erişim Modeli

Fiziksel kanal erişim metodu olarak, zaman bölüşümlü çoklama (time division multiplexing, TDM) tekniği kullanılır. Bütün LED vericileri senkronize edilerek, farklı zaman aralıklarında sinyal göndermeleri sağlanır ve bu sayede farklı LED'lerden gelen sinyallerin alıcıda girişim yapması engellenmiş olur. Düşünülen frame yapısına göre, bir LED lambası sinyal gönderirken diğer LED lambaları aydınlatma ihtiyacının giderilmesi açısından ışık yoğunluğunu sabit bir değerde tutarlar. Daha sonra optik sinyalden elektrik sinyaline dönüşüm aşamasında, yüksek geçirgen bir filtre uygulanarak diğer LED'lerden gelen güç bileşenleri filtrelenir. Şekil 2.4'te böyle bir sistemdeki LED'lerin fiziksel kanal erişim modeli verilmiştir.



Şekil 2.4. Fiziksel kanal erişim modeli

2.2.3. Gürültü Modeli ve Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise ratio, SNR) Analizi

[59] makalesinde detaylı bir şekilde açıklandığı gibi, VLC sistemlerinde gürültü, toplam varyansı N olan gaussian bir gürültü olarak modellenebilir. Buradaki N varyansı, shot gürültüsü ve termal gürültü katkılarının toplamı olarak (2.15)'deki gibi ifade edilebilir. Burada shot gürültüsünün varyansı (2.16)'da, termal gürültünün varyansı ise (2.17)'de verilmiştir. SNR ise (2.18) ile ifade edilebilir.

$$N = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (2.15)$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma P_{rec}B + 2qI_{bg}I_2B \quad (2.16)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi kT_K}{G} AI_2B^2 + \frac{16\pi^2 kT_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \quad (2.17)$$

$$SNR = \frac{(\gamma P_{rec})^2}{N} \quad (2.18)$$

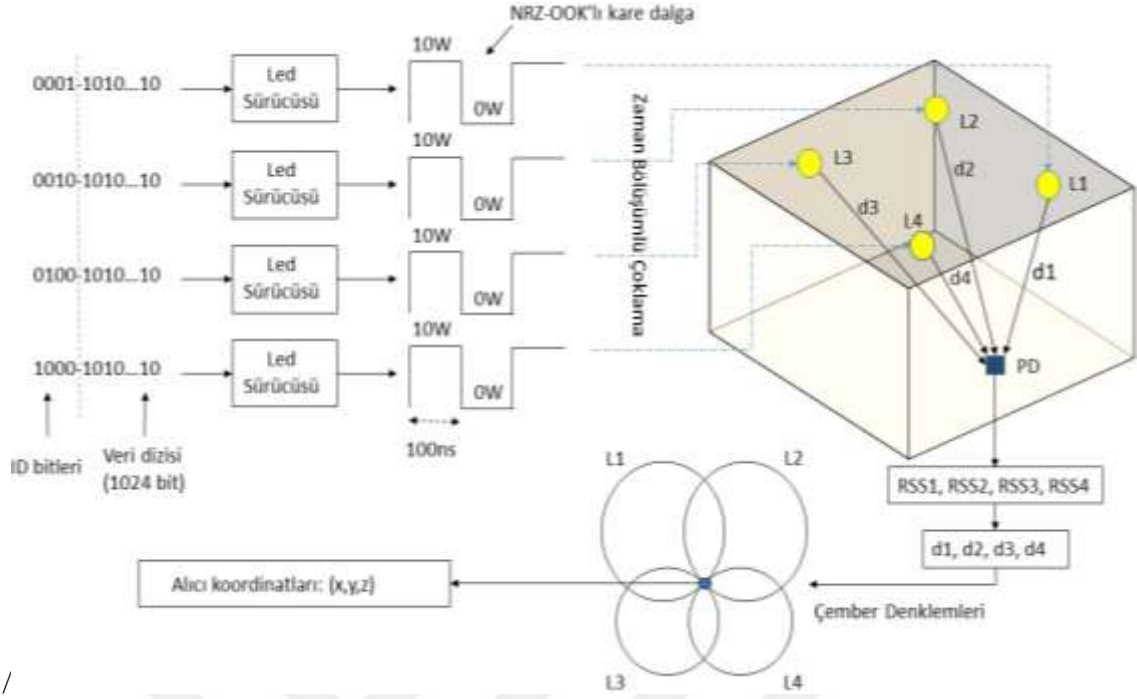
(2.16) eşitliğinde; γ , alıcı duyarlılığıdır. P_{rec} , tüm LED lambalarından alınan gücü ifade eder. q , elektronik yük, B eşdeğer gürültü bant genişliğidir. I_{bg} arka plan akımıdır. I_2 ve I_3 parametreleri ise gürültü bant genişliği faktörleridir. (2.17) eşitliğinde; k , Boltzman sabitidir. T_K mutlak sıcaklıktır. G , açık döngü gerilim kazancıdır. η birim alandaki foto-detektörün sabit kapasitans değeridir. Γ , FET kanal gürültü faktörüdür. g_m ise FET transkondüktans değeridir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan benzetimlerde bu değerler Tablo 2.3'teki gibi alınmıştır [62].

Tablo 2.3. Gürültü Modeli Parametreleri

Parametreler	Değerler
γ	0.54 A/W
P_{rec}	10W
q	$1.60217662 \times 10^{-19}$ C
B	10 Mhz
I_{bg}	5100 μ A
I_2	0.562
I_3	0.0868
k	1.380658×10^{-23} J/K
T_K	295 K
G	10
η	112 pF/cm ²
Γ	1.5
g_m	30 mS

2.2.4. Sistem Kurulumu

Öne sürülen senaryoya göre her bir led vericisi TDM tekniğini kullanarak farklı zaman aralıklarında ID bilgisinin yanı sıra 1 ve 0 sıralı bitlerinden oluşan 128 byte (1024 bit)'lık bir veriyi alıcıya göndermek istemektedir. Öncelikle bir haberleşme modülü içerisinde bu sayısal bitlere NRZ-OOK modülasyonu uygulanarak bir kare dalga sinyaline dönüştürülür ve her bir bit için gönderilecek olan optik güç değerleri elde edilir. 1 biti 10W'lık bir optik gücü, 0 biti ise 0 W'lık bir gücü temsil etmektedir. Bir LED vericisi sinyal gönderirken diğer LED vericileri de aydınlanma ihtiyacının karşılanabilmesi açısından sabit 5W gücünde optik sinyal göndermektedirler. LED lambalarının her biri bir LED sürücüsü aracılığıyla bu giriş sinyallerine göre anahtarlama yaparak ışık yoğunluğu şeklinde modüle edilmiş optik sinyali alıcıya gönderirler. LED'lerin anahtarlama hızı 10 Mhz olarak düşünülmüştür. Bu durumda T_b bit periyodu 100 ns olarak, kare dalganın periyodu ise 200 ns olarak bulunur. Burada düşünülen kanal yapısı, çok yollu yansımaların hesaba katıldığı optik kablosuz bir kanal olup MMC tekniğine göre modellenmiştir. Alıcı olarak kullanılan foto-diyot ise üzerine gelen ışın hüzmelerini optik yoğunlaştırıcı ve optik filtreden geçirerek almaktadır. Daha sonra ise alıcıya gelen sinyale shot ve termal gürültüler eklenir ve anlık olarak gelen optik güçle orantılı olarak çıkışında bir akım üretilir. Sistem kurulum şeması şekil 2.5'te gösterilmiştir. Şekil 2.5'teki LED lambaların her biri sırasıyla L1, L2, L3, L4 olarak etiketlenmiştir. Bu lambaların foto-diyot (photo-diode, PD) alıcısına olan uzaklıkları ise d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 olarak belirtilmiştir. Uzaklık değerleri, PD alıcısında elde edilen RSS değerleri baz alınarak bulunmaktadır. Sistem kurulumu ile ilgili parametreler ise Tablo 2.4'te verilmiştir. Sistem benzetiminde bu tabloda verilen değerler esas alınacaktır. Bundan sonraki kısım ise alıcıda gelen optik gücün elde edilmesi ve konumun bulunması işlemidir. Bunun için alıcı kısmında farklı teknikler kullanılarak bazı değişiklikler yapılacaktır.



Şekil 2.5. İç mekân konumlandırma sistemi kurulumu şeması

Tablo 2.4. Sistem Kurulum Parametreleri

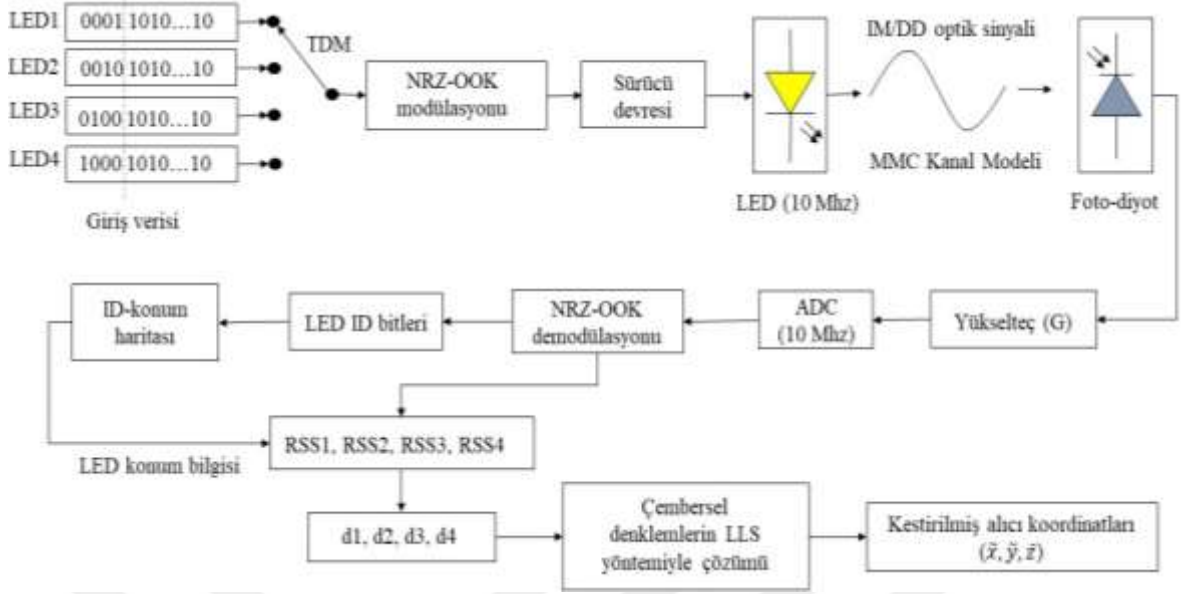
Sistem Parametreleri	Değeri
LED ID'leri	[0001], [0010], [0100], [1000]
Veri sinyali	1010....10
Veri sinyali uzunluğu	1024 bit
Modülasyon türü	NRZ-OOK
LED anahtarlama hızı	10Mhz
Kanal Modeli	MMC
Gürültü	Shot ve termal gürültü
Lambertyan mod sayısı, n	1
Optik filtre geçirgenliği, $T_s(\psi)$	1
Optik yoğunlaştırıcı, $g(\psi)$	n=1 iken aldığı değer

2.3. Konumlandırma Sistemleri

2.3.1. RSS-Temelli IPS

Bu bölümde, bölüm 2.2’de anlatılan sistem özellikleri ve fiziksel parametreler kullanılarak RSS-temelli bir iç mekan konumlandırma sistemi oluşturulmaya çalışılacaktır. Konumlandırma sisteminin senaryosu bölüm 2.2’de anlatıldığından dolayı burada ayrıca yer verilmeyecektir. Sadece alıcı kısmındaki farklılıklara değinilecek ve nasıl bir alıcı sisteminin tasarlanması gerektiği üzerinde durulacaktır.

Bir RSS-temelli IPS sisteminin genel şeması şekil 2.6’da verilmiştir. RSS-temelli IPS tekniğinde, alıcı olarak kullanılan bir foto-diyotun üzerine gelen ışın hüzmelerini optik yoğunlaştırıcı ve optik filtreden geçirerek aldığından ve anlık olarak gelen optik güçle orantılı olarak çıkışında bir akım ürettiğinden daha önce bahsedilmiştir. Üretilen bu akım sinyali bir yükselteç aracılığıyla yükseltilir ve en az 10 Mhz’de çalışan bir analog-sayısal dönüştürücüden (analog-digital convertor, ADC) geçirilerek sayısal veriye dönüştürülür. Daha sonra NRZ-OOK demodülasyonu yapılarak LED ID bitleri elde edilir. LED ID bitleri ile LED’lerin konumları arasındaki ilişkiyi gösteren LED ID-konum haritası kullanılarak sinyalin hangi konumdaki LED lambadan alıcıya ulaştığı tespit edilir. Düşünülen sistem senaryosuna göre ID-konum haritası tablo 2.5’de verildiği gibi olacaktır. Ayrıca her bir LED için bir sinyalleşme süresi (yaklaşık 1µs) boyunca ortalama RSS değeri hesaplanarak kayıt altına alınır. Bunun için alıcı tarafta elde edilen kare dalga sinyalindeki ortalama genlik değerine bakılmaktadır. Bir kare dalga sinyalinin genliği, alınan ortalama optik güç değerinin yaklaşık olarak iki katı olacaktır. Böylece bir LED tarafından gönderilen ve foto-diyot tarafından alınan ortalama optik güç hesaplanmış olur. Her bir LED’den alınan RSS değerlerinden yola çıkarak bir foto-diyot alıcısının her bir LED’e olan uzaklığı (1.2) denkleminde de ifade edilen LOS formülüne göre hesaplanır. Elde edilen bu uzaklık bilgilerinde çok yönlü yansımalar, shot ve termal gürültüden dolayı bazı sapmalar olacaktır. Alıcının her bir LED’e olan uzaklığı tespit edildikten sonra alıcının konumunu bulmak için 4 farklı çember denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Elde edilen çember denklemleri en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözülür ve alıcının konumu tespit edilmiş olur. Bir sonraki bölümde RSS tabanlı uzaklık tahmini analizinin nasıl yapıldığı ve alıcının konumunun RSS tekniğine göre nasıl bulunduğu ayrıntılı olarak anlatılacaktır.



Şekil 2.6. RSS-temelli IPS'nin genel şeması

Tablo 2.5. LED ID- konum haritası

LED ID	Konum
0001	(6,2,0.8)
0010	(6,6,0.8)
0100	(2,6,0.8)
1000	(2,4,0.8)

2.3.1.1. RSS tabanlı Uzaklık Tahmini Analizi

Optik kablosuz bir kanalın dürtü tepkileri hesaplandıktan sonra, i . LED vericisi için RSS değeri, $P_r^{(i)}$ olarak elde edilir. $P_r^{(i)}$ ve P_t arasındaki ilişki (2.19)'da verilmiştir.

$$P_r^i = \frac{m+1}{2\pi d_i^2} A \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) P_t \quad (2.19)$$

Burada ϕ açısı, vericiden alıcıya gelen ışık yayılım açısını; ψ açısı, gelme açısını; $T_s(\psi)$, optik filtrenin geçirgenlik fonksiyonunu; $g(\psi)$ ise alıcının parabolik yoğunlaştırıcı

katkı kazancını ifade etmektedir. A ise alıcının fiziksel alanını ifade eder. Verici ve alıcının birbirlerine göre olan konumları düşünüldüğünde $\cos(\varphi) = \cos(\psi) = h / d_i$ eşitliği yazılabilir. Burada h, verici ve alıcı arasındaki dikey uzaklığı ifade eder. Bu yüzden i vericisi ve alıcı arasındaki d_i uzaklığı (2.20)'ye göre hesaplanabilir. Alıcı ve verici arasındaki yatay uzaklık ise Pisagor Teoremi kullanılarak (2.21) yardımıyla elde edilebilir.

$$d_i = \sqrt[4]{\frac{(m+1)AT_s(\psi)g(\psi)P_t h^2}{2\pi P_r^{(i)}}} \quad (2.20)$$

$$r_i = \sqrt{d_i^2 - h^2} \quad (2.21)$$

(x_i, y_i) verici koordinatlarına karşılık gelen alıcı koordinatlarının (x, y) olduğu düşünülürse (2.22)'de verilen denklem gruplarının çözülmesi gerekmektedir.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = r_n^2 \end{cases} \quad (2.22)$$

Buradaki n sayısı, sinyali alıcı tarafından saptanabilen vericilerin sayısını ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında düşünülen sistem senaryosunda 4 farklı LED kullanıldığından dolayı n=4 olacaktır. Çok yollu yansımaların etkisi düşünüldüğünde r_i yatay uzaklığının değeri tam olarak kestirilemez. Bu yüzden tam çözüm çoğu zaman elde edilemez ve optimum çözümü elde etmek için bir arama algoritması gereklidir. Bunun için lineer kestirim modeli kullanılır. Bu model, (2.23) denklemindeki gibi matris formatında ifade edilebilir.

$$AX = B \quad (2.23)$$

Buradaki A, B ve X matrisleri ise sırasıyla eşitlik (2.24), (2.25) ve (2.26)'ya göre bulunur.

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_2^2) + (x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) \\ \vdots \\ (r_1^2 - r_n^2) + (x_n^2 + y_n^2) - (x_1^2 + y_1^2) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

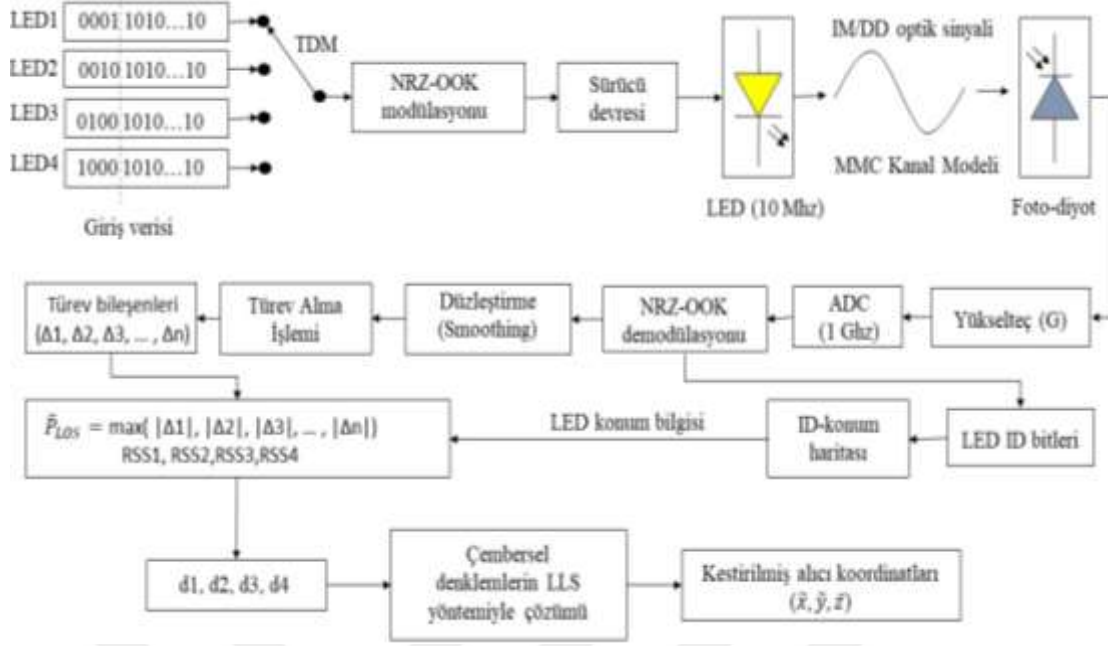
$$X = [x \ y]^T \quad (2.26)$$

(2.26) denklemindeki X matrisinin optimum çözümünün bulunması gereklidir ve bunun için de doğrusal en küçük kareler (linear least squares, LLS) yöntemi kullanılır. $\hat{X} = [\hat{x} \ \hat{y}]^T$ matrisinin optimum çözümü için ise (2.27) denklemi elde edilir. \hat{X} matrisi, kestirilen alıcı koordinatlarını bize verir.

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.27)$$

2.3.2. TAF-yardımlı RSS-Temelli IPS

RSS-temelli IPS'lerde alıcı tarafından alınan optik güç, LOS'tan gelen optik güç ile çok yönlü yansımalarla gelen optik güç katkılarının toplamından oluşur. Uzaklık tahmini yapılırken (2.19) eşitliğinde ifade edilen LOS formülü kullanıldığından dolayı RSS-temelli bir IPS'de, özellikle yansımaların etkili olduğu oda bölümlerinde (oda köşeleri ve duvar kenarları gibi...) yanlış uzaklık hesapları yapılacak ve bu da konumlandırmanın performansını olumsuz yönde etkileyecektir. Bu tez kapsamında öne sürülen TAF-yardımlı RSS-temelli IPS tekniğinde ise, alıcı tarafından alınan toplam optik güç sinyali üzerinden yansımaların katkısı çıkarılarak LOS güç bileşeni elde edilmeye çalışılacaktır. TAF-yardımlı RSS-temelli bir IPS'nin genel şeması şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. TAF-yardımlı RSS-temelli bir IPS'nin genel şeması

TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'lerde alıcı olarak kullanılan bir foto-diyot üzerine gelen optik sinyalin ışık yoğunluğuyla orantılı olarak çıkışında bir akım oluşur, daha sonra ise bu akım sinyali, kazancı G olan bir yükselteç kullanılarak yükseltilir. Bu aşamadan sonra bir ADC kullanılarak analog sinyalden 1 Ghz örnekleme frekansında örnekler alınır. Benzetim aşamasında ayrıca shot ve termal gürültüler de uygun SNR değerine göre üretilerek optik sinyale eklenir. Optik kanal değişimleri çok hızlı olduğundan dolayı kullanılacak ADC'nin örnekleme frekansı da yüksek olmalıdır. ADC'nin örnekleme frekansının konumlandırma performansı üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmektedir. Alınan örnekler NRZ-OOK demodülasyonundan geçirildikten sonra bir hafıza biriminde tutulur ve bir kare dalganın periyoduna eşit olacak şekilde ($2T_b=200ns$) birbirinden ayrılarak n_i ($i=1,2,\dots,512$) olarak etiketlenen farklı örnekleme alanları oluşturulur. Optik gürültü etkisini en aza indirmek için ise bir düzleştirme (smoothing) tekniği uygulanır. Bunun için daha önceden oluşturulan 512 adet örnekleme alanındaki örnekler üst üste eklenip ortalaması alınarak 200ns uzunluğundaki bir kare dalga sinyalinin 1ns aralıklarla örnekleri elde edilmiş olur. Bu teknik uygulandığında kare dalga sinyali optik gürültülerden arınmış olacaktır. Daha sonra ise elde edilen bir periyotluk uzunluktaki kare dalga sinyalinin türevi alınır ve elde edilen türev sinyalinin mutlak maksimum değeri \tilde{P}_{LOS} 'tan gelen sinyal güç bileşenini bize verir. Her bir LED için bulunan bu \tilde{P}_{LOS} güç değerlerinden (2.20) denkleminde göre uzaklık hesapları yapılır ve 4 adet çember denklemi ortaya çıkar. Bu çember denklemleri LLS

metodu yardımıyla çözümlenerek alıcının konumu çok az bir hatayla kestirilmiş olur. Bu tekniğin RSS-temelli IPS'den farkları şunlardır:

1. Alıcı, üzerine gelen sinyali daha yüksek örnekleme frekansına sahip bir ADC'den geçirir.
2. Alınan kare dalga sinyalini optik gürültülerden arındırmak için basit bir düzeltme tekniği uygulanır.
3. Bir periyotluk kare dalga sinyali üzerinde türev alınır, yaklaşık \tilde{P}_{LOS} güç bileşenleri elde edilir ve uzaklık tahmin analizinde bu \tilde{P}_{LOS} güç bileşen değerleri kullanılır.

TAF-yardımlı RSS-temelli IPS tekniğine göre tasarlanan bir sistemin konumlandırma performansına dair sonuçlar ise bölüm 3'te sunulacaktır.

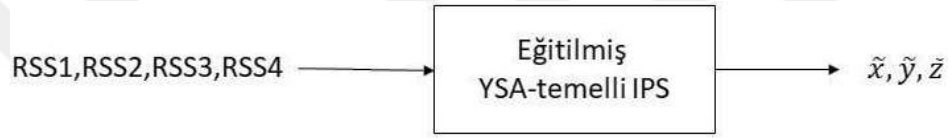
2.3.3. YSA-temelli IPS

Öncelikle tablo 2.2 ve tablo 2.4'te belirtilen sistem ve kanal parametreleri kullanılarak gürültüsüz bir ortamda her bir vericinin her bir alıcı noktasında oluşturduğu RSS güç değerleri elde edilerek bir veri tabanına kaydedilir. Daha sonra ise Tablo 2.6'da belirtilen ağ özellikleri kullanılarak bir YSA oluşturulur ve oluşturulan bu ağ için giriş verileri olarak her bir LED'in her bir alıcı noktasında oluşturduğu gürültüsüz RSS bilgileri, çıktı olarak ise ilgili alıcının x ve y koordinatları alınır. Daha sonra bu veri kümeleri kullanılarak ağ eğitilir ve kullanıma hazır hale getirilir. Bir YSA-temelli konumlandırma sisteminin blok diyagramı şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Benzetim aşamasında ise her bir LED vericisinden gelen sinyalin üzerine shot ve termal gürültüsü eklenmektedir. Daha sonra ise vericilerden gelen RSS bilgileri toplanarak bu bilgiler ile alıcının (x,y) konumu arasında daha önceden oluşturulan YSA yardımıyla bir ilinti kurulmakta ve alıcının konumu kestirilmeye çalışılmaktadır.

Tablo 2.6. YSA Ağ Özellikleri

Ağ Özellikleri	Ağ parametreleri
Katman Sayısı	2
Gizli Katman Nöron Sayısı	20
Kullanılan Eğitim Verilerinin Sayısı	1120
Kullanılan Doğrulama Verilerinin Sayısı	240
Kullanılan Test Verilerinin Sayısı	240
Kullanılan Öğrenme Algoritması	Bayesian Regularization



Şekil 2.8. YSA-temelli IPS'nin konumlandırma tahmini

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

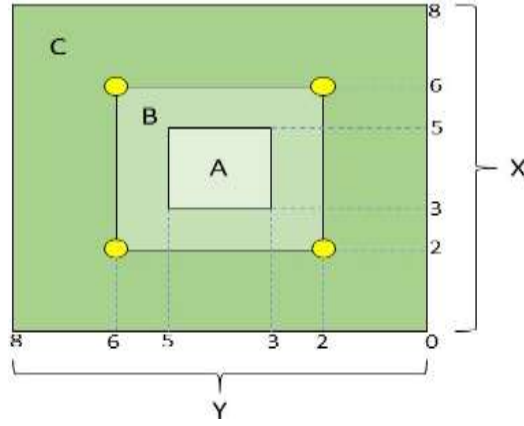
Bu bölümde öncelikli olarak, MMC modeliyle modellenen optik kablosuz bir kanaldaki dürtü tepkilerine yönelik benzetim sonuçları verilecektir. Daha sonra ise tez kapsamında düşünülen ve öne sürülen iç mekân konumlandırma sistemlerinin konumlandırma performanslarına yönelik bulgulara yer verilecek ve bu bulgular ışığında gerekli değerlendirmeler yapılarak tartışılacaktır.

Bu tez kapsamında ele alınan üç konumlandırma tekniği ile yapılan tüm benzetim çalışmalarının hepsinde odanın zemininden 0.8 metre yukardaki bir düzlem üzerinde 10 cm aralıklarla birbirinden ayrılmış toplam 6400 noktada bir foto-diyot alıcısı için konum hesapları yapılmıştır. Ayrıca benzetim çalışmalarında, bir alıcı noktasındaki konumlandırma hatasının bulunması işlemi, 1000 kere tekrarlanmış ve hesaplanan konumlandırma hataları kaydedilmiştir. Daha sonra ise (3.1) eşitliğiyle ifade edilen kare ortalamasının karekökü (root mean square error, RMSE) yöntemi kullanılarak bu hataların ortalaması alınmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (2.28)$$

Burada x , gerçek değeri; \hat{x} ise kestirilen değeri gösterir. (3.1) denklemine göre önce hatalar bulunur ve daha sonra ise bu hataların karelerinin ortalamasının karekökü alınarak RMSE değeri elde edilir.

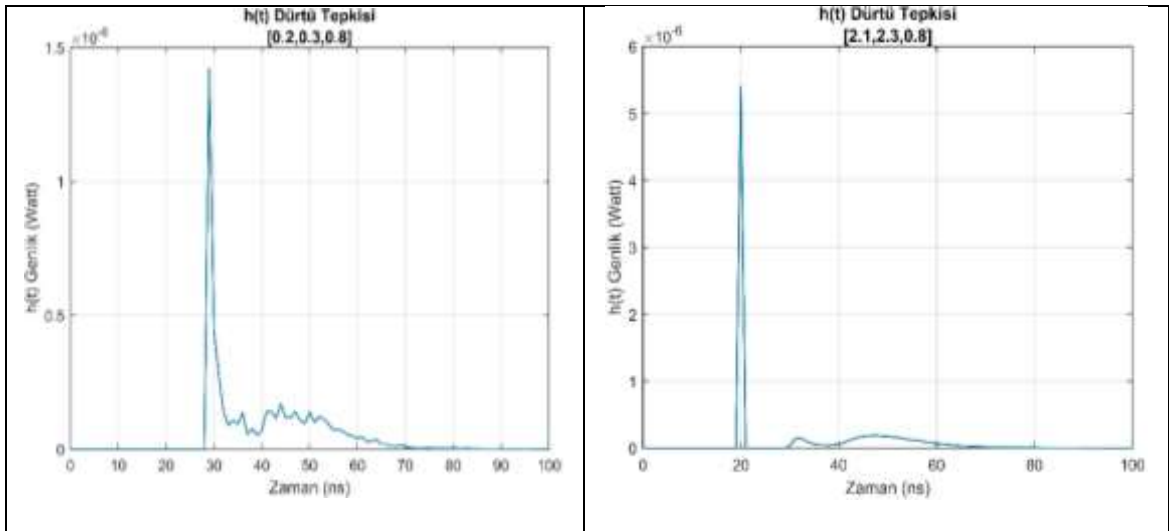
Oda içerisinde ayrıca Şekil 3.1’de belirtilen ve A, B ve C olarak etiketlenen üç farklı alan belirlenmiş ve bu alanlar içerisindeki RMS konumlandırma hatalarının ortalamalarına bakılmıştır. Bu alanların koordinat bilgileri de aynı şekil üzerinde verilmiştir. Bu şekle göre odanın tamamı 64 m², odanın ‘A’ ile etiketlenen kısmı 4 m², ‘B’ ile etiketlenen kısmı 12 m², ‘C’ ile etiketlenen kısmı ise 48 m²’dir. ‘A’ bölgesi, odanın en iç bölgesini; ‘B’ bölgesi, LED’lerle çevrili alanın izdüşümündeki bölge ile ‘A’ bölgesi arasında kalan bölgeyi; ‘C’ bölgesi ise LED’lerle çevrili alanın izdüşümündeki bölge ile duvarlar arasında kalan bölgeyi göstermektedir.



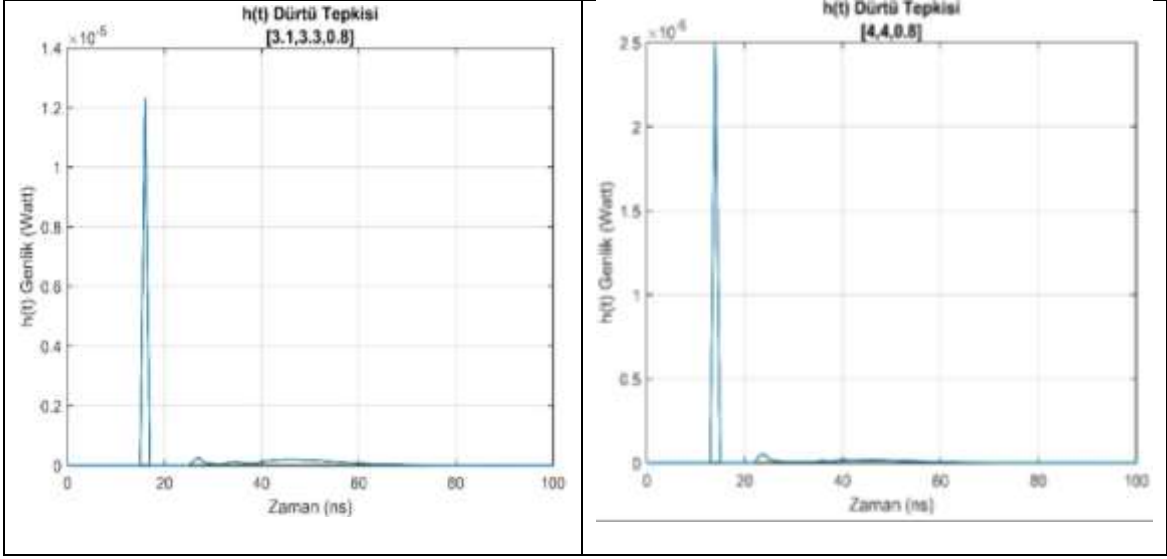
Şekil 3.1. Odamın farklı bölümlerinin gösterilmesi

3.1. Dürtü Tepkileri Benzetim Sonuçları

Bölüm 2.2.5’de anlatıldığı gibi oda A,B,C olarak etiketlenen 3 farklı bölgeye ayrılmış ve bu bölgeler içerisindeki alanların her birinde seçilen bir alıcı koordinatı için dürtü tepkilerinin davranışı incelenmiştir. [6,6,4] konumundaki bir LED vericisinin [0.2, 0.3, 0.8], [2.1, 2.3, 0.8], [3.1, 3.3, 0.8], [4, 4, 0.8] alıcı koordinatlarındaki dürtü tepkileri sırasıyla şekil 3.2 ‘deki grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde odanın kenar ve köşelerine doğru yaklaştıkça yansımaların etkisinin arttığı, odanın ortasına doğru yaklaştıkça ise yansımaların etkisinin ortadan kaybolduğu görülmektedir. En çok yansıma, odanın kenar ve köşesine yakın olan [0.2, 0.3, 0.8] koordinatında gerçekleşmektedir ve bu durum grafikten te açıkça okunmaktadır.

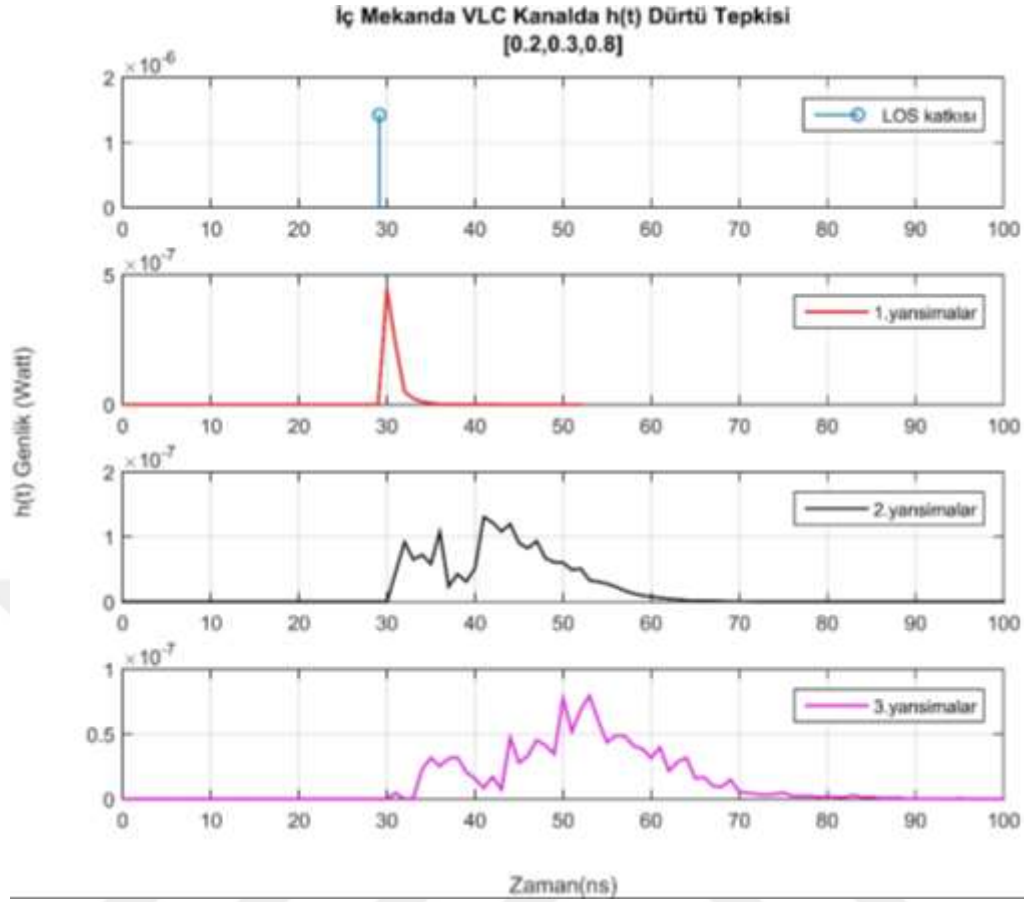


Şekil 3.2. İç mekânlarda kablosuz optik kanalın dürtü tepkileri



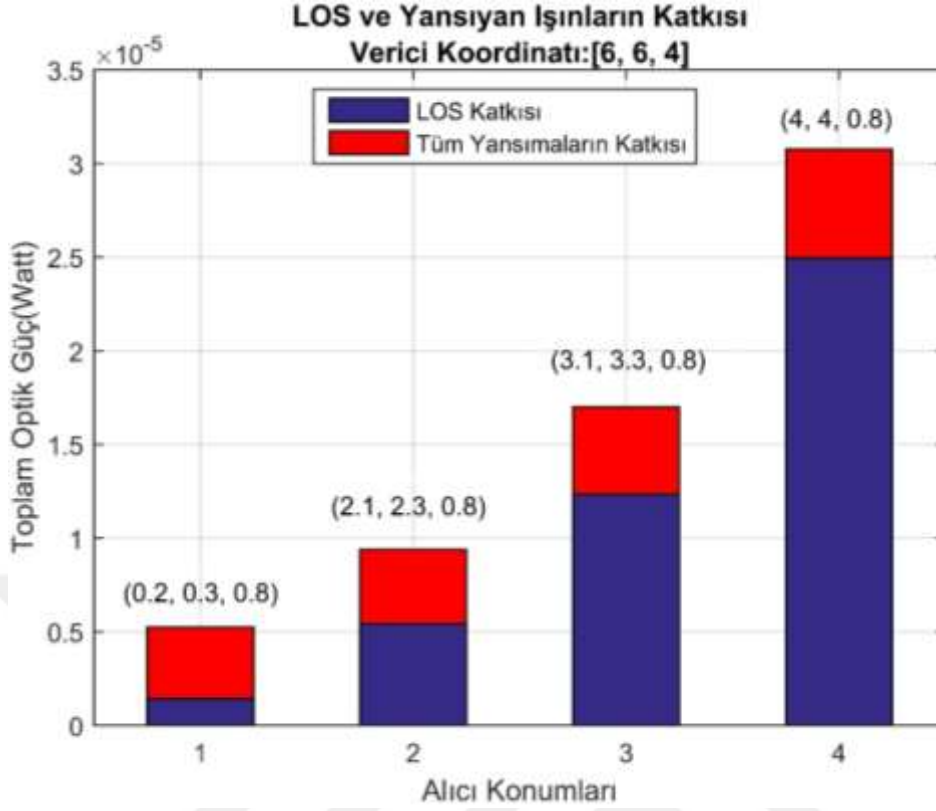
Şekil 3.2'in devamı

Şekil 3.3'de ise [0.2, 0.3, 0.8] koordinatı için dürtü tepkisinin bileşenleri verilmiştir. Bilindiği üzere alıcı tarafta alınan optik güç, LOS'tan gelen sinyalin yanında yansıyan ışınları da içermektedir. İşte bu şekil üzerinde LOS katkısı ile birinci, ikinci ve üçüncü yansımaların katkıları da ayrı ayrı çizdirilmiş ve çok yollu yansımaların katkısı daha net bir şekilde grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi en güçlü bileşen LOS'tan gelen optik güç bileşenidir. Bunu sırasıyla 1.yansıma, 2.yansıma ve 3.yansıma bileşenleri izlemektedir. Yansıma sayısı arttıkça yüzeylere çarpma sayısı da arttığı için optik güç kaybının da arttığını söyleyebiliriz. Şekil 3.3'e bakıldığında zamanda en uzun yayılan yansıma bileşeninin 3.yansımalarından gelen sinyal bileşenleri olduğu görülmektedir. Alıcıya en erken ulaşan sinyal ise LOS'tan gelen sinyal bileşenidir. Işının yansıma sayısının artması demek havada kalma süresinin artması anlamına geldiği için yansıma sayısı arttıkça ışınların alıcıya ulaşma süresi artmakta ve bu da dürtü tepkisinin zamanda yayılmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.3. [0.2, 0.3, 0.8] alıcı koordinatı için dürtü tepkisi bileşenlerinin grafikleri

Şekil 3.4'te ise [6,6,4] koordinatında bulunan bir LED vericisinin sırasıyla [0.2, 0.3, 0.8], [2.1, 2.3, 0.8], [3.1, 3.3, 0.8], [4, 4, 0.8] alıcı koordinatlarında oluşturduğu dürtü tepkileri için sinyal bileşen katkılarının nasıl olduğuna bakılmıştır. Bunun için LOS katkısı ayrı olarak tutulmuş; birinci, ikinci ve üçüncü yansımaların katkıları ise toplanarak tüm yansımaların katkısı şeklinde belirtilmiştir. Yansımalarından gelen sinyaller, doğrudan görüşün olmadığı bir hat üzerinden (NLOS, non-line of sight) alıcıya ulaşır ve NLOS bileşenleri şeklinde ifade edilebilir. Grafikten açıkça görüldüğü gibi odanın orta noktasında LOS/NLOS oranı çok yüksekken, odanın kenar ve köşelerine doğru gidildikçe bu oran düşmektedir. Hatta [0.2, 0.3, 0.8] koordinatında yansımaların katkısının LOS bileşen katkısını geçtiği görülmektedir. Artık bu koordinatlarda yansımalarından dolayı doğru bir şekilde RSS ölçümü yapmak çok zorlaşmaktadır.



Şekil 3.4. LOS ve NLOS katkılarının gösterilmesi

3.2. Konumlandırma Sistemlerinin Hata Grafikleri

Bu bölümde, RSS-temelli IPS, TAF-yardımlı RSS-temelli IPS, YSA-yardımlı IPS olmak üzere üç farklı konumlandırma sistemi incelenecek ve konumlandırma hatalarına ilişkin grafikler verilecektir. Daha sonra ise bu sistemlerin performansları karşılaştırılacaktır.

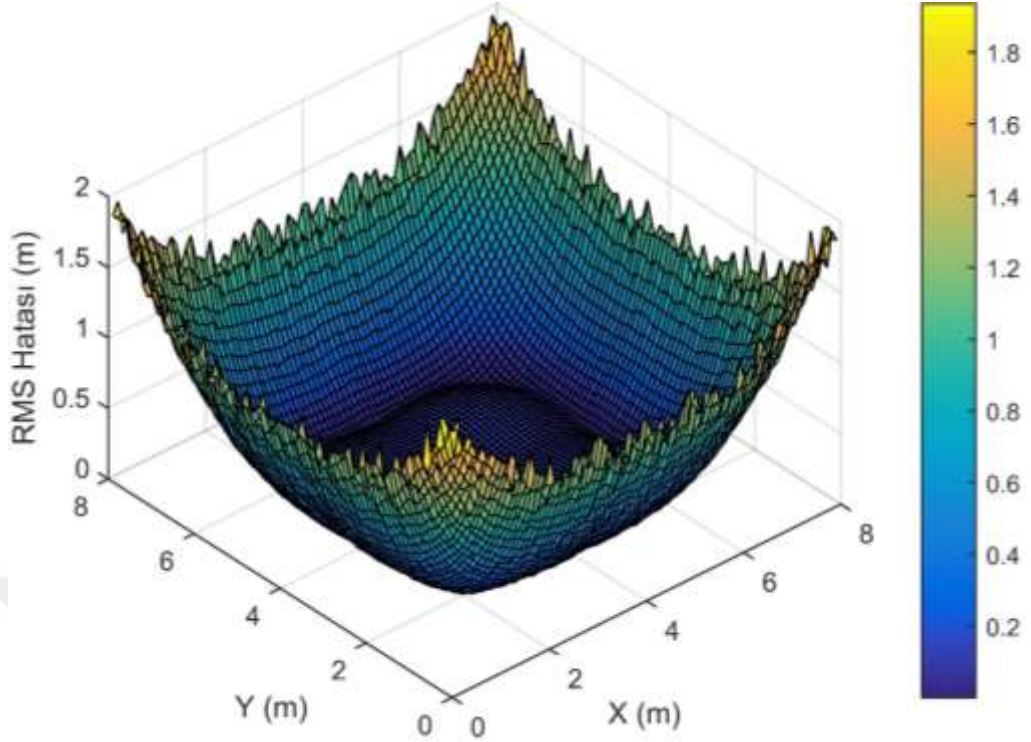
3.2.1. RSS-temelli IPS'nin Benzetimi

Bu çalışma kapsamında ele alınan iç mekan senaryosuna göre yapılan bir benzetimde RSS-temelli bir IPS'nin konumlandırma hatalarının grafiği şekil 3.5'teki gibi olmaktadır. Bu şekilde x ve y eksenleri; koordinat bilgilerini, z eksenini ise RMS hatalarını göstermektedir. Bu yüzey grafiğinde koyu maviden sarıya doğru değişen renkler bulunur ve şeklin yanındaki renk çubuğundan da görüldüğü gibi rengin sarıya doğru değişmesi hatanın arttığı anlamına gelmektedir. Şekil 3.5'e göre odanın orta noktasından kenarlara doğru gidildikçe konumlandırmadaki hatalar artmaktadır. En az konumlandırma hatası

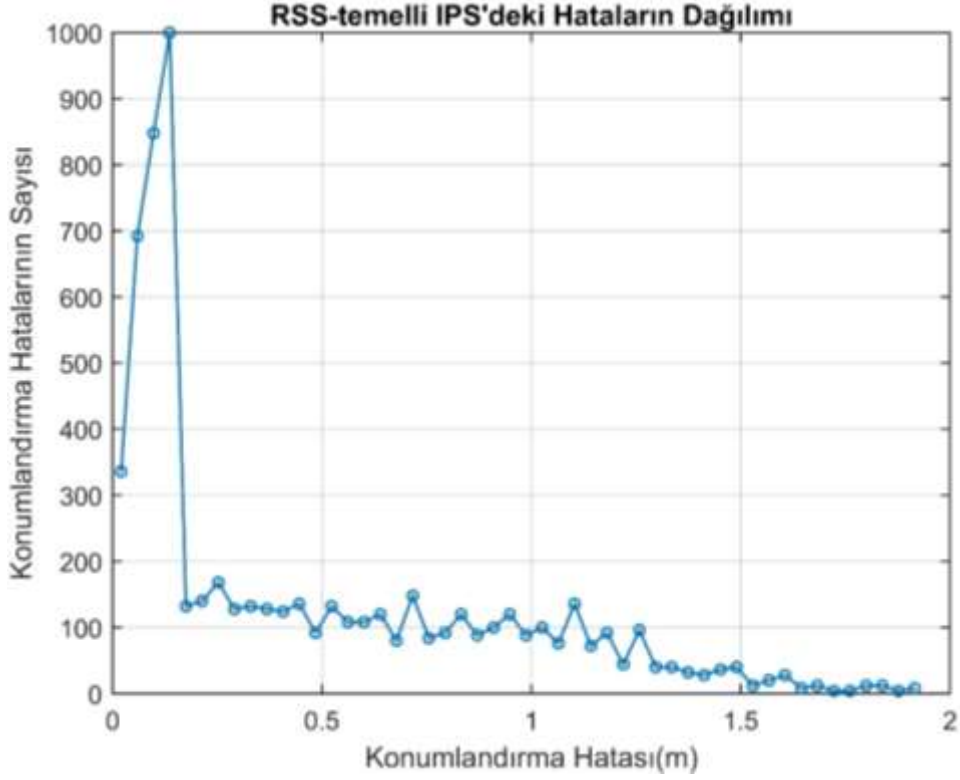
odanın orta kısımlarında oluşmaktadır. RMS hatalarının ortalamasına bakılacak olursa, odanın 'A' ile etiketlenen kısmında 9.03 cm, 'B' ile etiketlenen kısmında 11.48 cm, LED'lerle çevrili alanın izdüşümündeki noktalarında (A+B bölgesi) 10.87 cm, 'C' ile etiketlenen kısmında 58.27 cm, odanın tümünde ise 45.18 cm'dir. Bu konumlandırma sisteminde en büyük hatalar odanın köşe kısımlarında meydana gelmiştir ve 193.51 cm olarak kaydedilmiştir.

RSS-temelli IPS'deki konumlandırma hatalarının dağılımı şekil 3.6'da verilmiş ve odanın farklı bölümlerindeki hata dağılım grafikleri ise şekil 3.7'de gösterilmiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde küçük konumlandırma hatalarının, büyük konumlandırma hatalarına göre daha fazla meydana geldiği görülmektedir. Şekil 3.7'de 'A' ve 'B' ile etiketlenen oda bölümlerinde yani odanın iç kısımlarında küçük konumlandırma hataları meydana gelirken, 'C' ile etiketlenen oda bölümünde ise daha büyük konumlandırma hatalarına rastlanılmıştır. Odanın 'A' ve 'B' alanlarında meydana gelen konumlandırma hataları şekil 3.7'den de görüldüğü gibi 15 cm seviyesinin altında çıkmıştır. Odanın 'C' bölümünde ise 4 cm'den başlayıp 193 cm'e varan konumlandırma hataları meydana gelmiştir.

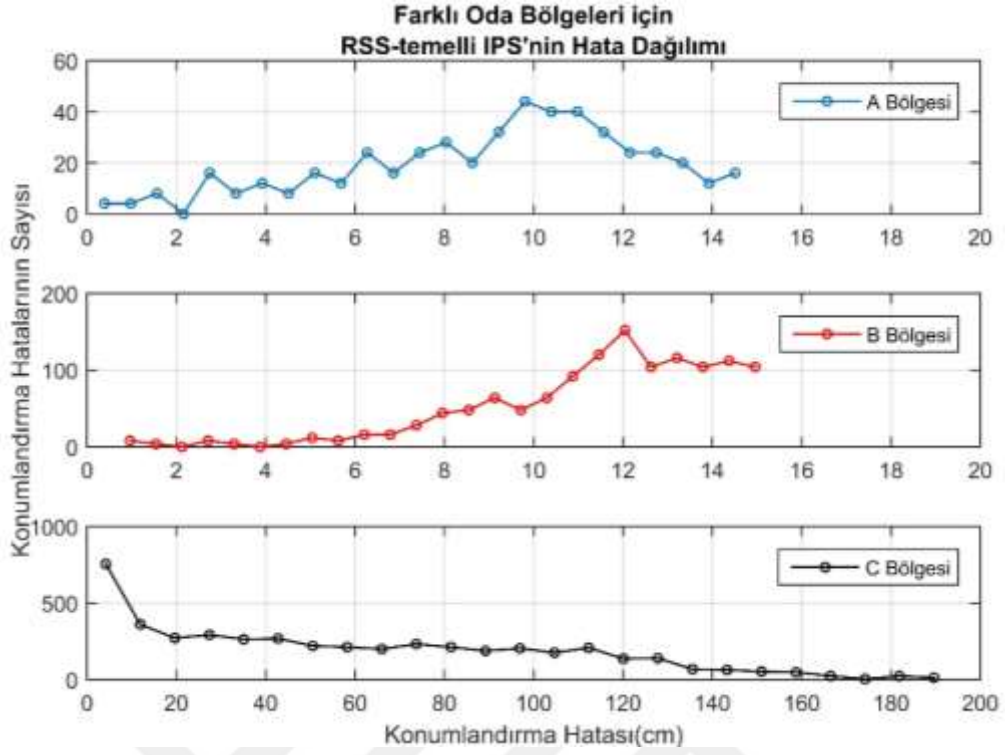
RSS-temelli bir iç mekan konumlandırma sistemi düşünüldüğünde ve Şekil 3.5'teki grafik incelendiğinde ancak LED'lerle çevrili alanın izdüşümünde bulunan alıcı noktalarında verimli bir konumlandırmanın yapılabileceği sonucuna varılır. Ama genel olarak odanın tüm noktalarında hassas ölçümler için kabul edilebilirlik sınırlarının dışında büyük konumlandırma hataları meydana gelmektedir. Şekil 3.8'e bakıldığında bu sistemle yapılan konumlandırma işlemlerinde odanın sadece %50'sinde 20 cm'in altında bir hata çıktığı görülmektedir. RSS-temelli bir IPS'de böyle sonuçların çıkması beklenir. Çünkü dürtü tepkileri analizinde de incelendiği gibi odanın köşe ve kenarlarına doğru gidildikçe çok yönlü yansımaların etkisi artmakta ve bu da konumlandırma hatalarına sebebiyet vermektedir. Eğer yansımaların etkisi fazlaysa alıcı tarafından saptanan güç, olması gereken değerinin üzerinde olacak ve LOS formülüne göre hesaplanan uzaklık bilgilerinde yanlış hesaplamalar meydana gelecektir. Bu sistemde sadece odanın orta kısımlarında nispeten daha az hatalar meydana gelmektedir. LED'lerle çevrili alanın dışına çıkıldığında ise hatadaki değişimler artmakta ve verimli bir konumlandırma yapılamamaktadır.



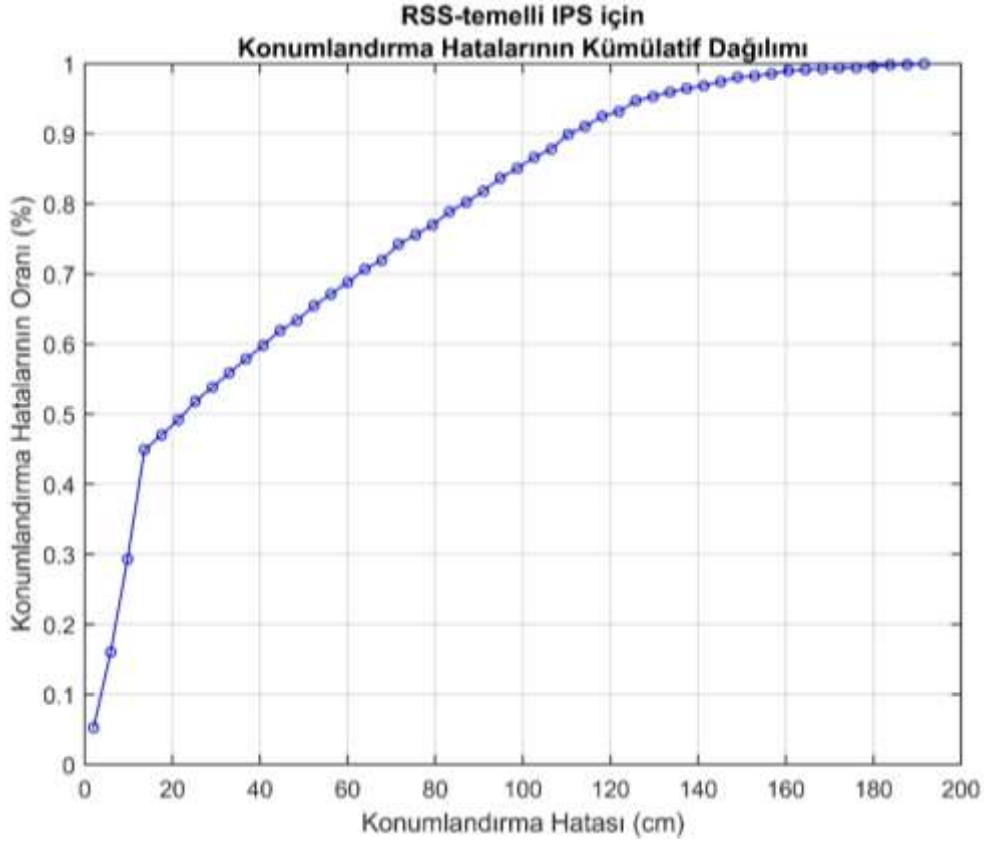
Şekil 3.5. RSS-temelli IPS’de konumlandırma hataları



Şekil 3.6. RSS-temelli IPS’deki konumlandırma hatalarının dağılımı



Şekil 3.7. Farklı oda bölgeleri için RSS-temelli IPS'deki hataların dağılımı



Şekil 3.8. RSS-temelli IPS'de Hataların Kümülatif Dağılımı

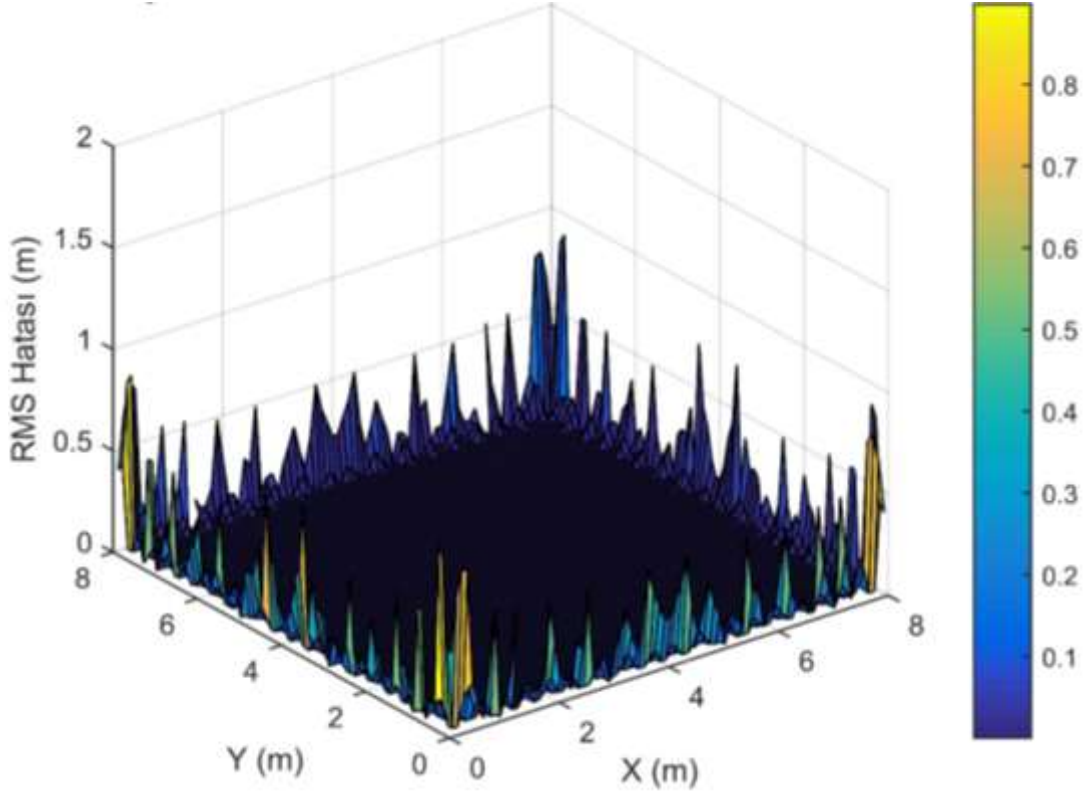
3.2.2. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'nin Benzetimi

RSS-temelli bir IPS'de konumlandırma yapılırken eğer yansıyan ışınların katkısı ortadan kaldırılabilirse doğrudan LOS güç bileşeni elde edilebilecek ve çok yollu yansımaların neden olduğu problemler de ortadan kaldırılacaktır. İşte bunun için bu kapsamda bölüm 2'de tasarım aşamaları verilen TAF-yardımlı RSS-temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi önerilmiştir. Şekil 3.9'da TAF-yardımlı RSS-temelli bir IPS'nin konumlandırma hatalarının grafiği gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde önerilen bu sistemin odanın hemen hemen her yerinde çok az bir hatayla konumlandırma yapılabilmesine imkân sağladığı görülmektedir. Sadece odanın köşe ve kenarlarına çok yakın kısımlarında büyük konumlandırma hataları meydana gelmiş, diğer yerlerde ise hatalar neredeyse yok denecek kadar az çıkmıştır. RMS hatalarının ortalaması, odanın 'A' ile etiketlenen bölümünde 0.03 cm, 'B' ile etiketlenen oda bölümünde 0.07 cm, 'A+B' bölümünde 0.06 cm, 'C' ile etiketlenen oda bölümünde 2.31 cm, odanın tüm noktalarında ise 1.69 cm olarak bulunmuştur. En büyük konumlandırma hatası ise 89.81 cm olarak kaydedilmiştir. Bu değer büyük gelebilir ancak bu hatalara az rastlanılmakta ve sadece odanın köşeleri veya kenarlarında böyle büyük hatalar meydana gelmektedir.

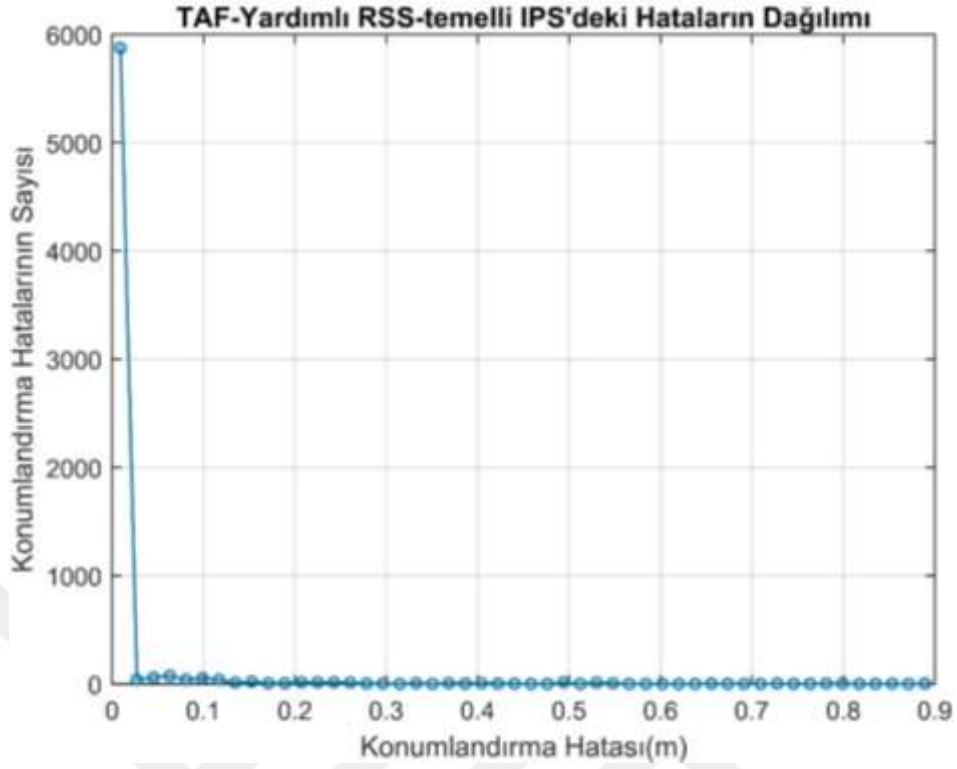
Şekil 3.10'da TAF-yardımlı RSS-temelli bir IPS'deki hataların dağılımı, şekil 3.11'de ise farklı oda bölgeleri için dağılım grafikleri gösterilmiştir. Şekil 3.10 incelendiğinde, bu sistemde küçük konumlandırma hatalarının daha sık, büyük konumlandırma hatalarının ise çok çok az meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca odanın kenar ve köşelerine yakın olan bölgelerinde (Örneğin; 'C' bölgesi) büyük konumlandırma hatalarının meydana gelme olasılığı daha fazladır. Şekil 3.11'e bakıldığında odanın 'A' ve 'B' bölgelerinde sadece milimetrik hataların meydana geldiği görülmektedir. Oluşan konumlandırma hataları, 'A' bölgesinde 0.45 mm seviyesinin, 'B' bölgesinde ise 1.3 mm seviyesinin altında seyretmektedir. 'C' bölgesinin yaklaşık %90'ında ise konumlandırma hataları 2 cm seviyesinin altında çıkmaktadır. Yani eğer bu sistemle bir iç mekân konumlandırma sistemi tasarlanırsa konumlandırma hassasiyeti oldukça yüksek olacak, milimetrik veya birkaç cm mertebesinde konumlandırma ölçümleri yapılacaktır.

TAF-yardımlı RSS-temelli IPS, çok yollu yansımaların etkisini ortadan kaldırdığı için konumlandırma performansında büyük başarı göstermiştir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi odanın yaklaşık %92'sinde konumlandırma hataları 1 cm'in altında bulunmuştur. Bu oran gerçekten hassasiyet açısından kabul edilebilir bir değer olarak görülebilir. Bu

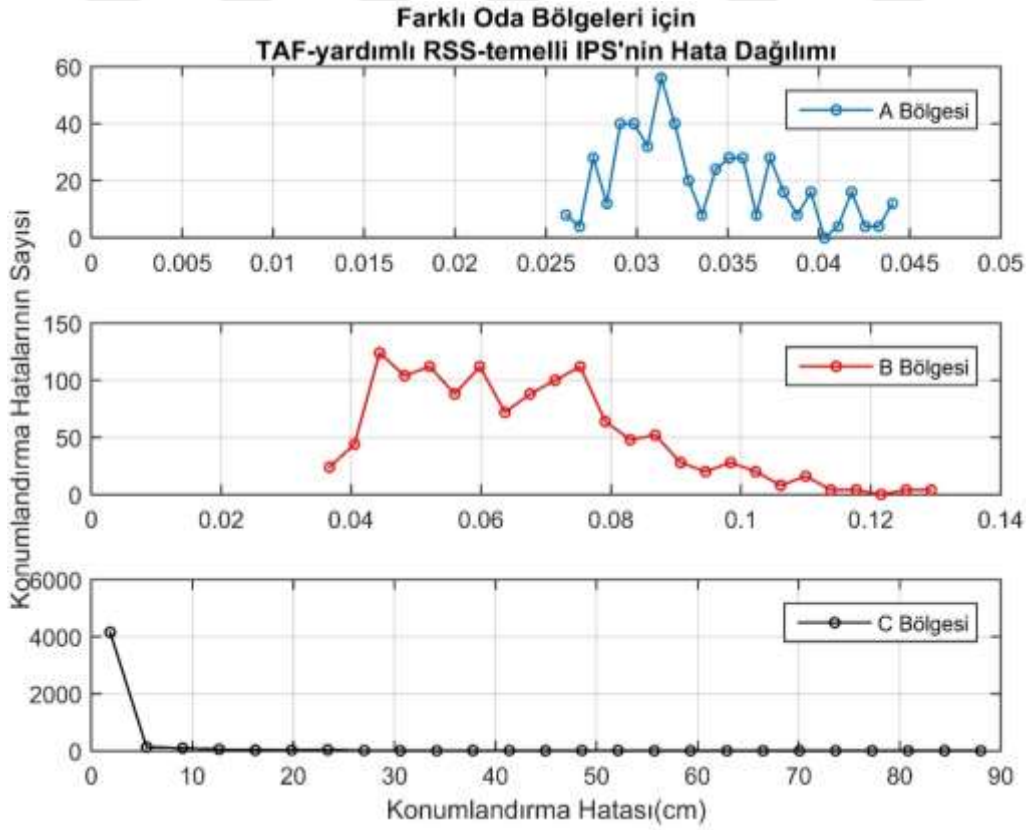
sistemle RSS-temelli bir sistemdeki sorunların üstesinden gelinmiştir. Yansımaların fazlaca meydana geldiği yerlerde bile bu sistem iyi çalışmaktadır. Eğer daha yüksek örnekleme yapabilen bir ADC ile optik sinyaller örneklenmiş olsa işte o zaman köşe ve kenarlarda meydana gelen hatanın da önlenebileceği tahmin edilmektedir.



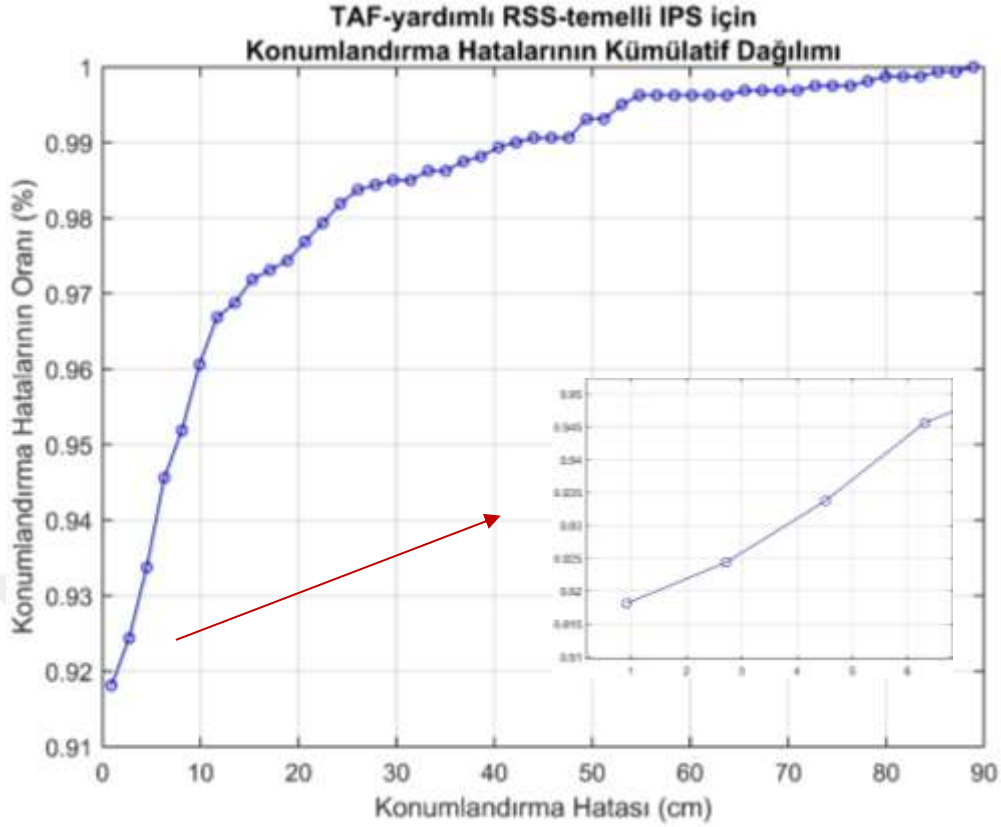
Şekil 3.9. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'nin konumlandırma hataları



Şekil 3.10. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'deki hataların dağılımı



Şekil 3.11. Farklı bölgelerde TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'nin hata dağılımı



Şekil 3.12. TAF-yardımlı RSS-temelli IPS’de hataların kümülatif dağılımı

3.2.3. YSA-yardımlı IPS’nin Benzetimi

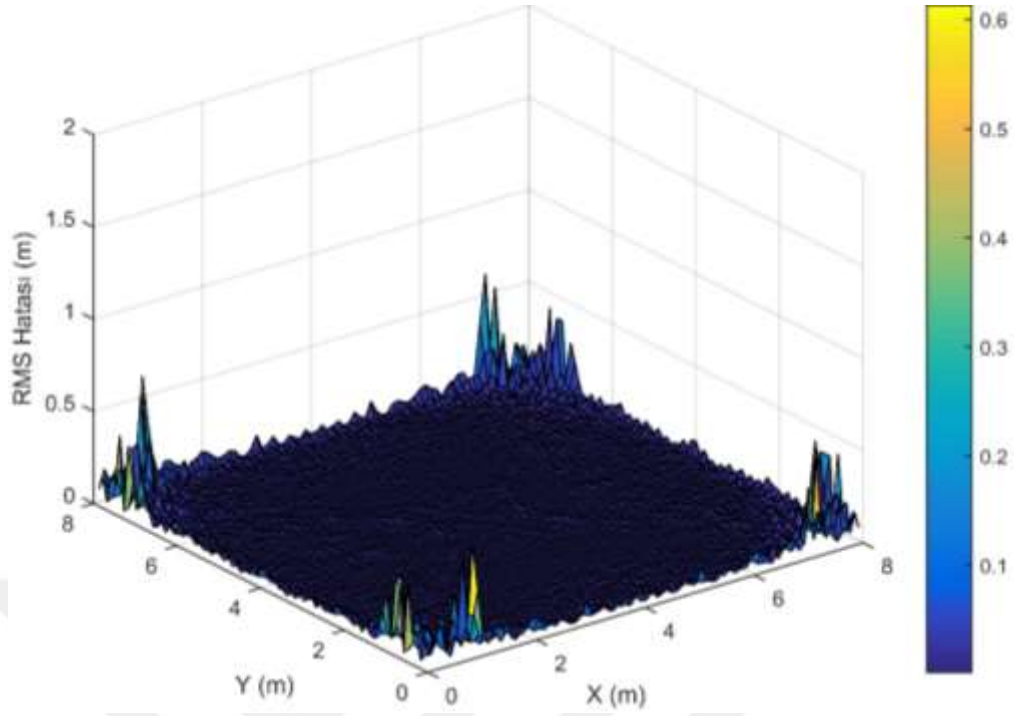
YSA-yardımlı IPS’lerde, fiziksel ortamdaki her bir (x,y) konumu ile ilgili RSS değerlerinin daha önceden farklı optik gürültüler içeren ortamlarda ölçülmesi ve bu ölçülen değerlerin kaydedilerek bir giriş-çıkış haritasının oluşturulması gerekmektedir. Bu tez kapsamında yapılan benzetim çalışmasında ise ölçümlerin öncelikle gürültüsüz bir ortamda yapıldığı ve daha sonra ise oluşturulan YSA’nın gürültülü kanal şartlarında elde edilen RSS değerlerine göre alıcının (x,y) konumunu tahmin etmesi sağlanmıştır. Bu yöntem bir ‘parmak izi’ yöntemi olarak düşünülebilir.

Şekil 3.13’te bir YSA-yardımlı IPS’de meydana gelen konumlandırma hataları grafiksel olarak gösterilmiştir. Daha önceden bahsedilen iki konumlandırma sisteminde olduğu gibi bu sistemde de odanın orta noktasından kenarlara ve köşelere doğru gidildikçe konumlandırma hatalarının arttığı görülmektedir. Sadece odanın köşelerinde çok yüksek bir hata oluşmakta, odanın kenarlarında ise kabul edilebilirlik sınırları içerisinde hatalar meydana gelmektedir. Odanın iç bölgelerinde ise hata yok denecek kadar az çıkmaktadır.

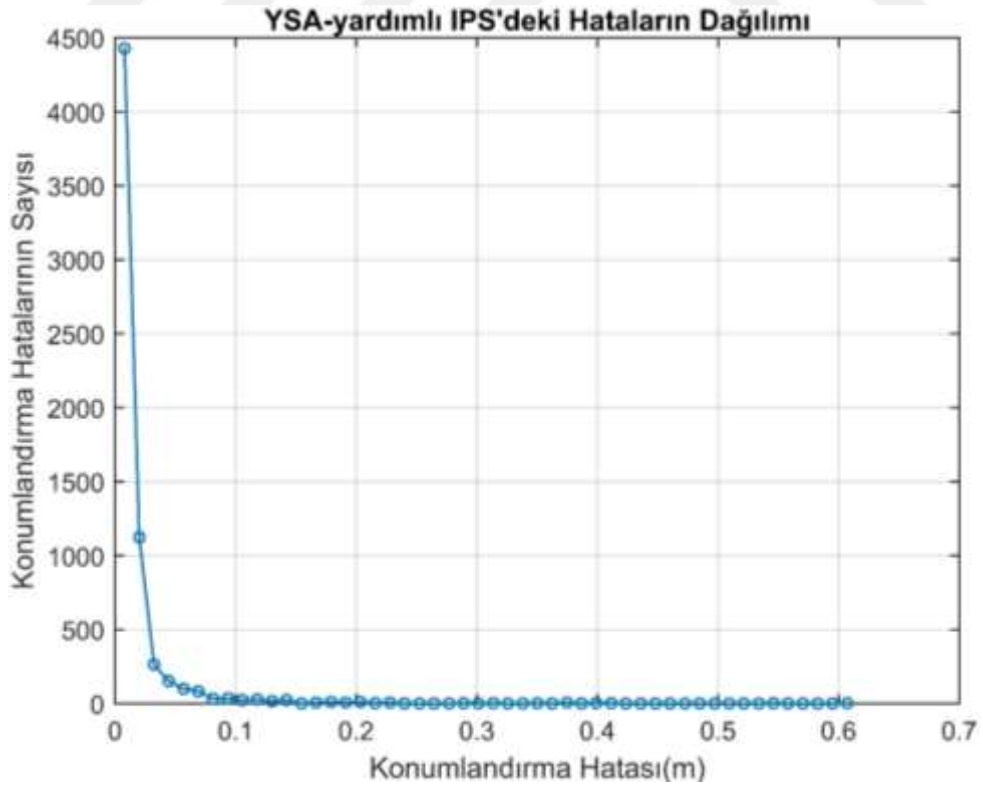
RMS hatalarının ortalaması, odanın 'A' ile etiketlenen kısmında 0.95 cm, 'B' ile etiketlenen kısmında 0.73 cm, odanın A+B bölgesinde 0.77 cm, odanın 'C' ile etiketlenen kısmında 2.74 cm, odanın tümünde ise 1.94 cm olarak hesaplanmıştır. En büyük hata, odanın köşelerine yakın olan kısımlarında meydana gelmiş ve 61.3 cm olarak kaydedilmiştir. Bu değer büyük görünebilir ancak böyle hatalar odanın sadece köşe kısımlarında ve sayıca az miktarda meydana gelmiş olduğundan konumlandırma performansı üzerinde bir etkisinin olmadığı düşünülebilir.

Şekil 3.14 ve şekil 3.15 incelendiğinde odanın genelinde küçük konumlandırma hatalarının daha sık, büyük konumlandırma hatalarının ise sayıca daha az miktarda meydana geldiği görülmektedir. Şekil 3.15 incelendiğinde Odanın 'A' ve 'B' ile etiketlenen iç kısımlarında meydana gelen hatalar küçük hatalar olup yaklaşık 3 cm seviyesinin altında seyretmektedir. Odanın 'C' ile etiketlenen ve köşe ile kenarlarına yakın olan kısımlarında ise 61 cm seviyesine yaklaşan hatalar meydana gelmektedir.

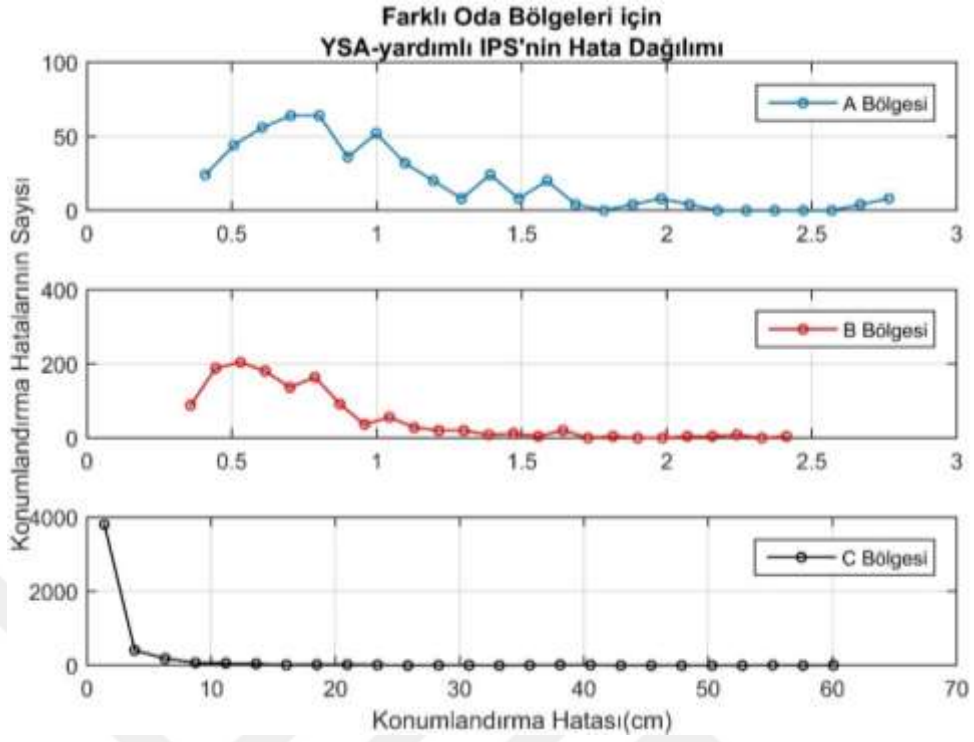
YSA-yardımlı bir iç mekân konumlandırma sistemi daha önceden ölçüm yapılacak fiziksel ortam ve kanal bilgilerine ihtiyaç duyar. Ölçüm yapılacak alıcı tarafında gürültüsüz bir ortamdaki giriş ve çıkışların nasıl olacağı bilindiğinden dolayı, burada sadece gürültülü alınan RSS değerlerine göre alıcı konumları tahmin edilmektedir. Şekil 3.16 incelendiğinde bu sistemle tasarlanan bir iç mekân konumlandırma sisteminde, odanın yaklaşık %90'ında 3 cm seviyesinin altında bir hatayla karşılaşmıştır. Odanın köşelerine doğru gidildikçe hatanın arttığı görülmüştür. YSA-yardımlı IPS'de konumlandırma hassasiyeti çok yüksektir ve eğer fiziksel ortamın kanal bilgileri daha önceden biliniyorsa bu sistemle çok hassas ölçümler yapılabileceği kanıtlanmıştır.



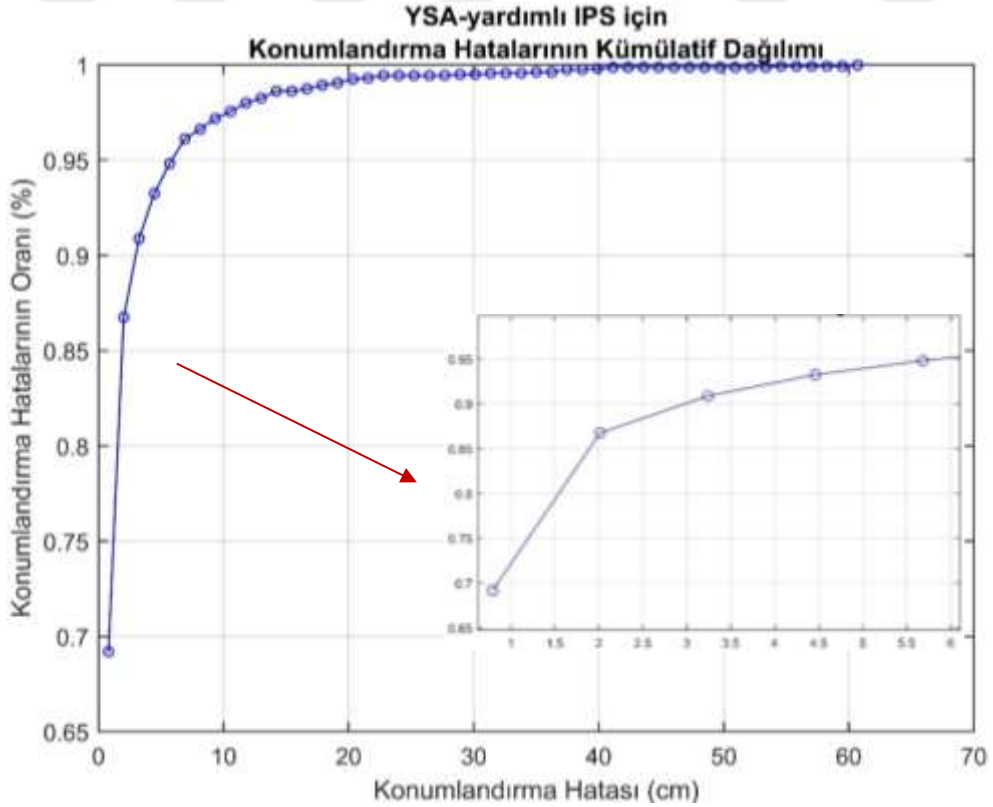
Şekil 3.13. YSA-yardımlı IPS'nin konumlandırma hataları



Şekil 3.14. YSA-yardımlı IPS'deki konumlandırma hatalarının dağılımı



Şekil 3.15. Farklı oda bölgeleri için YSA-yardımlı IPS'nin hata dağılımı



Şekil 3.16. YSA-yardımlı IPS'de konumlandırma hatalarının kümülatif dağılımı

3.2.4. Konumlandırma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında öne sürülen üç farklı konumlandırma sisteminin konumlandırma performanslarının karşılaştırılması tablo 3.1’de yapılmıştır. Bu tablodaki değerlere ilişkin açıklamalar daha önce verildiğinden dolayı burada genel bir değerlendirme yapılacaktır.

Tablo 3.1. Konumlandırma sistemleri performans tablosu

	C Bölgesi	B Bölgesi	A Bölgesi	A+B Bölgesi	En büyük hata	Ortalama hata
RSS-temelli IPS	58.27 cm	11.48 cm	9.03 cm	10.87 cm	193.51 cm	45.18 cm
YSA-temelli IPS	2.38 cm	0.73 cm	0.95 cm	0.77 cm	61.3 cm	1.94 cm
TAF-yardımlı RSS-temelli IPS	2.31 cm	0.07 cm	0.03 cm	0.06 cm	89.81 cm	1.69 cm

RSS-temelli IPS’de çok yollu yansımaların etkisinden dolayı konumlandırma hataları yüksek çıkmaktadır. Özellikle LED’lerle çevrili alanın dışında kalan oda bölgelerinde hataların çok yüksek çıkması bu sistemin kullanılabilirliğini tartışmaya açmaktadır. Bu sistemle yapılan benzetim çalışmasının sonuçlarında da hassasiyet sınırlarının dışında hatalar meydana geldiği görülmüştür.

RSS-temelli IPS’yi temel alan ve konumlandırma hatalarını azaltan iki farklı sistem tasarlanmıştır. Bu sistemlerden biri olan YSA-temelli IPS’de iç mekân konumlandırma performansında büyük başarımlar elde edilmiştir. Odanın genelinde 1-2 cm hassasiyetinde konumlandırma yapılabildiği görülmüştür. Bu sistem, yapay sinir ağlarını kullanan bir tahmin metodudur ve hataların düşük çıkması zaten beklenen bir şeydir. Fakat bu sistemin kurulması için konumlandırma yapılacak ortamların her bir noktası için daha önceden optik RSS ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Yani kapalı bir mekânın her bir koordinatını içeren bir RSS-konum haritasının daha önceden çıkarılması gerekmektedir.

Bu haritalandırma işleminin farklı kanal koşullarında (az ışık, çok ışık, sabah, öğle, akşam vakitleri ...) sürekli tekrarlanarak yapılmasına ve elde edilen optik güç haritasının bir veri tabanında kaydedilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Alıcı, bu veri tabanındaki verileri kullandığı için oluşturulan optik haritasının sürekli ölçüm yapılarak güncel tutulması da elzemdir. Bu sistemin konumlandırma performansı çok iyidir fakat ortamın fiziksel kanal değişkenlerine çok bağımlı olması, kurulum ve iş yükü maliyeti getirmesi gibi sebeplerle tercih edilebilir bir sistem olduğu konusu tartışmalıdır.

RSS-temelli IPS sistemini temel alan bir başka sistem olan ve ilk olarak bu tez kapsamında tasarlanan TAF-yardımlı RSS-temelli IPS’de, alıcıdaki sinyal üzerinde türev alma işlemi gerçekleştirilir. Bunun neticesinde LOS güç bileşenlerinin elde edildiği ve çok yollu yansıma etkilerinin ortadan kaldırıldığı bir sistem tasarlanır. Tasarım aşamalarına bölüm-2’de yer verildiğinden dolayı burada ayrıntıya girilmeyecektir. Tablo 3.1’den de görüldüğü gibi bu sistemle tasarlanan bir iç mekan konumlandırmasında milimetrik ölçekte konumlandırma yapılabilmektedir. Başarım sonuçlarının genel olarak YSA-yardımlı IPS’den daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat odanın tam köşe ve kenarlarında, YSA-yardımlı IPS sistemi daha başarılıdır. Bu sistem, optik kanal bilgisine ihtiyaç duymaz ve fiziksel kanal değişimlerinden çok az etkilenir. İç mekân konumlandırmasında karşılaşılan iki bozucu etkiyle de başa çıkabilmektedir. Bunlardan birincisi olan optik gürültü etkisi, alıcıda uygulanan düzleştirme teknikleriyle en aza indirgenebilmektedir. Çok yollu yansımaların etkisi ise türev alıcı bir filtre kullanılarak ortadan kaldırılmaktadır. Konumlandırma başarımının çok yüksek olması, optik kanal bilgisine ihtiyaç duymaması ve çevresel etkilerden çok az etkilenmesi gibi sebeplerle bu sistemin optik kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılabilir yararlı bir sistem olduğu sonucuna varılır.

4. SONUÇLAR

Bu tezde, görünür ışık haberleşmesinde RSS-temelli iç mekân konumlandırma sistemleri ele alınmış olup, bu sistemlerin konumlandırma performansını iyileştirebilmek için TAF-yardımlı RSS-temelli IPS ve YSA-yardımlı IPS olmak üzere iki farklı konumlandırma tekniği öne sürülmüş ve bu yöntemlerin başarımı incelenmiştir. Ayrıca, benzetim çalışmalarını gerçekleştirebilmek için optik kablosuz bir haberleşme kanalının MMC metoduna göre modeli yapılmış ve dürtü tepkileri analizine yer verilmiştir.

İç mekânlar için RSS-temelli IPS'lerde haberleşme kanalındaki çok yollu yansımalarından dolayı konumlandırma hassasiyeti düşük olmaktadır. Bu sistemlerde konumlandırma hesabı yapılırken alıcı tarafta elde edilen sinyal gücü temel alınır. Alınan sinyal gücü üzerinde yansıyan ışınların da etkisi olduğundan LOS formülüne göre yapılan uzaklık hesaplarında sapmalar olacaktır. Bu nedenle, alıcı tarafta elde edilen optik güç sinyali üzerindeki çok yollu yansıma bileşenlerinin etkisini en aza indirebilmek gereklidir. Bu tez çalışmasında, iç mekân konumlandırma performansını etkileyen çok yollu yansıyan ışınların bozucu etkisi, farklı iki teknik kullanılarak ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Boş bir odada, kablosuz optik haberleşme kanalı için yapılan dürtü tepkileri analizi sonucunda, odanın orta kısımlarında yansıyan ışınların etkisi çok az iken, odanın duvar kenarları ve köşelerine doğru gidildiğinde ise bu etkinin arttığı tespit edilmiştir. Ve önerilen her bir konumlandırma sisteminde de odanın köşe ve kenarlarına yakın olan kısımlarındaki konumlandırma hatalarında göreceli olarak yüksek değerler elde edilmiştir.

Türev alıcı yardımlı RSS-temelli bir iç mekân konumlandırma sistemi ile çok yollu yansımaların sinyal üzerindeki bozucu etkileri ortadan kaldırılarak sadece LOS üzerindeki güç bileşeni bulunmuştur. LOS'tan gelen sinyal güç bileşeninin bulunması ve konumlandırma hesabında bu güç değerinin kullanılmasından dolayı, yansımalarından kaynaklanan konumlandırma hataları azalmış ve milimetrik seviyelere indirgenmiştir. Ayrıca bu sistemde gürültülü olarak alınan sinyal gücü üzerinde düzleştirme teknikleri uygulanarak, çevresel optik gürültülerin etkisi de en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Konumlandırma başarımının çok yüksek olması, fiziksel kanal değişimlerinden ve ortam gürültüsünden çok az etkilenmesi, daha önceden optik kanal bilgisine ihtiyaç duymaması gibi nedenlerle bu yöntemin iç mekân konumlandırma sistemlerinde kullanılabilecek verimli bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

YSA-yardımlı yapılan bir iç mekân konumlandırma sisteminin başarımı da çok yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu yöntem, bir konum tahmin metodu olup oluşturulan bir YSA'ya göre konum tahmini yapmaktadır. Giriş verileri olarak RSS değerleri, çıkış verileri olarak ise koordinat bilgileri kullanılmıştır. Bu sistemler, konumlandırma tahmini yapmadan önce kanal bilgilerine ve farklı ortamlar (az ışıklı veya çok ışıklı ortamlar) için test edilen bir giriş-çıkış haritasına ihtiyaç duyar. Ayrıca iç mekânlardaki kablosuz optik haberleşme kanalı sürekli değişebileceğinden dolayı, bu sistem belli aralıklarla ölçüm yapılmasını ve veri tabanında güncel bir optik haritasının bulunmasını gerektirir. Bu nedenle çevresel değişikliklerden daha fazla etkilenir, hem iş yükü hem de kurulum maliyeti açısından da bazı kısıtlamalar içerir.

Bu tez kapsamında ele alınan konumlandırma sistemleri arasında RSS-temelli IPS'lerin konumlandırma hassasiyetinin kabul edilebilirlik sınırlarının dışında olduğu, TAF-yardımlı RSS-temelli IPS ve YSA-yardımlı IPS'lerin ise konumlandırma hassasiyetleri açısından yüksek başarımlı gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat TAF-yardımlı RSS-temelli IPS'lerin hem konumlandırma performansı, hem de uygulanabilirlik açısından YSA-yardımlı IPS'lerden daha iyi bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

5. KAYNAKLAR

1. He, S. ve Chan, S.H.G., Wi-Fi Fingerprint-based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18,1 (2016) 466-490.
2. Do, T.H. ve Yoo, M., An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems, Sensors, 16,5 (2016) 678.
3. Dardari, D., Closas, P. ve Djuric, P.M., Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies, IEEE Trans. Vehicular Technology, 64,4 (2015) 1263-1278.
4. Gu, W., Aminikashani, M., Deng, P. ve Kavehrad, M., Impact of Multipath Reflections on the Performance of Indoor Visible Light Positioning Systems, Journal of Lightwave Technology, 34,10 (2016) 2578-2587.
5. Gu, Y., Lo, A., Niemegeers, I., A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11,1 (2009) 13-32.
6. Hahnel, D., Burgard, W., Fox, D., Fishkin, K. ve Philipose, M., Mapping and localization with RFID technology, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04), Nisan 2004, New Orleans, Proceedings. ICRA'04., Vol. 1 1015-1020.
7. Çiftler, B.S., Kadri, A. ve Güvenç, İ., Fundamental bounds on RSS-based wireless localization in passive UHF RFID systems, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Mart 2015, New Orleans, 1356-1361.
8. Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G.B., Kobayashi, H., Molisch, A.F., Poor, H.V. ve Sahinoglu, Z., Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks, IEEE Signal Processing Magazine, 22,4 (2005) 70-84.
9. Sayed, A.H., Tarighat, A. ve Khajehnouri, N., Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information, IEEE Signal Processing Magazine, 22,4 (2005) 24-40.
10. Guvenc, I., Chong, C.C., A Survey on TOA Based Wireless Localization and NLOS Mitigation Techniques, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11,3 (2009) 107-124
11. Dalkılıç, F., Çabuk, U.C., Arıkan, E. ve Gürkan, A., An analysis of the positioning accuracy of iBeacon technology in indoor environments, International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Ekim 2017, Antalya, 549-553.
12. Kaemarungsi, K., Efficient design of indoor positioning systems based on location fingerprinting, International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, Eylül 2005, Maui, Vol. 1 181-186.

13. Luo, J., Fan, L., Li, H., Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19,4 (2017) 2871-2893.
14. Thyagaturu, A.S., Mercian, A., McGarry, M.P., Reisslein, M., Kellerer, W., Software Defined Optical Networks (SDONs): A Comprehensive Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18,4 (2016) 2738-2786.
15. Karlicek, R.F., Smart lighting - more than illumination, Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Kasım 2012, Guangzhou, 1–2.
16. Haigh, P.A., Ghassemlooy, Z. ve Papakonstantinou, I., 1.4-Mb/s White Organic LED Transmission System Using Discrete Multitone Modulation, IEEE Photonics Technology Letters, 25,6 (2013) 615-618.
17. Kim, H., Kim, D., Yang, S., Son, Y. ve Han, S., An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique, Journal of Lightwave Technology, 31,1 (2013) 134-144.
18. Yang, S., Jung, E., ve Han, S., Indoor Location Estimation Based on LED Visible Light Communication Using Multiple Optical Receivers, IEEE Communications Letters, 17,9 (2013) 1834-1837.
19. Li, L., Hu, P., Peng, C., Shen, G. ve Zhao, F., Epsilon: A Visible Light Based Positioning System, 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI), Nisan 2014, Seattle, 331-343.
20. Zhang, W., Chowdhury, M.S. ve Kavehrad, M., Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications, Optical Engineering, 53,4 (2014) 045105
21. Zhang, X., Duan, J., Fu, Y. ve Shi, A., Theoretical Accuracy Analysis of Indoor Visible Light Communication Positioning System Based on Received Signal Strength Indicator, Journal of Lightwave Technology, 32,21 (2014) 4180-4186.
22. Aminikashani, M., Gu, W. ve Kavehrad, M., Indoor location estimation with optical-based OFDM communications, arXiv preprint arXiv, 1506.07571, (2015).
23. Mohammed, N.A. ve Elkarim, M.A., Exploring the effect of diffuse reflection on indoor localization systems based on RSSI-VLC, Optics express, 23,16 (2015) 20297-20313.
24. Jeong, E.M., Yang, S.H., Kim, H.S. ve Han, S.K., Tilted receiver angle error compensated indoor positioning system based on visible light communication, Electronics Letters, 49,14 (2013) 890-892.
25. Zhou, Z., Kavehrad, M. ve Deng, P., Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications, Optical Engineering, 51,8 (2012) 085009.

26. Wang, T.Q., Sekercioglu, Y.A., Neild, A. ve Armstrong, J., Position Accuracy of Time-of-Arrival Based Ranging Using Visible Light With Application in Indoor Localization Systems, Journal of Lightwave Technology, 31,20 (2013) 3302-3308.
27. Jung, S., Hann, S. ve Park, C., TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 57,4 (2011) 1592-1597.
28. Do, T.H. ve Yoo, M., TDOA-based indoor positioning using visible light, Photonic Network Communications, 27,2 (2014) 80-88.
29. Panta, K. ve Armstrong, J., Indoor localisation using white LEDs, Electronics Letters, 48,4 (2012) 228-230.
30. Jung, S.Y., Hann, S., Park, S. ve Park, C.S., Optical wireless indoor positioning system using light emitting diode ceiling lights, Microwave and Optical Technology Letters, 54,7 (2012) 1622-1626.
31. Vongkulbhisal, J., Chantaramolee, B., Zhao, Y. ve Mohammed, W.S, A fingerprinting-based indoor localization system using intensity modulation of light emitting diodes, Microwave and Optical Technology Letters, 54,5 (2012) 1218-1227.
32. Yang, S.H., Kim, D.R., Kim, H.S., Son, Y.H. ve Han, S.K., Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals, Microwave and Optical Technology Letters, 55,6 (2013) 1385-1389.
33. Arafa, A., Dalmiya, S., Klukas, R. ve Holzman, J.F, Angle-of-arrival reception for optical wireless location technology, Optics express, 23,6 (2015) 7755-7766.
34. Arafa, A., Jin, X. ve Klukas, R., Wireless Indoor Optical Positioning With a Differential Photosensor, IEEE Photonics Technology Letters, 24,12 (2012) 1027-1029.
35. Nakajima, M. ve Haruyama, S., Indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication and compensated geomagnetic sensing, 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC), August 2012, Beijing, 524-529
36. Yasir, M., Ho, S. ve Vellambi, B.N., Indoor Positioning System Using Visible Light and Accelerometer, Journal of Lightwave Technology, 32,19 (2014) 3306-3316.
37. Yasir, M., Ho, S. ve Vellambi, B.N., Indoor Position Tracking Using Multiple Optical Receivers, Journal of Lightwave Technology, 34,4 (2016) 1166-1176.
38. Xie, B., Chen, K., Tan, G., Lu, M., Liu, Y., Wu, J. ve He, T., LIPS: A light intensity-based positioning system for indoor environments, ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 12,4 (2016) 28:1-27.

39. Rajagopal, N., Lazik, P. ve Rowe, A., Visual light landmarks for mobile devices, *Information Processing in Sensor Networks, IPSN-14 Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Nisan 2014, Berlin, 249-260.
40. Rahman, M.S., Haque, M.M. ve Kim K.D, Indoor positioning by LED visible light communication and image sensors, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 1,2 (2011) 161-170.
41. Hu, Y., Xiong, Y., Huang, W., Li, X.Y., Zhang, Y., Mao, X., Yang, P. ve Wang, C., A Visible Light Based Indoor Positioning System, *arXiv preprint arXiv*, 1505.05977, (2015).
42. Luo, Z., Zhang, W. ve Zhou, G., Improved spring model-based collaborative indoor visible light positioning, *Optical Review*, 23,3 (2016) 479-486.
43. Yang, S., Kim, H., Son, Y. ve Han, S., Three-Dimensional Visible Light Indoor Localization Using AOA and RSS With Multiple Optical Receivers, *Journal of Lightwave Technology*, 32,14 (2014) 2480-2485.
44. Xu, W., Wang, J., Shen, H., Zhang, H. ve You, X., Indoor Positioning for Multiphotodiode Device Using Visible-Light Communications, *IEEE Photonics Journal*, 8,1 (2016) 1-11.
45. Nguyen, N.T., Suebsomran, A., Sripimanwat, K., Nguyen ve N.H, Design and simulation of a novel indoor mobile robot localization method using a light-emitting diode positioning system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38,3 (2016) 305-314.
46. Barry, J.R., Kahn, J.M., Krause, W.J., Lee, E.A. ve Messerschmitt, D.G, Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11,3 (1993) 367-379.
47. Kahn, J.M. ve Barry, J.R., Wireless infrared communications, *Proceedings of the IEEE*, 85,2 (1997) 265-298.
48. Hernandez, F.J., Jimenez, R. ve Santamaria, A., Ray-tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels, *Optical engineering*, 39,10 (2000) 2775-2781.
49. Hernandez, F.J., Jimenez, R. ve Santamaria, A., Modified Monte Carlo scheme for high-efficiency simulation of the impulse response on diffuse IR wireless indoor channels, *Electronics Letters*, 34,19 (1998) 1819-1820.
50. Hernandez, F.J., Jimenez, R. ve Santamaria, A., Novel ray-tracing approach for fast calculation of the impulse response on diffuse IR-wireless indoor channels, *Optical Wireless Communications II: International Society for Optics and Photonics*, Vol. 3850 (1999) 100-108.

51. Chowdhury, M.I.S., Zhang, W. ve Kavehrad, M., Combined Deterministic and Modified Monte Carlo Method for Calculating Impulse Responses of Indoor Optical Wireless Channels, Journal of Lightwave Technology, 32,18 (2014) 3132-3148.
52. <https://www.gps.gov/systems/gps/>, Global Positioning System, 15 Ekim 2018.
53. Ergul, O., Dinc, E. ve Akan, O.B., Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications, Physical Communication, 17 (2015) 72-85.
54. Gilling, T., *The STREAM TONE: The Future of Personal Computing?*, Troubador Publishing Ltd., 2015.
55. <http://energy.gov/energysaver/articles/led-lighting>, LED Lighting, 18 Ekim 2018.
56. Bouchet, O. et al, Hybrid wireless optics (HWO): Building the next-generation home network, 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (*CNSDSP*), Temmuz 2008, Graz, 283-287.
57. Pathak, P.H., Feng, X., Hu, P., Mohapatra, P., Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17,4 (2015) 2047-2077.
58. Hranilovic, S., On the design of bandwidth efficient signalling for indoor wireless optical channels, International Journal of Communication Systems, 18,3 (2005) 205-228.
59. Komine, T. ve Nakagawa, M., Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 50,1 (2004) 100-107.
60. Li, H., Chen, X., Guo, J. ve Chen, H., A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application, Optics express, 22,22 (2014) 27203-27213.
61. Bilgi, M., Yuksel, M. ve Pala, N., 3-d optical wireless localization, *IEEE Globecom Workshops*, Aralık 2010, Miami, 1062-1066.
62. Tang, A.P., Kahn, J.M. ve Ho, K.P., Wireless infrared communication links using multi-beam transmitters and imaging receivers, *Proceedings of ICC/SUPERCOMM '96 - International Conference on Communications*, 1996, Dallas, Vol. 1 180-186.

ÖZGEÇMİŞ

20.05.1989 tarihinde Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Rize'de tamamladı. Lisans eğitimini bir yılı hazırlık eğitimi olmak üzere 2006-2011 yılları arasında Ankara Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2012 yılının sonunda Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi oldu. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

