



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK TAŞIYICILI GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME İÇİN SİSTEM
TASARIMI

Özhan ARIOĞLU

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Koray GÜRKAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı


İSTANBUL-2018

Bu çalışma 11.01.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ


Dr. Öğr. Üyesi Koray GÜRKAN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Fırat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Sinan AKŞİMŞEK
İstanbul Kültür Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince hiç bir destek ve yardımı esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Koray GÜRKAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarım süresince, göstermiş oldukları ilgi ve anlayıştan dolayı çalışmakta olduğum DTSİS firması Genel Müdürümüz Ergün ERSOY başta olmak üzere, değerli fikirleri ile tez çalışmamdan desteklerini esirgemeyen Donanım ARGE Müdürümüz Deniz ONUR'a, yazılım tasarımı ve arayüz oluşturma konularında fikir ve görüşlerini paylaşmaktan çekinmeyen değerli mesai arkadaşım Bilgisayar Mühendisi Mehmet GÜLEN'e, mekanik tasarım ve 3B yazıcı kullanımı ile ilgili vermiş olduğu destek ile göstermiş olduğu fedakarlıktan dolayı değerli mesai arkadaşım Makine Mühendisi Sabri TUNA'ya, baskılı devre üretimi ve elektronik malzeme dizgisi başta olmak üzere tüm teknik işlemler sırasında değerli vakitlerini bana ayırıp yardımlarını esirgemeyen mesai arkadaşlarım Tekniker Tuncer GÜLER ve Tekniker Emre SAVAŞ'a katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Bütün öğrenim hayatım boyunca bana göstermiş oldukları destek ile bu günlere gelmemde karşılığı ödenemeyecek büyük fedakarlıklar gösteren aileme ve eşime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Aralık 2018

Özhan ARIOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	5
2.1. KABLOSUZ HABERLEŞME VE VLC	5
2.2. VLC STANDART ÇALIŞMALARI	7
2.3. OPTİK OFDM MODÜLASYON TEKNİKLERİ	9
2.3.1. DCO-OFDM Modülasyonu	10
2.3.2. ACO-OFDM Modülasyonu	11
2.4. VLC ÜZERİNE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	13
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	15
3.1. SİSTEM BLOK ŞEMASI	15
3.2. ACO-OFDM BLOK ŞEMASI VE İŞLEYİŞ	16
3.3. DONANIM TASARIMI	18
3.3.1. Mikrodenetleyici.....	18
3.3.2. Besleme Devreleri	20
3.3.3. LED Işık Kaynağı.....	22
3.3.4. LED Sürücü Devresi.....	23
3.3.5. Fotodiyot.....	26
3.3.6. Akım–Gerilim Dönüştürücü Yükselteç Devresi	27
3.3.7. Evirmeyen Yükselteç Devresi	29
3.3.8. Bant Geçiren Süzgeç Devresi	30
3.3.9. İkinci Yükselteç Devresi	31
3.3.10. Analog–Sayısal Dönüştürücü	32
3.3.11. Seri Port Haberleşme Devresi	33

3.3.12. Işık Şiddeti Ölçüm Aracı	34
3.3.13. Şema ve Baskılı Devre Çizim Programları	35
3.4. YAZILIM TASARIMI.....	36
3.4.1. Verici Algoritması	36
3.4.2. Alıcı Algoritması	38
3.4.3. Keil µVision	40
3.4.4. CMSIS	40
3.4.5. C# ile Hazırlanan Hata Tespit Programı	41
3.4.6. C# ile Hazırlanmış Yılan Oyunu	42
3.4.7. C# ile Hazırlanmış Oyun Kontrol Programı.....	42
3.5. MEKANİK TASARIM.....	43
3.5.1. Verici Kutu Tasarımı	43
3.5.2. Alıcı Kutu Tasarımı	44
3.5.3. Optik Mercek.....	47
4. BULGULAR.....	48
4.1. TEST DÜZENEGİ	48
4.2. ALICI VE VERİCİ DEVRE TASARIMLARI.....	49
4.3. ACO-OFDM MODÜLASYONU VE DARBE BİÇİMLENDİRME	52
4.4. BAŞLANGIÇ VE EŞ ZAMANLAMA İŞARETLERİNİN EKLENMESİ.....	54
4.5. VERİCİ VE ALICI İŞARET ZAMANLAMALARI.....	54
4.6. ZAMANLAMALARIN GELİŞTİRİLMESİ	56
4.7. ALICI DEVREDE İŞARET BOZULMALARI	57
4.8. OPTİK MERCEK KULLANIMININ ETKİSİ	59
4.9. ÖLÇÜM ŞEKİLLERİ VE SONUÇLARI.....	60
4.9.1. Dikey Eksende Mesafe ve Hata Ölçüm Sonuçları	60
4.9.2. Yatay Eksende Mesafe ve Hata Ölçüm Sonuçları.....	62
4.9.3. Dairesel Eksende Açık ve Hata Kontrolü.....	63
4.9.4. Test Arayüzü Program Çıktısı	65
4.10. VERİCİ SICAKLIK DEĞERLERİ.....	67
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	68
KAYNAKLAR.....	70
EKLER	74
EK 1. Verici Devre Şeması	74
EK 2. Verici Baskılı Devre.....	80

EK 3. Verici Devre Malzeme Listesi.	84
EK 4. Alıcı Devre Şeması.	85
EK 5. Alıcı Baskılı Devre.....	90
EK 6. Alıcı Devre Malzeme Listesi.	94
EK 7. Verici Programı.....	95
EK 8. Alıcı Programı.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	102



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Elektromanyetik dalga spektrumu.	5
Şekil 2.2: Frekans seçici sönümlenmeli ve düz sönümlenmeli kanal görselleri.	9
Şekil 2.3: DCO-OFDM sistemde elde edilen OFDM işareti [14].	10
Şekil 2.4: ACO-OFDM sistemde elde edilen OFDM işareti [14].	12
Şekil 3.1: VLC sistem blok şeması.	15
Şekil 3.2: ACO-OFDM algoritma blok şeması.	16
Şekil 3.3: LPC1768 kılıf, bacak yapısı ve boyut bilgileri [32].	19
Şekil 3.4: LPC1768 blok şeması [32].	19
Şekil 3.5: L5973 anahtarlama gerilim dönüştürücü devresi.	21
Şekil 3.6: MCP1700 doğrusal regülatörün fonksiyonel blok şeması [34].	21
Şekil 3.7: OSRAM Classic A serisi LED ışık kaynağı görseli ve yapısı.	23
Şekil 3.8: FJAF4310 kılıf, bacak bağlantıları ve boyut bilgileri (mm) [37].	24
Şekil 3.9: FJAF4310 transistör ile tasarlanan A sınıfı yükselteç devre şeması.	25
Şekil 3.10: SFH203P fotodiyot görseli ile boyut bilgileri (mm) [38].	26
Şekil 3.11: SFH203P dalga boyu karakteristiği [38].	26
Şekil 3.12: Geçiş-empedans (akım-gerilim dönüştürücü) yükselteç devresi.	27
Şekil 3.13: OPA2356 kılıfı, içyapısı, bacak bağlantıları ve boyut bilgileri (mm) [39].	28
Şekil 3.14: Evirmeyen yükselteç tasarımı.	30
Şekil 3.15: Bant geçiren süzgeç devresi.	30
Şekil 3.16: İkinci yükselteç devresi.	31
Şekil 3.17: Analog-sayısal dönüştürücü devre şeması.	32
Şekil 3.18: RS232 standardında haberleşme için tasarlanan seri port devresi.	34
Şekil 3.19: Pozometre uygulaması ile ışık şiddeti ölçümü.	34

Şekil 3.20: Orcad Capture programı ile şema tasarımı.	35
Şekil 3.21: Orcad PCB Editor programı ile baskılı devre tasarımı.	36
Şekil 3.22: Verici algoritma akış diyagramı.	37
Şekil 3.23: Alıcı algoritma akış diyagramı.	39
Şekil 3.24: Keil µVision program görseli.	40
Şekil 3.25: C# ile tasarlanan hata tespit programı.....	41
Şekil 3.26: C# ile tasarlanan oyun kontrol programı.	42
Şekil 3.27: 6063 alüminyum serisi ile hazırlanmış verici kutu tasarımı.	43
Şekil 3.28: Verici kutusu boyut bilgileri.	44
Şekil 3.29: Alıcı kutu tasarımı.	45
Şekil 3.30: Alıcı kutusu boyut bilgileri.	45
Şekil 3.31: 3 boyutlu yazıcı Prusa i3 için kullanılan Ultimaker Cura programı.	46
Şekil 4.1: Test düzeneği.	48
Şekil 4.2: Verici LED için kullanılan güç kaynakları ve güç değerleri.	49
Şekil 4.3: Alıcı devre.	50
Şekil 4.4: Alıcı devrenin kutulu görseli.	50
Şekil 4.5: Verici devre.....	51
Şekil 4.6: Transistör yükselteç devresi.....	51
Şekil 4.7: Verici devrenin kutulu görseli.	52
Şekil 4.8: Verici devrenin kutu içerisindeki yerleşimi.....	52
Şekil 4.9: ACO-OFDM işareti, darbe biçimlendirme verisi ve uygulanma sonucu.	53
Şekil 4.10: Başlangıç ve eş zamanlama işaretinin eklenmesi.	54
Şekil 4.11: Verici devrede seri port üzerinden gelen verinin işleme süresi.	55
Şekil 4.12: Alıcı devrede alınan verinin işlenip seri porta gönderilme süresi.	55
Şekil 4.13: Zaman geliştirme sonrası verici devre işaret zamanlaması.	56
Şekil 4.14: Zaman geliştirme sonrası alıcı devre işaret zamanlaması.....	57
Şekil 4.15: Fotodiyot ve geçiş-empedans yükselteç kazancına bağlı işaret kaybı.	57

Şekil 4.16: Verici devrede uygulanan 235 mV'luk işaret yükseltme.....	58
Şekil 4.17: Vericide uygulanan işaret yükseltmenin alıcıda işarete etkisi.....	58
Şekil 4.18: Alıcı ve verici arası 1.8 m mesafede optik mercekle kullanımının etkisi.....	59
Şekil 4.19: Alıcı ve verici arası 2 m mesafede optik mercekle kullanımının etkisi.....	60
Şekil 4.20: Dikey eksen testi.....	61
Şekil 4.21: Yatay eksen testi.....	62
Şekil 4.22: Yatay eksen testine ait görsel.....	62
Şekil 4.23: Dairesel eksen testi.....	63
Şekil 4.24: Dairesel eksen testine ait görsel.....	64
Şekil 4.25: C# ile hazırlanan arayüz ile veri iletimi.....	65
Şekil 4.26: C# ile hazırlanan arayüz ile bit hata kontrolü.....	65
Şekil 4.27: Test programı ile gönderilen ve alınan veri dosyaları.....	66

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: VLC ile RF arasındaki farklar [7, 8, 31].	6
Tablo 2.2: IEEE 802.15.7 standardı PHY I tanımlamaları [9].	7
Tablo 2.3: IEEE 802.15.7 standardı PHY II tanımlamaları [9].	8
Tablo 2.4: IEEE 802.15.7 standardı PHY III tanımlamaları [9].	8
Tablo 3.1: LED ışık kaynağı teknik parametreleri [35].	22
Tablo 3.2: FJAF4310 teknik verileri [37].	24
Tablo 3.3: Fotodiyot karşılaştırma tablosu.	27
Tablo 3.4: OPA2356 teknik özellikleri [39].	28
Tablo 3.5: ADS7883 teknik verileri [40].	32
Tablo 4.1: ACO-OFDM algoritması ve darbe biçimlendirme parametreleri.	53
Tablo 4.2: Dikey eksen ölçüm sonuçları.	61
Tablo 4.3: Yatay eksen ölçüm sonuçları.	63
Tablo 4.4: Dairesel eksen ölçüm sonuçları.	64
Tablo 4.5: Transistör kılıfı sıcaklık değerleri.	67

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
°	: Derece (açısal)
*	: Eşleniği
T	: Devriği
A	: Amper (akım)
β	: Azalma katsayısı
C	: Santigrat
cm	: Santimetre
cos	: Kosinüs
f_c	: Kesim frekansı
f_s	: Örnekleme frekansı
GHz	: Gigahertz
K	: Kelvin
kB	: Kilobayt
kbps	: Bir saniyedeki kilobit sayısı
kHz	: Kilohertz
lm	: Lümen
log	: Logaritma
lux	: Lüks (ışık akısı)
m	: Metre
mA	: Miliamper
Mbps	: Bir saniyedeki megabit sayısı
MHz	: Megahertz
Mm	: Milimetre
Ω	: Ohm (direnç)
pA	: Pikoamper
π	: Pi sayısı
sin	: Sinüs
sn	: Saniye
t	: Zaman

T	: Örnekleme zamanı
THz	: Terahertz
μF	: Mikro farat
V	: Volt (gerilim)
V_{ceo}	: Açık devre toplayıcı emetör gerilimi
V_{FB}	: Geri besleme gerilimi
V_{OUT}	: Çıkış gerilimi
V_{REF}	: Referans gerilimi
W	: Watt (güç)
X	: Karmaşık bilgi işareti

Kısaltmalar

Açıklama

AC	: Alternatif akım
ACO-OFDM	: Asimetrik kırılmış optik dikgen frekans bölmeli çoğullama
ADC	: Analog-sayısal dönüştürücü
BJT	: Çift kutuplu eklemeli transistör
CP	: Çevrimsel ön takı
CSK	: Renk kaydırmalı anahtarlama
DAC	: Sayısal-analog dönüştürücü
DC	: Doğru akım
DCO-OFDM	: Doğru akım eklemeli optik dikgen frekans bölmeli çoğullama
DNP	: Normal olarak yerleştirilmemiş
DSP	: Sayısal işaret işleme
FFT/IFFT	: Hızlı Fourier dönüşümü / Ters hızlı Fourier dönüşümü
FPGA	: Alanda programlanabilir kapı dizileri
IR	: Kızılötesi alıcı
ISI	: Semboller arası girişim
LED	: Işık yayan diyot
MOSFET	: Metal oksit yarıiletkenli alan etkili transistör
NPN	: Negatif pozitif negatif
OOK	: Dur-başla anahtarlama
P/S	: Paralelden seriye dönüşüm
PAPR	: Tepe-ortalama güç oranı
QPSK	: Dördün evre kaydırmalı kiplenim

RAM	: Rasgele erişimli bellek
RF	: Radyo frekansı
RLL	: Tekrar uzunluğu sınırlı
S/P	: Seriden paralele dönüşüm
SMPS	: Anahtarlamalı güç kaynağı
SPI	: Seri çevresel arayüz
TIA	: Geçiş-empedans yükselteci
UART	: Evrensel asenkron alıcı verici
USB	: Evrensel seri veri yolu
VLC	: Görünür ışık haberleşme
VPPM	: Değişken darbe konum modülasyonu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK TAŞIYICILI GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME İÇİN SİSTEM TASARIMI

Özhan ARIOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Koray GÜRKAN

Teknolojinin gelişimiyle birlikte haberleşme alanındaki kısıtlar ve ihtiyaçlar artmış, araştırmacıları, buna çözüm olabilecek yeni fikir arayışları üzerine yöneltmiştir. Özellikle kablosuz iletişimde elektromanyetik girişimlere ve sağlık sorunlarına neden olabilen, sınırlı ve lisanslı radyo frekansları kullanımı, görünür ışık haberleşmesi (VLC) teknolojilerinin gelişimini önemli hale getirmiştir. Bu çalışmada düşük maliyetli ve kolay bulunabilir elektronik malzemelerin kullanımıyla, özgün ve ticari bir ürün oluşturmaya yönelik, ARM tabanlı bir VLC sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda alıcı ve verici devreleri tasarlanmış, baskılı devre ve uygun kutu üretimleri gerçekleştirilmiş, bunun sonucunda da standart tavan yüksekliğinin olduğu iç ortam uygulamalarında kullanılabilir bir sistem prototipi oluşturulmuştur. Tasarım ayrıca ARM tabanlı mikrodenetleyici ile dikgen frekans bölme (OFDM) modülasyonu ve sayısal işaret işleme uygulamalarının gerçekleştirildiği az sayıdaki gerçeğe birisidir.

Aralık 2018, 118 sayfa.

Anahtar kelimeler: Görünür ışık haberleşmesi, ACO-OFDM, optik haberleşme, fotodiyot, ARM Cortex M3 mikrodenetleyici

SUMMARY

M.Sc. THESIS

SYSTEM DESIGN FOR MULTICARRIER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Özhan ARIOĞLU

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Koray GÜRKAN

With the development of technology, the constraints and the needs in the field of communication have increased and the researchers have focused on the search for new ideas that can be a solution. Espacially, limited and licensed radio frequencies that can cause electromagnetic interference and health problems in the use of wireless communication make the visible light communication (VLC) technologies very important. In this thesis, an ARM based VLC system design has been realized to implement a unique product with the use of low-cost and commercial off-the-shelf electronic components. In this context, receiver and transmitter circuits are designed, printed circuit boards and appropriate enclosures have been produced, as a result, a system prototype has been created to use in interior applications with standard ceiling height. The design is also one of the few implementations in which orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation and digital signal processing applications are performed by using ARM based microcontroller.

December 2018, 118 pages.

Keywords: Visble light communication, ACO-OFDM, optical communication, photodiode, ARM Cortex M3 microcontroller

1. GİRİŞ

Her geçen gün kalabalıklaşan ve gelişmekte olan dünyada sınırlı kaynakların varoluşu, insanları her daim yeni kaynak arayışlarına yönelmiştir. Enerji, yiyecek, temiz su ve iletişim kanalları bu ihtiyaçlardan sadece en önemlilerinden birkaçıdır. Nüfusun artması ve daha çok insanın dünya üzerinde birbirleriyle iletişim halinde olabilme çabası, iletişim teknolojilerinde de birçok yeniliği ve ihtiyacı öne çıkarmaktadır. Bu konuda en belirgin kısıtlama elektromanyetik spektrumda yaşanmaktadır [1].

Radyo dalgalarıyla kablosuz olarak haberleşme yıllardır üzerinde çalışılmakta olan ve her türlü gelişime açık olan bir konudur. Ancak kullanıcı sayısının ve talebin artması elektromanyetik spektrum üzerinde kullanılabilir alan ihtiyacına dönüşmektedir. Bununla beraber sağlık ve güvenlik gibi konularda da süregelen alternatif çözüm arayışları kendisini görünür ışık haberleşmesi (VLC) başlığı ile göstermiştir.

Görünür ışık haberleşmesi, elektromanyetik spektrumda 400 THz ile 800 THz frekans bandında bulunan, klasik radyo dalgaları frekans bandından çok daha geniş bir bant içeren ve bu sayede de daha çok kullanıcıya daha hızlı veri iletimine olanak sağlayan bir iletişim teknolojisidir. Bu alandaki çalışmalar, 1972 yılında Fransız mühendis Claude Chappe tarafından 196 adet bilginin, birbirine bir çubuk ile bağlı iki kolun hareketleri ile sembolize edilmesi çalışmalarıyla başlamıştır. Daha sonralarda güneş ışığının ayna ile yansıtılması ve Morse kodlarının keşfi ile fenerlerin kullanımı ile ışık üzerinden bilgi aktarımı ilerleme kaydetmiştir. Alexander Graham Bell tarafından 1880 yılında ilk FSO (free-space optic) bağlantı kurulmuştur. Bu noktadan sonra gerçekleştirilen çalışmalar sonucu LED (light emitting diode) ışık kaynakları ve farklı modülasyon teknikleri kullanımı ile veri iletim hızları artmış, çok girdili çok çıktılı sistem kullanımıyla da gigabit seviyelerinde iletişime olanak sağlanmıştır. Bu teknoloji 2011 yılında Harald Haas tarafından Li-Fi (light fidelity) olarak literatüre kazandırılmıştır [2].

Hali hazırda yaygın olarak kullanılan radyo dalgalarıyla kablosuz haberleşme sisteminde özellikle cep telefonu ve internet kullanımının yoğun bir şekilde artmasıyla frekans bandı kullanımındaki kısıtlar daha net şekilde görülmüştür. Görünür ışık haberleşmesinin en büyük avantajı lisanslanmamış ve radyo dalgalarına göre oldukça geniş bir banda sahip temiz bir spektrum sağlamasıdır. Haas [3] günümüzden başlayarak 20 yıl içerisinde kablosuz iletişim

ihtiyacının 6 THz'lik bant genişliğine ulaşacağını, radyo frekansının sadece 0.3 THz'lik bant genişliğine sahip olduğunu, 6 THz'lik bant genişliğinin ise görünür ışık bandı ile IR (kızılötesi) bandının toplamının sadece % 0.8'lik bir bölümüne denk geldiğini ifade etmektedir. Ayrıca kablosuz iletişimin geleceği 5G standardında Li-Fi teknolojisinin kullanılabilirliğine de dikkat çekmektedir.

Geleneksel aydınlatma metotlarına kıyasla sağladığı düşük enerji tüketimi, uzun ömür, küçük boyutlar ve soğutma kolaylığı açısından beyaz LED ışık kaynaklarının [4], görünür ışık haberleşmesi sistemlerinde kullanılabilir olması bu teknolojinin aydınlatma sistemleriyle entegre şekilde iki fonksiyonun beraber kullanımına imkan vermektedir [5]. Bu şekilde eş zamanlı olarak hem aydınlatma hem de yüksek hızda veri iletimi sağlanabilmektedir. Ayrıca göz ve beden sağlık açısından da herhangi bir soruna yol açmayan güvenilir bir sistemdir [2].

Yaygın olarak kullanılan ve radyo dalgalarıyla haberleşen cihazların birbirlerini etkilememesi için belirli standartlara uygun üretilmesi gerekmektedir. VLC sistemlerde EMI (elektromanyetik girişim) olmadığı için daha güvenilir ve hatasız iletişime olanak sağlamaktadır.

Bu avantajların yanı sıra haberleşme kaynağı ışık olduğu için duvarları geçemediğinden dolayı fiziksel olarak sınırlandırılmaktadır. Işık kaynağı ile alıcı arasındaki haberleşme fiziksel objelerin araya girmesi ile kolaylıkla kopabilmektedir. Ayrıca görünür ışığın kullanımı, sistemin güneş gibi diğer ışık kaynakları tarafından girişime uğrayabilmesine olanak sağlamaktadır.

Görünür ışık haberleşme frekans bandı lisanslanmadığı için ücretsizdir [18]. Bu sebeple özellikle evlerde ve iş yerlerinde rahatlıkla yüksek hızda iletişimde kullanılabilir. Evlerde kullanılan aydınlatmaların yanı sıra bir başka görüntü ve ışık kaynağı olan televizyonlar da veri iletiminde kullanılabilir. Bu sayede bir televizyon kanalı izlenirken bir başka kanalın diğer bir cihaz üzerinden izlenmesi, farklı platformlardan yayınlanan haber kaynaklarının takibi, sosyal medya takibi, program rehberi takibi ya da çevrimiçi dosya paylaşımı gibi farklı uygulamalar da televizyon üzerinden sağlanabilecektir. Ayrıca genellikle LED paneller kullanılan bildiri panoları da benzer şekilde görünür ışık haberleşmesi sisteminde kullanılabilir [6].

Bunun yanı sıra aydınlatma ile haberleşme beraber gerçekleştirildiğinden ve EMI problemi olmadığından dolayı market, alışveriş merkezi, hava alanı ve hastane gibi yerlerde de kolaylıkla uygulanabilir bir sistemdir. Trafikte bulunan araçların birbirleri ya da trafik ışıkları ile haberleşmesi ile çarpışmayı önceden sezme, acil durum elektronik fren, şerit ihlali uyarısı gibi trafik akışının ve güvenilirliğinin artmasına olanak tanıyacak başka görünür ışık haberleşme sistem uygulamaları da kullanılabilir. Ayrıca radyo frekanslarının kullanımının, deniz suyunun iyi iletkenlik özelliğiyle sebebiyle yetersiz olduğu denizaltı gibi yerlerde iletişim için büyük fayda sağlamaktadır [6].

Bu tez çalışması ile özgün bir görünür ışık haberleşme sistem tasarımı hedeflenmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen sistemde bulunan alıcı ve verici devreler, kolay elde edilebilir ve düşük maliyetli olacak şekilde seçilmiştir. Bu şekilde daha sonra ticari bir ürün olarak satılabilir bir sistemin prototip üretimi amaçlanmıştır. Özellikle gelecek çalışmalara zemin oluşturması amaçlı modülasyon türü seçimi ile çok taşıyıcılı bir sistem tasarımı ön görülmüş, bunun gerçek ve çalışabilir bir sistem haline getirilmesiyle de ülkemizde gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarından farklı olması hedeflenmiştir. Tasarlanacak sistemde alıcı ve verici devrelerde ARM çekirdeğine ait bir mikrodenetleyici kullanılmasıyla, düşük güç tüketimi ve uygun maliyet yanında daha kolay elde edilebilir ve daha kolay yazılım geliştirilebilir bir test ortamı hazırlamak hedeflenmiştir.

Bu çalışmada beş bölümde gerçekleştirilecek olup ilk bölümde görünür ışık haberleşmesinin tanımı, fayda ve zararları ile kullanım alanları ve tarihi gelişiminden bahsedilecektir.

İkinci bölümde görünür ışık haberleşme sistemi ile ilgili akademik çalışmalar incelenecek olup VLC ile ilgili standartlardan bahsedilecektir. Bunun yanı sıra radyo frekansları ile kablosuz iletişim ile farkları belirtilecektir. Tez çalışmasında kullanılmış olan modülasyon tekniği ile ilgili detaylı bilgiler de yine bu bölümde incelenecektir.

Üçüncü bölümde VLC sistemi için verici ve alıcı tasarımı yapılacak, kullanılan yöntemler ile malzemeler ve kullanılma sebepleri hakkında detaylı bilgiler sunulacaktır. Donanımsal tasarımların yanı sıra mikrodenetleyici için tasarlanan programlara ait akış diyagramları ve test aşamalarında kullanılmak amaçlı tasarlanan bilgisayar arayüz programlarından bahsedilecektir. İlave olarak alıcı ve verici devrelerin içine koyulacağı kutular için mekanik tasarım görsellerinden ve materyallerinden detaylı bilgiler sunulacaktır.

Dördüncü bölümde gerçekleştirilen testlere ait sonuçlardan ve elde edilen verilerden bahsedilecek, eklenen görseller ile test aşamaları ve sayısal işaret ölçümleri sunulacaktır.

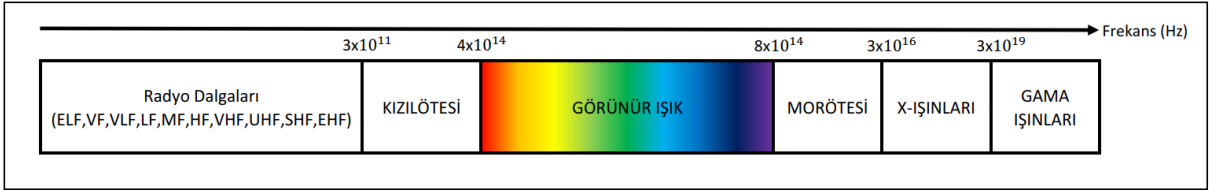
Son bölümde elde edilen sonuçlara ait yorumlar ve tasarımlara ait geliştirme notları sunulacaktır.



2. GENEL KISIMLAR

2.1. KABLOSUZ HABERLEŞME VE VLC

Kablolu iletişimin maliyetli ve çok sınırlı iletişim imkanı sunması üzerine geliştirilen kablosuz veri iletimi ile insanoğlu son yüzyılda haberleşme alanında büyük gelişmeler sağlamıştır. Bu noktadan sonra kablosuz iletişimin faydalarından yararlanabilmek için birçok araştırma yapılmakta ve gün be gün geliştirilen yeni metot ve yöntemler insanlığın hizmetine sunulmaktadır. Bu bağlamda özellikle radyo dalgalarının lisanslanmış olması ve bant kapasitesinin yetersiz hale gelmesi üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Görünür ışık haberleşmesi, sunduğu faydalar ve sağladığı bant genişliği ile bu araştırmalarda önemli yer almaktadır. Şekil 2.1’de elektromanyetik spektrum üzerinde kullanılan frekans bantları gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Elektromanyetik dalga spektrumu.

Radyo dalgaları kullanımı ile televizyon yayınlarından cep telefonlarına, uydu haberleşmesinden radyo yayınlarına, uydu temelli yer bulma sistemlerinden telsiz haberleşmesine kadar birçok alanda haberleşme sağlanabilmektedir. Spektrum üzerinden de görüleceği üzere 300 GHz’lik bir bant genişliği ile bu haberleşme kanalları kullanılmaktadır. Görünür ışık haberleşmesinin kullanımı ile spektrum üzerinden görüleceği üzere yaklaşık 400 THz’lik bir kullanım alanı haberleşme sistemlerinin hizmetine girecektir. Daha çok kullanıcıya daha hızlı veri iletiminin sağlanması hususunda görünür ışık kanallarının kullanımı büyük önem arz etmektedir.

Özellikle su altı haberleşmede radyo dalgalarının çok güçlü bir şekilde zayıflıyor olması [2], VLC sistemlerin klasik radyo dalgalarının yetersiz olduğu alanlarda yeni yetenekler kazandırdığının en belirgin göstergesidir.

Tablo 2.1’de kablosuz haberleşmede kullanılan radyo dalgaları ve görünür ışık haberleşme arasındaki farklar gösterilmektedir.

Tablo 2.1: VLC ile RF arasındaki farklar [7, 8, 31].

ÖZELLİK	VLC	RF
Dalga Boyu	380 nm – 780 nm	1 mm - 10^5 m
Bant Genişliği	Çok fazla (~400 THz)	Az (~300 GHz)
Elektromanyetik Girişim	Hayır	Evet
İşaret Türü	Gerçek değerler, tek kutuplu	Karmaşık değerler, çift kutuplu
Kapsama Alanı	Dar	Geniş
Açık Görüş	Evet	Hayır
Hareketli Kullanım	Sınırlı	İyi
Güç Tüketimi	Az	Çok
Güvenilirlik	Açık görüş gerektiğinden güvenilirlik yüksek (iç ortam)	Duvarlar ile kısıtlanamaz güvenilirlik az (iç ortam)
Sağlık Riski	Yok	Zararlı (yüksek güç kullanımında)
Kurulum	Kolay	Orta zorlukta (iç ya da dış ortam durumuna göre)

2.2. VLC STANDART ÇALIŞMALARI

Görünür ışık haberleşmesi ile ilgili üniversitelerce ve firmalarca gerçekleştirilen akademik çalışmalar ve duyulan ilgi arttıkça konu ile alakalı standart oluşturma çalışmaları da kendini göstermiştir. Bu konuda ilk adım Japonya tarafından 2007 yılında atılmış, Japan Electronics and Information Technologies Industries Associations (JEITA) tarafından JEITA CP-1221 ve JEITA CP-1222 standartları yayımlanmıştır [1].

2011 yılında The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) tarafından IEEE 802.15.7-2011 ,”IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light” yayınlanmıştır [2]. Bu standart ile görünür ışık haberleşmesi için PHY (fiziksel katman) ve MAC (medium access control) katmanlarının tanımı yapılmış, uygulanan modülasyon türleri ve veri iletim hızları belirlenmiştir [9]. IEEE 802.15.7 tarafından 3 adet fiziksel katman tanımı yapılmaktadır. Tablo 2.2’de, Tablo 2.3’te ve Tablo 2.4’te bu katmanlar, kullanılan modülasyon türleri ve iletim hızları gösterilmektedir.

IEEE 802.15.7 standardına göre her PHY için farklı uygulanabilir saat frekansları olduğu belirtilmiştir. PHY I için trafik ışıkları gibi yüksek akım gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere 400 kHz ve daha düşük frekanslar seçilmiştir. PHY II için taşınabilir cihazlarda kullanılmak üzere 120 MHz ve daha düşük frekanslar seçilmiştir. PHY III için beyaz LED akım karakteristiği göz önünde bulundurularak maksimum 24 MHz frekansı kullanılacak şekilde standart belirlenmiştir. Ayrıca her PHY yapısında farklı hat kodlama ve kanal kodlama teknikleri uygulanmaktadır [9].

Tablo 2.2: IEEE 802.15.7 standardı PHY I tanımlamaları [9].

MODÜLASYON	RLL KOD	FREKANS	VERİ HIZI
OOK	Manchester	200 kHz	11.67 kbps – 100 kbps
VPPM	4B6B	400 kHz	35.56 kbps – 266.6 kbps

Tablo 2.3: IEEE 802.15.7 standardı PHY II tanımlamaları [9].

MODÜLASYON	RLL KOD	FREKANS	VERİ HIZI
VPPM	4B6B	3.75 MHz	1.25 Mbps – 2 Mbps
		7.5 MHz	2.5 Mbps – 5 Mbps
OOK	8B10B	15 MHz	6 Mbps – 9.6 Mbps
		30 MHz	12 Mbps – 19.2 Mbps
		60 MHz	24 Mbps – 38.4 Mbps
		120 MHz	48 Mbps – 96 Mbps

Tablo 2.4: IEEE 802.15.7 standardı PHY III tanımlamaları [9].

MODÜLASYON	FREKANS	VERİ HIZI
4-CSK	12 MHz	12 Mbps
8-CSK		18 Mbps
4-CSK	24 MHz	24 Mbps
8-CSK		36 Mbps – 72 Mbps
16-CSK		48 Mbps – 96 Mbps

Tanaka ve diğ. [10] tarafından, iç ortam aydınlatmalarında birden fazla LED ışık kaynağının kullanılmasıyla oluşan optik yol farklılıklarının ortaya çıkardığı problemlerin çözümünde OFDM (dikgen frekans bölmeli çoğullama) tekniğinin kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Yüksek veri iletim hızı sağlayan OFDM işaretleri negatif değerler içerdiğinden, optik sistemler

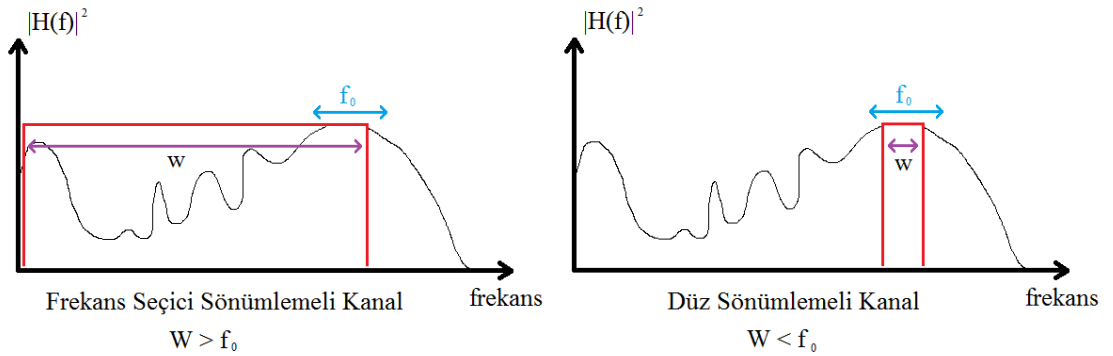
için kullanılırken ya büyük DC gerilimi eklenmeli ya da negatif değerleri sıfırlanıp kırılarak kullanılmalıdır [11].

2.3. OPTİK OFDM MODÜLASYON TEKNİKLERİ

OFDM tekniği, kablolu ve kablosuz iletişim sistemlerinde semboller arası girişim problemine getirdiği etkili çözüm ile tercih sebebi olmaktadır. Bunun yanı sıra OFDM tekniğinin optik kanalda da uygulanabilirliği üzerine birçok çalışma yayımlanmıştır.

Radyo frekanslı kablosuz sistemlerde karmaşık temel bant OFDM işareti kullanımıyla taşıyıcı radyo frekansının genlik ve fazı modüle edilmektedir. Optik kablosuz sistemlerde işaretin gerçek ve pozitif olması gerektiğinden genlik ve faz modülasyonu yerine temel bant işaretin optik taşıyıcı frekansın yoğunluğunu modüle ettiği IM/DD (intensity modulation and direct detection) tekniği kullanılmaktadır [12].

OFDM modülasyonu çok taşıyıcılı bir iletişim tekniğidir. İşaretler paralel olarak farklı frekansta alt taşıyıcı kanallar aracılığı ile iletilirler [11]. Toplam bant genişliği dikgen alt bantlara bölünür. Kanalların dikgen olması, eşit aralıklı ayırık frekans kümesi seçimi ile sağlanmaktadır. Bunun için IFFT (inverse fast fourier transform) işlemi kullanılmaktadır. Alıcı kısmında ise FFT (fast fourier transform) kullanımı ile paralel verilerin çözülmesi sağlanır [13]. OFDM sistemi sayesinde frekans seçici sönmlemeli kanal, alt bantların kullanımı ile düz sönmlemeli hale getirilir [15] ve karmaşık kanal denkleştiricilerine ihtiyaç duyulmadan yüksek veri hızları elde edilir [14]. Şekil 2.2'de frekans seçici sönmlemeli kanalın ve düz sönmlemeli kanalın, uyumluluk bant genişliği (f_0) ile ilişkisine ait görseller bulunmaktadır.



Şekil 2.2: Frekans seçici sönmlemeli ve düz sönmlemeli kanal görselleri.

2.3.1. DCO-OFDM Modülasyonu

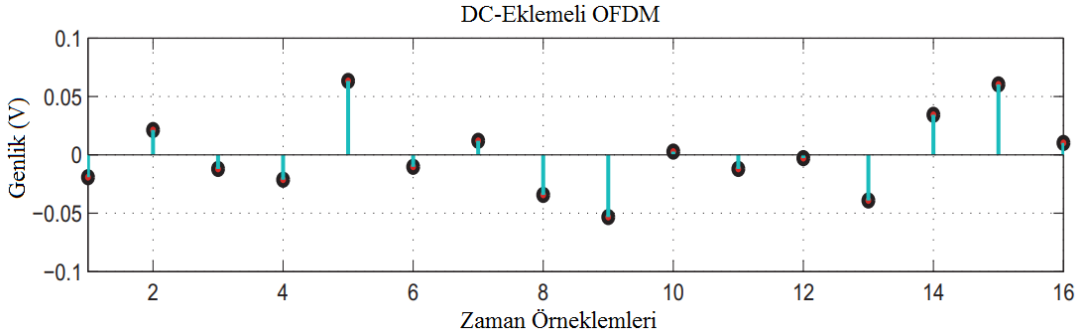
DCO-OFDM (DC-biased optical OFDM) modülasyon tekniğinde çift kutuplu OFDM işareti sabit bir DC gerilim (B_{DC}) eklenmesiyle tek kutuplu (pozitif) duruma getirilir. Pratikte OFDM işaretleri Gauss dağılımına sahiptir ve dolayısıyla B_{DC} yeterli miktarda değilse negatif işaretlerde kırılırlar. Bu şekilde kırılma gürültüsü (n_C) oluşur ki bu değer B_{DC} azaldıkça artmakta ve tüm alt taşıyıcıları etkilemektedir. Aşağıdaki eşitlikte DCO-OFDM işaretine DC ilave edilmesinin matematiksel formülü gösterilmektedir [12].

$$x(t) = x_0(t) + B_{DC} + n_C(B_{DC}) \approx x_0(t) + B_{DC} \quad (2.1)$$

DCO-OFDM ile iletilen bit sayısı, N_g çevrimsel ön takı (CP) uzunluğu, B bant genişliği ve M modülasyon seviyesini göstermek üzere aşağıdaki gibidir [14].

$$R^{DCO} = \left(\frac{\frac{N}{2}-1}{N+N_g} \right) B \log_2 M \quad \text{bits/s.} \quad (2.2)$$

Şekil 2.3'te DCO-OFDM sistem için elde edilen OFDM işareti görülmektedir. Bilgi kaybının oluşmaması için DC gerilim eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.3: DCO-OFDM sistemde elde edilen OFDM işareti [14].

DCO-OFDM sistemlerde performans eklenen gerilim değerine bağlıdır. Yüksek bir değer eklenmesi sistemde daha yüksek güç ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Düşük bir değer eklenmesi de kırılma gürültüsüne sebep olacağından performansı sınırlandıracaktır [12].

2.3.2. ACO-OFDM Modülasyonu

ACO-OFDM (asymmetrically clipped optical OFDM) sistemde ilk olarak bilgiler N adet alt taşıyıcı kullanılmak üzere $N/4$ 'lük karmaşık sembollere bölünmektedir. Sembolize edilen veri dizisine ait matematiksel ifade aşağıdaki gibidir [16].

$$\mathbf{X}_d = [X_1 X_2 X_3 \dots X_{N/4}]^T \quad (2.3)$$

Burada semboller QAM (quadrature amplitude modulation) modülasyonun yıldız diyagramından alınmıştır. Optik kanalda kullanılacak gerçek işaretlerin üretilmesi için alt taşıyıcıların Hermitsel simetriye sahip olması gerekmektedir. Buna ilave olarak ACO-OFDM modülasyonunda sadece tek alt taşıyıcılar veri sembolü taşımaktadır ve çift taşıyıcılar kırpma gürtüsüyle beraber performans problemlerine yol açmaması için sıfıra eşitlenmektedir. Sonuç olarak karmaşık veri sembolleri ile $N \times 1$ boyutunda aşağıdaki vektör elde edilir [16].

$$\mathbf{X} = [0 X_1 0 X_2 0 \dots X_{N/4} 0 X_{N/4}^* 0 \dots 0 X_2^* 0 X_1^*]^T \quad (2.4)$$

Bu vektörde $(.)^*$ ile eşleniği, $(.)^T$ ile de devriği ifade edilmektedir. Daha sonra zaman bölgesindeki vektör $x[n]$ 'i elde etmek amacıyla \mathbf{X} vektörüne IFFT işlemi aşağıdaki formül ile uygulanır [16].

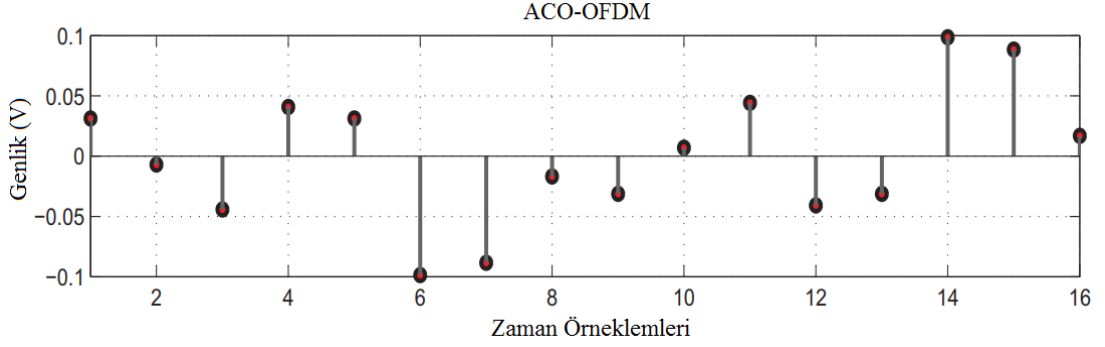
$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.5)$$

Semboller arası girişimi (ISI) önlemek için kanalın beklenen gecikme yayılmasından uzun olmak suretiyle çevrimsel ön takı (CP) diziye eklenir [16].

ACO-OFDM sistemde çift taşıyıcılardaki veriler tek taşıyıcılardaki verilerin simetriği olduğu için sadece tek taşıyıcılardaki veriler kullanılarak bilgi kaybı olmaksızın veri iletimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde genliğin yarıya düşmesi sağlanmaktadır. Ayrıca sistemde iletilen bit sayısı aşağıdaki gibidir [14].

$$R^{ACO} = \left(\frac{N-1}{N+N_g} \right) B \log_2 M \quad \text{bits/s.} \quad (2.6)$$

Şekil 2.4'te ACO-OFDM sistem için elde edilen OFDM işareti görülmektedir. Çift taşıyıcıların tek taşıyıcıların simetriği olmasından dolayı negatif verilerin kırılması sonucu bilgi kaybı oluşmamaktadır.



Şekil 2.4: ACO-OFDM sistemde elde edilen OFDM işareti [14].

Haberleşme sistemlerinde veri iletiminin harcanan güç karşılığında maksimum güvenilirlikte sağlanması ya da bit başına harcanan enerjinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Sistemlerde kullanılan yükselteçler, anlık yüksek çıkış güçleri sebebiyle doyuma ulaşabilmektedir. Dolayısıyla maksimum çıkış gücü önemli bir kısıtlama olarak karşımıza çıkmaktadır. Çok taşıyıcılı OFDM sistemlerde de üretilen çıkış sinyallerinde anlık yüksek çıkış gücünün ortalama çıkış gücüne oranı (PAPR) yüksek olma eğilimindedir. Bu durum kullanılan yükselticide verim kaybına yol açmaktadır [17].

PAPR konusu önemli bir problem olmasının yanı sıra bu tezin konusu olmadığı için üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

ACO-OFDM kullanımının DCO-OFDM kullanımına karşı daha verimli olması ve daha düşük güç tüketimine olanak sağlaması göz önünde bulundurularak tez çalışmamızda ACO-OFDM modülasyon tekniğinin kullanılmasına karar verilmiştir.

2.4. VLC ÜZERİNE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

VLC konusu üzerine her geçen gün yeni çalışmalar gerçekleştirilmekte ve bu araştırmalar ile literatüre yeni bilgiler kazandırılmaktadır. Bu tezin çalışmaları sırasında birçok araştırma incelenmiştir. Bunlardan tasarladığımız VLC sistemi için motivasyon kaynağı olarak görülen bazı çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Videv ve Haas [18] yapmış oldukları çalışmada uzaysal kaydırmalı anahtarlama (SSK) modülasyon tekniğini kullanarak birden fazla LED ve fotodiyot çifti oluşturmak suretiyle VLC sistem tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemde alıcı ve verici arasındaki mesafenin artmasıyla kullanılan modülasyon tekniğinin etkisi sonucu sembol kestirimlerinde, semboller arası mesafenin azaldığı görülmüştür. Bu da sistemin başarı performansını düşürmekte, sistemin uzak mesafeler arasında kullanılmasına müsaade etmemektedir.

Branda ve diğ. [19] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada alıcı ve verici tasarımlarında yazılım tabanlı radyo kullanmışlardır. Ayrıca alıcı devrede fotodiyot olarak Thorlabs PDA36 ürünü kullanılmıştır. Bu şekilde geliştirilebilir bir ortam oluşturmakla beraber IEEE 802.15.7 standardının PHY I iletişim hızlarında veri iletimini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan ürünler test ortamı için uygun olmakla beraber ticari bir ürüne dönüştürülmek üzere kullanıldığında yüksek maliyet getiren malzemelerdir.

Samudika ve diğ. [20] hazırlamış oldukları görünür ışık ile ses aktarımı tasarımlarında 20 cm mesafede MP3 ve PCM (pulse code modulation) formatında ses dosyaları aktarımını başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan sistem ses dosyalarının örneklenebilmesi için uygun çalışma frekansına sahip olmasının yanında ilave olarak OOK modülasyon yapısı kullanılmıştır.

Ding ve diğ. [21] hazırlamış oldukları prototip çalışmasında düşük maliyetli malzemeler kullanarak USB arayüzü üzerinden görünür ışık haberleşmesi aracılığıyla 2 Mbps veri iletim hızında bağlantı gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarımlarında OOK modülasyon türünü kullanmışlardır.

Schmid ve diğ. [22] hazırlamış oldukları sistemde yazılım tabanlı iletişim protokolleri için düşük maliyetli mikrodenetleyicilerin kullanılabilceğini belirtmiş, kullandıkları 8 bitlik Atmel ATmega328P geliştirme kartları ile LED'den LED'e 2 m mesafede 800 bps veri iletim hızı ile VLC haberleşmesi elde etmişlerdir.

Xi ve diğ. [23] yapmış oldukları çalışmada, 4x4 LED dizisi ve 16 seviye PAM (pulse amplitude modulation) genlik modülasyonu türünü kullanarak, tek LED kaynağına uygulanan OOK modülasyonun getirdiği sınırlı bant genişliğine çözüm getirmiş, teorik olarak 10 Mbps veri iletim hızının 40 Mbps veri iletim hızına çıkabileceğini göstermişlerdir.

Afgani ve diğ. [24] beyaz LED kullanarak gerçekleştirmiş oldukları çalışmada OFDM modülasyon türünü kullanmışlar, pilot işareti ekleyerek eş zamanlamayı başarılı bir şekilde gerçekleştirmekle beraber 8 kbps maksimum veri iletim hızı elde edebilecekleri bir sistem ortaya çıkarmışlardır.

Ho ve diğ. [25] 2018 yılında yayımlanmış olan çalışmalarında OFDM modülasyon türü kullanımı yanı sıra InGaN (indium gallium nitride) tabanlı mikro foto algılayıcılar kullanarak 3.2 Gbps gibi bir yüksek veri iletim hızı elde etmişlerdir.

Islim ve diğ. [26] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada mikro LED ve OFDM modülasyon türü kullanımıyla 11.95 Gbps veri iletim hızına ulaşmışlardır.

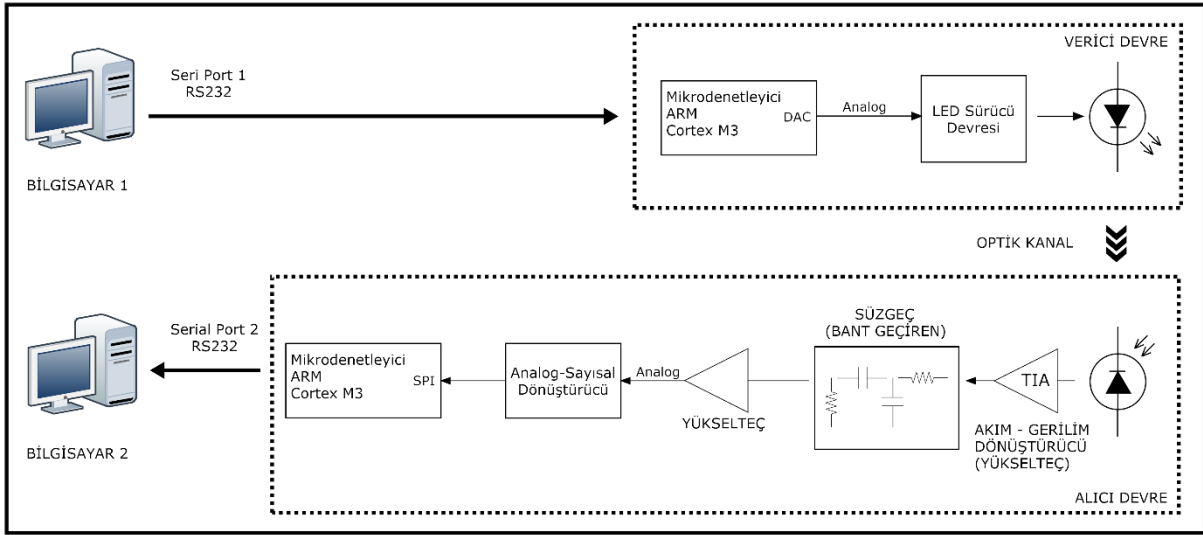
Tsonev ve diğ. [27] lazer diyot ve dalga boyu bölümlenmeli modülasyon türü kullanımı ile veri iletim hızının 100 Gbps seviyelerine ulaşabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Bu çalışmalar ışığında elde edilen bilgiler ve eksiklikler göz önüne alınarak tez çalışmamızda düşük maliyetli ve kolay bulunabilir elektronik malzemelerin kullanımıyla, özgün ve ticari bir ürün oluşturmaya yönelik, ACO-OFDM modülasyon türü kullanımı ile gelecek çalışmalara alt yapı hazırlayan, ARM tabanlı bir VLC sistem tasarımı gerçekleştirilecektir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. SİSTEM BLOK ŞEMASI

Tasarımı yapılacak olan VLC (visible light communication) alıcı ve verici devreleri ile oluşturulmuş genel sistem blok şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Sistemde veri iletimi iki bilgisayar arasında tek yönlü olarak ve seri port haberleşmesi ile tetiklenerek gerçekleşmektedir. Verici ve alıcı devrelerin ikisinde de ARM Cortex M3 çekirdeğine sahip aynı mikrodenetleyici kullanılmıştır.



Şekil 3.1: VLC sistem blok şeması.

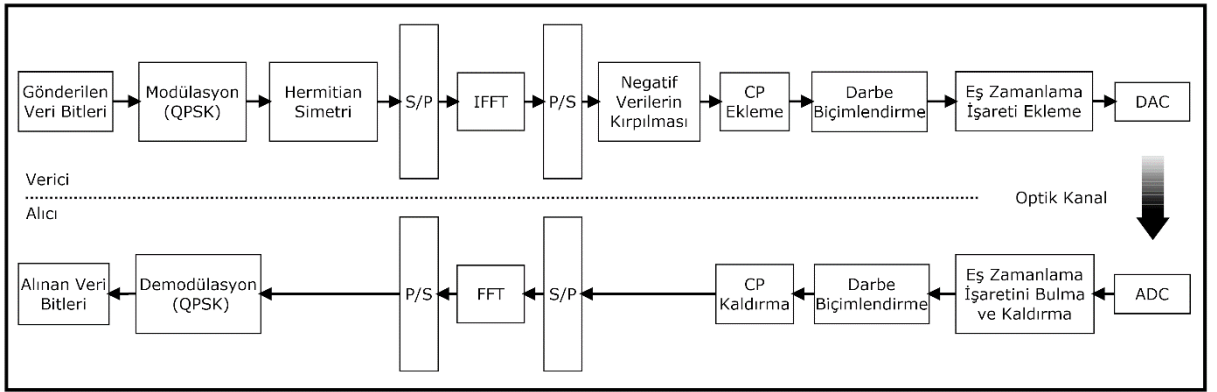
Bilgisayar arayüzü üzerinden seri port aracılığı ile gönderilen veriler mikrodenetleyici tarafından analog işarete dönüştürülmektedir. Bu analog işaretin sürücü devresine uygulanması sonucunda LED ışık kaynağı tarafından ilgili işaretler optik kanalda yayılır.

Yayılmı sağlanan modüle edilmiş görünür ışık işaretleri alıcı devrede bir fotodiyot aracılığı ile elektrik akım hareketlerine dönüştürülmektedir. Akım değişimleri geçiş-empedans yükseltici ile gerilime dönüştürülüp güçlendirilmektedir. Sonrasında pasif bant geçiren süzgeç devresinden geçen işaretler süzülüş ve DC bileşeni bloke edilmiş şekilde ikinci yükseltici devresine iletilmektedir. Burada süzülüş işaretin güçlendirilmesi ve analog-sayısal dönüştürücü entegrenin giriş akım ihtiyacının karşılanması sağlanmıştır. Analog işaretler analog-sayısal dönüştürücü entegre aracılığı ile sayısal işaretlere dönüştürülmektedir.

Mikrodenetleyicilerin gömülü olarak analog-sayısal dönüştürücü (ADC) yapıları bulunmasına karşın yeterli hızlarda olamamaları nedeniyle SPI (serial peripheral interface) arayüzü üzerinden mikrodenetleyiciye sayısal işaretleri ileten bir dönüştürücü kullanılmıştır. Alıcı devresinde bulunan mikrodenetleyici ile gelen işaretlerin demodülasyonu sağlanarak veriler tekrar seri port bağlantısı üzerinden bir başka bilgisayara aktarılmaktadır. Aynı bilgisayarın iki seri portu arasında da bu sistemin çalışması sağlanabilir.

3.2. ACO-OFDM BLOK ŞEMASI VE İŞLEYİŞ

VLC sistemimizde işaret modülasyonu OFDM tabanlı ACO-OFDM üzerinden gerçekleştirilmektedir. Verici devre ile alıcı devre arasındaki modülasyon ve demodülasyon algoritmalarına ait blok şema Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: ACO-OFDM algoritma blok şeması.

Seri port üzerinden mikrodenetleyiciye gelen ikili kod sistem verileri öncelikle QPSK modülasyonu kullanılarak sembollere dönüştürülür. Sistemimizde veriler 4 baytlık paketler halinde iletilmektedir. Dolayısı ile karşılık gelen 32 bit ikili kod sistem verisi toplam 16 sembole dönüştürülür. Sembolize edilen veriler, IFFT işlemi öncesinde Hermitsel simetri yapısına uygun hale getirilir ve seriden paralele dönüştürülür. Bu sayede IFFT sonrasında verilerin gerçek değerlerden oluşması sağlanır. Gerçek verilerin içerisinde negatif olan bilgiler de bulunabilir. Optik haberleşme sisteminde iletilen işaretlerin pozitif olması dolayısıyla bu negatif birimler sıfırlanarak kırılırlar.

Kanala iletilmek üzere paralelden seriye dönüştürülen verilere semboller arası girişimi (ISI) önleme amaçlı çevrimsel ön takı (CP) eklenir. CP ilave ederken, veri dizisinin, sonundan alınan

belirlenen sayıda veri parçası, dizinin baş tarafına kopyalanır. Eklenecek CP uzunluğu en azından kanalın uzunluğu kadar olmalıdır. Bu sayede kanalın gönderilen veri ile arasındaki doğrusal evrişim (linear convolution), dairesel evrişime (circular convolution) dönüştürülür ve ISI kolaylıkla ortadan kaldırılır [28].

Sembollere kök yükseltilmiş kosinüs darbe biçimlendirme (root raised cosine pulse shaping) işlemi uygulanarak bant genişliği iyileştirilmiş ve sınırlandırılmış işaretler elde edilir. Bu şekilde iletilen veri oranında artış ve iletim hatalarında azalma elde edilir [29]. Sonrasında veri dizisine, alıcı devrede işaretlerin başlangıç noktasını bulmada yardım etmesi amaçlı eş zamanlama bilgisi eklenir. Bu çalışmada 2 adet işaret eklemesi yapılmıştır. Birincisi normal şartlarda alıcının ortamdaki kaynaklanabilecek ışık hareketlenmelerine karşı direncini arttırmak ve işaretin başladığını algılamak için başlangıç işareti olarak, ikincisi ise verici tarafından gönderilen işaretin başladığı noktanın tam yerinin tespit edilebilmesi için eş zamanlama işareti olarak eklenmiştir. Bu şartlar altında oluşturulan sayısal veriler optik kanala iletilmek üzere bir sayısal-analog dönüştürücü aracılığı ile ışık kaynağına etkiyecek analog işaretlere dönüştürülür.

Optik kanal üzerinden ışık yoğunluk değişimi ile aktarılan işaretler, alıcı devrede fotodiyot ve sayısal-analog dönüştürücü devreler üzerinden alındıktan sonra öncelikle eş zamanlama için eklenen işaretler bulunur ve çıkartılır. Elde edilen veri dizisi tekrar kök yükseltilmiş darbe biçimlendirme verisi ile işleme sokulur. Hem vericide hem de alıcıda aynı darbe biçimlendirme verisi kullanılır. Bu şekilde, çarpıldığında tek bir yükseltilmiş darbe biçimlendirme fonksiyonunu sağlayan iki veri dizisi kullanılmış olur ki bu yapı daha iyi bir süzme sağlar. Bu sayede de alıcıdaki işaret-gürültü oranı daha başarılı şekilde optimize edilebilir [29]. Kullanılan darbe biçimlendirme süzgecinin dürtü yanıt fonksiyonu [30] aşağıdaki gibidir.

$$h(t) = \frac{\sin[(1-\beta)\pi t/T] + 4\beta t/T \cos[(1+\beta)\pi t/T]}{\pi t/T (1-(4\beta t/T)^2)} \quad (3.1)$$

Burada β azalma katsayısını (roll-off factor), T ise örnekleme zamanını temsil etmektedir.

Darbe biçimlendirme verisi ile süzülen işaretlerden daha önce eklenmiş olan CP verisi kaldırılır. Orijinal veriye ulaşabilmek için de seriden paralele dönüştürülen veri dizisi FFT dönüşümü alındıktan sonra tekrar seri veri dizisi haline getirilir. Demodülasyon ile sembollerin bitlere dönüştürülmesi sayesinde veri iletimi tamamlanmış olur.

3.3. DONANIM TASARIMI

Bu bölümde VLC haberleşme sistemimizde kullanılan donanım birimleri tanıtılacak ve teknik özelliklerinden bahsedilecektir. Ayrıca alıcı ve verici devre şematikleri ile tasarlanan bölümler açıklanacaktır.

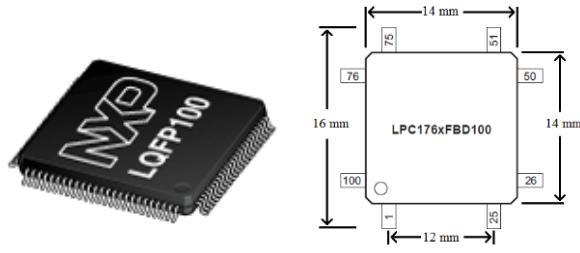
3.3.1. Mikrodenetleyici

Alıcı ve verici devrelerinde gerekli işaretlerin oluşturulması ve işlenebilmesi için analog devrelerden daha yüksek kontrol sağlayan birimlerin kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple hem alıcı hem de verici devrelerinde sayısal verileri işleyebilmek için mikrodenetleyici kullanılmıştır.

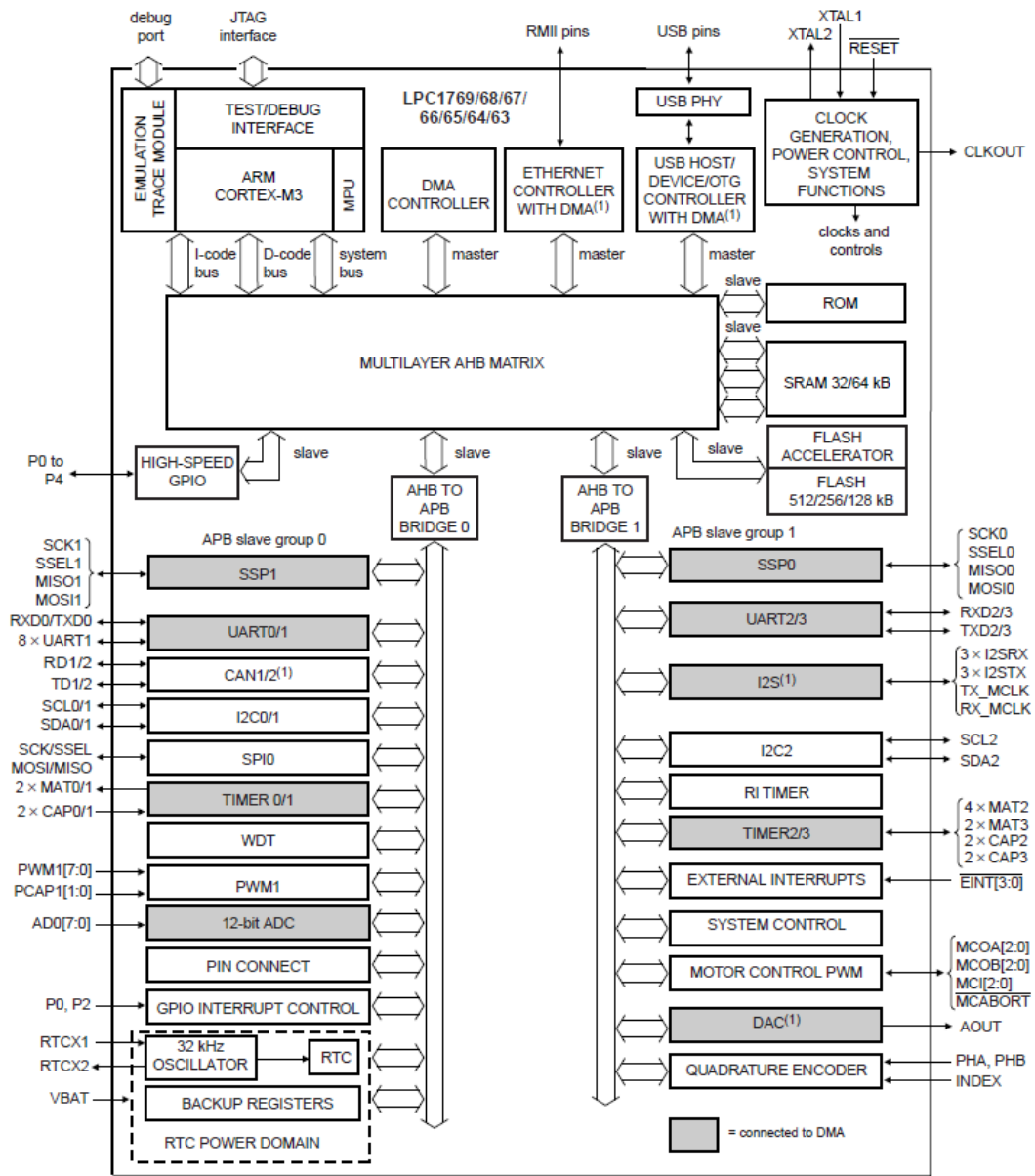
Bu projede NXP USA Inc. firmasının ARM Cortex M3 çekirdeğine sahip LPC1768 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. ARM mimarisine sahip mikrodenetleyiciler, içerdikleri birçok çevresel birim yapıları ile her türlü haberleşme ve kontrol uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilirler. Özellikle düşük güç tüketimleri ve uygun fiyata bulunmaları sebebiyle daha çok mobil ürünlerde tercih edilmektedirler. Şekil 3.4'te LPC1768 mikrodenetleyicisinin yapısına ait blok şema gösterilmiştir [32].

LPC1768, 32 bit veri yoluna, 100 MHz çalışma frekansına, 512 kB program hafızasına ve 64 kB RAM hafızasına sahiptir. Özellikle sayısal işaret işleme algoritmalarından dolayı kullanılacak mikrodenetleyicinin yeterli seviyede hafızaya sahip olması gerekmektedir. Çalışma gerilimi olarak 3.3V isteyen mikrodenetleyici, 12 bit çözünürlükte 200 kHz'e kadar örnekleme frekansı sunan 8 kanal analog-sayısal dönüştürücü ve 10 bit çözünürlükte 1 MHz örnekleme frekansı sunan bir adet sayısal-analog dönüştürücü birimine sahiptir. Seri haberleşme için yapısında 4 adet asenkron seri arayüz (UART) kanalı ve 2 adet SPI kanalı bulunmasının yanı sıra daha hızlı haberleşme için USB de desteklemektedir. Ayrıca LQFP100 kılıfında olduğu için baskılı devre üzerine lehimlenmesi ya da sökülmesi diğer yapıda mikrodenetleyicilere göre oldukça fazla kolaylık sağlamaktadır. (Şekil 3.3)

Hem bahsedilen donanımsal özelliklerin uygunluğu hem de sunduğu yazılım geliştirme kolaylığı açısından projemizde LPC1768 tercih edilmiştir.



Şekil 3.3: LPC1768 kılıf, bacak yapısı ve boyut bilgileri [32].



Şekil 3.4: LPC1768 blok şeması [32].

3.3.2. Besleme Devreleri

Alıcı ve verici devrelerimizde mikrodenetleyicilerin ve bağlı olduğu çevresel birimlerin çalışabilmesi için 3.3 V DC besleme gerilimine ihtiyaç vardır. Bu durum neticesinde alıcı ve verici devrelerde gerekli gerilim seviyesinin elde edilebilmesi için gerilim dönüştürücü devreler kullanılmıştır.

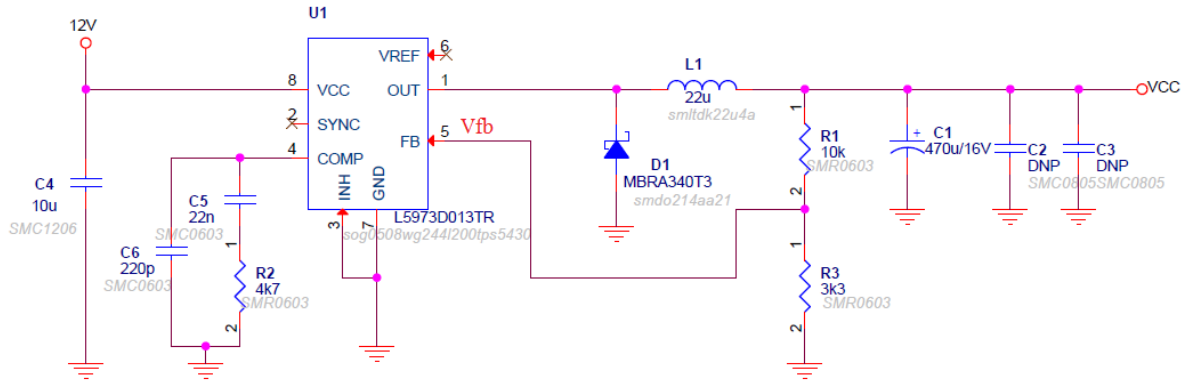
Verici devresi 12 V DC güç kaynağı ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sebeple verici üzerinde bir adet anahtarlama gerilim düşürücü devre (SMPS) kullanılarak 12 V giriş gerilimi 5 V'a düşürülecektir. Daha sonra üretilen 5 V, regülatör devresi üzerinden 3.3 V'a düşürülerek gerekli sistem gerilimi elde edilecektir.

12 V giriş gerilimini 5 V'a düşürmek için anahtarlama gerilim düşürücü devre olarak ST Microelectronics firmasının L5973D ürünü kullanılacaktır. Bu seviyede gerilim dönüşümü sonrasında devrenin çekeceği akımların güç katı üzerinde ısıya dönüşmemesi ve daha verimli olması için anahtarlama güç kaynakları tercih edilmiştir. L5973, 4-36 V giriş gerilimine uyumlu, çıkış gerilimi ayarlanabilen, 2.5 A akım kapasitesinde ve 250 kHz anahtarlama frekansına sahip bir entegre devredir. Gerilim düşümünü sağlamak için beraberinde bobin, diyot ve kondansatör kullanılması gerekmektedir. Bu malzemelerin değerleri, L5973'ün veri sayfasında tavsiye ettiği örnek şemalar referans alınarak belirlenmiştir [33]. Çıkış geriliminin 5 V'a ayarlanabilmesi için geri besleme bacağına bağlanacak dirençler aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

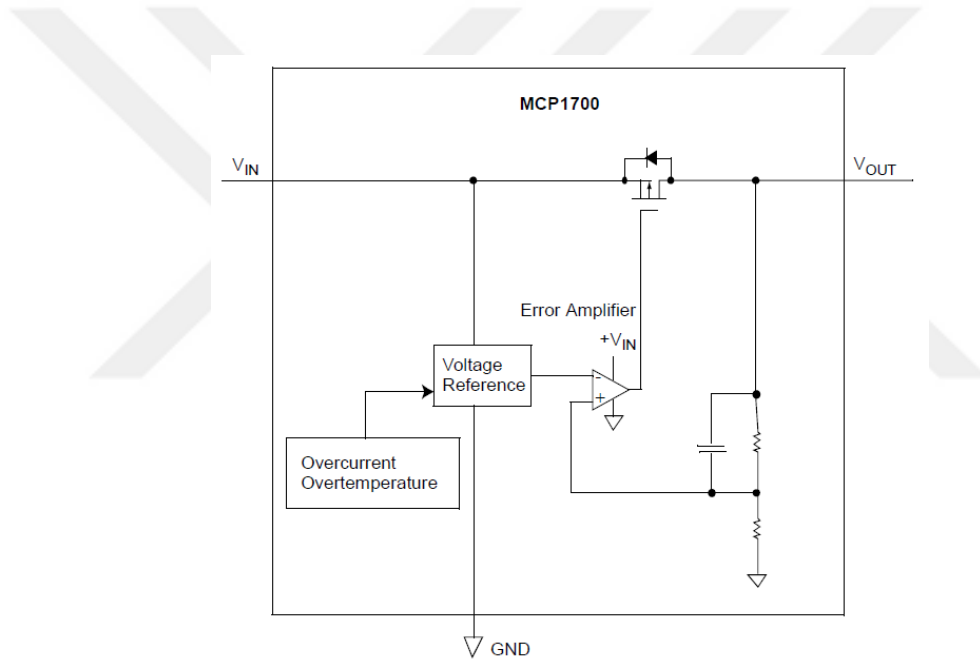
$$V_{OUT} = V_{FB} - [(V_{REF} - V_{FB})(R_2/R_1)] \quad (3.2)$$

Burada V_{OUT} çıkış gerilimini, V_{FB} geri besleme gerilimini (1.235 V) ve V_{REF} referans gerilimini temsil etmektedir. Tasarlanan devrede V_{REF} ucu açık bırakılmıştır. Hesaplanan direnç değerleri ve devre şeması Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Tasarlanan devrede çıkış gerilimi 5 V için V_{CC} , formüldeki dirençler R_1 için R_3 , R_2 için de R_1 referans simgeleri kullanılmıştır.

Devrede gerekli olan 3.3 V gerilimi, 5 V'tan Microchip firmasının MCP1700 isimli regülatörü kullanılarak elde edilmiştir. MCP1700, düşük (1.6 μ A) sızıntı akımı olan, 2.3 V-6 V giriş gerilimini destekleyen, 250 mA akım kapasitesine sahip bir doğrusal regülatördür [34]. Mikrodenetleyicinin ihtiyacı olan seviyede ve temiz şekilde doğrultulmuş gerilim, MCP1700 sayesinde elde edilmiştir. Şekil 3.6'da MCP1700'e ait fonksiyonel blok şema gösterilmektedir.



Şekil 3.5: L5973 anahtarlamalı gerilim dönüştürücü devresi.



Şekil 3.6: MCP1700 doğrusal regülatörün fonksiyonel blok şeması [34].

Alıcı devrenin daha çok masaüstü uygulamalarda ve gezici sistemlerde kullanılması planlandığı için herhangi bir USB portundan beslenebilmesi amaçlı doğrudan 5 V ile çalışabilir halde tasarlanmıştır. Dolayısıyla anahtarlamalı gerilim düşürücü kullanılmayıp sadece MCP1700 ile 5 V üzerinden 3.3 V elde edilecektir.

3.3.3. LED Işıık Kaynağı

Görünür ışık ile haberleşme sistem tasarımında farklı renklerin kullanılması sonucunda farklı frekans aralıklarında ışık kaynakları kullanılabilir. Bu projede ışık kaynağı olarak beyaz ışık veren LED kullanılacaktır. Bunun sebebi hem spektrumda daha geniş bant içerdiğinden dolayı haberleşmenin frekans temelli kayıplara uğramaması, hem de aydınlatmada sıklıkla kullanılan bir renk olduğundan dolayı aydınlatma sistemlerine uygun olmasıdır.

Bu çalışmada OSRAM firmasının Classic A serisi, 1521 lm olan ürünü kullanılmıştır. İç aydınlatmada sıklıkla kullanılan bu ticari ürün uygun fiyat ve güçlü aydınlatma sağladığı, uzun çalışma ömrüne sahip olduğu ve düşük güç tüketimi sağladığı için tercih edilmiştir. Kullanılmış olan LED aydınlatma ürününe ait teknik veriler Tablo 3.1’de, görseller ise Şekil 3.7’de sunulmuştur.

Tablo 3.1: LED ışık kaynağı teknik parametreleri [35].

PARAMETRE	DEĞER
Güç	14 W
Işıık Akısı	1521 lm
Renk Sıcaklığı	6500 K
Normal Çalışma Ömrü	15000 saat
LED Sayısı	25
Çalışma Gerilimi	220 V AC
Çalışma Akımı	0.102 A @220 V AC



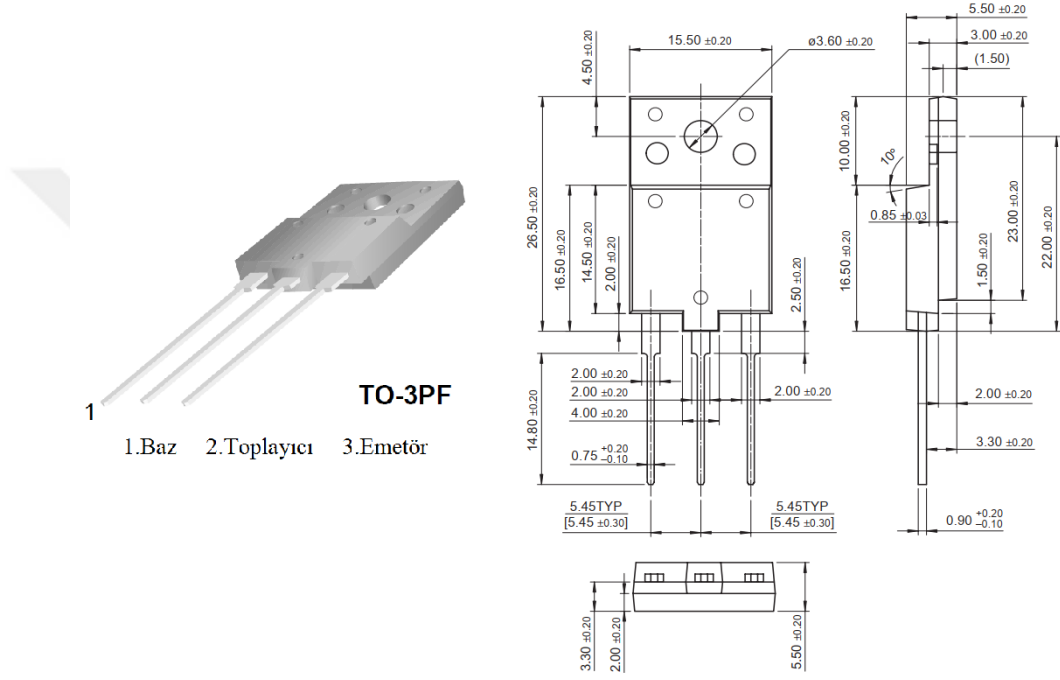
Şekil 3.7: OSRAM Classic A serisi LED ışık kaynağı görseli ve yapısı.

Aydınlatma devrelerinde kullanılan LED'ler iki şekilde bağlanabilmektedir. Bunlardan birincisi paralel bağlantı, ikincisi ise seri bağlantıdır. Paralel bağlantıda sistemden geçen toplam akım, her bir LED'in üzerinden geçen akımların toplamına eşittir. Bu sayede sistem daha düşük gerilimde çalışabilir hale gelmekte ancak toplamda yüksek akım çekmektedir. Ayrıca her LED'in üzerinden aynı akım geçmemesi durumunda LED'lerin parlaklıkları arasında farklılıklar oluşmaktadır. Seri bağlantıda ise her LED'in üzerinden geçen akım aynıdır ve sistem akımına eşittir. Her LED aynı seviyede parlaklık sunmaktadır. Her bir LED'in eşdeğer aydınlatma yoğunluğu sağlaması bütünlük açısından önemlidir. Seri bağlantıdaki tek dezavantaj, devrede bir adet LED'in zarar görmesi durumunda tüm sistemin çalışmaz hale gelmesidir [36]. Bu durumlar dikkate alınarak LED ışık kaynağı seri bağlantılı LED yapısına sahip olan bir ürün seçilmiştir.

3.3.4. LED Sürücü Devresi

Bu projede LED sürücü devresi olarak A sınıfı transistör yükselteç devresi kullanılmıştır. Bu şekilde normal şartlarda aydınlatma sağlanırken aynı zamanda haberleşmeye de imkan tanıyacak bir devre oluşturulmuştur. BJT (çift kutuplu eklemlenmiş transistör) transistörlerin akım kontrolünün doğrusal olması, dolayısıyla LED sürücü olarak daha uygun olması sebebiyle MOSFET (metal oksit yarı iletkenli alan etkili transistör) kullanımı yerine transistör kullanımı tercih edilmiştir. 25 adet seri LED, her birinin üzerinde 3.5 V gerilim kalacak şekilde (toplamda

87.5 V LED gerilimi) 0.250 A'lik akım geçiren bir transistör devresi tasarlanmıştır. LED'lerin ihtiyacı olan gerilimi sağlayabilmek için 120 V DC güç kaynağı kullanılacaktır. Dolayısıyla transistör seçiminde bu durum göz önünde bulundurulmuştur. ON Semiconductor firmasının FJAF4310 model NPN transistörü sürücü devresinde kullanılmıştır. FJAF4310 transistörün TO-3PF kılıf görseli ve bacak bağlantıları Şekil 3.8'de, önemli teknik özellikleri de Tablo 3.2'de sunulmuştur.

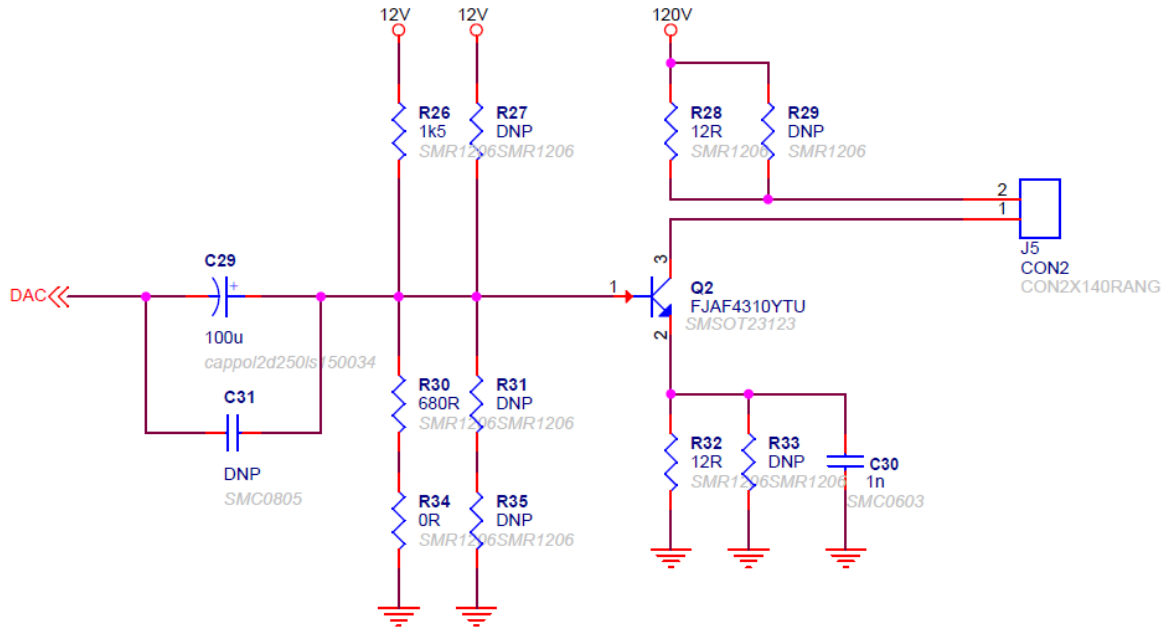


Şekil 3.8: FJAF4310 kılıf, bacak bağlantıları ve boyut bilgileri (mm) [37].

Tablo 3.2: FJAF4310 teknik verileri [37].

PARAMETRE	DEĞER
Toplayıcı – Emetör Gerilimi (V_{CEO})	140 V
Toplayıcı Akımı (I_C)	10 A
Toplayıcı Güç Tüketimi (P_C)	80 W
Bağlantı Sıcaklığı (T_j)	150 °C
DC Akım Kazancı (h_{FE})	90 - 180
Frekans (f_T)	30 MHz
Yarı İletken Yapısı	NPN

FJAF4310 transistörü kullanılarak tasarlanan A sınıfı yükselteç devre şeması Şekil 3.9'da gösterilmiştir. LED sürmek için gerekli çalışma noktası 250 mA olarak belirlenmiş ve elde edebilmek için transistörün baz ucuna bir gerilim bölücü ile doğru polarma devresi oluşturulmuştur. Burada 12 V beslemesinden alınan gerilim 1.5 k Ω ve 680 Ω direnç değerleriyle bölünerek 3.74 V baz gerilimini oluşturmaktadır. Dolayısıyla emetör bacağına bağlı direnç üzerinde yaklaşık 3.04 V gerilim oluşacaktır. Toplayıcı akımı 250 mA olacağı için emetör direnci 12 Ω olarak belirlenmiştir. Bununla beraber toplayıcı tarafında da 12 Ω yük direnci LED'leri ve devreyi korumak amaçlı tasarıma eklenmiştir. Transistörün DC çalışma noktasının bozulmaması için baz bacağına bir kondansatör eklenmiştir. Bu kondansatörün değeri daha düşük frekanslı bileşenleri de geçirebilmesi için 100 μ F seçilmiştir.



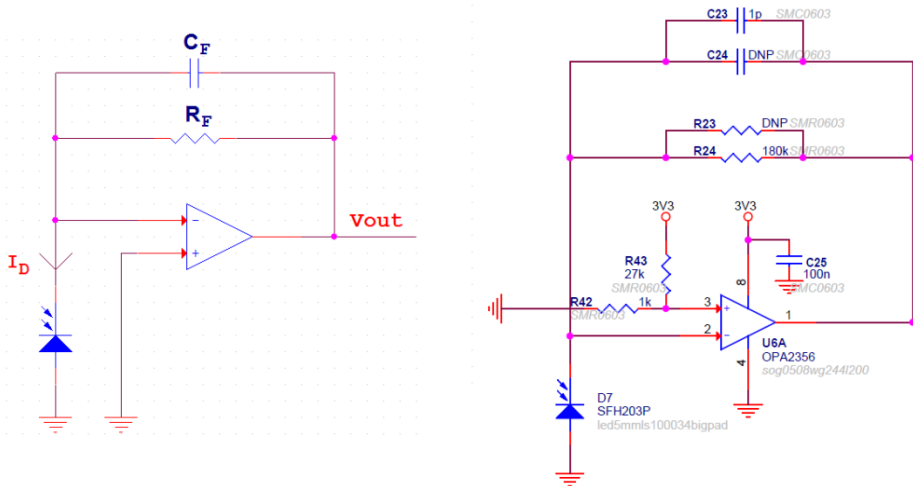
Şekil 3.9: FJAF4310 transistör ile tasarlanan A sınıfı yükselteç devre şeması.

Tablo 3.3: Fotodiyot karşılaştırma tablosu.

PARAMETRE	SFH203P	SFH203PFA	BPW21R	S6801
Dalga Boyu (nm)	400 – 1100	750 – 1100	420 – 675	320 – 1100
Karanlık Akım (nA)	1 - 10	1 - 10	2 - 30	0.5 - 10
Kapasite (pF)	11	11	400 - 1200	40 - 80
Tepkime Süresi (ns)	5	5	3000	66 - 143
Kısa Devre Akımı (μ A)	9.5	6.2	9	120
Üretici Firma	OSRAM	OSRAM	VISHAY	HAMAMATSU

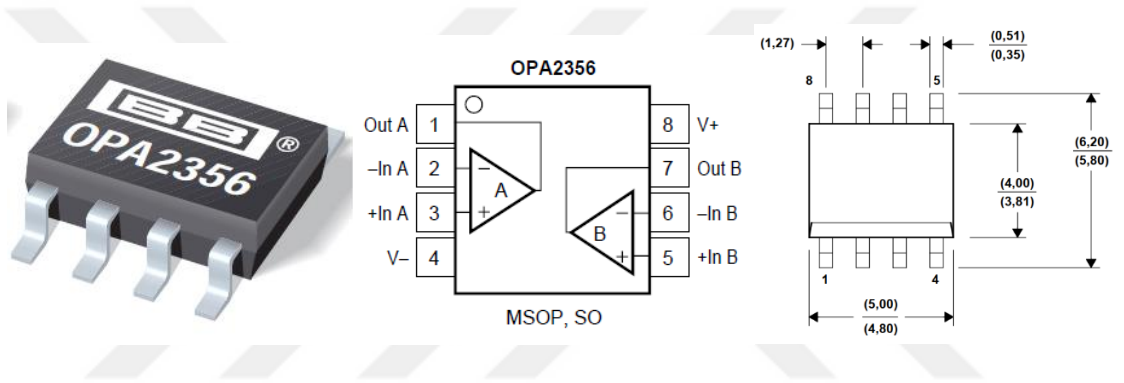
3.3.6. Akım–Gerilim Dönüştürücü Yükselteç Devresi

Fotodiyot üzerine düşen ışık yoğunluğu değişimlerinin sebep olduğu akım hareketlerinin gerilim işaretlerine dönüştürülebilmesi ve işlenebilmesi için bir işlemsel yükselteç devresi kullanılmaktadır. Geçiş-empedans yükselteç (TIA) olarak bilinen bu devrenin projemizde tasarlanmış değerleri ve yapısı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

**Şekil 3.12:** Geçiş-empedans (akım–gerilim dönüştürücü) yükselteç devresi.

Bu çalışmamızda fotodiyot yükselteci devresi, doğrusal ve daha düşük gürültülü bir çıkış sunabilmesi amaçlı fotovoltaik mod çalışacak şekilde bağlanmıştır [52].

Geçiş-empedans yükselteç devresinde kullanılan işlemsel yükseltecin, işareti doğru ve temiz bir şekilde yükseltebilmesi için özellikle girişlerinin ön akım değerlerinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca düşük gürültülü ve yüksek çalışma frekansına sahip olması da gerekmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda projemizde kullanmak üzere Texas Instruments firmasının iki kanallı OPA2356 ürünü tercih edilmiştir. Şekil 3.13'te OPA2356'nın içyapısı ve bacak bağlantıları gösterilmiştir. İlave olarak başlıca önemli parametreleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13: OPA2356 kılıfı, içyapısı, bacak bağlantıları ve boyut bilgileri (mm) [39].

Tablo 3.4: OPA2356 teknik özellikleri [39].

PARAMETRE	DEĞER
Çalışma Gerilimi	2.5 V – 5.5 V
Frekans	200 MHz
Çıkış Gerilimi Değişim Hızı	360 V/ μ s
Giriş Gürültü Gerilim Yoğunluğu	5.8 nV/ \sqrt{Hz}
Giriş Ön Akımı	3 pA
Kılıf	SO-8

Tasarlanan geçiş-empedans yükselteç devresinde kullanılan C23 referanslı kondansatör 1 pF olarak seçilmiştir. Bu kondansatörün olabildiğince küçük değeri seçilmesi önem taşımaktadır. Bu kapasite değeri yüksek hızlı işaretlerde işaretin yükselme ve azalma zamanlarına doğrudan etkiyerek bant genişliğine ve işaret şekline etki etmektedir.

Fotodiyot üzerinden ışık etkisi ile geçen akımın gerilime dönüşebilmesi için kullanılan direnç R24 referanslı dirençtir ve değeri 180 kΩ olarak seçilmiştir. Bu değeri fotodiyot üzerinden akan akımın 180 bin kat arttırılarak devreye iletilmesini sağlamaktadır. Bu duruma etkiyen formül aşağıda belirtilmiştir.

$$V_{out} = I_D R_F \quad (3.3)$$

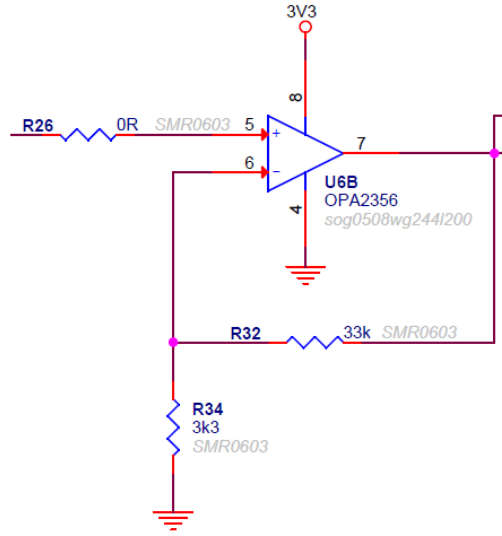
Formülde kullanılan V_{out} işlemsel yükseltecin çıkışını, I_D fotodiyot üzerinden akan akımı ve R_F ise geri besleme direnci olan şemadaki R24 referanslı direnci simgelemektedir.

3.3.7. Evirmeyen Yükselteç Devresi

Geçiş-empedans yükselteç ile optik işaretlerin gerilim işaretlerine dönüştürülmesinden ve bir miktar yükseltilmesinden sonra evirmeyen yükselteç yapısı ile elde edilen işaretler güçlendirilir. Ayrıca yüksek giriş direnci sağlayan bir yapı olduğu için geçiş-empedans yükseltecin sonrasında kuplaj devresi olarak da kullanılmaktadır. Çalışmamızda kullandığımız OPA2356 işlemsel yükselteci kılıfı içerisinde iki kanal yükseltece sahip olduğu için ikinci kanalı evirmeyen yükselteç olarak kullanılmıştır. Projede kullanılan yükselteç devre tasarımı Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Evirmeyen yükselteç kazanç hesabı için kullanılan formül aşağıda belirtilmiştir.

$$Gain = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

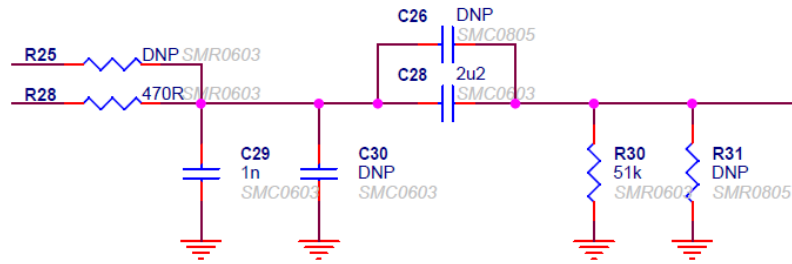
Bu formülde R_2 tasarlanan devredeki 33 kΩ'luk direnci, R_1 ise 3.3 kΩ'luk direnci simgelemektedir. Formülde değeri hesaba katıldığında 11 kat kazanç sağlayan bir yükselteç tasarımı yapılmıştır.



Şekil 3.14: Evirmeyen yükselteç tasarımı.

3.3.8. Bant Geçiren Süzgeç Devresi

Yükselteç devreleri ile kuvvetlendirilen işaret bir adet pasif alçak geçiren süzgeç devresinden ve bir adet de yüksek geçiren süzgeç devresinden geçirilmektedir. Bu şekilde bütününde bant geçiren bir süzgeç tasarımı uygulanmıştır. Şekil 3.15’de tasarlanan bant geçiren süzgeç şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Bant geçiren süzgeç devresi.

Alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeç tasarımlarında kullanılan, süzgecin frekans tepkisi formülü aşağıda belirtilmiştir.

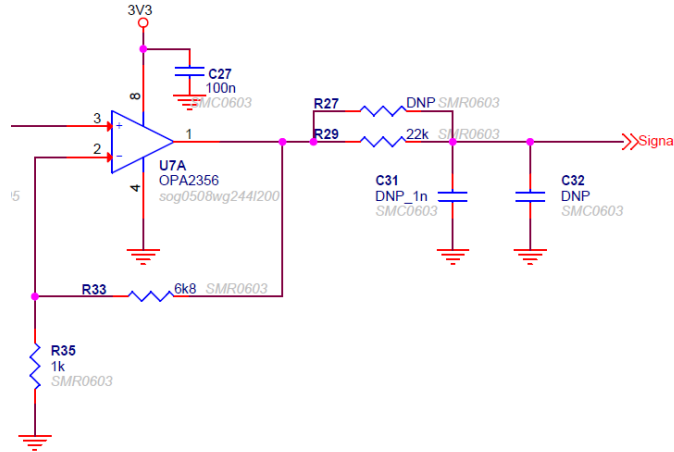
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.5)$$

Alçak geçiren süzgeç için kullanılan direnç değeri 470 Ω , kondansatör değeri ise 1 nF'tır. Bu şekilde hesap yapıldığında süzgeç 338 kHz altındaki frekansları geçirecek şekilde tasarlanmıştır.

Aynı şekilde yüksek geçiren süzgeç için kullanılan direnç değeri 51 k Ω , kondansatör değeri ise 2.2 μ F'tır. Bu şekilde hesap yapıldığında süzgeç 1.5 Hz üzerindeki frekansları geçirecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca bu devrede seri kullanılan kondansatör aracılığı ile yükselteç katlarından kaynaklanan DC bileşenler bloke edilmiştir.

3.3.9. İkinci Yükselteç Devresi

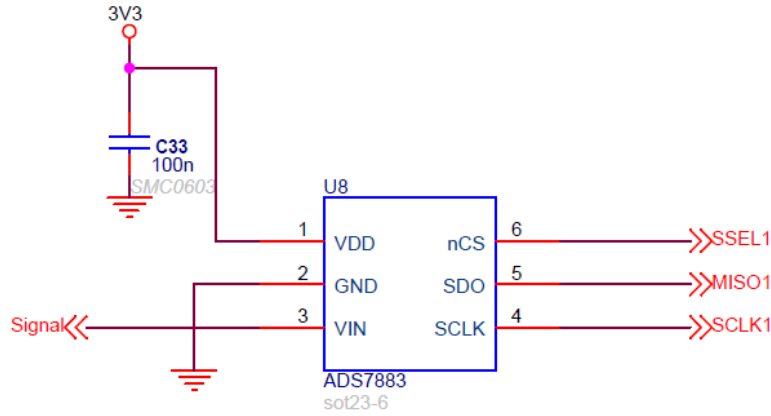
Süzülmüş ve kuvvetlendirilmiş işaret, tasarlanan ikinci evirmeyen yükselteç devresi aracılığı ile bir kez daha kuvvetlendirilir. Bu şekilde analog-sayısal dönüştürücünün ihtiyaç duyduğu akım sağlanmış olup işaret üzerinde buna bağlı bozulmalar ortadan kaldırılmıştır. Bu tasarımda 6.8 k Ω ve 1 k Ω direnç kullanarak işaret 7.8 kat kuvvetlendirilmiştir. Şekil 3.16'da tasarlanan ikinci yükselteç devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.16: İkinci yükselteç devresi.

3.3.10. Analog–Sayısal Dönüştürücü

Optik kanal üzerinden alıcıya gelen optik işaretler elektrik işaretlerine dönüştürülüp kuvvetlendirildikten ve süzgeç devresi ile süzöldükten sonra mikrodnetleyicinin algılayabileceği sayısal verilere dönüştürölmektedir. Bu projemizde analog-sayısal dönüştürücü olarak Texas Instruments firmasının ADS7883 isimli ürünü kullanılmıştır. SPI arayüzü üzerinden bağlanan bu dönüştürücü entegre devre için kullanılan şematik gösterim şekil 3.17’de gösterilmiştir. SPI arayüzü, hızlı, iki yönlü ve eş zamanlı bir seri haberleşme türü olup birden fazla birim arasında seçim yapılarak iletişim sağlanan bir protokole sahiptir. ADS7883 analog–sayısal dönüştürücü için kritik parametreler Tablo 3.5’te belirtilmiştir.



şekil 3.17: Analog–sayısal dönüştürücü devre şeması.

Tablo 3.5: ADS7883 teknik verileri [40].

PARAMETRE	DEĞER
Örnekleme Frekansı	2 MHz @ $2.5 V < V_{DD} < 4.5 V$
Çözünürlük	12 bit
Çalışma Gerilimi	2.7 V – 5.5 V
SPI Saat Frekansı	32 MHz @ $2.5 V < V_{DD} < 4.5 V$
Kılıf	SOT23-6

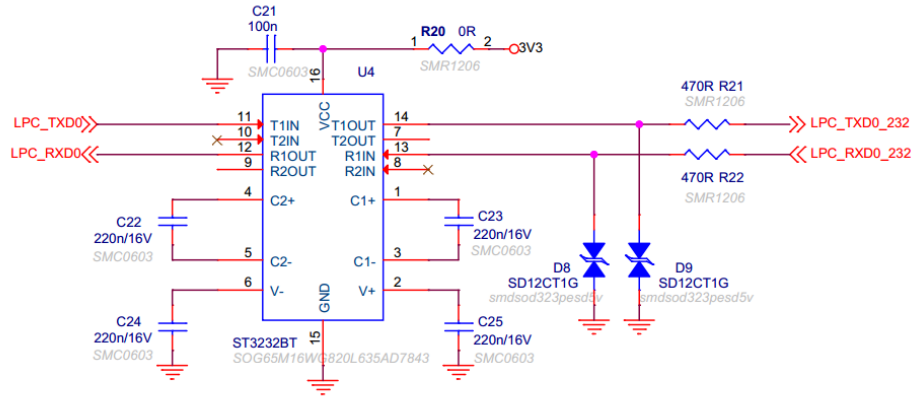
3.3.11. Seri Port Haberleşme Devresi

Alıcı ve verici devrelerin işaret alışverişlerini tetikleyebilmek, buna ilaveten iletilen verilerin kontrolünün sağlanabilmesi için bilgisayar arayüzünü kullanılabilmek amaçlı devrelerimizde seri port haberleşme RS232 standardı üzerinden yapılmaktadır. Yaklaşık olarak 15m haberleşme mesafesi sunan bir haberleşme protokolü olduğu için çok uzak mesafeler arası iletişimin olmadığı durumlarda rahatlıkla kullanılabilir.

Asenkron bir haberleşme türü olan RS232’de işaret seviyeleri 12 V seviyelerine çıkartılarak, bir gönderici (transmit) ve bir alıcı (receive) hat üzerinden iki yönlü iletişime olanak tanınmaktadır. Haberleşme hatlarının yanı sıra cihazlar arası selamlaşma operasyonu için de içerdiği hatlar olmasına karşın iletişim için yalnızca bu iki hat yeterli olmaktadır. Haberleşme belirlenen saniyedeki sembol gönderim oranı (baudrate) ile tanımlanmaktadır. Mikrodenetleyicinin asenkron seri haberleşme arayüzü üzerinden gerekli işaret seviyelerinin elde edilmesini sağlayan sürücü entegreler aracılığıyla haberleşme yapılmaktadır. Ayrıca mikrodenetleyiciler için hazırlanan programların yüklenebilmesi yine RS232 haberleşmesi ile özel olarak tanımlanmış seri port hattı (UART0) üzerinden olmaktadır.

Bu projemizde RS232 dönüştürücü olarak ST Microelectronics firmasının ST3232 isimli ürünü kullanılmaktadır. Yapısında iki kanal barındıran bu sürücü entegresi 3 V - 5.5 V besleme gerilim aralığında çalışabilen, 400 kbps haberleşme hızına olanak sağlayan bir üründür [41]. Bilgisayarlar ile alıcı ve verici devreler arasında haberleşme 115200 sembol gönderim oranı ile tanımlanmıştır. Devrelerimiz için tasarlanan RS232 seri haberleşme devresi Şekil 3.18’de gösterilmektedir.

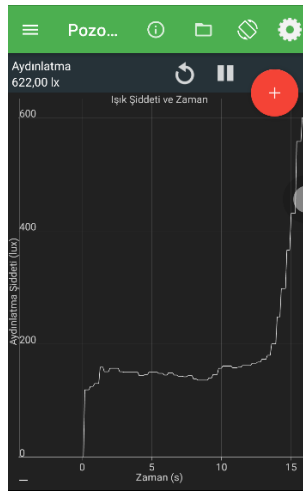
RS232 hatları dış ortama sunulan haberleşme hatları olduğu için konektöre giden hatlarında elektrostatik koruyucu diyotlar kullanılmıştır. Olası bir elektrostatik boşalma durumunda diyotların zarar görüp haberleşmeyi olumsuz etkilemesini önlemek için de diyotların konektör tarafından gelen hatlarına seri 470 Ω direnç ilave edilmiştir.



Şekil 3.18: RS232 standardında haberleşme için tasarlanan seri port devresi.

3.3.12. Işık Şiddeti Ölçüm Aracı

Optik kanal üzerinden haberleşme sağlayan sistemimizi test ederken, haberleşmenin hangi ışık şiddeti altında ve hangi ışık şiddeti değerine kadar yapılabildiğinin takip edilebilmesi için basit bir ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bunun için tasarlanmış hazır cihazlar olmasına karşın Android işletim sistemine ve ışık sensörüne sahip bir cep telefonu da kullanılabilir. Projemizde ışık ölçümleri, cep telefonuna uygulama marketinden indirilen, Physics Toolbox Sensor Suit [42] programı pozometre ölçüm birimi sayesinde yapılmıştır. Şekil 3.19'da bu programa ait görsel bulunmaktadır. Uygulama Huawei firmasının Nova model cep telefonu ile kullanılmıştır.



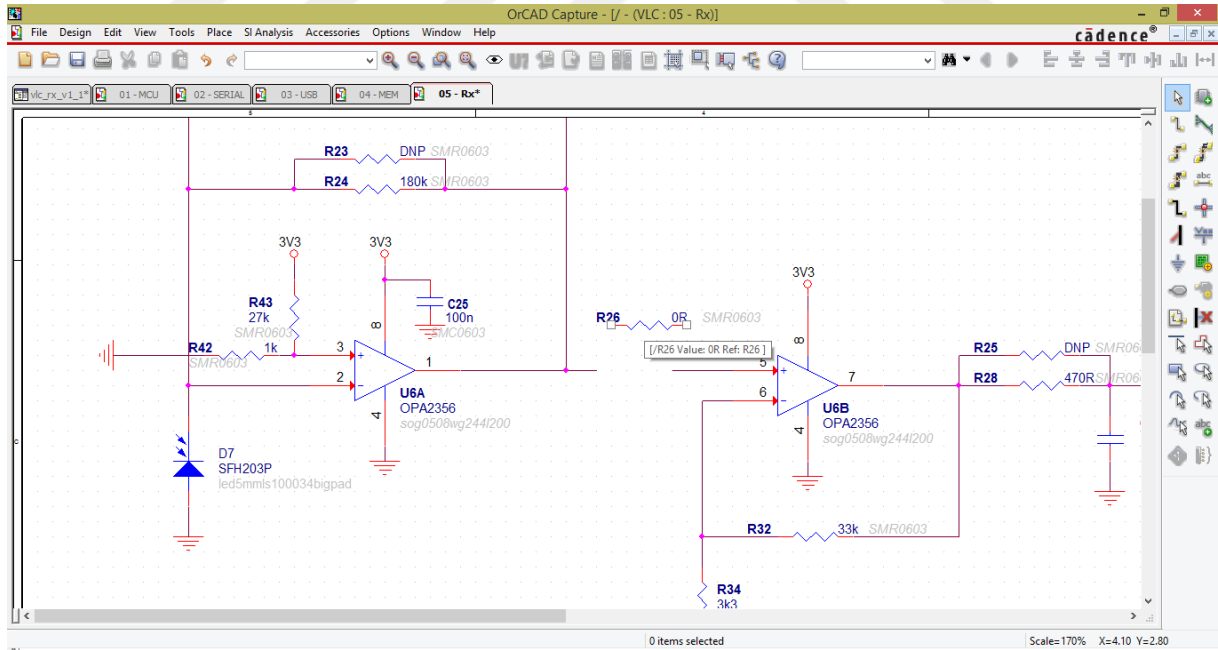
Şekil 3.19: Pozometre uygulaması ile ışık şiddeti ölçümü.

3.3.13. Şema ve Baskılı Devre Çizim Programları

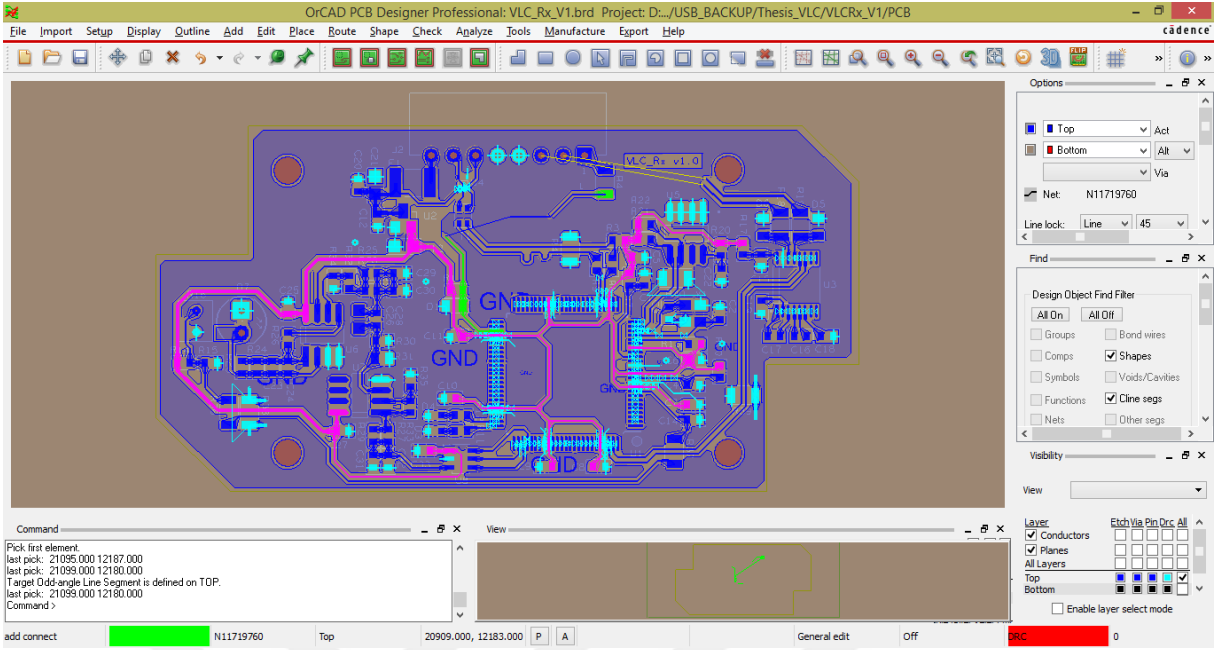
Çok taşıyıcılı görünür ışık haberleşme sistemi için tasarımı yapılan elektronik devreler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi şema çizimi, ikincisi ise baskılı devre çizimidir.

Şema çiziminde gerekli işaret ve besleme bağlantılarının mantıksal olarak hangi noktalar arasında olacağı tanımlanmaktadır. Baskılı devre çiziminde ise bu mantıksal bağlantılar fiziksel olarak gerçeğe dönüştürülmekte ve bakır hatlara aktarılmaktadır.

Projemizde devre çizimlerinde Cadence firmasının Orcad Capture programı, baskılı devre tasarımında ise yine aynı firmanın Orcad PCB Editor programı kullanılmıştır [43]. İleri seviye devre tasarımlarına olanak sağlayan bu programlar ile çok katmanlı baskılı devre tasarımları, çoklu ve diferansiyel hat çizimleri, hat boyu eşitlemesi ve empedans hesaplarına kadar birçok konuda tasarım kolaylığı sağlamaktadır. Şekil 3.20’de Orcad Capture programına, Şekil 3.21’de de Orcad PCB Editor programına ait proje tasarım görselleri gösterilmektedir.



Şekil 3.20: Orcad Capture programı ile şema tasarımı.



Şekil 3.21: Orcad PCB Editor programı ile baskılı devre tasarımı.

3.4. YAZILIM TASARIMI

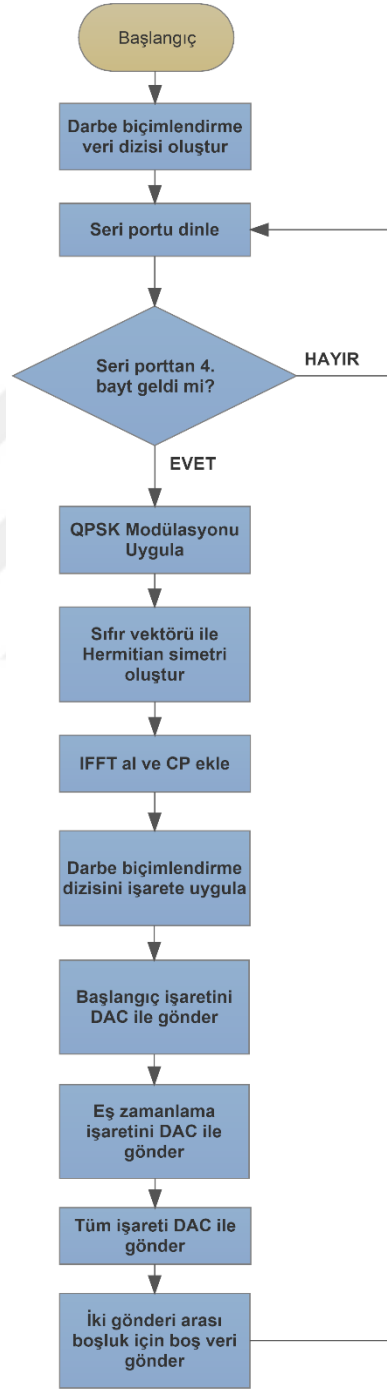
Bu bölümde tasarladığımız donanım üzerinde çalışan algoritmalar, yazılım tasarım ve test aşamalarında kullanılan programlar tanıtılacaktır.

3.4.1. Verici Algoritması

Mikrodenetleyici çalıştığı anda öncelikle gerekli çevresel birimler başlatılır. Bu noktada darbe biçimlendirme için kullanılacak veri dizisi bir fonksiyon ile üretilmektedir. Aynı darbe biçimlendirme verisi her bilgi gönderildiğinde tekrar kullanılacağı için her seferinde hesaplanarak zaman kaybına yol açmayacak şekilde tasarlanmıştır.

Görünür ışık ile haberleşme sistemimiz seri port üzerinden gelen veriler ile tetiklenerek çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bilgisayar üzerinden seri port aracılığı ile gönderilen 4 bayt bilgi verici devreyi tetiklemektedir. Alınan veri bitleri QPSK modülasyonu ile sembollere dönüştürülmektedir. Sembolize edilen veriler, ACO-OFDM algoritması uygulanmak üzere önce sıfır doldurulması ve karmaşık sayıların tersinin alınması işlemleri yardımlarıyla Hermitsel simetrisine uygun hale getirilir. Daha sonra elde edilen gerçek işaret verileri IFFT işlemine tabi tutulur ve çevrimsel ön takı eklenir. Öncelikle başlangıç işareti, hemen arkasından

da eş zamanlama işareti gönderilir. Sonrasında darbe biçimlendirme dizisi ile işleme giren veri işareti gönderilir. İki veri gönderim süresi arasında girişim olmaması için boş veri gönderimi yapılmaktadır. Şekil 3.22’de verici devre için tasarlanan algoritma akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.22: Verici algoritma akış diyagramı.

3.4.2. Alıcı Algoritması

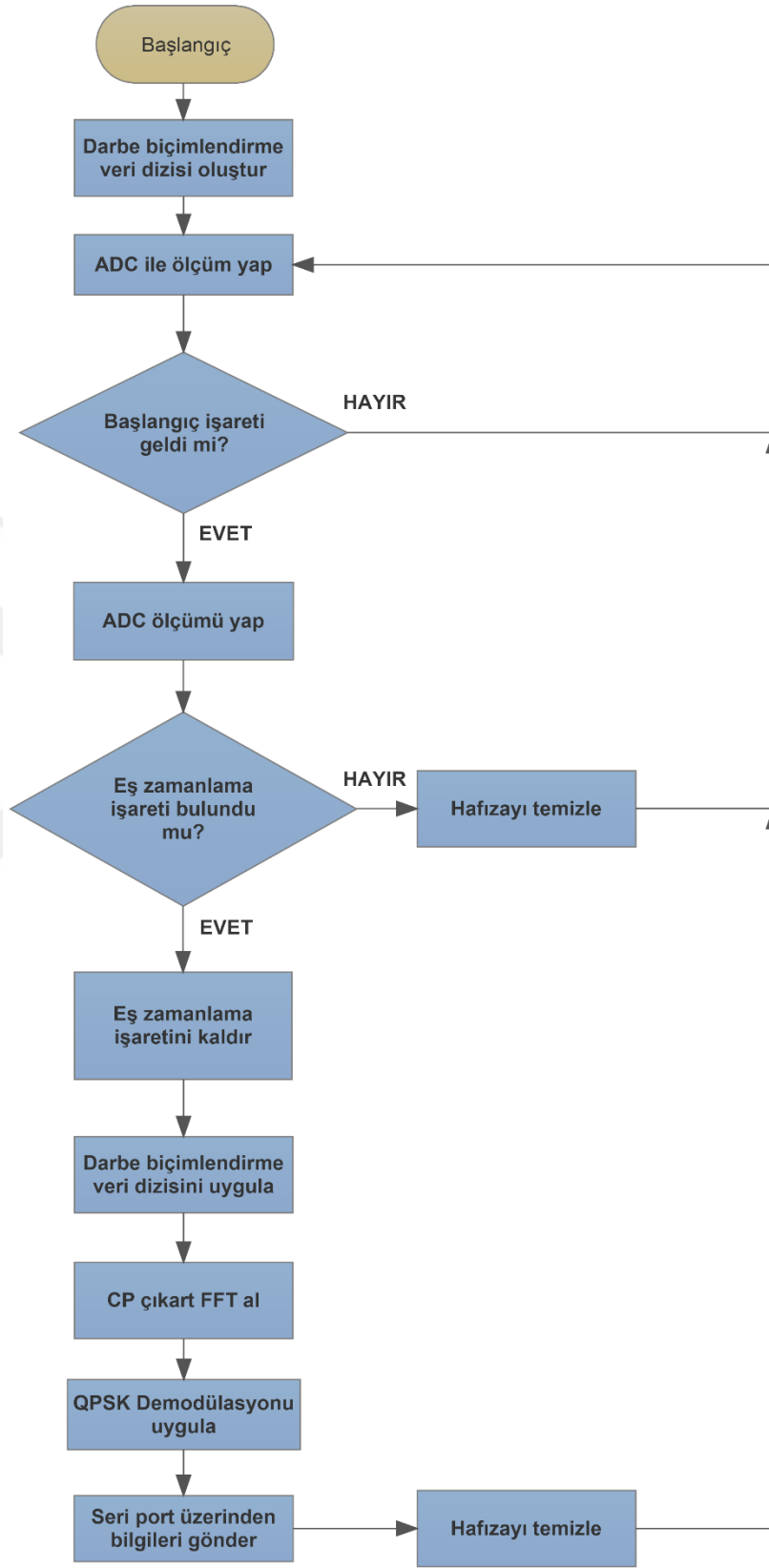
Alıcı devrede de mikrodnetleyici çalışır konuma geçtiği anda önce çevresel birimleri başlatır sonrasında da darbe biçimlendirme veri dizisini tek sefere mahsus olmak üzere hesaplar.

Mikrodnetleyici yazılımı, sistemi başlattıktan sonra sürekli olarak SPI analog–sayısal dönüştürücü aracılığı ile fotodiyot üzerindeki hareketlilikleri tarayacak şekilde tasarlanmıştır. Sürekli olarak ölçüm yapar ve tanımlanmış olan başlangıç işaretinin var olup olmadığını kontrol eder. Başlangıç işareti gelmiş ise ardından belirlenen örnek sayısı kadar ölçüm tekrar alınır. Bu alınan ölçüm içerisinde eş zamanlama bilgisi içeren veri olup olmadığı araştırılır. Eğer eş zamanlama işareti yoksa sağlıklı bir veri gelmediği kararına varılır ve başlangıç ölçüm durumuna geri dönlür. Eğer eş zamanlama bilgisi var ise bu veri, işaret verisinden ayıklanır ve darbe biçimlendirme veri dizisi ile işleme sokulur. Çevrimsel ön takı verisi de çıkartılan işaretin FFT dönüşümü alınır. Çıkan sonuca QPSK demodülasyonu uygulanmasıyla semboller veri bitlerine geri dönüştürülür ve elde edilen veri bitleri seri port aracılığı ile dış ortama aktarılır. Veri iletimi tamamlandığı için mikrodnetleyici bir sonraki başlangıç işaretini aramak üzere ilk ölçüm durumuna geri döner. Şekil 3.23'te alıcı devresi üzerinde çalışan algoritmaya ait akış diyagramı gösterilmektedir.

Alıcı devresinde kullanılan SPI analog–sayısal dönüştürücü için örnekleme zamanını ayarlamak için zamanlayıcı kurulmuştur. Zamanlayıcı değeri ayarlanan değere eşitlendiği durumda SPI üzerinden veri okuması yapılmaktadır. Bunun için kullanılan hesaplama formülü aşağıda belirtilmiştir [32].

$$R_{VALUE} = (CCLK/Tick) - 1 \quad (3.6)$$

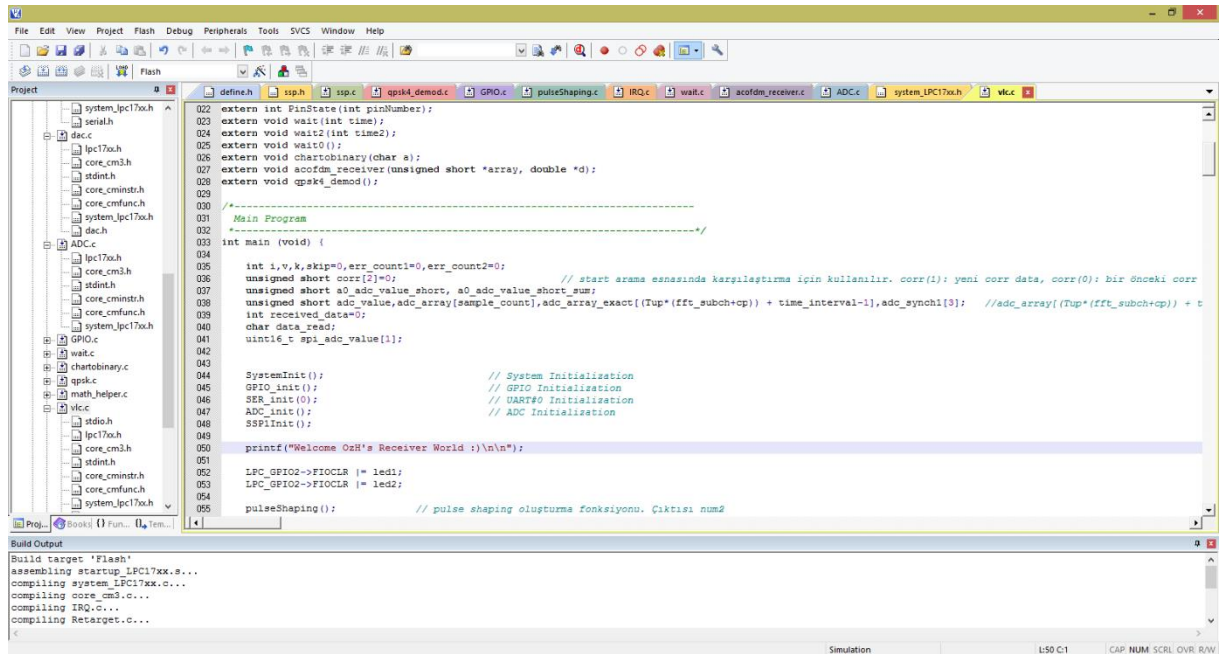
Burada R_{VALUE} hesaplama sonucu saklayıcıya kayıt edilecek veriyi, $CCLK$ mikrodnetleyicinin çalışma frekansını ve $Tick$ ise saniyedeki örnekleme sayısını ifade etmektedir. LPC1768 mikrodnetleyici 100 MHz çalışma frekansında kullanılacak şekilde ayarlanmıştır. Bu durumda saniyede 200000 adet örnek almak için R_{VALUE} değerinin 499 olması gerekmektedir. Bu hesap bize 5 μ s'de bir SPI üzerinden değer okuyabileceğimizi göstermektedir.



Şekil 3.23: Alıcı algoritma akış diyagramı.

3.4.3. Keil μ Vision

ARM platformunda yazılım geliştirmek için birçok firma kendine özgü yazılım geliştirme ortamı sunmaktadır. Bu çalışmamızda Cortex-M3 çekirdeğine sahip LPC1768 mikrodenetleyici için Keil firmasının μ Vision programı kullanılmıştır. Geleneksel C yazılım dili kullanılmaktadır. Keil μ Vision, ARM mimarisine sahip mikrodenetleyiciler için gerçek zamanlı işletim sistemi kodlamasına imkan sağlayan, program hatalarını giderme, test etme ve doğrulama konularında büyük kolaylıklar sağlayan bir programdır [44]. Şekil 3.24'te Keil μ Vision programına ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 3.24: Keil μ Vision program görseli.

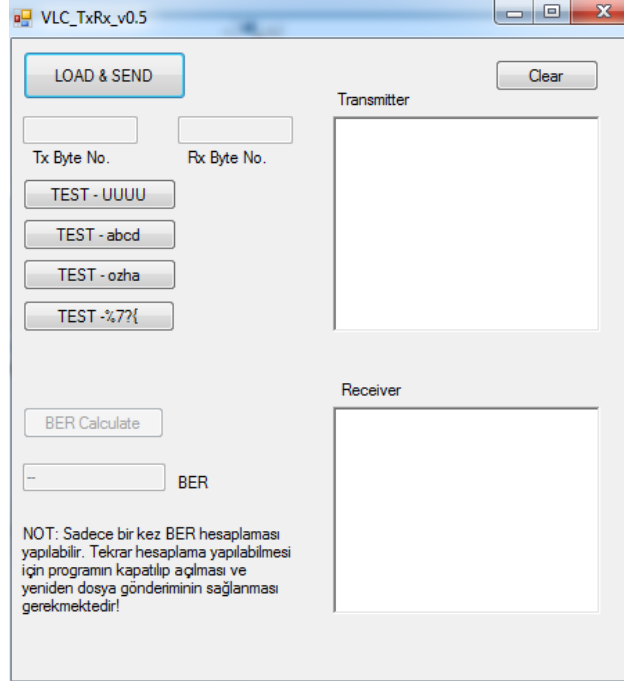
3.4.4. CMSIS

CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) [45], Cortex mikrodenetleyiciler için bir yazılım arayüzü standardıdır. Cortex çekirdeğine sahip işlemciler üzerinde üreticiye ve işlemciye bağımlı olmaksızın kolaylıkla gerçek zamanlı işletim sistemi kullanabilmeye olanak sağlamaktadır. Özellikle CMSIS DSP (sayısal işaret işleme) kütüphanesinin sunduğu işaret işleme algoritmaları oldukça fayda sağlamaktadır. Projemizde kullanılan IFFT ve FFT gibi algoritmalar, CMSIS DSP kütüphanesi kullanımıyla gerçekleştirilmiştir.

3.4.5. C# ile Hazırlanan Hata Tespit Programı

Görünür ışık haberleşme sistemimizin test ortamı kurulduğunda veri iletiminin otomatik olarak uzun veriler ile yapılması ve bu verilerin sağlıklı ulaşım ulaşımadıklarına dair hata kontrolünün yapılabilmesi için C# programı ile bir arayüz tasarlanmıştır.

Sistem tek bilgisayar üzerinden kontrol edilecek şekilde bağlandığında bu arayüz programı sayesinde bir seri port üzerinden gönderilen veriler bir başka seri port üzerinden alınmaktadır. Gönderilecek veriler bilgisayar üzerinde herhangi bir konumda metin dosyası formatında kaydedilmektedir. Arayüz başlatıldığında otomatik olarak bir alıcı metin dosyası oluşturulmaktadır. Gönderici dosyasındaki verilerin tümü bayt-bayt seri porta gönderilmekte ve kanal üzerinden iletdikten sonra alıcı devre aracılığı ile diğer seri porttan gelerek alıcı dosyaya bayt-bayt kaydedilmektedir. Program gönderilen ve alınan veri miktarını gösterebilmektedir. Veri iletimi tamamlandıktan sonra hata oranı butonu aracılığı ile gönderilen ve alınan veri dosyaları bit seviyesinde karşılaştırılmaktadır. Bulunan hatalar yine bit seviyesinde kullanıcıya gösterilebilmektedir. Eğer sistemde eksik veri alınırsa program bunu gösterebilmekte ancak bu durum altında hata oranını tespit edememektedir. Şekil 3.25'te hata tespit programına ait görsel bulunmaktadır.



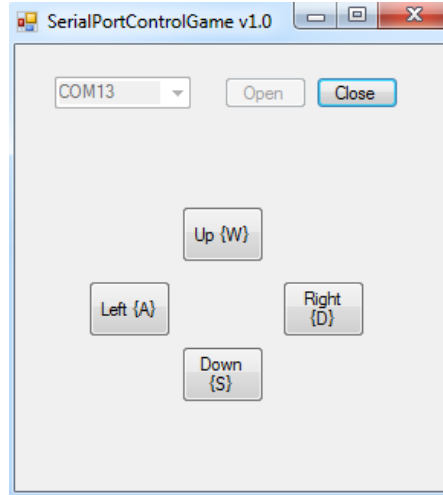
Şekil 3.25: C# ile tasarlanan hata tespit programı.

3.4.6. C# ile Hazırlanmış Yılan Oyunu

Görünür ışık haberleşme sistemimizin test aşamalarından biri de iki karşılıklı bilgisayar arasında veri iletimi ile kontrol sağlamak üzerine kurgulanmıştır. Bu senaryoda ilk bilgisayar üzerinde kullanılan klavye tuşları ile optik kanal üzerinden ikinci bilgisayardaki yılan oyunu kontrol edilmektedir. Bunun için C# programı ile hazırlanmış açık kaynak kodlu bir yılan oyunu temin edilmiştir [46]. Bu programa ilave olarak, gönderilen verileri seri port üzerinden alıp tanımlayabilmesi için kodlar eklenmiştir.

3.4.7. C# ile Hazırlanmış Oyun Kontrol Programı

Sistem testlerinde kullanılmak üzere eklemeler yapılmış yılan oyununa kontrolleri göndermek için C# programı kullanılarak bir kontrol program tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu program ile seçilen uygun pozisyondaki seri port kanalı üzerinden basılan butonlar ya da özel atanmış klavye tuşları sayesinde seri porttan verici devreye tanımlanmış veriler gönderilmektedir. Alıcı devre aracılığı ile seri port üzerinden düzenlenmiş yılan oyununa gelen bu veriler, oyun üzerinde yılanın hareketlerini kontrol etmeyi sağlamaktadır. Şekil 3.26'da oyun kontrol programına ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 3.26: C# ile tasarlanan oyun kontrol programı.

3.5. MEKANİK TASARIM

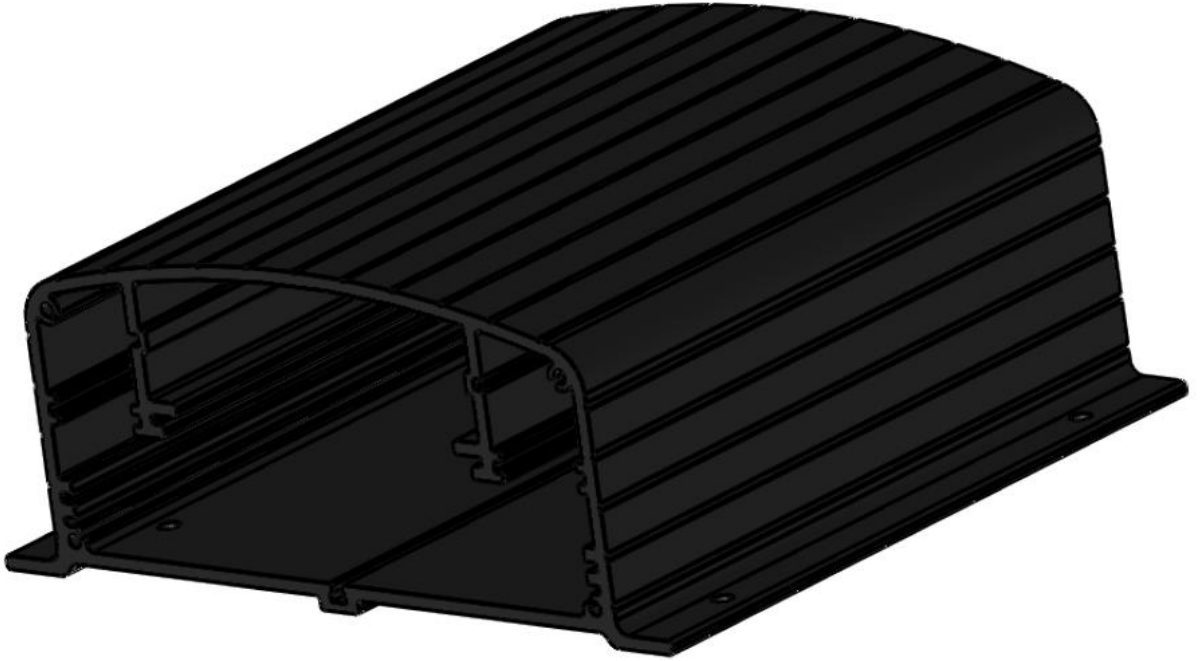
Bu bölümde alıcı ve verici devreleri için hazırlanan kutu tasarımları, malzemeleri ve kullanılan programlardan bahsedilmektedir.

3.5.1. Verici Kutu Tasarımı

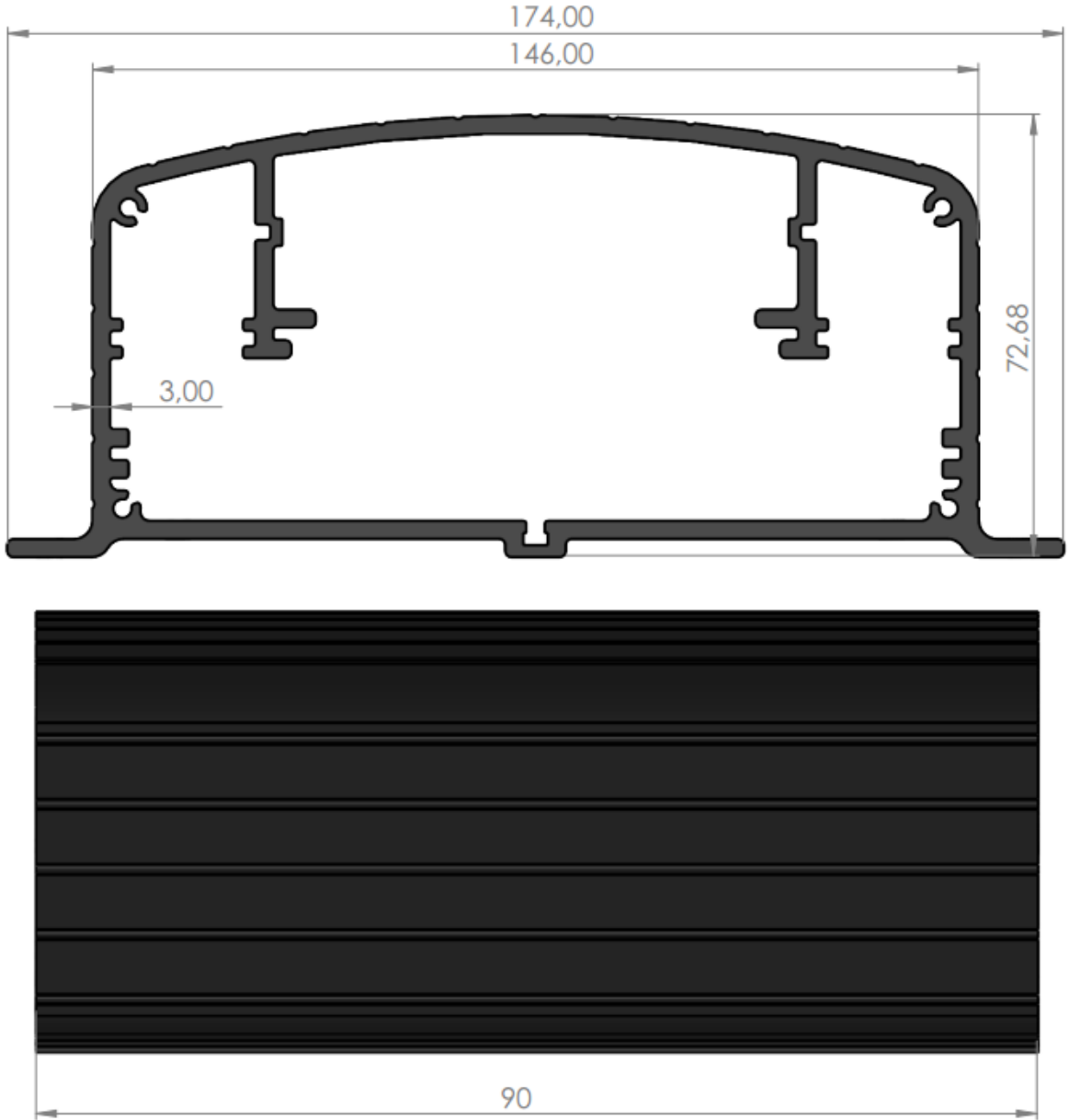
Verici devresi üzerinde bulunan LED ışık kaynağının ve transistörün üzerinde kalacak olan ısı miktarı göz önünde bulundurularak içine montajı yapılan kutu tasarımında alüminyum kullanılmıştır.

Geniş alüminyum yüzeyleri sayesinde ısı dağıtımını kolaylaştıracığı için devrenin güvenli bir çalışma noktasında kalması sağlanacaktır. Verici kutusu alüminyum çekme yöntemiyle hazırlanmış profilden kesilmek suretiyle elde edilmektedir. Ayrıca devrelerin montajının sağlanabilmesi için farklı noktalarda vida montaj delikleri de elde açılmıştır.

Verici kutu tasarımında profil çekmeye uygun 6063 alüminyum serisi malzeme kullanılmıştır [47]. Şekil 3.27’de tasarlanan alüminyum verici kutusu görseli, Şekil 3.28’de da kutu boyutlarına ait bilgiler gösterilmiştir.



Şekil 3.27: 6063 alüminyum serisi ile hazırlanmış verici kutu tasarımı.

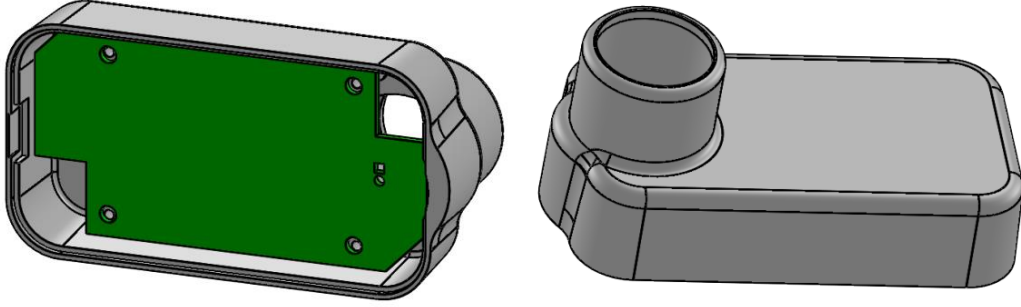


Şekil 3.28: Verici kutusu boyut bilgileri.

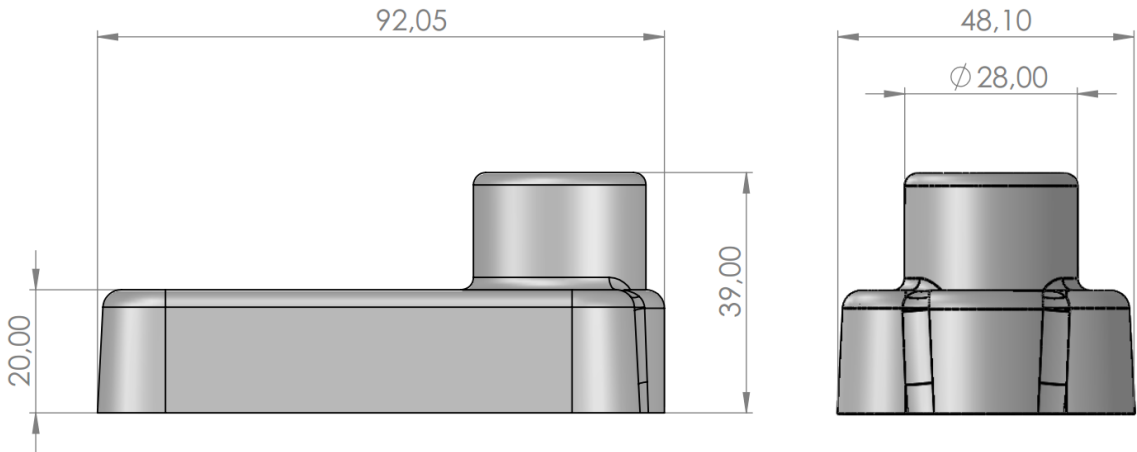
3.5.2. Alıcı Kutu Tasarımı

Alıcı devresinin herhangi bir ısınma probleminin olmaması ve masaüstü kullanım kolaylığı sağlaması amaçlı küçük ve plastik bir kutu tasarımı yapılmıştır. Bu şekilde maliyeti düşürülmekle beraber mobil kullanılabilen bir cihaz tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Alıcı kutu tasarımı Solidworks [48] programı aracılığı ile yapılmış olup prototip üretimi için 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Şekil 3.29’da alıcı kutu tasarımına ait görseller bulunmaktadır. Bunun yanı sıra Şekil 3.30’da alıcı kutusu boyut bilgileri gösterilmektedir.



Şekil 3.29: Alıcı kutu tasarımı.



Şekil 3.30: Alıcı kutusu boyut bilgileri.

Alıcı kutu tasarımına ait prototip üretimi Prusa i3 [49] model 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üretim için Solidworks ile tasarımı gerçekleştirilen kutu verileri Ultimaker Cura yazılımı aracılığı ile 3 boyutlu yazıcının üretim verilerine dönüştürülmüştür. ABS malzeme kullanılarak kutu üretimi, %90 doluluk oranı kullanımı ile 3 saat 7 dakika süre almıştır. Şekil 3.31’de 3 boyutlu yazdırma için kullanılan Ultimaker Cura isimli programa ve kullanılan parametrelere ait görsel gösterilmiştir.

Ultimaker Cura
Dosya Düzenle Görünüm Ayarlar Uzantılar Araç kutusu Tercihler Yardım

cura Hazırla Görüntüle

Prusa i3

Malzeme: ABS

Uyumluluğu Kontrol Et

Yazıcı Ayarları

Önerilen Ayarlar Özel

Katman Yüksekliği: 0.06 0.1 0.15 0.2 0.4 0.6 Daha Hızlı

Yazdırma Hızı: Daha yavaş

Doğru: 90%

Kademeli özelliği etkinleştir

Oluşturma Desteği

Yapı Levhası Yapıştır...

Yazıcı çıktılarını iyileştirmek için yardıma mı ihtiyacınız var?
[Ultimaker Sorun Giderme Klavuzunu Okuyun](#)

Dosyaya Kaydet Hazır

03sa 07dk
11.89m / ~ 31g

Dosyaya Kaydet

Renk şeması Katman kalınlığı Katman görünümü

Extruder
 Geşşlen Göster
 Yardımcı Göster
 Kabuğu Göster
 Doğruyu Göster

1.7976931346623157e+30800

195

PI3_kutu_ust
92.0 x 48.1 x 39.0 mm

Şekil 3.31: 3 boyutlu yazıcı Prusa i3 için kullanılan Ultimaker Cura programı.

3.5.3. Optik Mercek

Alıcı tasarımında kutuya ilave olarak optik mercek de eklenmiştir. Bu yapı ile bir oda içerisinde yerde bulunan alıcı ile standart tavan yüksekliğinde bulunan verici arasında hata oluşumu asgariye indirilerek haberleşme sağlanmaya çalışılmıştır.

Optik lens olarak iKKEGOL firmasının 40x büyütme sağlayan 25 mm'lik mercekleri kullanılmıştır [51]. Merceğin odak noktasının uzun olması dolayısıyla kutunun asimetrik şekilde uzamasını engellemek ve standart yükseklikte veri iletimi sağlayabilmek için fotodiyot, merceğin odak noktasından daha yakın bir mesafeye konumlandırılmıştır.

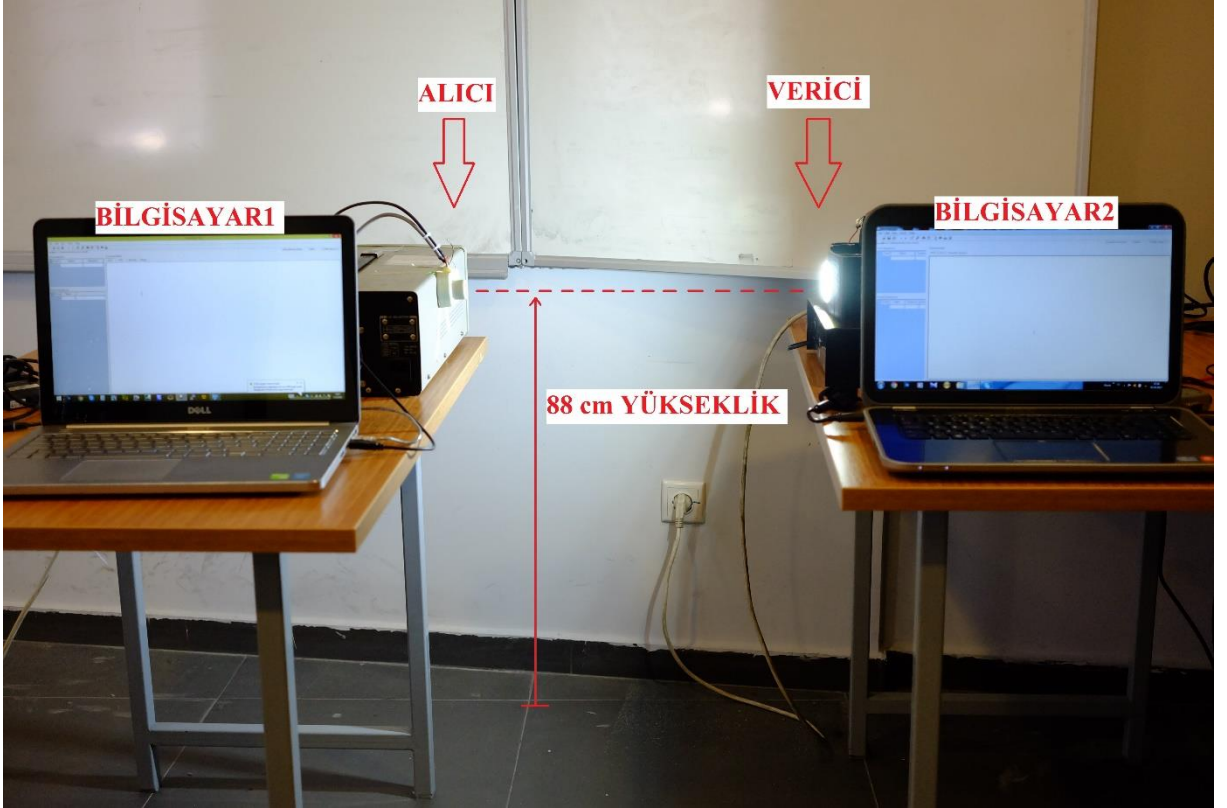


4. BULGULAR

Bu bölümde, tasarlanan çok taşıyıcılı görünür ışık haberleşme sistemimiz için hazırlanan test düzeneğinden, tasarlanan verici ve alıcı devrelerden, ACO-OFDM modülasyonu sonucu oluşan işaretlerden, haberleşme sistemimizin hızından, uygulanan farklı test yöntemlerinden, elde edilen test sonuçlarından, optik merceğin sisteme etkilerinden ve osiloskop yardımı ile ölçülen gerçek zamanlı işaretlerden bahsedilecektir.

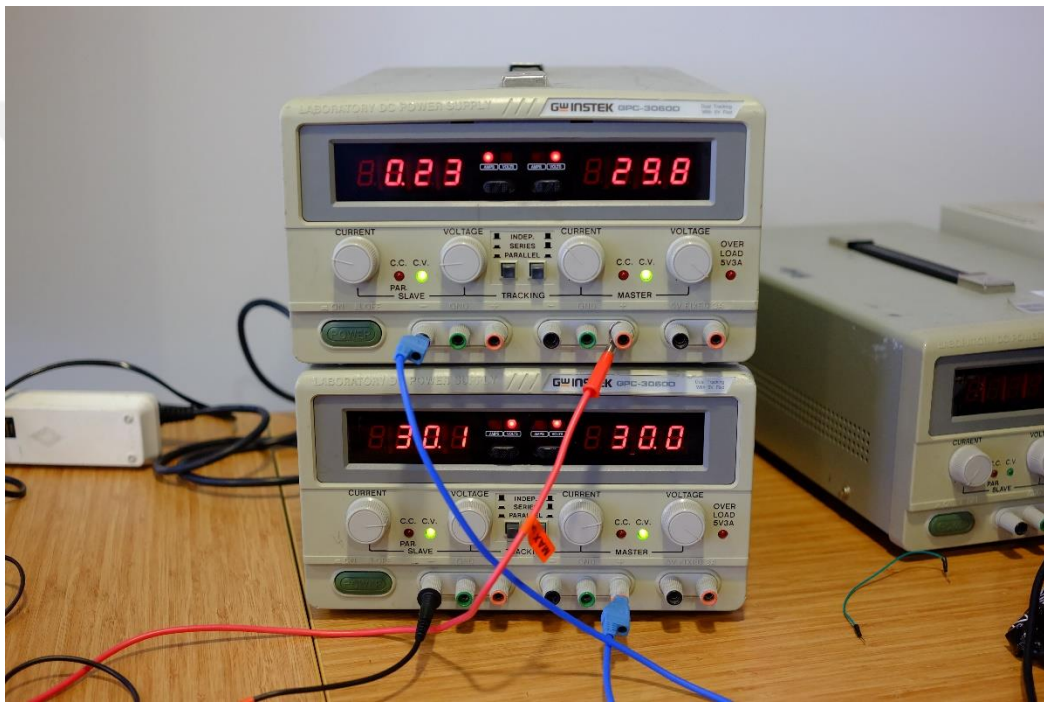
4.1. TEST DÜZENEĞİ

Görünür ışık haberleşme sistemi için hazırlanmış olan test düzeneği Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Düzenek, iki ayrı diz üstü bilgisayarın seri portlarına bağlanan alıcı ve verici devrelerin, yerden 88 cm yükseklikte, yatay ekseninde ve birbirlerini dik açı ile görecek şekilde karşılıklı konumlandırılmaları ile hazırlanmıştır.



Şekil 4.1: Test düzeneği.

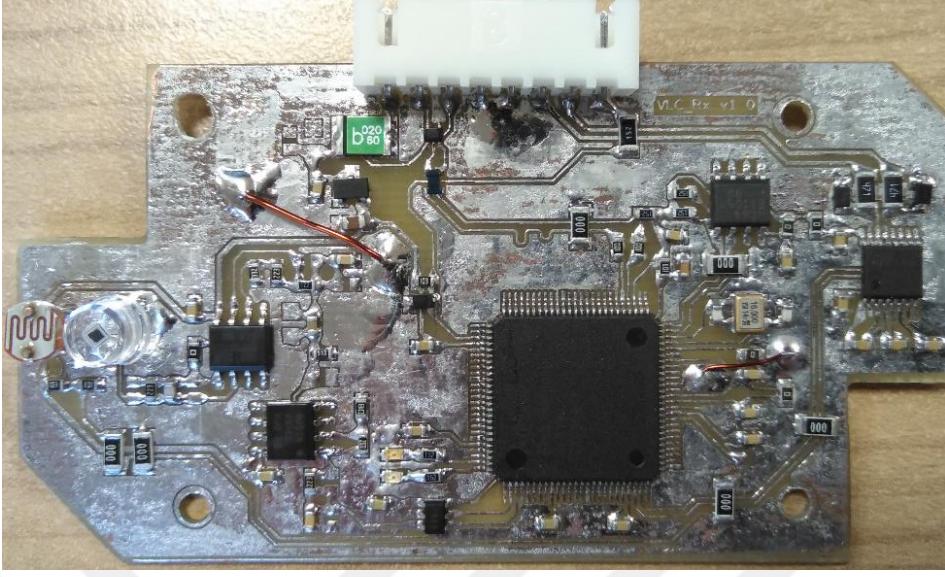
Alıcı devre, bilgisayarın USB portu üzerinden 5 V DC ile beslenecek şekilde tasarlanmış ve hazırlanan kablo yardımıyla bilgisayara bağlanmıştır. Verici devrede ise 12 V adaptör ile mikrodenetleyici ve sistem beslenirken LED grubunu sürmek için 120 V DC güç kaynağı kullanılmıştır. Bu besleme iki adet aynı tip güç kaynağının birbirine seri bağlanması ile elde edilmiştir. Şekil 4.2’de çalışma esnasında güç kaynaklarının bağlantı şekli, ayarlanan gerilim seviyesi ve çekilen akım gösterilmiştir.



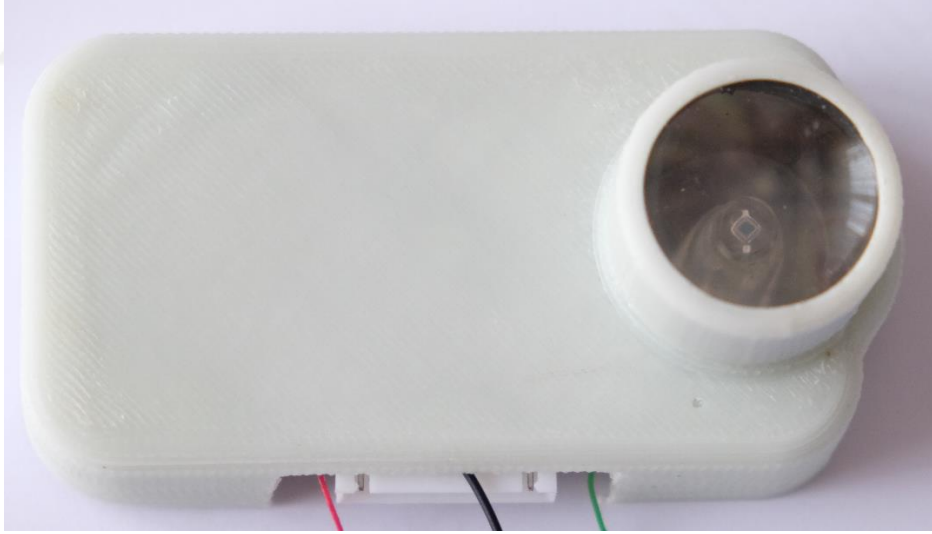
Şekil 4.2: Verici LED için kullanılan güç kaynakları ve güç değerleri.

4.2. ALICI VE VERİCİ DEVRE TASARIMLARI

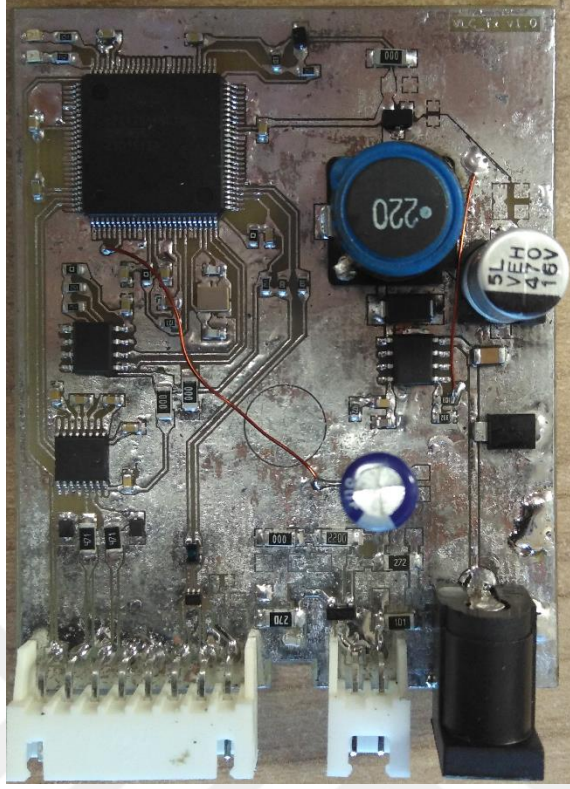
Tasarımı tamamlanan ve baskılı devreleri hazırlanıp malzemeleri dizilen alıcı ve verici devrelerine ait kutusuz ve kutulu görseller aşağıda gösterilmektedir. Verici devrede transistör yükselteç devresi ayrı bir delikli kart ile hazırlanmıştır.



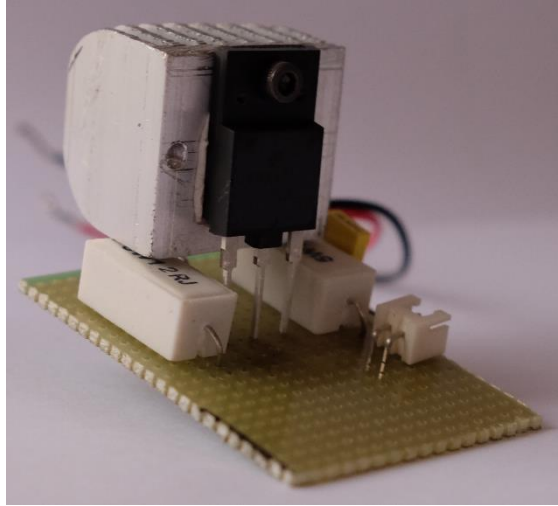
Şekil 4.3: Alıcı devre.



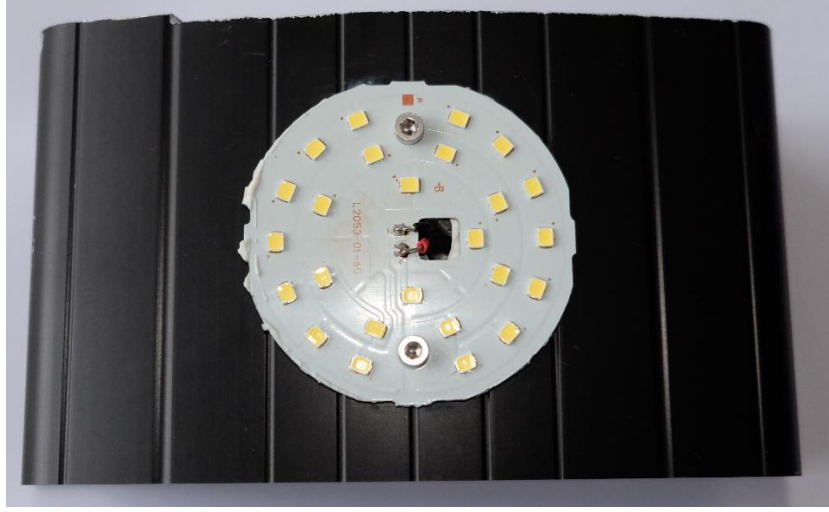
Şekil 4.4: Alıcı devrenin kutulu görseli.



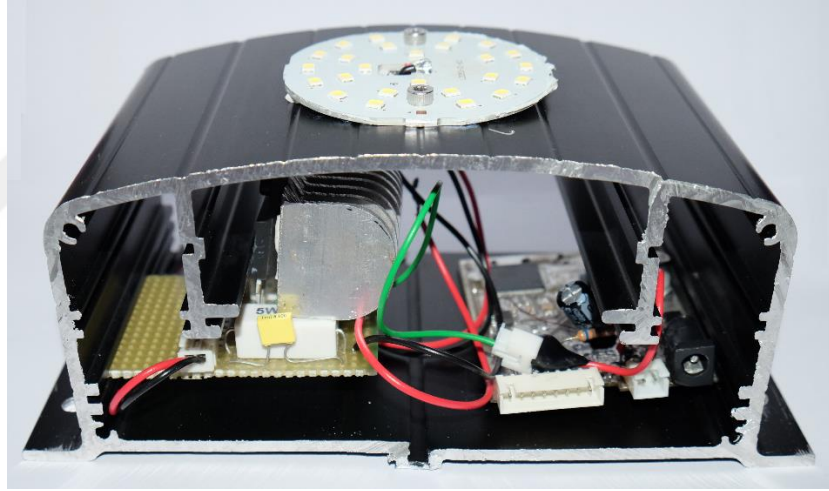
Şekil 4.5: Verici devre.



Şekil 4.6: Transistör yükselteç devresi.



Şekil 4.7: Verici devrenin kutulu görseli.



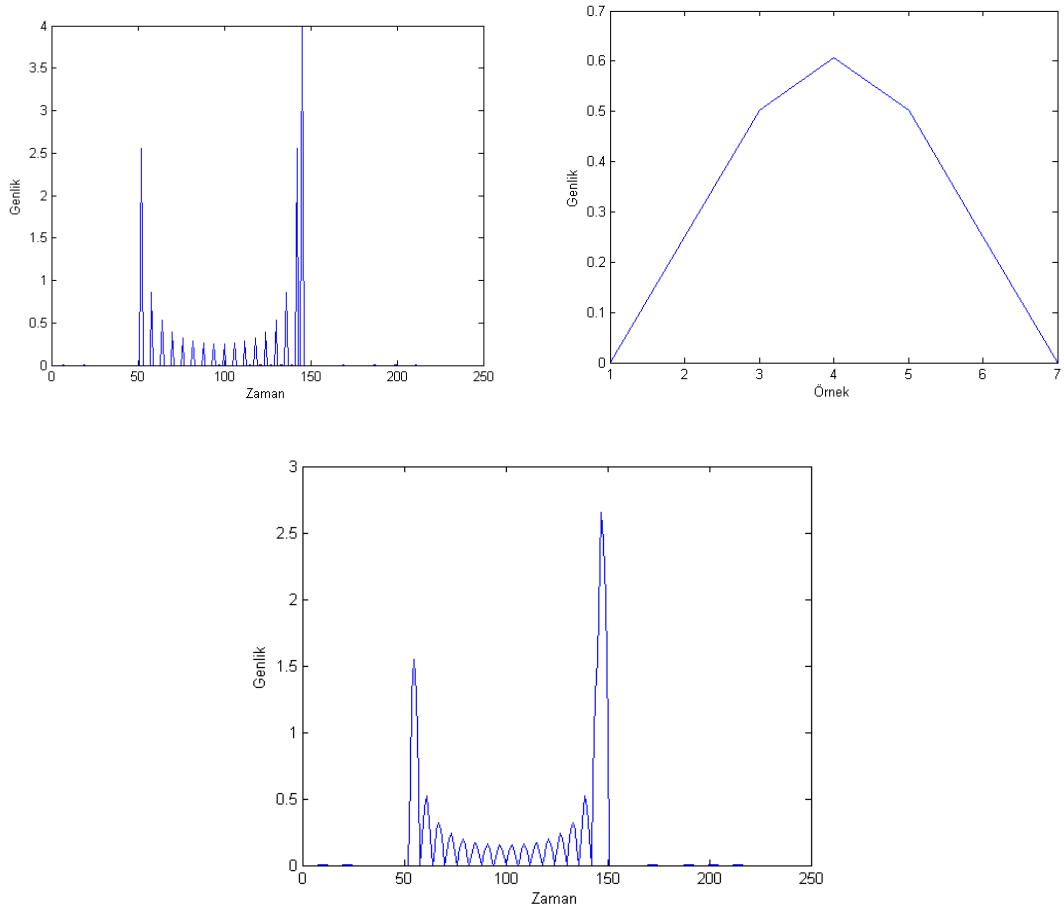
Şekil 4.8: Verici devrenin kutu içerisindeki yerleşimi.

4.3. ACO-OFDM MODÜLASYONU VE DARBE BİÇİMLENDİRME

Görünür ışık ile haberleşme sistemimizde ACO-OFDM modülasyonu kullanılarak oluşturulan işaretin, darbe biçimlendirme veri dizisinin ve darbe biçimlendirme uygulanması sonucu sayısal-analog dönüştürücü birimine gönderilen işaretin Matlab çıktıları sırası ile Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Burada örnek olarak bilgisayardan 4 baytlık “UUUU” karakter dizisi gönderilmiştir. Uygulanan ACO-OFDM modülasyonuna ve darbe biçimlendirme verisine ait parametreler ise Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

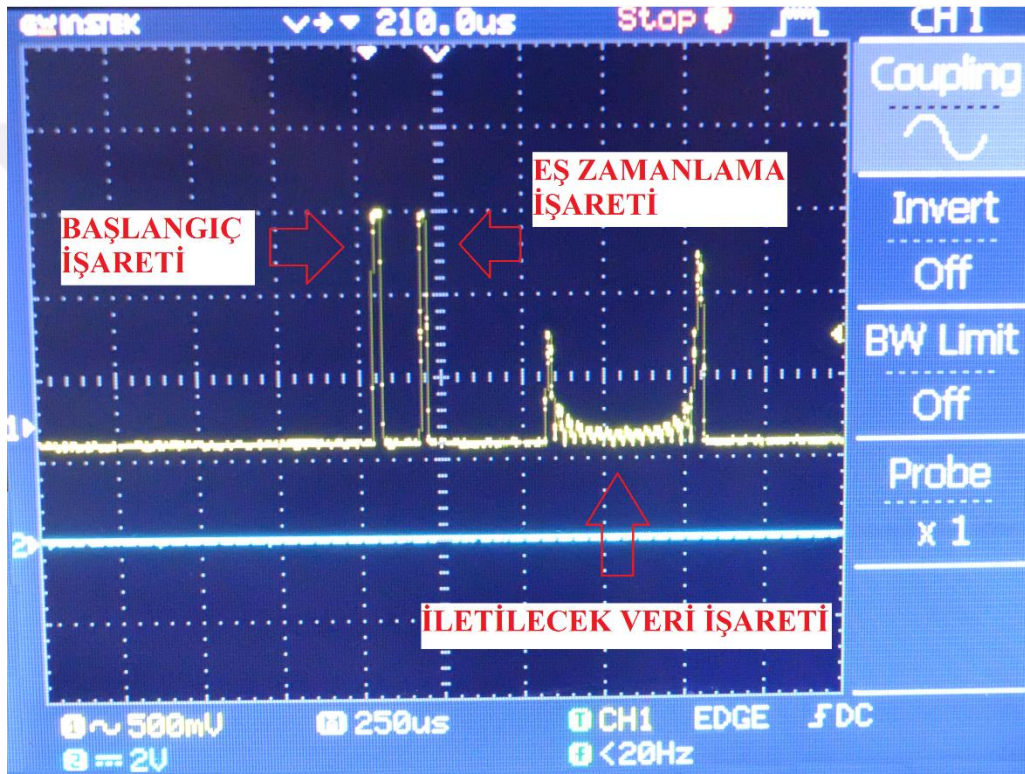
Tablo 4.1: ACO-OFDM algoritması ve darbe biçimlendirme parametreleri.

PARAMETRE	DEĞER
Bit Sayısı	32
Sembol Sayısı	16
OFDM Alt Bant Sayısı (IFFT)	64
Çevrimsel Ön Takı (CP) Uzunluğu	16
Azalma Katsayısı (β)	0
Sembol Çevrim Süresi Katsayısı	1
OFDM İşareti Örnekleme Zamanı (T)	3×10^{-6} sn
Örnekleme Frekansı (f_s)	1 MHz
$T_{up} (f_s T)$	3

**Şekil 4.9:** ACO-OFDM işareti, darbe biçimlendirme verisi ve uygulanma sonucu.

4.4. BAŞLANGIÇ VE EŞ ZAMANLAMA İŞARETLERİNİN EKLENMESİ

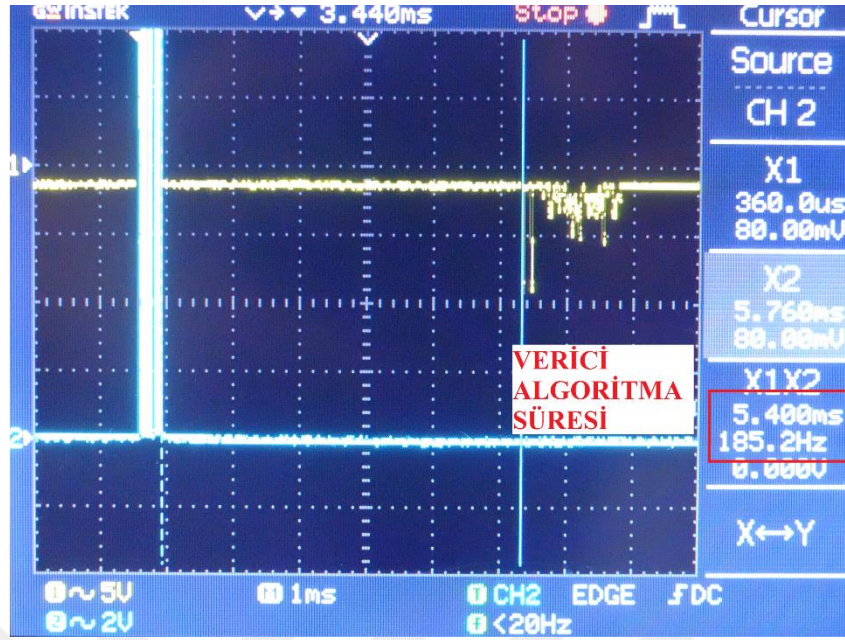
Alıcı devrenin, veri iletiminin başladığını algılayabilmesi için eklenen başlangıç işaretinin ve gönderilen verinin tam olarak başlangıç noktasının tespiti için kullanılan eş zamanlama işaretinin gönderilecek veriye eklenmiş hali Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Bu eklemelerin ardından işaret LED ışık kaynağı ile optik kanala iletilmektedir.



Şekil 4.10: Başlangıç ve eş zamanlama işaretinin eklenmesi.

4.5. VERİCİ VE ALICI İŞARET ZAMANLAMALARI

Bilgisayar seri portu üzerinden gönderilen RS232 işaretlerinin verici tarafından işlenip LED sürücüyü gönderilmesi süresince harcanan zamanın osiloskop görüntüsü Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Burada örnek olarak bilgisayardan 4 baytlık "abcd" karakter dizisi gönderilmiştir.



Şekil 4.11: Verici devrede seri port üzerinden gelen verinin işlenme süresi.

Aynı şekilde alıcı devrede de optik kanal üzerinden gelen işaretin işlenmesi sonucunda elde edilen verilerin bilgisayara seri port üzerinden gönderilmesi işlemi süresince harcanan zamanın osiloskop görüntüsü Şekil 4.12’de gösterilmektedir.

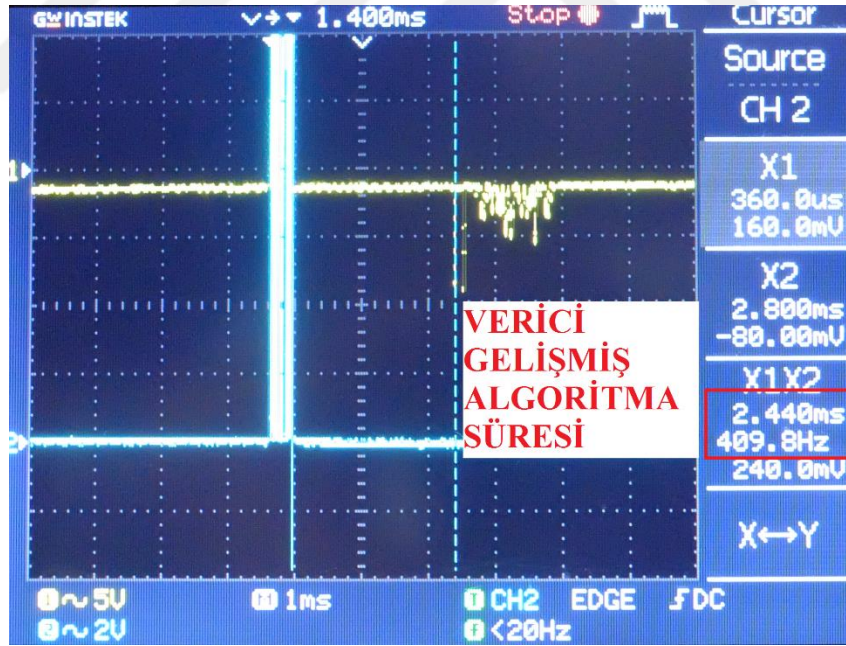


Şekil 4.12: Alıcı devrede alınan verinin işlenip seri porta gönderilme süresi.

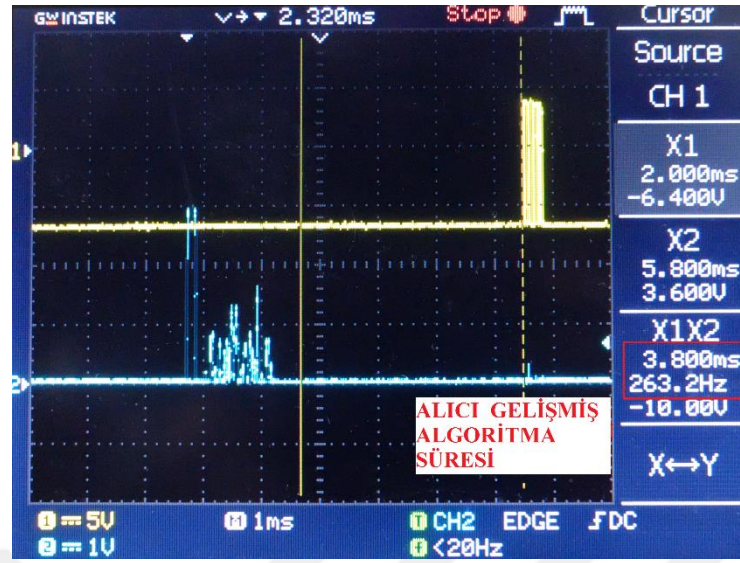
Alıcı devre zaman ölçümünde belirteç, alınan işaretin belirli bir miktar sonrasında yerleştirilerek ölçüldüğü görülmektedir. İşaretin tam olarak bittiği noktanın tespit edilmesi üzere belirteç görüldüğü yere yerleştirilmiş ve ölçüm yapılmıştır.

4.6. ZAMANLAMALARIN GELİŞTİRİLMESİ

Alıcı ve verici devrelerin işaret ölçümlerinde görülen sürelerin geliştirilmesi için darbe biçimlendirme verisinin uygulanma süreci gözden geçirilmiştir. Kullanılan darbe biçimlendirme parametresi T_{up} dolayısıyla elde edilen veri dizisinin, birden çok aynı çarpma işlemi içerdiği tespit edildiğinden işlemlerin tek seferde hesaplanması öngörülerek süreler geliştirilmiştir. Şekil 4.13'te verici ve Şekil 4.14'te alıcı devrede geliştirme ile elde edilen işaret zamanlamaları gösterilmektedir.



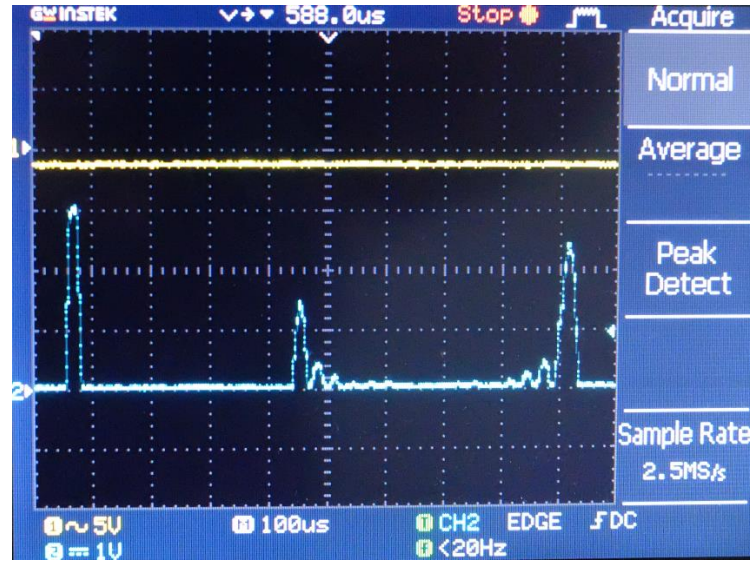
Şekil 4.13: Zaman geliştirme sonrası verici devre işaret zamanlaması.



Şekil 4.14: Zaman geliştirme sonrası alıcı devre işaret zamanlaması.

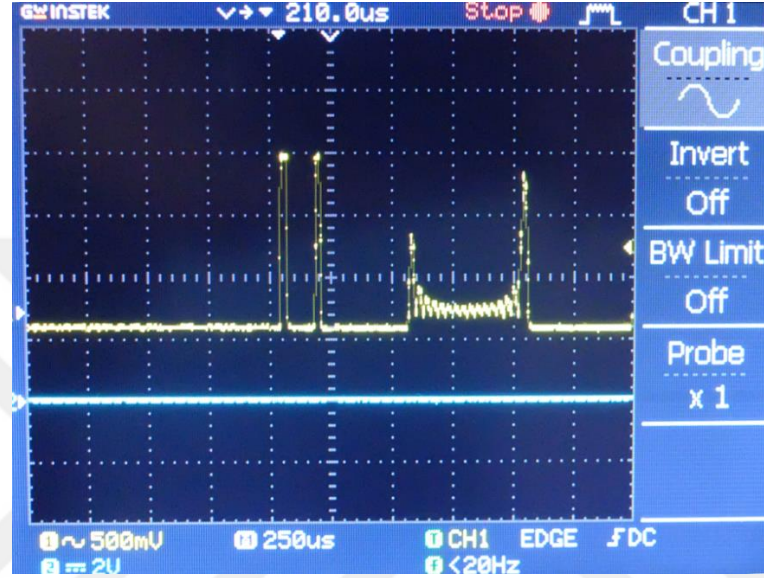
4.7. ALICI DEVREDE İŞARET BOZULMALARI

Alıcı devrede kullanılan geçiş-empedans yükseltecin kazancı çok yüksek olduğundan dolayı gönderilen işaret, belli bir seviyenin üzerine çıktıktan sonra fotodiyotun sızdırdığı akım değerine bağlı gerilimi aşarak, tam olarak mikrodenetleyiciye yansıtılabilmektedir. Bahsedilen duruma ait işaret görseli Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

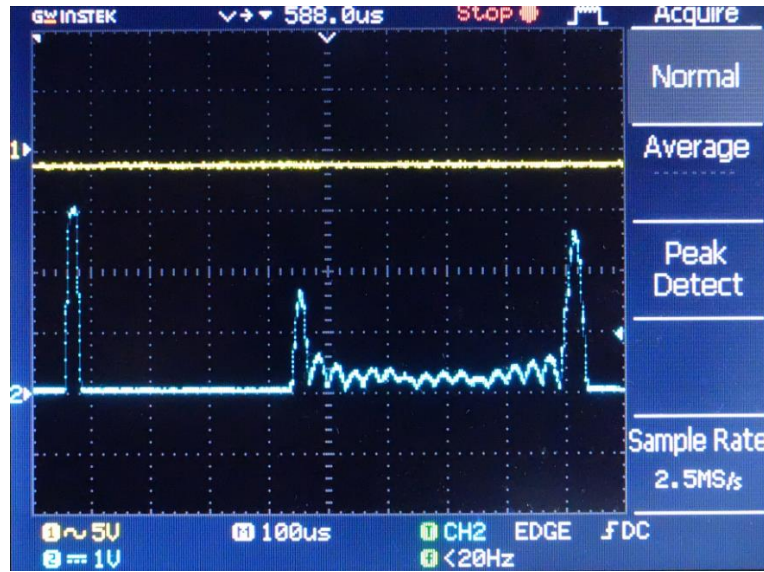


Şekil 4.15: Fotodiyot ve geçiş-empedans yükselteç kazancına bağlı işaret kaybı.

Bu işaret kayıplarının önüne geçebilmek için geçiş-empedans yükseltecin, veri gönderimi olmaksızın, yükselteç kazancına bağlı olarak etkilendiği gerilim seviyesi gözlemlenmiş ve bu değer kadar gerilim değeri verici devrede gönderilen işarete eklenmiştir. Testler sonucu elde edilen gerilim seviyesi 235 mV'tur. Aşağıdaki şekillerde verici devrede işaretin yükseltilmesi ve alıcıdaki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.16: Verici devrede uygulanan 235 mV'luk işaret yükseltme.



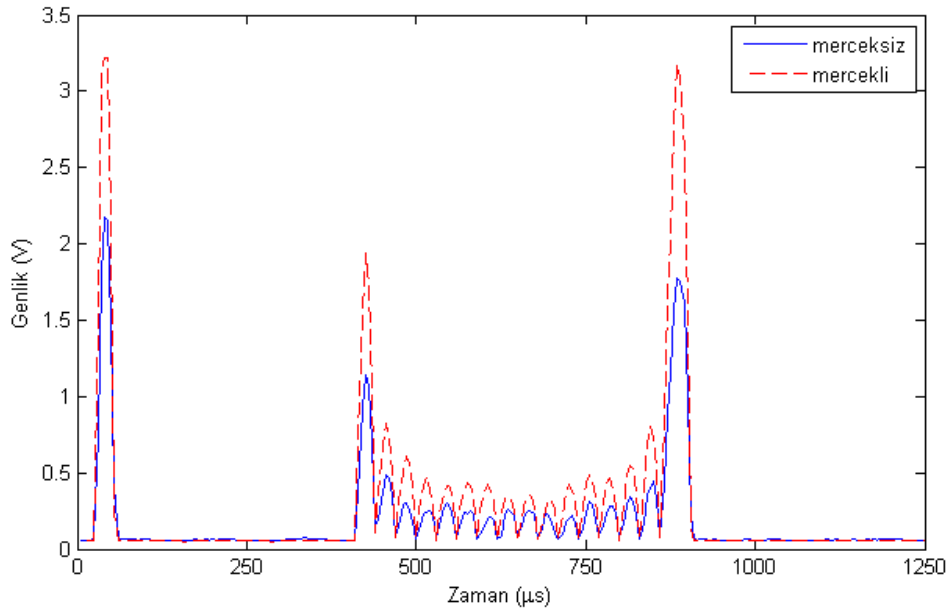
Şekil 4.17: Vericide uygulanan işaret yükseltmenin alıcıda işarete etkisi.

4.8. OPTİK MERCEK KULLANIMININ ETKİSİ

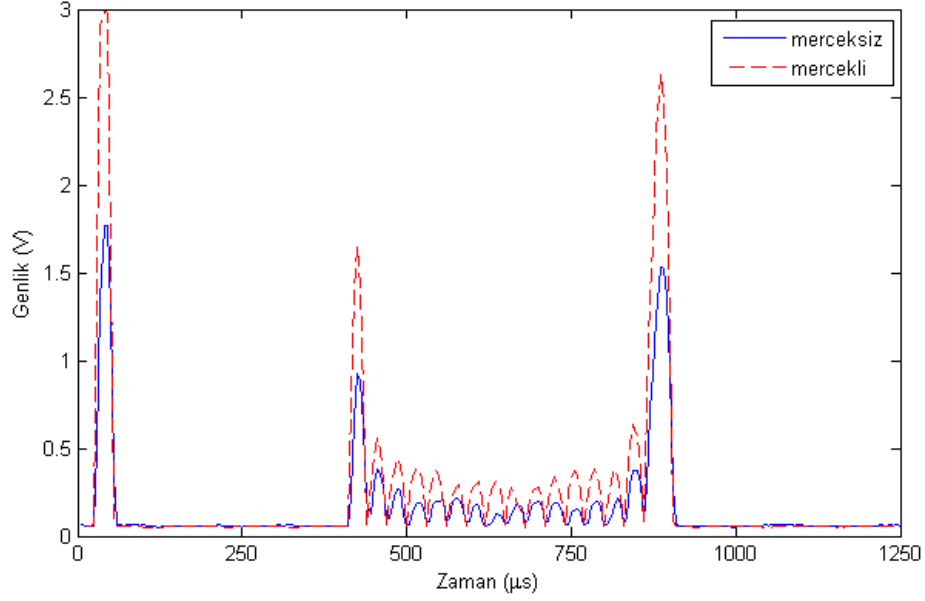
Alıcı devrede kullanılan optik merceğin sistem üzerinde sebep olduğu etki Şekil 4.18’de görülmektedir. Optik mercek kullanılmadan da sistemde haberleşme sağlanabilmektedir. Optik mercek kullanımı ile sistem, standart tavan ölçüleri göz önünde bulundurulduğunda, tavandan yere doğru 1.8 m - 2.5 m gibi bir aralıkta problem olmaksızın haberleşme sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Sonuçlar alıcı devrenin seri portu üzerinden alınan, analog–sayısal dönüştürücü ölçüm sonuçlarının ikili sistem kodları olarak geri bildirim ve bu verilerin Matlab ile görselleştirilmesiyle elde edilmiştir.

Alıcı devrede başlangıç işareti algılandıktan sonra yapılan ölçümler seri port üzerinden gönderildiği için görsellerde başlangıç işareti görünmemektedir.



Şekil 4.18: Alıcı ve verici arası 1.8 m mesafede optik mercek kullanımının etkisi.



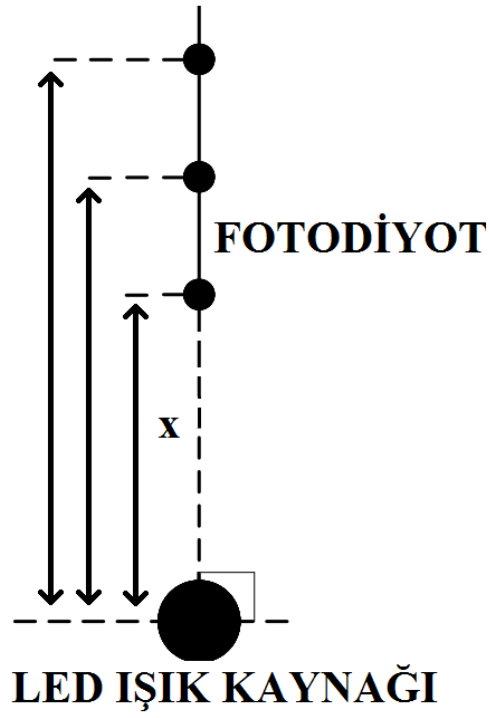
Şekil 4.19: Alıcı ve verici arası 2 m mesafede optik mercek kullanımının etkisi.

4.9. ÖLÇÜM ŞEKİLLERİ VE SONUÇLARI

Çok taşıyıcılı görünür ışık haberleşme sistemimize 3 farklı test süreci uygulanmıştır. Bunlar dikey ekseninde mesafe ve hata kontrolü, yatay ekseninde mesafe ve hata kontrolü ile dairesel ekseninde açı ve hata kontrolü şeklindedir.

4.9.1. Dikey Ekseninde Mesafe ve Hata Ölçüm Sonuçları

Dikey ekseninde gerçekleştirilen bu test sürecinde alıcı devre, LED ışık kaynağı ile 90° dik açı yapacak şekilde karşılıklı konumlandırılmış, aralarındaki mesafe arttırılırken ışık şiddetindeki değişim, eksik veri iletimi olup olmadığı ve iletimde hatalı bitlerin gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Şekil 4.20’de dikey ekseninde gerçekleştirilen teste ait anlatım görseli bulunmaktadır. Ayrıca Tablo 4.2’de elde edilen test sonuçları bulunmaktadır.



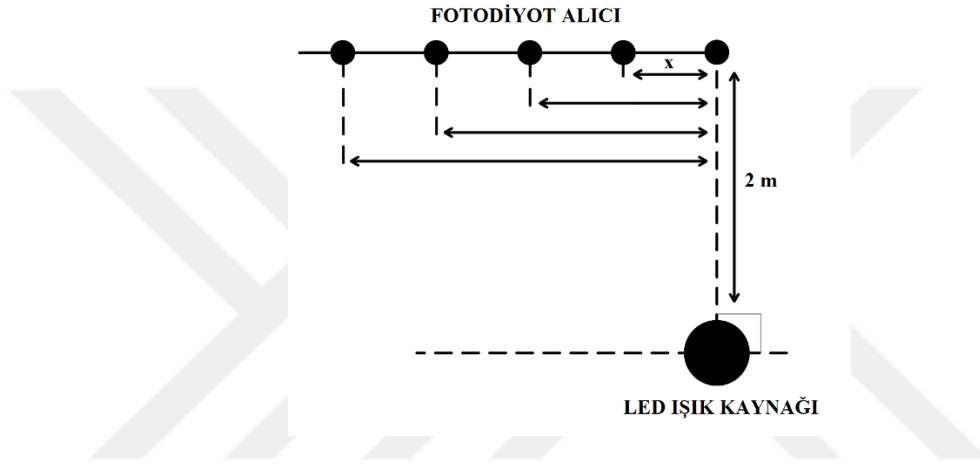
Şekil 4.20: Dikey eksen testi.

Tablo 4.2: Dikey eksen ölçüm sonuçları.

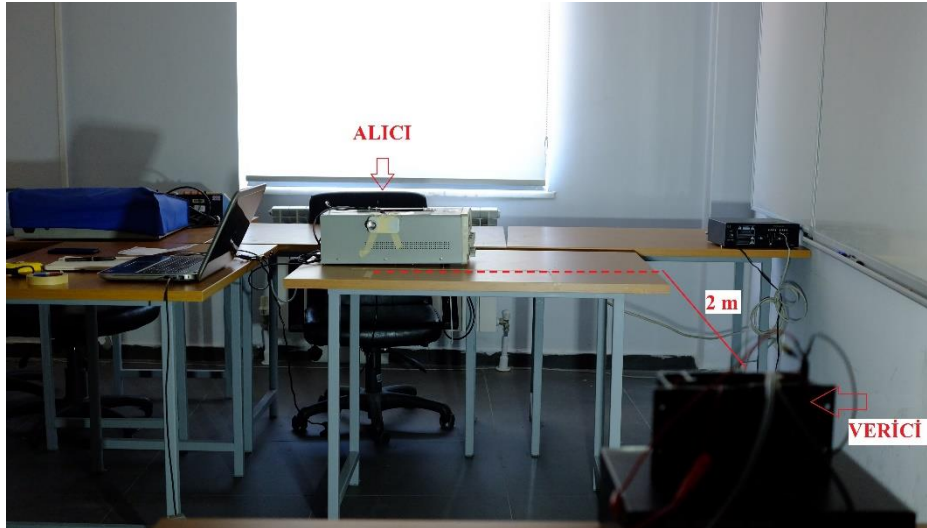
MESAFE (x metre)	IŞIK ŞİDDETİ (lux)	HABERLEŞME	EKSİK VERİ	HATALI VERİ (bit/bayt)
1.5	500	YOK	-	-
1.8	370	VAR	YOK	0/5000
2	300	VAR	YOK	0/5000
2.3	260	VAR	YOK	0/5000
2.5	225	VAR	YOK	0/5000
2.8	200	VAR	YOK	0/5000
3	185	VAR	YOK	0/5000
3.15	177	VAR	YOK	84/5000
3.3	160	YOK	-	-

4.9.2. Yatay Eksende Mesafe ve Hata Ölçüm Sonuçları

Yatay eksende gerçekleştirilen bu test sürecinde alıcı devre, LED ışık kaynağının tam karşısında 2 m mesafeden başlayarak yatay eksende belirli miktarlarda hareket ettirildikten sonra, ışık şiddetindeki değişim, eksik veri iletimi olup olmadığı ve iletimde hatalı bitlerin gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Şekil 4.21’de yatay eksende gerçekleştirilen teste ait anlatım görseli, Şekil 4.22’de de test sırasında çekilen görsel bulunmaktadır. Ayrıca Tablo 4.3’te elde edilen test sonuçları bulunmaktadır.



Şekil 4.21: Yatay eksen testi.



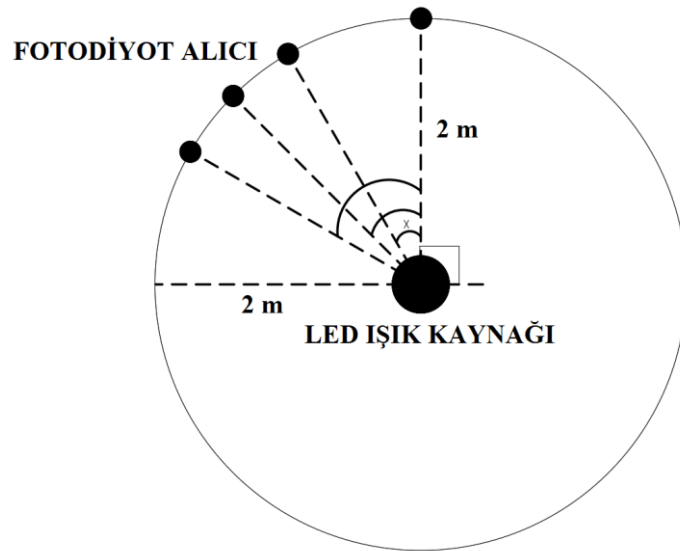
Şekil 4.22: Yatay eksen testine ait görsel.

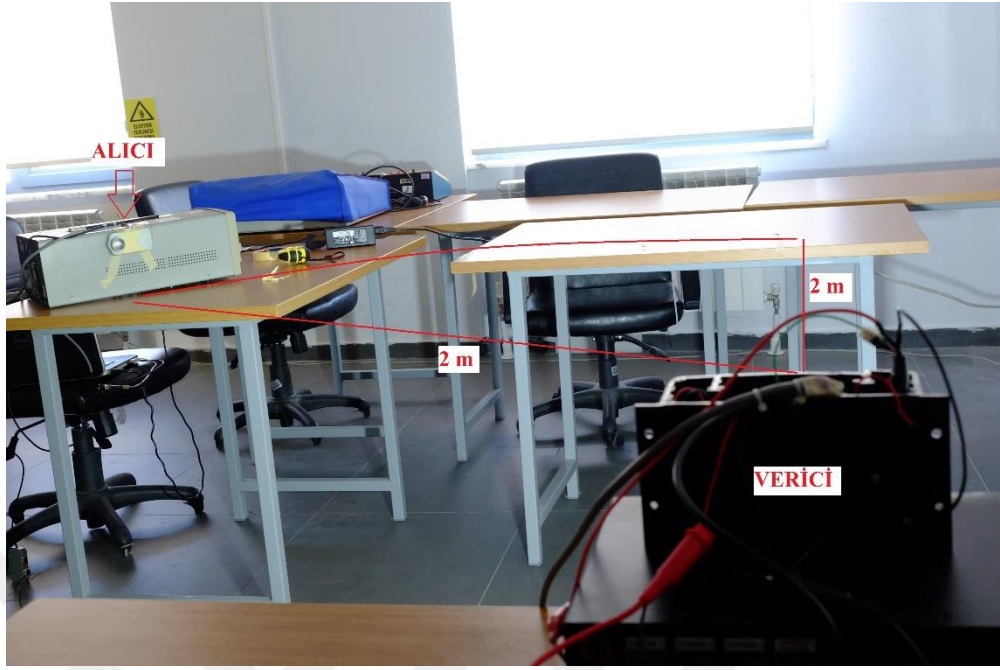
Tablo 4.3: Yatay eksen ölçüm sonuçları.

MESAFE (x metre)	IŞIK ŞİDDETİ (lux)	HABERLEŞME	EKSİK VERİ	HATALI VERİ (bit/bayt)
0.3	300	VAR	YOK	0/5000
0.5	265	VAR	YOK	0/5000
0.7	235	VAR	YOK	0/5000
0.85	205	VAR	YOK	0/5000
1	175	YOK	-	-

4.9.3. Dairesel Eksende Aç ve Hata Kontrolü

Dairesel eksende gerçekleştirilen bu test sürecinde alıcı devre, LED ışık kaynağı etrafında 2 m mesafeli bir çember üzerinde farklı açılarda hareket ettirilerek, ışık şiddetindeki değişim, eksik veri iletimi olup olmadığı ve iletimde hatalı bitlerin gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Şekil 4.23'te dairesel eksende gerçekleştirilen test ait anlatım görseli, Şekil 4.24'te de test esnasında çekilen görsel gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 4.4'te elde edilen test sonuçları bulunmaktadır.

**Şekil 4.23:** Dairesel eksen testi.



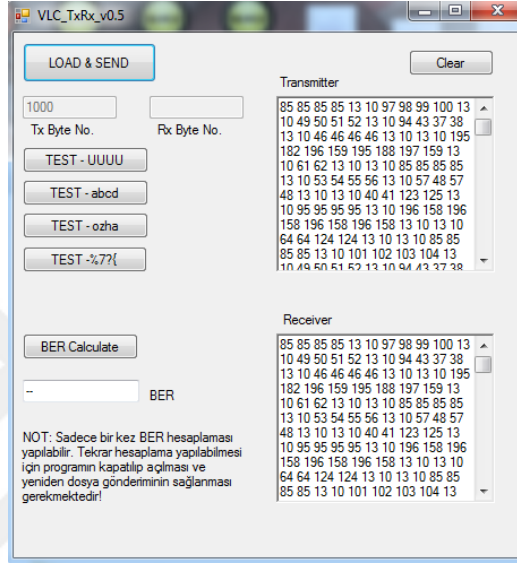
Şekil 4.24: Dairesel eksen testine ait görsel.

Tablo 4.4: Dairesel eksen ölçüm sonuçları.

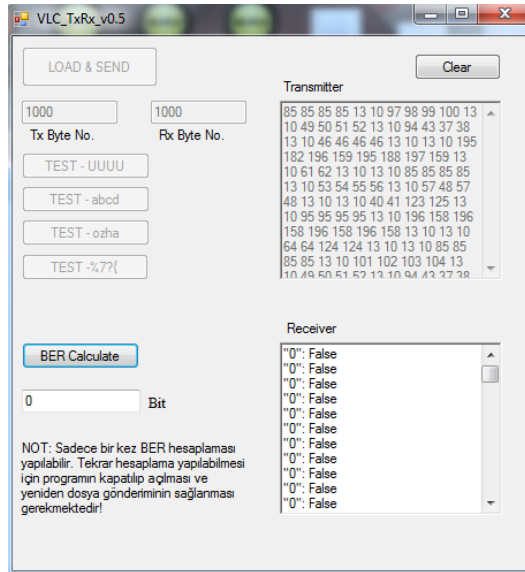
AÇI (x)	IŞIK ŞİDDETİ (lux)	HABERLEŞME	EKSİK VERİ	HATALI VERİ (bit/bayt)
14°	310	VAR	YOK	0/5000
26.56°	300	VAR	YOK	0/5000
42.43°	260	VAR	YOK	0/5000
50.80°	215	VAR	YOK	0/5000
58.22°	175	YOK	-	-

4.9.4. Test Arayüzü Program Çıktısı

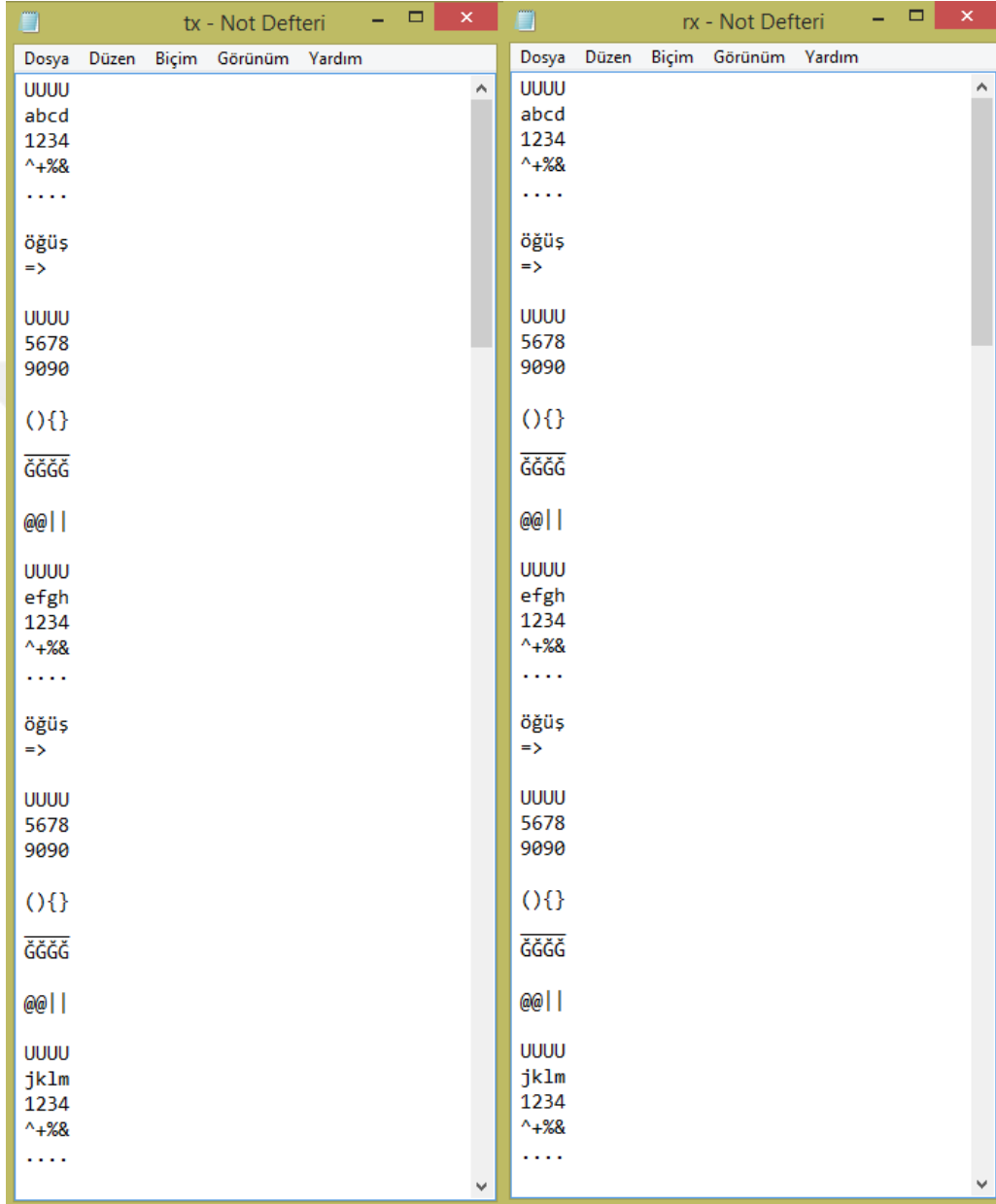
Testlerde kullanılan ve C# ile hazırlanmış arayüz programına ait test görselleri Şekil 4.25'te ve Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Program, göndereceği verileri "tx" isimli bir metin dosyasından almakta ve iletim tamamlandıktan sonra alınan veriler de "rx" isimli bir metin dosyasına kayıt edilmektedir. Şekil 4.27'de tx ve rx dosyalarına ait görseller gösterilmektedir.



Şekil 4.25: C# ile hazırlanan arayüz ile veri iletimi.



Şekil 4.26: C# ile hazırlanan arayüz ile bit hata kontrolü.



Şekil 4.27: Test programı ile gönderilen ve alınan veri dosyaları.

4.10. VERİCİ SICAKLIK DEĞERLERİ

Çok taşıyıcılı görünür ışık haberleşme sistemimizde verici LED ışık kaynağı 120 V DC ile beslenmekte, dolayısıyla transistör üzerinde kalan gerilim ve LED'ler üzerinde kalan gerilim ısınmalara sebep olmaktadır. Kullanılan transistörün kılıfı uygun olduğu için alüminyum soğutucu takılmıştır. Ayrıca ısınma sürecini kontrol altına alabilmek adına verici kutusu alüminyum malzemedan tasarlanmış, ilave olarak termal iletken süngerler ile LED ışık kaynağı ve transistör, kutuya ısı iletecek şekilde monte edilmiştir. Buna karşın 1 saatlik çalışma süresi içerisinde transistör üzerinde oluşan sıcaklık değerleri Tablo 4.5'te gösterilmektedir.

Tablo 4.5: Transistör kılıfı sıcaklık değerleri.

SÜRE	SICAKLIK
15 dakika	125 °C
30 dakika	128 °C
45 dakika	130 °C
60 dakika	130 °C

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, çok taşıyıcılı görünür ışık haberleşme için tamamen özgün alıcı ve verici tasarımı gerçekleştirilmiş olup 1.8 m ile 3 m mesafe aralığında 3.5 kbps veri iletim hızında haberleşme hatasız bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ışık kaynağı merkezinden yatay ekseninde 85 cm mesafe uzaklığa kadar ya da ışık kaynağı ile 50° açık yapacak konuma kadar haberleşmenin sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler, tasarımlarımızın ev içi aydınlatma sistemlerinde, standart tavan yüksekliğinin bulunduğu yerlerde masa üzerinde ya da yerde başarılı bir şekilde kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca tasarımda kullanılan malzemeler ticari olarak satışta olan ve temini kolay ürünlerden seçilmiş olup maliyeti mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılmıştır. ARM mimarisine sahip mikrodenetleyici kullanımı ile hem düşük maliyetli hem de düşük enerji tüketimi olan bir ürün prototipi hazırlamaya çalışılmıştır.

Vericide gönderilen işarete eklenen başlangıç işareti ve eş zamanlama işareti, alıcı devrede işaret elde edildikten sonra belirlenen değerler ile karşılaştırılarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde karşılaştırma ile işaret tanımlama işlemi daha sağlıklı olmasına karşın daha hızlı bir çözüm olduğu için tercih edilmiştir. Aksi takdirde özellikle başlangıç işaretinin sürekli olarak elde edilen verilerde taranması sırasında kaybedilen zamanda yeni gelen veriler kaçırılabilir.

Başlangıç işaretinin karşılaştırma değerleri 1.5 V ile başlamaktadır. Bu değer, ortamda oluşabilen 1 V'a kadar gürültülerin sistemi tetiklememesi için tercih edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarında mesafenin sınırlanmasında bu değer de etkili olmaktadır. Bu değer daha aşağılara çekilmesi ile sistemin daha düşük ışık yoğunluğunda tetiklenmesi sağlanarak daha uzun mesafelerde haberleşme sağlanabilecektir. Buna ilaveten elde edilen işaret verisinde genlik değerleri oldukça azalacağından hatalı veri gönderimleri oluşacaktır.

Alıcı devrede bulunan optik mercekle, sistemin kararlılığını arttırmak için kullanılmıştır. Mercek kullanmadan yapılan ölçümlerde sistemin 1.5 m ile 2.5 m mesafe arasında çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu durumda elde edilen verilerin hata oranı artabilmektedir. Ayrıca mercek odak uzaklığının fazla olması dolayısıyla alıcı kutunun uzun bir alıcı göze sahip olmasına sebep olacağı için fotodiyot mercekle odağına yerleştirilmemiştir. Odak uzaklığından daha yakın bir mesafeye yerleştirilmiştir. Uygun kutu tasarımı ya da optik mercek kullanımıyla bu mesafe

değerleri arttırılabilir. Buna ilaveten kullanılan LED'lerin daha dar açılı seçilmesi ve ışığı daha yoğun yönlendirecek şekilde bir optik lens kullanımıyla da mesafede ciddi artma elde edilebilir.

Alıcı devre tasarımında başlangıçta mikrodenetleyicinin analog-sayısal dönüştürücü birimi kullanılmıştır. LPC1768'in maksimum 200 kHz örnekleme hızına sahip ADC birimini kullanmak bir sonraki hız seviyelerine geçme konusunda sorun yaşatacağından onun yerine SPI ADC entegresi kullanılmıştır. Bu şekilde daha yüksek hızlar desteklenebilmektedir. Ancak devrede örnekleme hızı yine 200 kHz (5 μ s) seviyelerinde kalmıştır. Bunun sebebi ve hızı etkileyen en büyük etken ACO-OFDM için gerekli IFFT, FFT ve darbe biçimlendirme uygulama işlemleridir. Bu işlemlerin 100 MHz'lik mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmesi oldukça fazla zaman almaktadır. Bu durumu geliştirmek adına daha yüksek hızlı işlemci ya da FPGA kullanımı oldukça fayda sağlayacaktır. Bununla birlikte daha hızlı ADC ve DAC birimlerinin de kullanılması gerekecektir. Ayrıca QPSK modülasyonu yerine daha yüksek dereceli modülasyon türleri (64-PSK, 128-QAM vb.) kullanılarak hata oranı ile birlikte gönderilen veri sayısında da artma sağlanabilir. Darbe biçimlendirme ve FFT parametrelerinde uygulanacak bir değişiklik, daha fazla hafıza ihtiyacı doğuracağından işlemcinin ona göre seçilmesi ya da ilave hafıza birimi kullanılması gerekmektedir.

Tasarlanmış olan alıcı ve verici devreler aynı zamanda USB arayüzüne de sahiptir. Algoritma hızlarının arttırılması sağlanabilirse RS232 yerine USB arayüzünün kullanımıyla sistem hem daha mobil hem de daha hızlı veri iletimine imkan tanıyacak hale getirilebilir.

Verici devrede LED ve transistör üzerinde oluşan ısı tasarlanan sistemdeki en büyük sorunlardan birisidir. Bu durumu önlemek için alüminyum kutu kullanılmasına karşın özellikle transistör üzerinde çok ısı birikmektedir. Dolayısıyla sistemin daha düşük güçte çalışacak şekilde getirilmesi ya da kutuya bir aktif soğutucu (fan) eklenmesi sistemin güvenilirliğini arttıracaktır.

Verici devrede kullanılan 120 V DC besleme gerilimi DC güç kaynakları tarafından elde edilmiştir. 220 V alternatif akım tarafından üretilmesi ve daha kompakt bir yapı haline gelmesi için verici kutusu içine bir anahtarlamalı güç kaynağı devresi ilave edilebilir. Bu şekilde verici herhangi bir prize takılarak kullanılabilir bir ürün haline gelecektir.

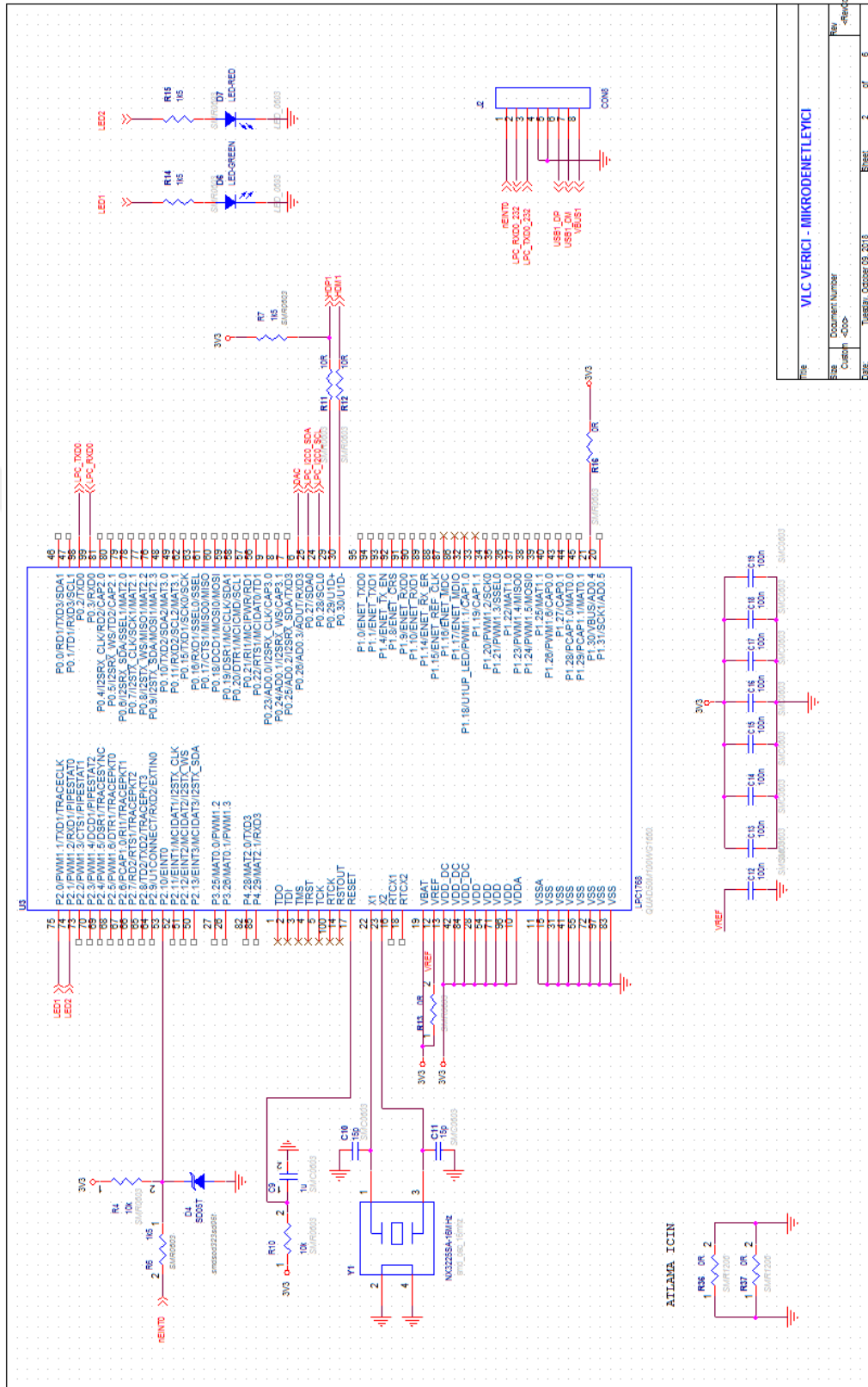
KAYNAKLAR

- [1]. Zuhdi, M., & Wafi, A., 2015, *High performance drive circuits for integrated microLED/CMOS arrays for visible light communication (VLC)*, Thesis (PhD), University of Edinburgh.
- [2]. Dimitrov, S., & Haas, H., 2015, *Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [3]. Haas, H., 2017, LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. *Reviews in Physics*, 3, 26-31.
- [4]. Komine, T., & Nakagawa, M., 2004, Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights, *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 50(1), 100-107.
- [5]. Gavrinca, C., Baranda, J., & Henarejos, P., 2014, Rapid prototyping of standard-compliant visible light communications system, *IEEE Communications Magazine*, 52(7), 80-87.
- [6]. Khan, L. U., 2017, Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges, *Digital Communications and Networks*, 3(2), 78-88.
- [7]. Fişne, A., 2015, *Görünür Işık Haberleşmesinde Kırpma Gürültüsünün Analizi*, Yüksek Lisans, Hacettepe Üniversitesi.
- [8]. Ertuna, A. D., 2016, *Görünür Işık ile Haberleşme ve Sistem Tasarımı*, Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9]. Rajagopal, S., Roberts, R. D., & Lim, S. K., 2012, IEEE 802.15. 7 visible light communication: modulation schemes and dimming support, *IEEE Communications Magazine*, 50(3), 72-82.
- [10]. Tanaka, Y., Komine, T., Haruyama, S., & Nakagawa, M., 2001, Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting, In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001 12th IEEE International Symposium on*, 3 October-30 September 2001 San Diego, IEEE, ISBN: 0-7803-7244-1 , Vol. 2, pp. F-F.
- [11]. Armstrong, J., & Lowery, A. J., 2006, Power efficient optical OFDM, *Electronics Letters*, 42(6), 370-372.
- [12]. Armstrong, J., & Schmidt, B. J., 2008, Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN, *IEEE Communications Letters*, 12(5).
- [13]. Elgala, H., Mesleh, R., Haas, H., & Pricope, B., 2007, OFDM visible light wireless communication based on white LEDs, In *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring*, 22-25 April 2007 Dublin, IEEE, ISBN: 1-4244-0266-2, 2185-2189.

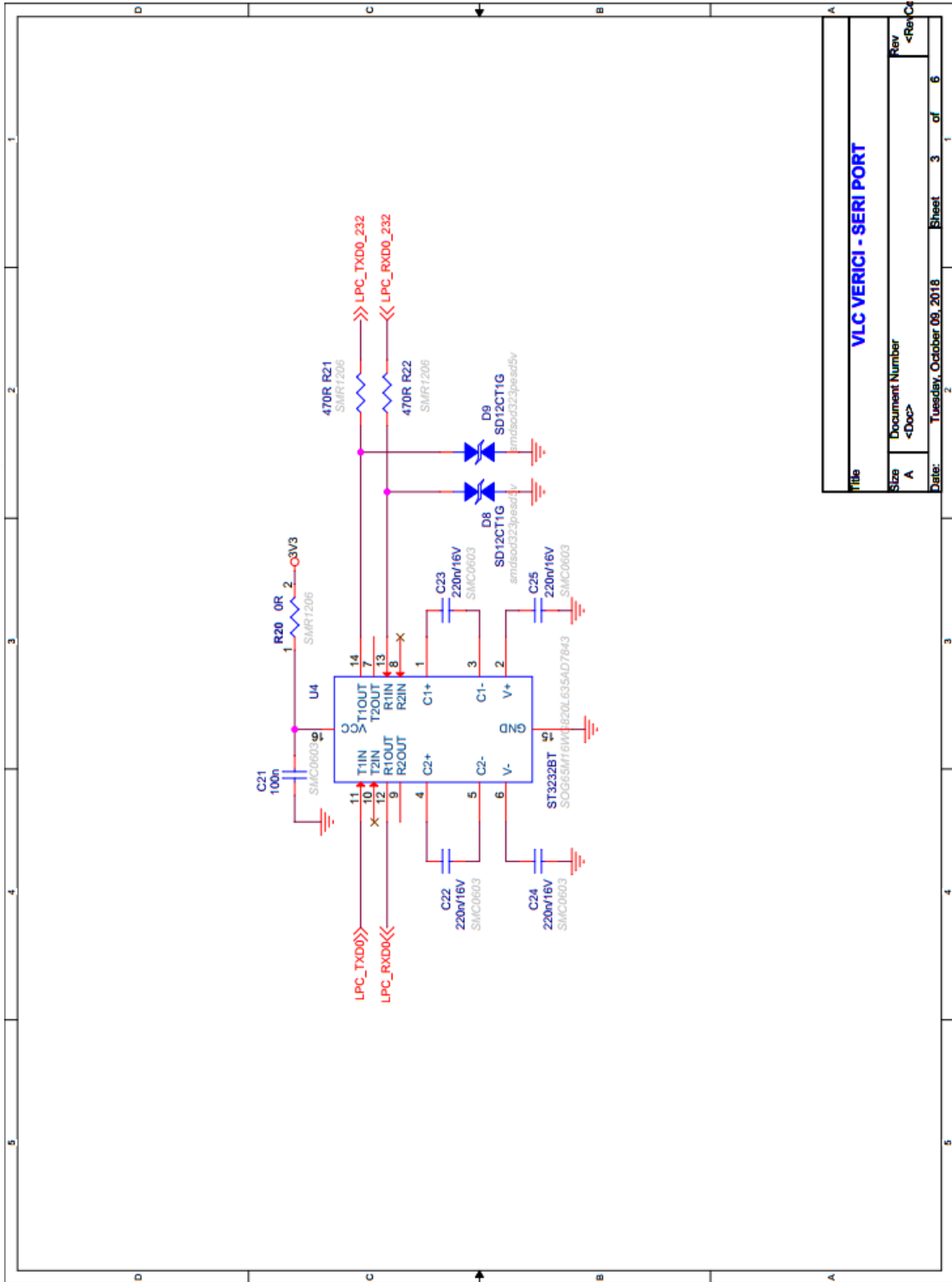
- [14]. Mesleh, R., Elgala, H., & Haas, H., 2012, Performance analysis of indoor OFDM optical wireless communication systems, In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1-4 April 2012 Shanghai, IEEE, 1005-1010).
- [15]. Chiang, B., Lin, D., & Yu, J., 2002, OFDM in Multipath Mobile Fading Channel, In *Proc. of the 8th Mobile Computing Workshop*, National Chiao-Tung University, Hsin-Chu, Taiwan, ROC, 196-201.
- [16]. Şaylı, O., Doğan, H., & Panayırçı, E., 2016, Spline interpolation based channel estimation for ACO-OFDM over visible light channels, In *Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, 16-19 May 2016 Zonguldak, IEEE, 333-336.
- [17]. Huang, E. W., & Wornell, G. W., 2007, Peak to Average Power Reduction for Low-Power OFDM Systems, In *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*, 24-28 June 2007 Glasgow, IEEE, ISBN: 1-4244-0353-7, 2924-2929.
- [18]. Videv, S., & Haas, H., 2014, Practical space shift keying VLC system, In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 6-9 April 2014 Istanbul, IEEE, ISBN: 978-1-4799-3083-8, 405-409.
- [19]. Baranda, J., Henarejos, P., & Gavrincea, C. G., 2013, An SDR implementation of a visible light communication system based on the IEEE 802.15. 7 standard, In *Telecommunications (ICT), 2013 20th International Conference*, 6-8 May 2013 Casablanca, IEEE, 1-5.
- [20]. Samudika, D., Jayasinghe, L., Gunathilaka, K. E., Rumes, Y., Weerasuriya, R., & Dias, D., 2016, Stereo audio streaming via Visible Light, In *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, 5-6 April 2016 Moratuwa, IEEE, 132-136.
- [21]. Ding, L., Liu, F., He, Y., Zhu, H., & Wang, Y., 2013, Design of Wireless Optical Access System using LED, *Optics and Photonics Journal*, 3(02), 148.
- [22]. Schmid, S., Corbellini, G., Mangold, S., & Gross, T. R., 2013, LED-to-LED visible light communication networks, In *Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 29 July- 01 August 2013 Bangalore, ACM, ISBN: 978-1-4503-2193-8, 1-10.
- [23]. Xi, C., Mirvakili, A., & Koomson, V. J., 2012, A visible light communication system demonstration based on 16-level pulse amplitude modulation of an LED array, In *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium*, 21-23 May 2012 Shanghai, IEEE, 1-4.
- [24]. Afgani, M. Z., Haas, H., Elgala, H., & Knipp, D., 2006, Visible light communication using OFDM, In *Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006. TRIDENTCOM 2006. 2nd International Conference*, 1-3 March 2006 Barcelona, IEEE, ISBN: 1-4244-0106-2, 129-134.
- [25]. Ho, K. T., Chen, R., Liu, G., Shen, C., Holguin-Lerma, J., Al-Saggaf, A. A., ... & Ooi, B. S., 2018, 3.2 Gigabit-per-second Visible Light Communication Link with InGaN/GaN MQW Micro-photodetector, *Optics express*, 26(3), 3037-3045.

- [26]. Islim, M. S., Ferreira, R. X., He, X., Xie, E., Videv, S., Viola, S., ... & Kelly, A. E., 2017, Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED, *Photonics Research*, 5(2), A35-A43.
- [27]. Tsonev, D., Videv, S., & Haas, H., 2015, Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network, *Optics express*, 23(2), 1627-1637.
- [28]. Aksoy, K., 2008, *OFDM Modülasyonu Kullanan Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Telsiz İletişim Sistemleri için Yüksek Başarılı Kodlama Teknikleri*, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [29]. Khedkar, A., Sumathi, M., & Murugan, M., 2016, Root Raised Cosine Pulse Shape Based ICI Suppression in OFDM System for Rayleigh Multipath Channel, *International Journal of Engineering and Technology*, 8(6), 2795-2799.
- [30]. Joost, M., 2010, Theory of root-raised cosine filter, *Research and Development*, 47829.
- [31]. RF Wireless World, *VLC vs RF difference between VLC and RF Communication*, <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-VLC-communication-and-RF-communication.html>, [Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2018].
- [32]. NXP, <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-based-processors-and-mcus/lpc-cortex-m-mcus/lpc1700-cortex-m3/512kb-flash-64kb-sram-ethernet-usb-lqfp100-package:LPC1768FBD100>, [Ziyaret tarihi: 12 Aralık 2016].
- [33]. STMicroelectronics, <https://www.st.com/en/power-management/l5973d.html>, [Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2016].
- [34]. Microchip Technology Inc., <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP1700>, [Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2016].
- [35]. Ledvance GmbH, https://www.ledvance.asia/products/lamps/led-lamps/consumer-led-lamps-with-classic-bulbs/led-value-classic-a/index.jsp?productId=ZMP_3210955&classificationId=GPS01_2615962, [Ziyaret tarihi: 5 Eylül 2018].
- [36]. Sault, B., 2015, *Wiring LEDs Correctly: Series & Parallel Circuits Explained!*, <https://www.ledsupply.com/blog/wiring-leds-correctly-series-parallel-circuits-explained/>, [Ziyaret tarihi: 21 Mart 2016].
- [37]. ON Semiconductor, <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=FJAF4310>, [Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016].
- [38]. OSRAM Opto Semiconductors, https://www.osram.com/os/ecat/Radial%20T1%203-4%20SFH%20203%20P/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2219552/, [Ziyaret tarihi: 2 Temmuz 2016].
- [39]. Texas Instruments, <http://www.ti.com/product/OPA2356>, [Ziyaret tarihi: 2 Temmuz 2016].

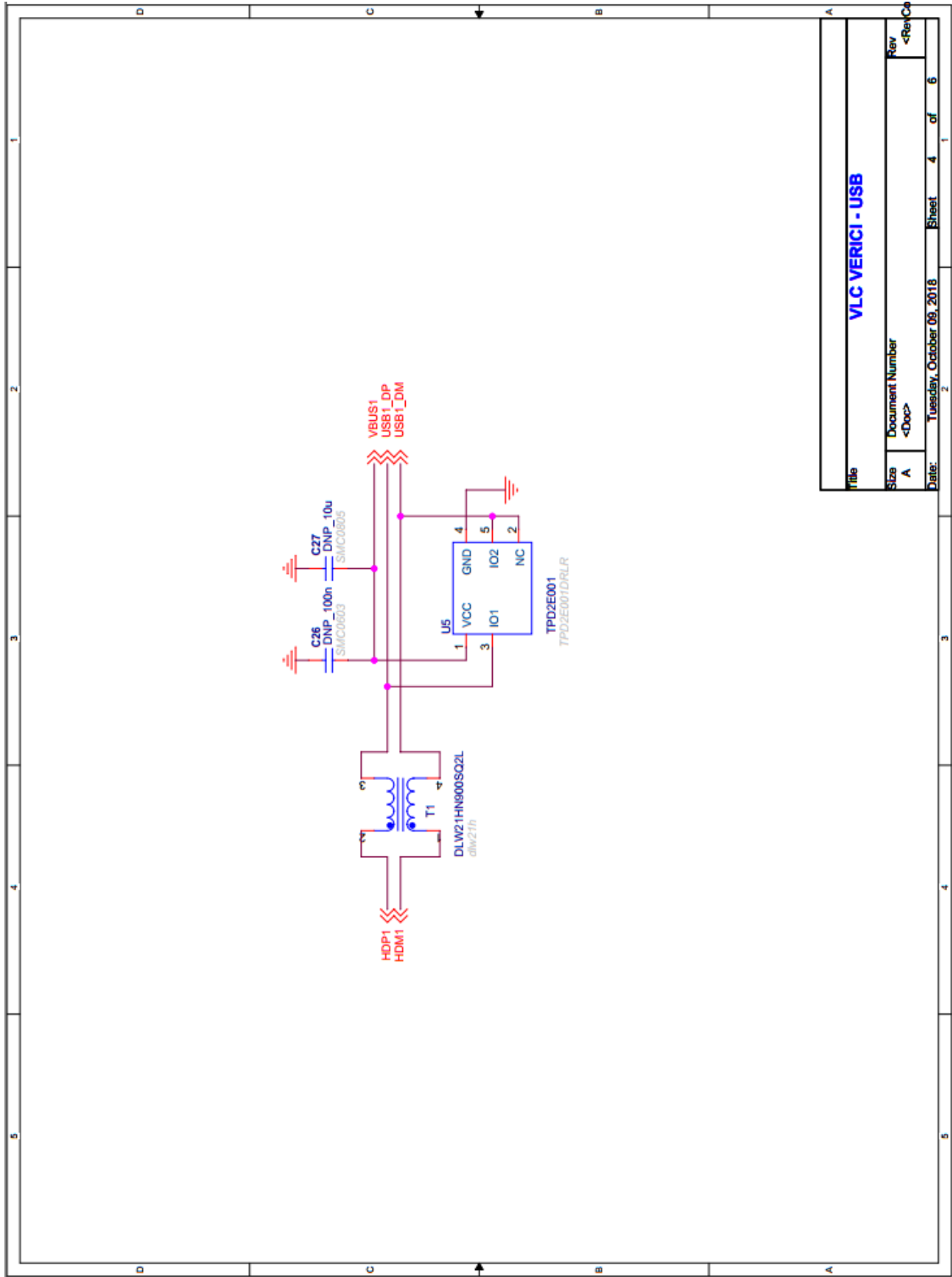
- [40]. Texas Instruments, <http://www.ti.com/product/ADS7883>, [Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2016].
- [41]. Mouser Electronics, <https://www.mouser.com.tr/datasheet/2/389/st3232b-955297.pdf>, [Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2018].
- [42]. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite>, [Ziyaret tarihi: 1 Eylül 2018].
- [43]. Cadence Design Systems, <https://www.orcad.com/>, [Ziyaret tarihi: 5 Ekim 2018].
- [44]. Keil, <http://www2.keil.com/mdk5/uvision/>, [Ziyaret tarihi: 5 Ekim 2018].
- [45]. <http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>, [Ziyaret tarihi: 7 Ağustos 2018].
- [46]. http://www.java2s.com/Open-Source/CSharp_Free_Code/Game/Download_Console_Snake_App.htm, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].
- [47]. Avas Metal San. Tic. Aş., <http://www.avasmetal.com.tr/?/aluminyum/6063-aluminyum>, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].
- [48]. Solidworks, <https://www.solidworks.com/tr>, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].
- [49]. Prusa 3D, <https://www.prusaprinters.org/prusa-i3/>, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].
- [50]. Ultimaker, <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].
- [51]. ikkegol, <http://www.ikkegol.com/ikkegol-40x-25mm-magnifier-optical-glass-jeweler-loupe-with-led-p-26.html>, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].
- [52]. National Semiconductor, *Photodiode Amplifiers*
<http://edge.rit.edu/edge/P09051/public/photodiodeamplifiers.pdf>, [Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2018].



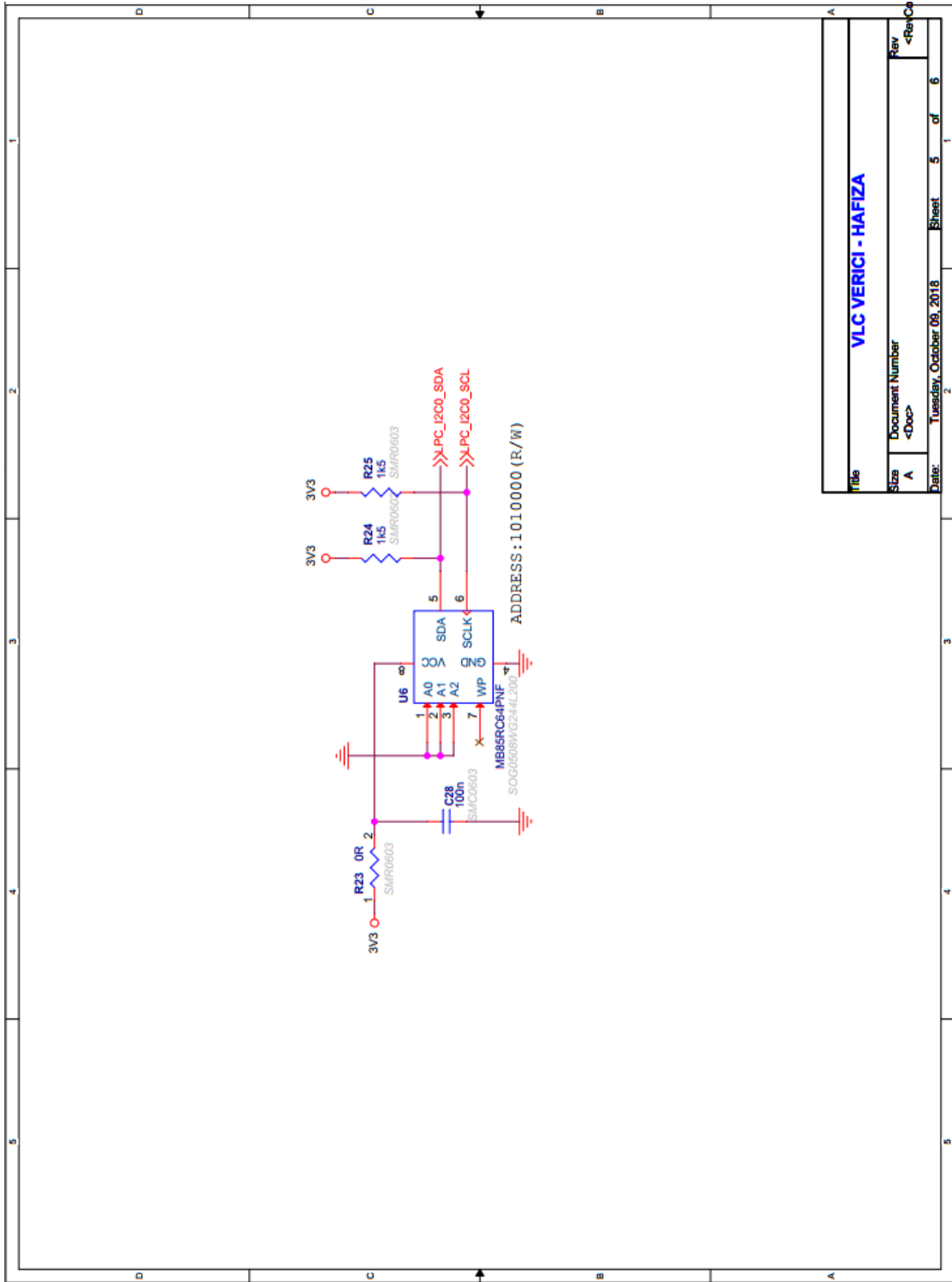
FILE	VLC VERICI - MIKRODENETLEYICI				
Size	Document Number				
Class	-000				
DATE	Tuesday, October 09, 2018	Page	2	of	6



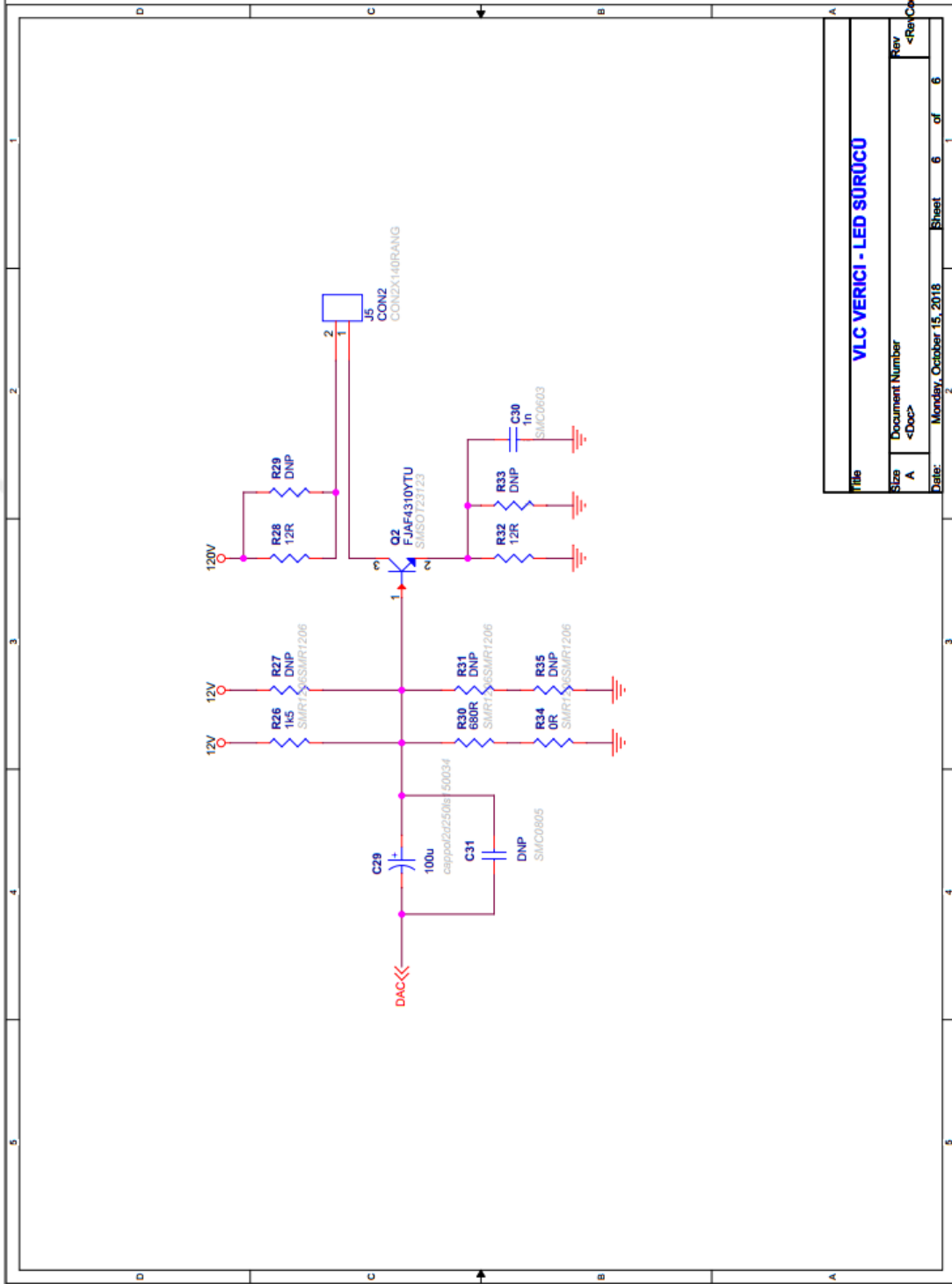
File		VLC VERICI - SERI PORT			
Size	Document Number				
A	<Doc>				
Date:	Tuesday, October 09, 2018	Sheet	3	of	6



Title		VLC VERICI - USB	
Size	Document Number	Rev	<Rev C>
A	<Doc>		
Date:	Tuesday, October 09, 2018	Sheet	4 of 6

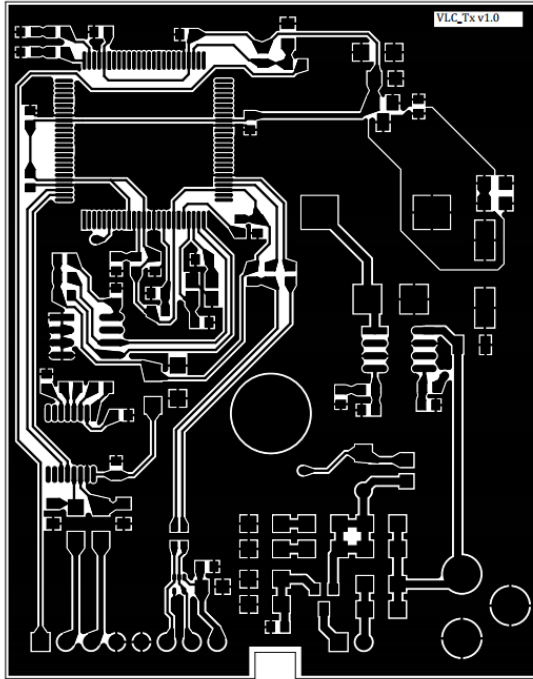


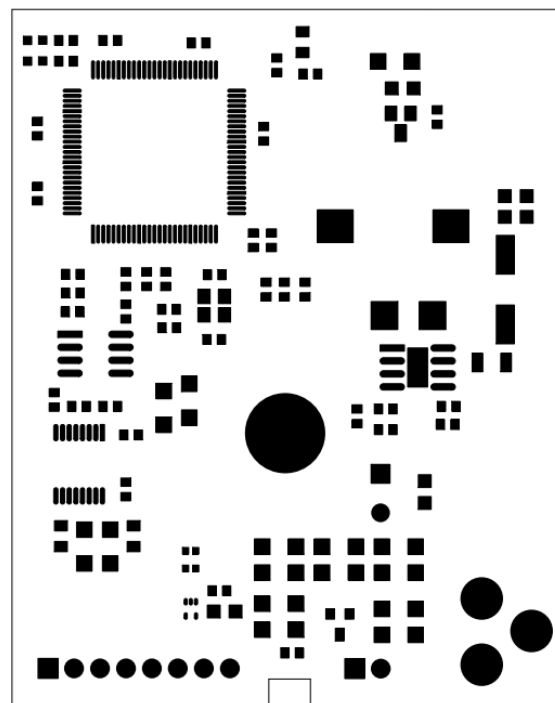
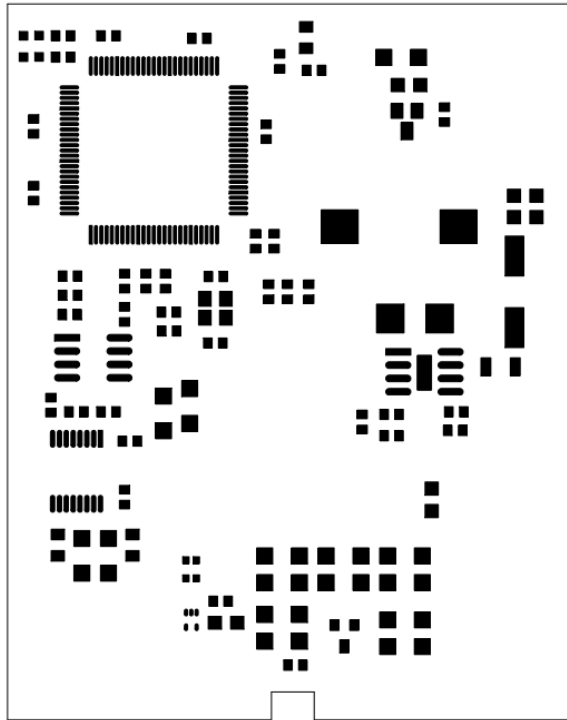
Title		VLC VERICI - HAFIZA	
Size	Document Number	Rev	<RevC>
A	<Doc>		
Date:	Tuesday, October 09, 2018	Sheet	5 of 6

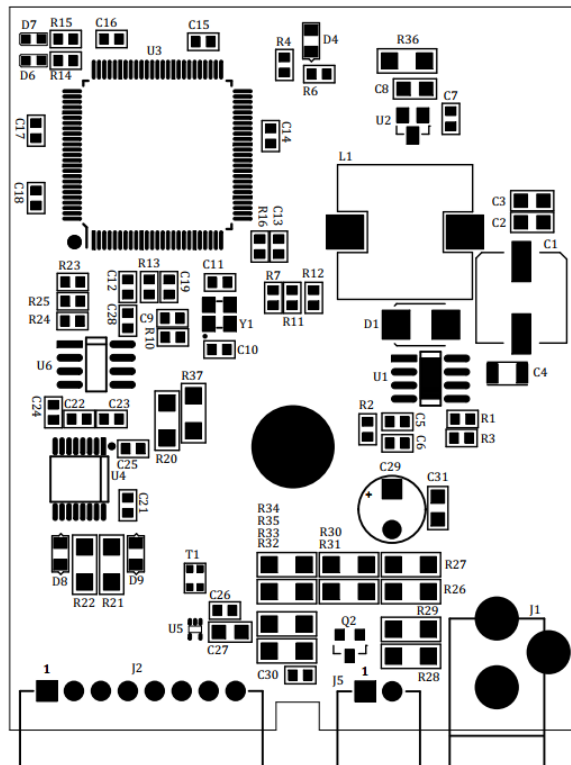
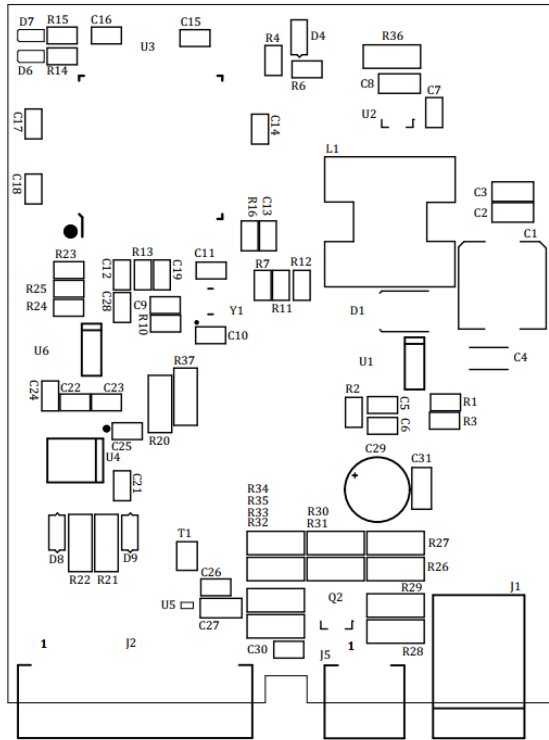


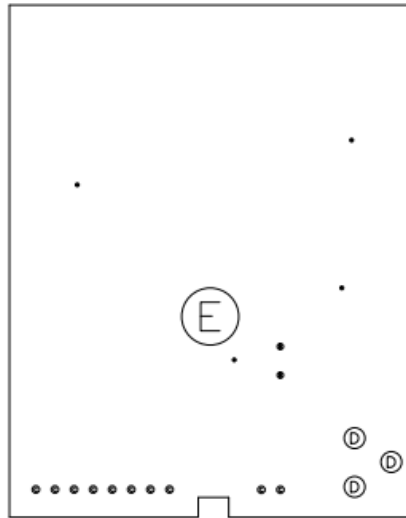
VLC VERICI - LED SÜRÜCÜ

Title					
Size	Document Number	Rev	6	of	6
A	<Doc>	<Rev>			
Date:	Monday, October 15, 2018	Sheet	6		

EK 2. Verici Baskılı Devre.





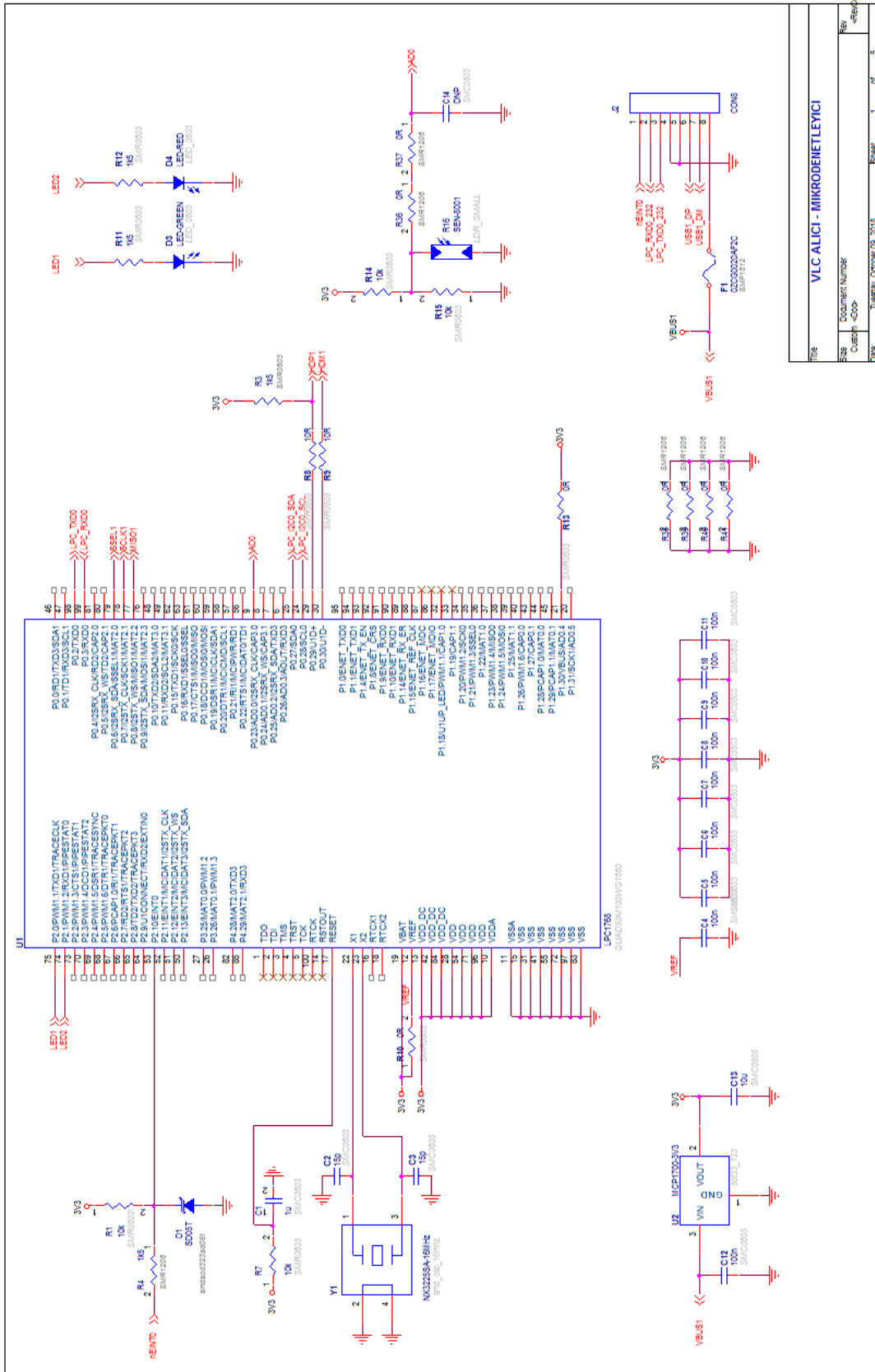


DRILL CHART: TOP to BOTTOM			
ALL UNITS ARE IN MILS			
FIGURE	FINISHED_SIZE	PLATED	QTY
•	20.0	PLATED	4
•	34.0	PLATED	2
•	40.0	PLATED	10
ⓓ	110.0	PLATED	3
ⓔ	300.0	PLATED	1

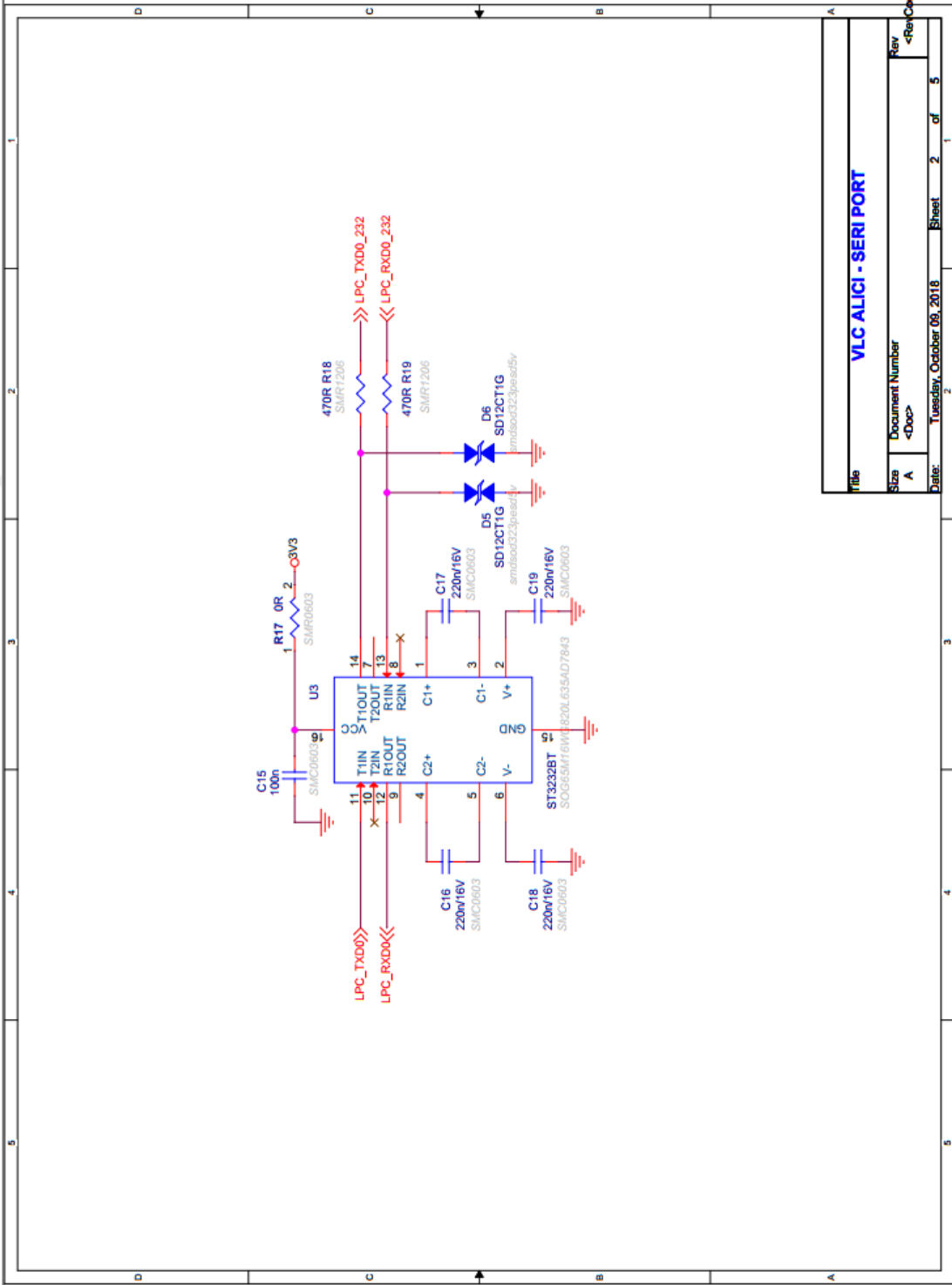
EK 3. Verici Devre Malzeme Listesi.

PARÇA	MİKTAR	REFERANS	DEĞER	KILIF	ÜRETİCİ	ÜRETİCİ KODU	AÇIKLAMA	BİRİM FİYAT	FİYAT
1	1	C1	470u/16V	SMCSMD83X83	PANASONIC	EEE-FP1C471AP	CAP ALUM 470UF 20% 16V SMD	\$0.30	\$0.30
2	3	C2, C3, C31	DNP	SMC0805	--	--	--		
3	1	C4	10u	SMC1206	SAMSUNG	CL131B106K1HNFNE	CAP CER 10UF 35V X7R 1206	\$1.08	\$1.08
4	1	C5	22n	SMC0603	SAMSUNG	CL10B223KB8WPNPC	CAP CER 0.022UF 50V X7R 0603	\$0.10	\$0.10
5	1	C6	220p	SMC0603	SAMSUNG	CL10B221KB8WPNPC	CAP CER 220PF 50V X7R 0603	\$0.10	\$0.10
6	11	C7, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C21, C28	100n	SMC0603	SAMSUNG	CL10B104JB8NNNC	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0603	\$0.10	\$1.10
7	1	C8	10u	SMC0805	SAMSUNG	CL21A106KQCLRNC	CAP CER 10UF 6.3V X5R 0805	\$0.11	\$0.11
8	1	C9	1u	SMC0603	SAMSUNG	CL10B105KJ8NNNC	CAP CER 1UF 10V X7R 0603	\$0.10	\$0.10
9	2	C10, C11	15p	SMC0603	SAMSUNG	CL10C150JB8NNNC	CAP CER 15PF 50V C0G/NPO 0603	\$0.10	\$0.20
10	4	C22, C23, C24, C25	220n/16V	SMC0603	SAMSUNG	CL10B224J08NNNC	CAP CER 0.22UF 16V X7R 0603	\$0.24	\$0.96
11	1	C26	DNP 100n	SMC0603	--	--	--		
12	1	C27	DNP 10u	SMC0805	--	--	--		
13	1	C29	100u	capppol2d250s150034	KOSHIN	--	--		
14	1	C30	1n	SMC0603	SAMSUNG	CL10C102JB81PNC	CAP ALU 100UF 50V RADIAL 8X11.5	\$0.10	\$0.10
15	1	D1	MBRA340T3	smdo214aa21	ON SEMICONDUCTOR	MBRA340T3G	CAP CER 1000PF 50V C0G/NPO 0603	\$0.17	\$0.17
16	1	D4	SD05T	smdsod323sd05t	ON SEMICONDUCTOR	SD05T1G	DIODE SCHOTTKY 40V 3A SMA	\$0.56	\$0.56
17	1	D6	LED-GREEN	LED_0603	LITE-ON	LTST-C191KGGK	TVS DIODE 5V 9.8V SOD323	\$0.49	\$0.49
18	1	D7	LED-RED	LED_0603	LITE-ON	LTST-C191K1RKT	LED GREEN CLEAR SMD	\$0.29	\$0.29
19	2	D8, D9	SD12CT1G	smdsod323psed5v	ON SEMICONDUCTOR	SD12CT1G	TVS DIODE 12V 19V SOD323	\$0.38	\$0.76
20	1	J1	PWR JACK	PWR_JK_NEW	CUJ INC.	PI-002A	CONN PWR JACK 2X5.5MM SOLDER	\$0.74	\$0.74
21	1	J2	CON8	CON8X140RANG	JST	S8B-XH-A(LF)(SN)	CONN HEADER XH SIDE 8POS 2.5MM	\$0.48	\$0.48
22	1	J5	CON2	CON2X140RANG	JST	S2B-XH-A(LF)(SN)	CONN HEADER XH SIDE 2POS 2.5MM	\$0.17	\$0.17
23	1	L1	22u	sm1k22u4a	TDK	S1F12575T-220M4R0-PF	FIXED IND 22UH 4A 26.3 MOHM SMD	\$2.06	\$2.06
24	1	Q2	FJAF4310YTU	SM50T23123	ON SEMICONDUCTOR	FJAF4310YTU	TRANS NPN 140V 10A TO-3PF	\$2.57	\$2.57
25	3	R1, R4, R10	10k	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0710KL	RES SMD 10K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.30
26	1	R2	4k7	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-074K7L	RES SMD 4.7K OHM 1% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
27	1	R3	3k3	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-073K3L	RES SMD 3.3K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
28	6	R6, R7, R14, R15, R24, R25	1k5	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-071K5L	RES SMD 1.5K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.60
29	2	R11, R12	10R	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0710RP	RES SMD 10 OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.20
30	3	R13, R16, R23	OR	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-070RL	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/10W 0603	\$0.10	\$0.30
31	4	R20, R34, R36, R37	OR	SMR1206	YAGEO	RC1206JR-070RL	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/4W 1206	\$0.10	\$0.40
32	2	R21, R22	470R	SMR1206	YAGEO	RC1206JR-07470RL	RES SMD 470 OHM 5% 1/4W 1206	\$0.10	\$0.20
33	1	R26	1k5	SMR1206	YAGEO	RC1206FR-071K5L	RES SMD 1.5K OHM 1% 1/4W 1206	\$0.10	\$0.10
34	5	R27, R29, R31, R33, R35	DNP	SMR1206	--	--	--		
35	2	R28, R32	12R	SMR1206	YAGEO	RC1206JR-0712RL	RES SMD 12 OHM 5% 1/4W 1206	\$0.10	\$0.20
36	1	R30	680R	SMR1206	YAGEO	RC1206JR-07680RL	RES SMD 680 OHM 5% 1/4W 1206	\$0.10	\$0.10
37	1	T1	DLW21HN9005Q2L	dlw21n	MURATA	DLW21HN9005Q2L	CMC 330MA 2LN 90 OHM SMD	\$0.53	\$0.53
38	1	U1	L5973D013TR	sog0508wg2441200ps5430	STMICROELECTRONICS	L5973D013TR	IC REG BUCK ADJ 2.5A 850IC	\$2.80	\$2.80
39	1	U2	MCP1700-3V3	sof23_123	MICROCHIP	MCP1700T-3302E/TT	IC REG LINEAR 3.3V 250MA SOT23-3	\$0.38	\$0.38
40	1	U3	LP1768	QUAD50M100W/G1660	NXP	LPC1768FB100.551	IC MCU 32BIT 512KB FLASH 100LQFP	\$11.25	\$11.25
41	1	U4	ST3232BT	SO6G5M16W/G820U635AD7843	MAXIM	ST3232BT8T	IC DRVR/RCVR RS232 LP 16-TSSOP	\$1.21	\$1.21
42	1	U5	TPD2E001	TPD2E001DRLR	TEXAS INS.	TPD2E001DRLR	TVS DIODE 5.5V SOTS	\$0.61	\$0.61
43	1	U6	MB85RC64PNF	SO6G508WG244L200	ATMEL	MB85RC64PNF-G-JNE1	IC FRAM 64K 12C 400KHZ 8SOP	\$1.64	\$1.64
44	1	Y1	NX32255A-16MHZ	smd_osc_16mhz	NDK AMERICA	NX32255A-16.000MHZ-STD-CSR-1	CRYSTAL 16.0000MHZ 8PF SMD	\$0.75	\$0.75
45	1	Alüminyum 6063 Kutu	--	--	--	--	--	\$4.83	\$4.83
46	1	Kablo Seti	--	--	--	--	--	\$1.00	\$1.00
							Toplam		\$40.33

EK 4. Alıcı Devre Şeması.

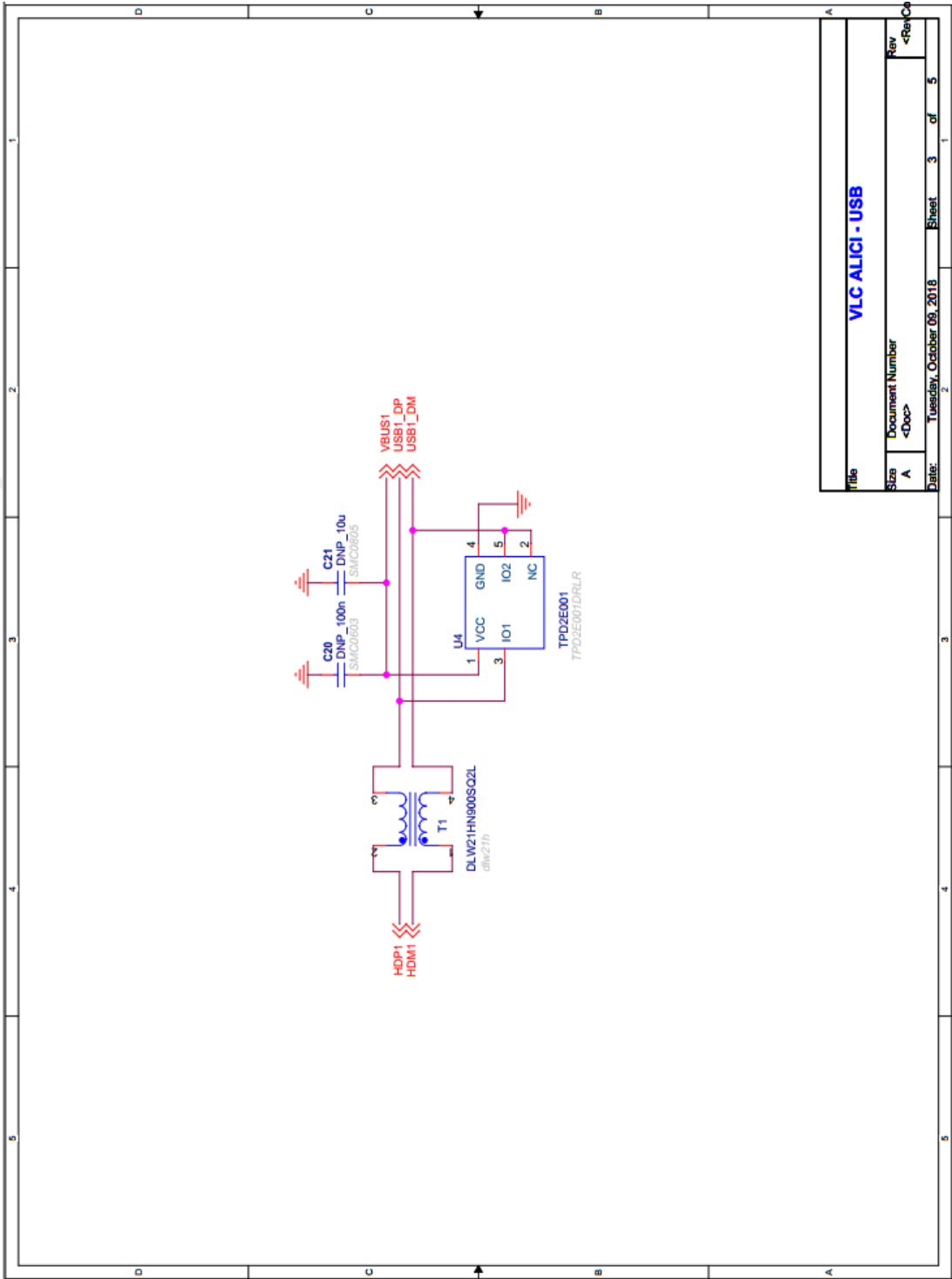


Rev	VLC ALICI - MIKRODENETLEYICI			
Şap	Document Number	Rev	Rev	
Çizim	-000-	01	Rev	
Yazdır	TURKISH_000009_09_2013	01	Rev	

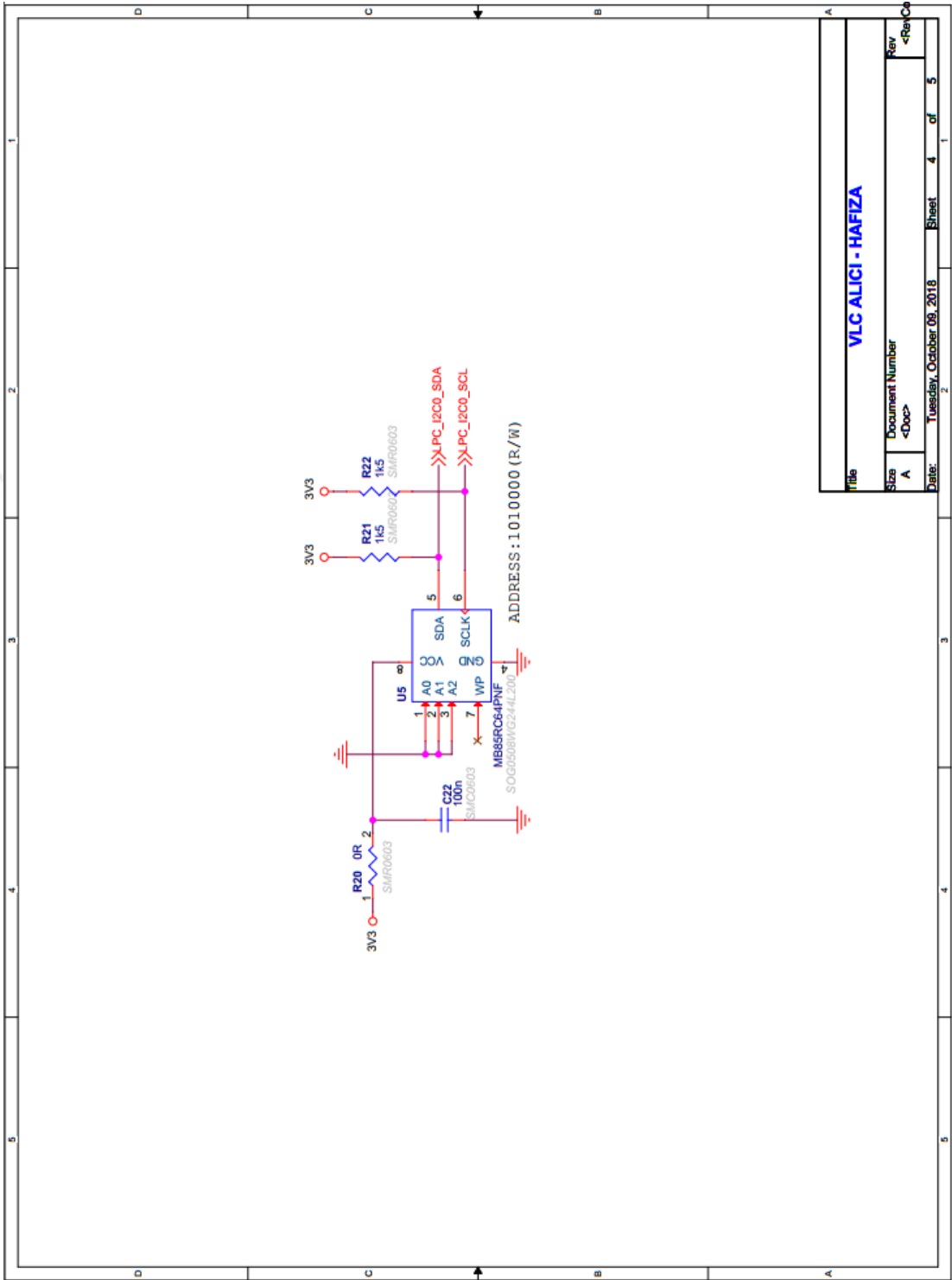


VLC ALICI - SERI PORT

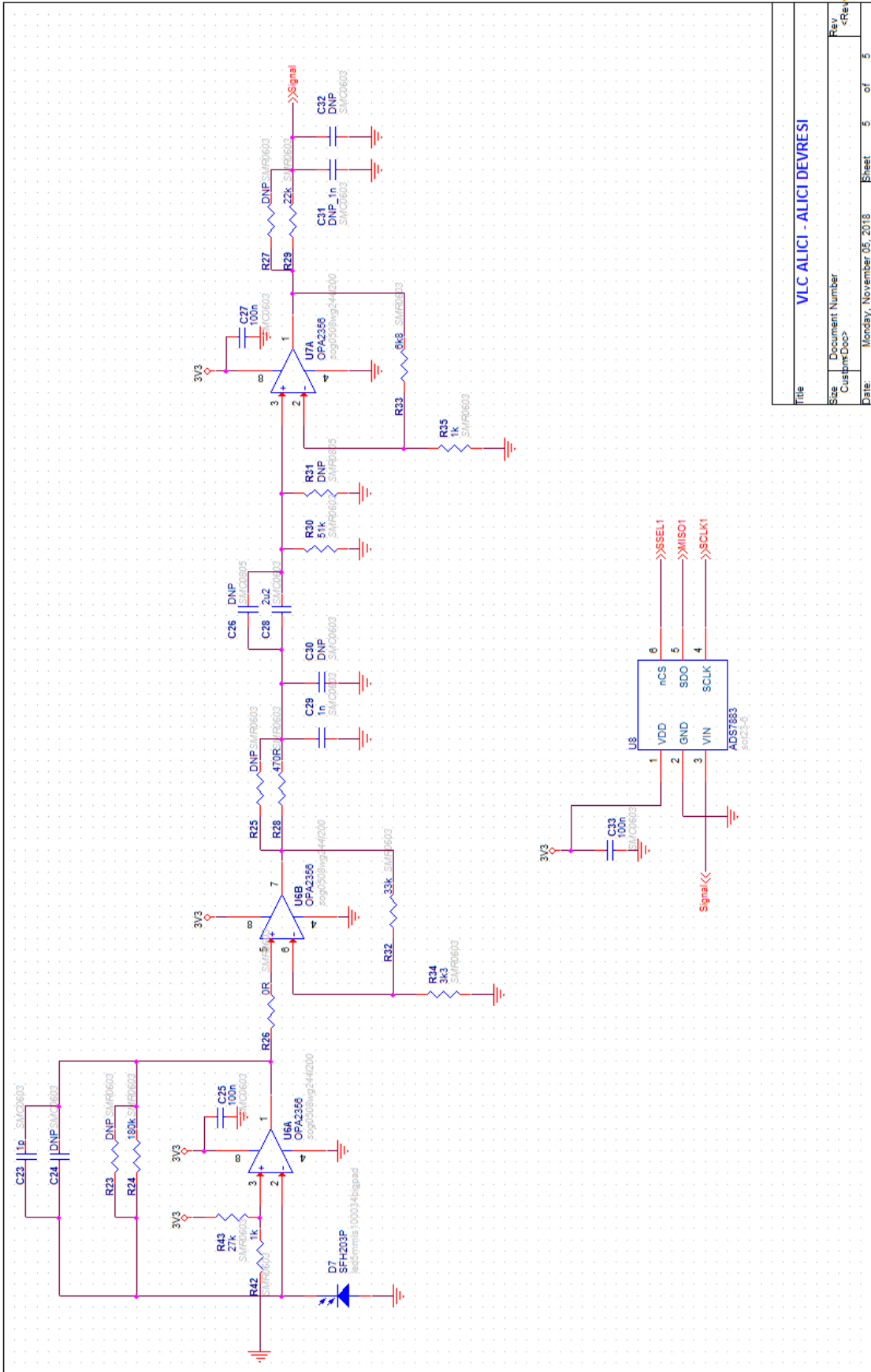
File			
Size	Document Number	Rev	
A	<Doc>	<Rev>	
Date:	Tuesday, October 09, 2018	Sheet	2 of 5



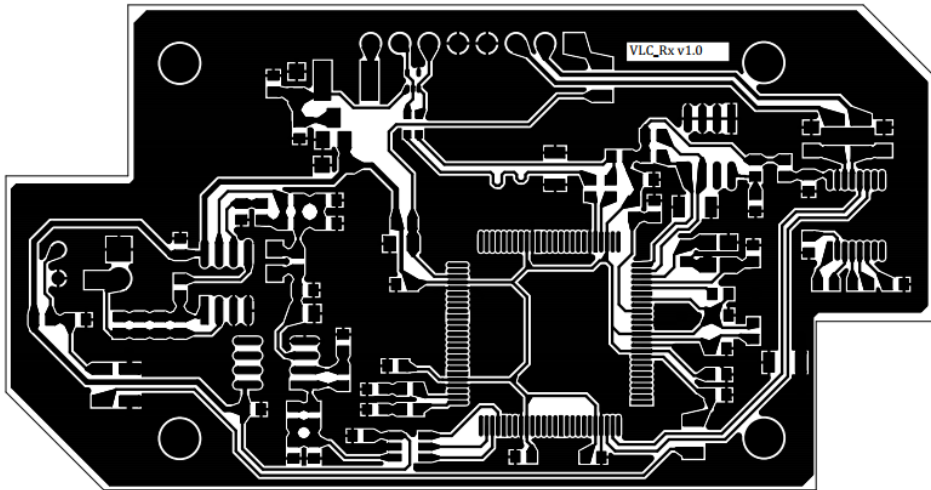
Title	
VLC ALICI - USB	
Size	Document Number
A	<Doc>
Date:	Tuesday, October 09, 2018
Sheet	3 of 5

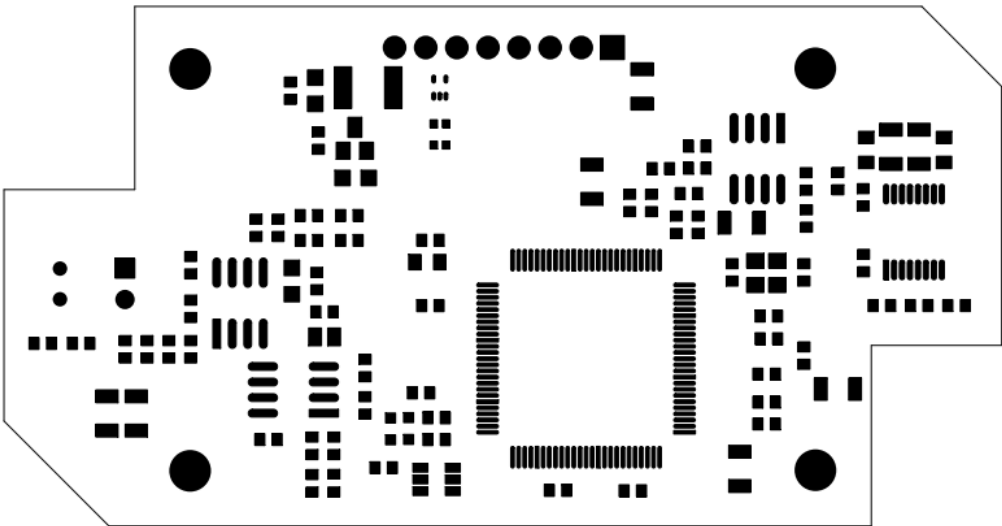
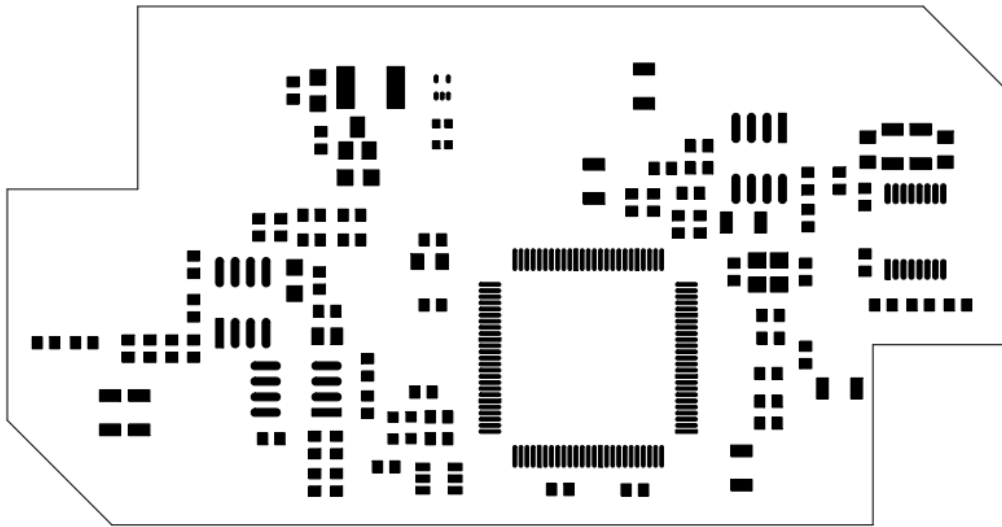


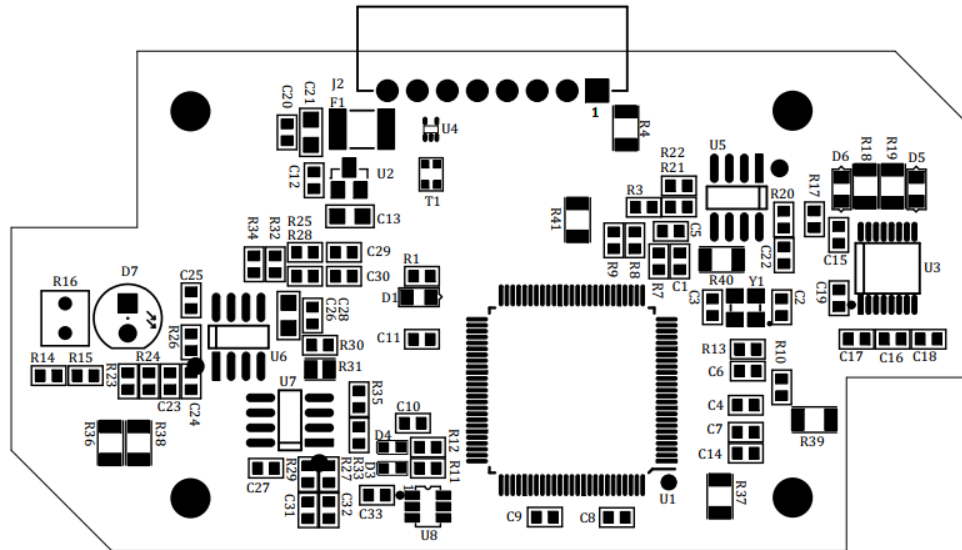
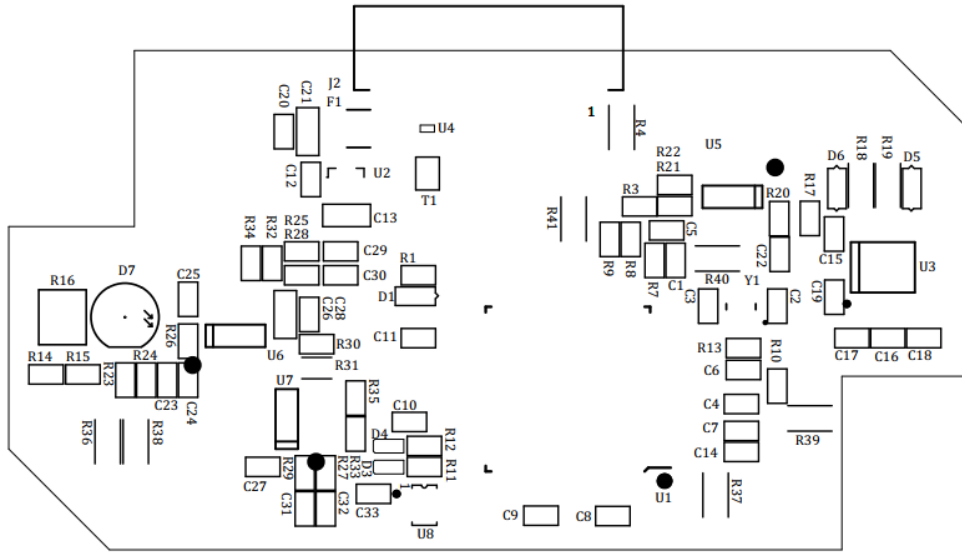
Title		VLC ALICI - HAFIZA	
Size	Document Number	Rev	
A	<Doc>		
Date:	Tuesday, October 09, 2018	Sheet	4 of 5

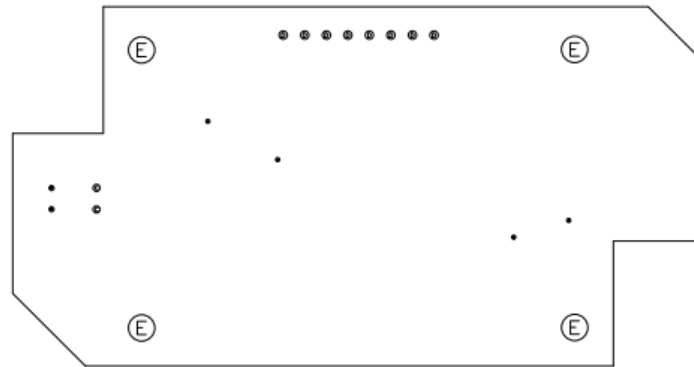


Title		VLC ALICI - ALICI DEVRESI	
Size	Document Number	Sheet	5 of 5
C:\aspm\000-		Date:	Monday, November 05, 2018
Rev	Rev		

EK 5. Alıcı Baskılı Devre.







DRILL CHART: TOP to BOTTOM			
ALL UNITS ARE IN MILS			
FIGURE	SIZE	PLATED	QTY
•	20.0	PLATED	4
•	23.622	PLATED	2
•	34.0	PLATED	2
•	40.0	PLATED	8
ⓔ	123.0	NON-PLATED	4

EK 6. Alıcı Devre Malzeme Listesi.

PARÇA	MİKTAR	REFERANS	DEĞER	KIUF	ÜRETİCİ	ÜRETİCİ KODU	AÇIKLAMA	BİRİM FİYAT	FİYAT
1	1 C1		1u	SMC0603	SAMSUNG	CL10B105K8P8NNNC	CAP CER 1UF 10V X7R 0603	\$0.10	\$0.10
2	2 C2,C3		15p	SMC0603	SAMSUNG	CL10C150B8NNNC	CAP CER 15PF 50V COG/NP0 0603	\$0.10	\$0.20
3	14 C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10,C11,C12,C13		100n	SMC0603	SAMSUNG	CL10B104B8NNNC	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0603	\$0.10	\$1.40
4	1 C13		10u	SMC0805	SAMSUNG	CL21A106K0CLRNC	CAP CER 10UF 6.3V X5R 0805	\$0.11	\$0.11
5	4 C14,C24,C30,C32		DNP	SMC0603			--		
6	4 C16,C17,C18,C19		220n/16v	SMC0603	SAMSUNG	CL10B224J08NNNC	CAP CER 0.22UF 16V X7R 0603	\$0.24	\$0.96
7	1 C20		DNP_100n	SMC0603	--		--		
8	1 C21		DNP_10u	SMC0805	--		--		
9	1 C23		1p	SMC0603	SAMSUNG	CL10C100C88NNNC	CAP CER 1PF 50V COG/NP0 0603	\$0.10	\$0.10
10	1 C26		DNP	SMC0805	--		--		
11	1 C28		2u2	SMC0603	SAMSUNG	CL10A225MQ8NNNC	CAP CER 2.2UF 6.3V X5R 0603	\$0.13	\$0.13
12	1 C29		1n	SMC0603	SAMSUNG	CL10C102B81PNC	CAP CER 1000PF 50V COG/NP0 0603	\$0.17	\$0.17
13	1 C31		DNP_1n	SMC0603	--		--		
14	1 D1		SD05T	smdsod323sd05t	ON SEMICONDUCTOR	SD05T1G	TVS DIODE 5V 9.8V SOD323	\$0.49	\$0.49
15	1 D3		LED-GREEN	LED_0603	LITE-ON	LTST-C191K9KT	LED GREEN CLEAR SMD	\$0.29	\$0.29
16	1 D4		LED-RED	LED_0603	LITE-ON	LTST-C191KRKT	LED RED CLEAR SMD	\$0.29	\$0.29
17	2 D5,D6		SD12CT1G	smdsod323psds5v	ON SEMICONDUCTOR	SD12CT1G	TVS DIODE 12V 19V SOD323	\$0.38	\$0.76
18	1 D7		SFH203P	led5mm1s100094bigpad	OSRAM	SFH203P	PHOTODIODE RADIAL 400NM~1100NM	\$1.02	\$1.02
19	1 F1		OZCG0020AF2C	SMF1812	BEL FUSE	OZCG0020AF2C	PTC RESET FUSE 60V 200MA 1812	\$0.14	\$0.14
20	1 J2		CON8X140RANG	CON8X140RANG	JST	S8B-XH-A(LF)(SN)	CONN HEADER XH SIDE 8POS 2.5MM	\$0.48	\$0.48
21	4 R1,R7,R14,R15		10k	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0710KL	RES SMD 10K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.40
22	5 R3,R11,R12,R21,R22		1k5	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-071K5L	RES SMD 1.5K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.50
23	1 R4		1k5	SMR1206	YAGEO	RC1206FR-071K5L	RES SMD 1.5K OHM 1% 1/4W 1206	\$0.10	\$0.10
24	2 R8,R9		10R	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0710RL	RES SMD 10 OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.20
25	5 R10,R13,R17,R20,R26		0R	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0700RL	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/10W 0603	\$0.10	\$0.50
26	1 R16		SEN-8001	LDR_S1MALL	C.B.ELECTRONICS	SEN-8001	LDR -1k	\$0.35	\$0.35
27	2 R18,R19		470R	SMR1206	YAGEO	RC1206JR-07470RL	RES SMD 470 OHM 5% 1/4W 1206	\$0.10	\$0.20
28	3 R23,R25,R27		DNP	SMR0603	--		--		
29	1 R24		180K	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-07180KL	RES SMD 180K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
30	1 R28		470R	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-07470RP	RES SMD 470 OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
31	1 R29		22k	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0722KL	RES SMD 22K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
32	1 R30		51k	SMR0603	YAGEO	RC0603FR-0751KL	RES SMD 51K OHM 1% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
33	1 R31		DNP	SMR0805	--		--		
34	1 R32		33k	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-0733KL	RES SMD 33K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
35	1 R33		6k8	SMR0603	YAGEO	RC0603FR-076K8L	RES SMD 6.8K OHM 1% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
36	1 R34		3k3	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-073K3L	RES SMD 3.3K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
37	2 R35,R42		1k	SMR0603	YAGEO	RC0603JR-071KL	RES SMD 1K OHM 5% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.20
38	6 R36,R37,R38,R39,R40,R41		0R	SMR1206	YAGEO	RC1206JR-0700RL	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/4W 1206	\$0.10	\$0.60
39	1 R43		27k	SMR0603	YAGEO	RC0603FR-0727KL	RES SMD 27K OHM 1% 1/10W 0603	\$0.10	\$0.10
40	1 T1		DLW21HN9005Q2L	dlw21h	MURATA	DLW21HN9005Q2L	CMC 330MA 21N 90 OHM SMD	\$0.53	\$0.53
41	1 U1		LPC1768	QUAD50M100WG1660	NXP	LPC1768FBD100_551	IC MCU 32BIT 512KB FLASH 100IQFP	\$11.25	\$11.25
42	1 U2		MCP1700-3V3	soa23_123	MICROCHIP	MCP1700T-3302E/TT	IC REG LINEAR 3.3V 250MA SOT23-3	\$0.38	\$0.38
43	1 U3		ST3232BT	SOG65M16WG8201635AD7843	MAXIM	ST3232BTR	IC DRVVR/RCVR RS232 LP 16-TSSOP	\$1.21	\$1.21
44	1 U4		TPD2E001	TPD2E001DRUR	TEXAS INS.	TPD2E001DRUR	TVS DIODE 5.5V SOT5	\$0.61	\$0.61
45	1 U5		MB85RCG4PNF	SOG0508WG244L200	ATMEL	MB85RCG4PNF-G-INE1	IC FRAM 64K 12C 400KHZ 85OP	\$1.64	\$1.64
46	2 U6,U7		OPA2356	sog0508wg244l200	TEXAS INS.	OPA2356ADR	IC OPAMP VFB 2000MHZ RRO 85OIC	\$2.76	\$5.52
47	1 U8		AD57883	soa23-6	TEXAS INS.	AD57883DBVT	IC ADC 12BIT 3MSPS SOT23-6	\$5.11	\$5.11
48	1 Y1		NX32255A-16MHz	smd_osc_16mhz	NDK AMERICA	NX32255A-16.000MHZ-STD-CSR-1	CRYSTAL 16.000MHZ 8PF SMD	\$0.75	\$0.75
49	31 gr.	ABS kutu					31g ABS kutu 3B yazıcı maliyeti	\$0.38	\$11.78
50	1	Kablo seti					--	\$1.00	\$1.00
51	1	Mercek					40x 25mm	\$4.21	4.21
Toplam									\$54.48

EK 7. Verici Programı.

```

#include "stdio.h"
#include "LPC17xx.H"
#include "Serial.h"
#include "dac.h"
#include "define.h"
#include "arm_math.h"
#include "gonder.h"
#include "qpsk4.h"
#include "zeroVector.h"
#include "acofdm.h"
#include "pulseShaping.h"

/*-----
Global Değişkenler
-----*/
extern unsigned short sure_olcer;
float32_t input_IFFT_reduced_cp[fft_subch+cp];
unsigned short sending_byte_counter;
char data_array[character_count];
double ylg[(Tup*(fft_subch+cp)) + time_interval-1];
double num2[time_interval];
double katsayi025, katsayi050;

struct complex {
    float Re;
    float Im;
}qpsk_sym[4],qpsk_sym_array[symbol_count],zero_first[symbol_count*2]={0},zero_second[symbol_count*2]={0},temp[symbol_count*2]={0},zero_data[symbol_count*4]={0};

/*-----
Fonksiyonlar
-----*/
extern void GPIO_init (void);
extern void ADC_init (void);
extern int PinState(int pinNumber);
extern void wait(int time);
extern void chartobinary(char a);

/*-----
"Main" Ana Program
-----*/
int main (void) {

    int i,v;
    int output_symbol[symbol_count];
    float32_t sva[Tup*(fft_subch+cp)];

    int count_time_interval = (time_interval-1)/2;           // döngü içerisinde tekrar
    tekrar hesaplanmaması için
    int count_time_interval_m1 = count_time_interval - 1;
    int count_time_interval_p1 = count_time_interval + 1;
    int count_time_interval_p2 = count_time_interval + 2;
    int count_time_interval_m2 = count_time_interval - 2;

    SystemInit();           // System Initialization
    GPIO_init();           // GPIO Initialization
    SER_init(0);           // UART#0 Initialization
    ADC_init();           // ADC Initialization
    DACInit();           // DAC Initialization

    LPC_PINCON->PINSEL1 |= 0x02 << 20;

```

```

printf("Welcome OzH's World :)\n\n");
LPC_GPIO2->FIOSET |=led1;

pulseShaping(); // Pulse Shaping verilerinin oluşturulması. Çıktısı
num2

while(1){
SER_getChar(0);

if(sending_byte_counter==character_count)
{
    qpsk4(data_array); // 4-QPSK Modülasyonu Sembol Oluşturma Fonksiyonu.
Çıktısı: qpsk_sym_array

    zeroVector(); // Zero vector oluşturma, flipupdown ve conjugate a
lma fonksiyonu. Çıktısı: zero_data

    acofdm(); // ACOFDM algoritması ve Cyclic Prefix ekleme. Çıktı
ısı: input_IFFT_reduced_cp

    // reduced convolution algorithm
    for(i=0;i<=(fft_subch+cp)-1;i++)
    {
        ylg[(Tup*i)+count_time_interval]=input_IFFT_reduced_cp[i] * num2[count_time
_interval];
    }
    for(i=0;i<=(fft_subch+cp)-1;i++)
    {
        if(input_IFFT_reduced_cp[i]!=0)
        {
            katsayi025 = input_IFFT_reduced_cp[i] * num2[count_time_interval_m2];

            ylg[(Tup*i)+ count_time_interval_m2] += katsayi025;
            ylg[(Tup*i)+ count_time_interval_p2] += katsayi025;
        }
    }
    for(i=0;i<=(fft_subch+cp)-1;i++)
    {
        if(input_IFFT_reduced_cp[i]!=0)
        {
            katsayi050 = input_IFFT_reduced_cp[i] * num2[count_time_interval_m1];

            ylg[(Tup*i)+ count_time_interval_m1] += katsayi050;
            ylg[(Tup*i)+ count_time_interval_p1] += katsayi050;
        }
    }

    gonder(ylg);

    memset(ylg, 0, sizeof(ylg)); // clear content of ylg
    katsayi025=0;
    katsayi050=0;
}
}
}

```

Vericide OFDM Algoritması:

```

#include "lpc17xx.h"
#include "define.h"
#include "Serial.h"
#include "arm_math.h"

extern float32_t input_IFFT_reduced_cp[fft_subch*cp];
extern struct complex {
    float Re;
    float Im;
}zero_data[symbol_count*4];

float32_t input_IFFT[fft_subch*2]; // hem real hem de imaginary kısımları aynı array i
çinde olduğu için 2 kat yer gerekiyor
float32_t input_IFFT_reduced[fft_subch];
float32_t output_FFT[fft_subch*2];
uint32_t fftSize = fft_subch;
uint32_t doBitReverse = 1;
uint32_t refIndex = 213, testIndex = 0;
arm_status status;
arm_cfft_radix4_instance_f32 S;
float32_t maxValue;

void acofdm() {
    int i;
    int normal;
    int count_cp=fft_subch-cp; // döngü içerisinde tekrar tekrar hesaplanmaması için

    //IFFT input array preparation input_IFFT={real(1),imaginary(1),real(2),imaginar
y(2),...}
    for(i=0;i<=fft_subch-1;i++)
    {
        input_IFFT[2*i]=zero_data[i].Re;
        input_IFFT[(2*i)+1]=zero_data[i].Im;
    }

    //IFFT Function
    status = ARM_MATH_SUCCESS;
    /* Initialize the CFFT/CIFFT module */
    status = arm_cfft_radix4_init_f32(&S, fftSize,1, doBitReverse);
    /* Process the data through the CFFT/CIFFT module */
    arm_cfft_radix4_f32(&S, input_IFFT);

    normal = sqrt(fftSize);
    for(i=0;i<=fft_subch-1;i++)
    {
        if(input_IFFT[2*i]>0)
        {
            input_IFFT_reduced[i]=input_IFFT[2*i]*normal; //normalization with
reduced_IFFT form
        }
        else
        {
            input_IFFT_reduced[i]=0; //Reduced form of IFF
T signal positive values (includes only positive real values)
        }
    }

    //Cyclic Prefix addition
    for(i=0;i<=cp-1;i++)
    {
        input_IFFT_reduced_cp[i]=input_IFFT_reduced[count_cp+i];
    }

    for(i=0;i<=fft_subch-1;i++)
    {
        input_IFFT_reduced_cp[cp+i]=input_IFFT_reduced[i];
    }
    return;}

```

EK 8. Alıcı Programı.

```

#include "stdio.h"
#include "LPC17xx.H"
#include "Serial.h"
#include "dac.h"
#include "define.h"
#include "arm_math.h"

extern unsigned short gecikme;
extern unsigned short sure_olcer;
double num2[time_interval];
float32_t output_FFT[fft_subch*2];
int output_bit[character_count*8];
/*-----
   Fonksiyonlar
   -----*/
extern void GPIO_init (void);
extern void ADC_init (void);
extern unsigned short ADC_get ();
extern int PinState(int pinNumber);
extern void wait(int time);
extern void wait2(int time2);
extern void wait0();
extern void chartobinary(char a);
extern void acofdm_receiver(unsigned short *array, double *d);
extern void qpsk4_demod();
/*-----
   "Main" Ana Program
   -----*/
int main (void) {

    int i,v,k,skip=0,err_count1=0,err_count2=0;
    unsigned short corr[2]=0;
    unsigned short a0_adc_value_short, a0_adc_value_short_sum;

    unsigned short adc_value,adc_array[sample_count],adc_array_exact[(Tup*(fft_subch+cp
)) + time_interval-1],adc_synch1[3];
    int received_data=0;
    char data_read;
    uint16_t spi_adc_value[1];

    SystemInit();                // System Initialization
    GPIO_init();                 // GPIO Initialization
    SER_init(0);                 // UART#0 Initialization
    ADC_init();                  // ADC Initialization
    SSP1Init();
    printf("Welcome OzH's Receiver World :)\n\n");
    LPC_GPIO2->FIOCLR |= led1;
    LPC_GPIO2->FIOCLR |= led2;

    pulseShaping();              // pulse shaping oluşturma fonksiyonu. Çıktısı num2

    SSP_SSELToggle(1,1);         // ilk okunan değeri geçerli saymamak için
    wait2(5);
    SSP_SSELToggle(1,0);
    SSP_SSELToggle(1,1);

    gecikme=0;

    while(1){

        LPC_GPIO2->FIOSET |= led2;
        SSP_SSELToggle(1,0);

```

```

SSPReceive(1, spi_adc_value,1);
SSP_SSELToggle(1,1);
spi_adc_value[0]= (spi_adc_value[0] & 0x3FFC) >> 2 ;

if(PinState(input) == 0)
{
    a0_adc_value_short_sum=0;
    wait2(100);
    if(PinState(input) == 1 )
    {
        for(i=0;i<=19;i++)
        {
            a0_adc_value_short=ADC_get();
            a0_adc_value_short_sum=a0_adc_value_short_sum + a0_adc_value_short;
            wait2(10);
        }
        a0_adc_value_short=a0_adc_value_short_sum/20;
        printf("\n ortam değeri: %.3f",a0_adc_value_short*(adc_voltage/4096));
    }
}
if((spi_adc_value[0]*adc_voltage)/4096 >= 1.5 && (spi_adc_value[0]*adc_voltage)/409
6 <adc_voltage)
{
    for(i=0;i<=2;i++)
    {
        SSP_SSELToggle(1,0);
        SSPReceive(1, spi_adc_value,1);
        SSP_SSELToggle(1,1);
        adc_synch1[i]= (spi_adc_value[0] & 0x3FFC) >> 2 ;
        LPC_GPIO2->FIOCLR |= led2;
        wait2(135);
    }
    if(((adc_synch1[0]*adc_voltage)/4096 > 0.4 &&
(adc_synch1[1]*adc_voltage)/4096 < 3.0 &&
(adc_synch1[2]*adc_voltage)/4096 < 0.6))
    {
        LPC_GPIO2->FIOSET |= led1;
        err_count1++;

        STRELOAD = RELOAD_VALUE;
        STCTRL = (1<<SBIT_ENABLE) | (1<<SBIT_TICKINT) | (1<<SBIT_CLKSOURCE);
        while(gecikme!=1);
        gecikme=0;

        for(i=0;i<=sample_count-1;i++)
        {
            SSP_SSELToggle(1,0);
            SSPReceive(1, spi_adc_value,1);
            SSP_SSELToggle(1,1);
            adc_array[i]= (spi_adc_value[0] & 0x3FFC) >> 2 ;
            while(gecikme!=1);
            gecikme=0;
        }
        STCTRL ^= (1<<SBIT_ENABLE);
        LPC_GPIO2->FIOCLR |= led1;

        for(i=0;i<=start_arama-1;i++) // start sinyalinini arıyoruz
        {
            if( adc_array[i+1] < 200 &&
            adc_array[i+2] < 200 &&
            adc_array[i+3] < 200 &&
            adc_array[i+5] > 248 && adc_array[i+5] < 3000 &&
            adc_array[i+6] > adc_array[i+5] &&
            adc_array[i+8] > 620 &&

```

```

        adc_array[i+9] > 620 &&
        adc_array[i+24] < 248 )
    {
        for(v=0;v<=(Tup*(fft_subch+cp)) + time_interval-2;v++)
        {
            adc_array_exact[v]=adc_array[(i+calibrate)+(v)];
        }
        received_data=1;
        err_count2++;
        break;
    }
    else
    {
        received_data=0;
    }
}
if(received_data==0)
{
    //clearing the contents of array
    memset(adc_array_exact, 0, sizeof(adc_array_exact));
    memset(adc_array, 0, sizeof(adc_array));
}
else if(received_data==1){
    acofdm_receiver(adc_array_exact,num2); // tersine ofdm işl
emleri algoritması. Çıktısı: output_FFT
    qpsk4_demod(); // 4-QPSK demodülat
ör fonksiyonu. Çıktısı: output_bit
    for(i=0;i<=character_count-1;i++)
    {
        for(v=0;v<=7;v++)
        {
            if(output_bit[v+8*i]==0) // 1byte=8bit formülünden geliyor
            {
                data_read=data_read << 1;
            }
            if(output_bit[v+8*i]==1) // 1byte=8bit formülünden geliyor
            {
                data_read=data_read << 1 | 1;
            }
        }
        printf("%c",data_read);
    }
    //clearing the contents of array
    memset(adc_array_exact, 0, sizeof(adc_array_exact));
    memset(adc_array, 0, sizeof(adc_array));
    memset(adc_synch1, 0, sizeof(adc_synch1));
}
received_data=0;
} }
memset(adc_synch1, 0, sizeof(adc_synch1));
}
}
}

```

Alicda OFDM Algoritması:

```

#include "stdio.h"
#include "LPC17xx.H"
#include "Serial.h"
#include "define.h"
#include "arm_math.h"

extern float32_t output_FFT[fft_subch*2];
extern unsigned short sure_olcer;
double katsayi025,katsayi050;
uint32_t fftSize = fft_subch;
uint32_t doBitReverse = 1;
uint32_t refIndex = 213, testIndex = 0;
arm_status status;
arm_cfft_radix4_instance_f32 S;
float32_t maxValue;

void acofdm_receiver(unsigned short *adc_array_exact_ptr, double *num2_ptr){
    int i,v;
    double yFilt[(Tup*(fft_subch+cp)) + time_interval-1 + time_interval-1];
    double rofdm_A[fft_subch+cp];
    int count_time_interval = (time_interval-1)/2;
    int count_time_interval_m1 = count_time_interval - 1;
    int count_time_interval_p1 = count_time_interval + 1;
    int count_time_interval_p2 = count_time_interval + 2;
    int count_time_interval_m2 = count_time_interval - 2;
    double voltage_convert = adc_voltage/4096;
    float normal = 1/sqrt(fftSize);

    memset(yFilt, 0, sizeof(yFilt)); // clear content of yFilt
    memset(output_FFT, 0, sizeof(output_FFT)); //clear the content
    // reduced convolution algorithm
    for(i=0;i<=(Tup*(fft_subch+cp)) + time_interval-2;i++)
    {
        yFilt[i+count_time_interval]=adc_array_exact_ptr[i] * num2_ptr[count_time_i
nterval];
    }
    for(i=0;i<=(Tup*(fft_subch+cp)) + time_interval-2;i++)
    {
        katsayi025 = adc_array_exact_ptr[i] * num2_ptr[count_time_interval_m2];

        yFilt[i + count_time_interval_m2] += katsayi025;
        yFilt[i + count_time_interval_p2] += katsayi025;
    }
    for(i=0;i<=(Tup*(fft_subch+cp)) + time_interval-2;i++)
    {
        katsayi050 = adc_array_exact_ptr[i] * num2_ptr[count_time_interval_m1];

        yFilt[i+ count_time_interval_m1] += katsayi050;
        yFilt[i+ count_time_interval_p1] += katsayi050;
    }
    for(i=0;i<=fft_subch-1;i++)
    {
        output_FFT[2*i]=yFilt[time_interval-1 + (i+cp)*Tup] * voltage_convert;
    }
    status = ARM_MATH_SUCCESS;
    /* Initialize the CFFT/CIFFT module */
    status = arm_cfft_radix4_init_f32(&S, fftSize,0, doBitReverse);
    /* Process the data through the CFFT/CIFFT module */
    arm_cfft_radix4_f32(&S, output_FFT);
    for(i=0;i<=fft_subch*2-1;i++)
    {
        output_FFT[i]-output_FFT[i]*normal; //normalization
    }
}

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	ÖZHAN ARIOĞLU
Doğum Yeri	BAKIRKÖY - İSTANBUL
Doğum Tarihi	06.11.1986
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	05056506489
E-Posta Adresi	ozhanarioglu@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
Fakülte	MÜHENDİSLİK – MİMARLIK FAKÜLTESİ
Bölümü	ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	